

Е.Ю. Логинова

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛОКОМОТИВОВ

*Допущено
Федеральным агентством железнодорожного транспорта
в качестве учебника для студентов вузов
железнодорожного транспорта*

Москва
2014

УДК 629.4.02
ББК 39.22-04
Л69

Рецензенты: ведущий инженер ПКБ ЦТ — филиала ОАО «РЖД», канд. техн. наук *С.О. Никителый*; доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ МИИТ *Е.П. Капустина*

Логинова Е.Ю.

Л69 Электрическое оборудование локомотивов: учебник. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. — 576 с.

ISBN 978-5-89035-718-2

Рассмотрены назначение и виды основного энергетического и вспомогательного электрооборудования локомотивов. Особое внимание уделено электрическому оборудованию тепловозов; изложены базовые сведения по электрооборудованию электровозов.

Представлены устройства систем защиты энергетического оборудования, специальных блоков систем автоматики и аппаратов локомотивов. Рассмотрены основные цепи управления тепловозом в тяговом и тормозном режимах. Изложены методы расчета режимов работы и характеристик основных систем и аппаратов.

Предназначен для студентов вузов железнодорожного транспорта, обучающихся по специальности 190300 «Подвижной состав железных дорог», а также может быть полезен инженерно-техническим работникам.

УДК 629.4.02
ББК 39.22-04

ISBN 978-5-89035-718-2

© Логинова Е.Ю., 2014

© ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014

От автора

За последнее десятилетие в сфере локомотивостроения произошли серьезные изменения. В особенности эти изменения коснулись электрооборудования, так как получили распространение системы преобразования энергии с использованием силовых полупроводниковых приборов. С началом промышленного производства силовых управляемых тиристоров и транзисторов стало возможным применять в тяговом приводе локомотивов асинхронные тяговые двигатели.

В то же время основной парк локомотивов, находящихся в эксплуатации, составляют тепловозы и электровозы прошлого поколения. Длительный срок эксплуатации этих локомотивов и большие объемы выпускаемых серий позволили в конечном итоге получить надежные и экономичные машины, вполне удовлетворяющие условиям поездной работы. При ремонте выполняется модернизация систем и агрегатов локомотивов, что позволяет им эксплуатироваться еще длительное время. Поэтому при изложении материала учебника в качестве базовых локомотивов были приняты наиболее распространенные тепловозы с электрической передачей переменного-постоянного тока (серий 2ТЭ116, ТЭП70 и ТЭМ7) и электровозы постоянного и переменного тока ВЛ10 и ВЛ80С. Электрооборудование тепловозов с электрической передачей постоянного тока не рассматривалось, так как, во-первых, такие тепловозы не выпускаются уже около 40 лет (хотя еще и находятся в эксплуатации), а во-вторых, в свободном доступе имеется большое количество учебной и специальной литературы по данной теме.

В связи с объединением специальностей «Локомотивы» и «Электрический транспорт железных дорог» в одно направление «Подвижной состав железных дорог» в данном издании была сделана попытка рассмотреть электрооборудование тепловозов и электровозов в рамках одного учебника, несмотря на определенные сложности,

связанные с большим объемом и разноплановостью обобщаемого материала.

Автор выражает большую благодарность В.В. Литовченко за неоценимую помощь в подготовке материала, посвященного электрооборудованию электровозов и вопросам управления асинхронными тяговыми двигателями в энергетических цепях локомотивов.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Общие сведения теории электропривода

1.1.1. Классификация электроприводов

В общем случае *электрическим приводом* (ЭП) называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение каких-либо механизмов или агрегатов (рис. 1.1) [1].

Основным элементом всякого ЭП является электродвигатель 1, который создает на валу механический момент. От электродвигателя через передаточное устройство 2, в качестве которого выступает, как правило, редуктор, момент передается на приводной агрегат 3 (например, вентилятор или насос). Назначение передаточного устройства — согласование кинематических характеристик электродвигателя и приводного агрегата, так как электрические машины преимущественно высокооборотные.

Для управления ЭП между электродвигателем и источником энергии 4 может устанавливаться силовой преобразователь 5. Управление преобразователем осуществляется от маломощного регулятора 6 с помощью сигнала управления U_y , который формируется из задающего сигнала U_3 и ряда дополнительных сигналов ΔU , доставляющих в регулятор информацию о значении регулируемой величины приводного агрегата (например, частоты вращения), и возмущений, действующих на приводной агрегат. Регулятор и преобразователь образуют систему управления электропривода (СУ).

В ЭП локомотивов используются:

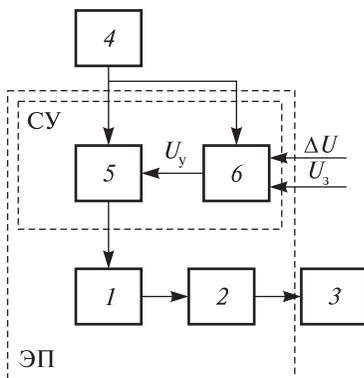


Рис. 1.1. Блок-схема электропривода

- электродвигатели: постоянного тока (последовательного, параллельного, независимого и смешанного возбуждения), асинхронные, вентильные;
- механические передаточные устройства: редукторы, гидромуфты, ременные передачи;
- блоки управления: регуляторы, усилители, логические элементы, микропроцессоры.

Электродвигатели постоянного тока являются основным видом регулируемого электропривода. Электротехническая промышленность для ЭП выпускает двигатели постоянного тока основной общепромышленной серии 2П (2 — номер разработки, П — постоянного тока) в диапазоне мощностей от 0,13 до 200 кВт в различных конструктивных исполнениях и различными способами вентиляции и серии 4П с улучшенными по сравнению с двигателями серии 2П удельными показателями, получаемыми за счет повышенной частоты вращения якоря.

Электропривод с трехфазным асинхронным двигателем является самым массовым за счет простоты изготовления и эксплуатации самого электродвигателя, его надежности в работе, а также за счет меньших по сравнению с двигателями постоянного тока массой, габаритами и стоимостью. Общепромышленную серию составляют асинхронные двигатели серии 4А мощностью от 0,06 до 400 кВт в самых различных модификациях и конструктивных исполнениях: с повышенным пусковым моментом и скольжением; с фазным ротором; встраиваемые и т.д. Основной областью применения асинхронных электродвигателей до недавнего времени являлся нерегулируемый ЭП. В последние годы в связи с серийным выпуском тиристорных преобразователей частоты и напряжения стали создаваться регулируемые асинхронные ЭП.

Классификация ЭП осуществляется:

- по кинематическим характеристикам движения — вращательного или поступательного; при этом скорость приводного агрегата может быть регулируемой и нерегулируемой, а само движение — непрерывным или дискретным;
- по количеству используемых двигателей различают групповой, когда один двигатель приводит в движение несколько приводных агрегатов, и индивидуальный, обеспечивающий движение одного приводного агрегата;

– по виду силового преобразователя: управляемые и неуправляемые выпрямители, преобразующие переменное напряжение в постоянное напряжение; инверторы, преобразующие постоянное напряжение в переменное напряжение (регулируемой и нерегулируемой частоты); импульсные преобразователи напряжения.

Величины, характеризующие преобразуемую энергию, — напряжение, ток, момент (силу), скорость — называют *координатами электропривода*. Основная функция ЭП состоит в управлении координатами, т.е. в их принудительном изменении в соответствии с требованиями работы приводного агрегата. Управление электроприводом должно осуществляться в пределах, разрешенных конструкцией элементов, чем обеспечивается надежность работы системы. Эти допустимые пределы обычно связаны с номинальными режимами работы, обеспечивающими оптимальное использование электропривода.

1.1.2. Механика электропривода

Все движущиеся части ЭП (ротор или якорь электродвигателя, элементы передаточного устройства и приводного агрегата) образуют *кинематическую схему* ЭП. Обычно между двигателем и приводным агрегатом (нагрузкой) находится какая-либо механическая передача, т.е. имеется несколько различных валов со своими моментами и скоростями.

Рассмотрим подробнее энергетическую систему ЭП (рис. 1.2, а). Будем полагать, что мощность, развиваемая двигателем $P_{дв}$, передается через редуктор к нагрузке $P_{нагр}$. Очевидно, что передача и преобразование мощности сопровождается некоторыми ее потерями ΔP в каждом элементе системы.

Для сведения любой реальной системы к простейшей модели, нужно заменить ее эквивалентной системой ЭП, та-

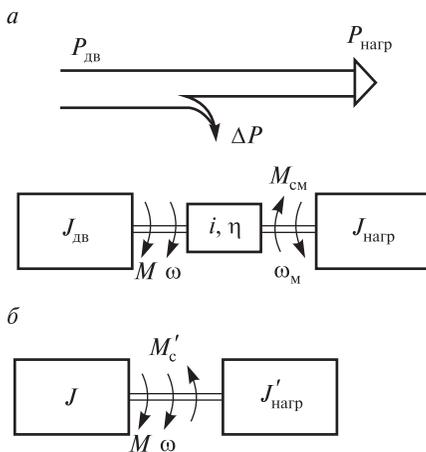


Рис. 1.2. Приведение системы электропривода к валу электродвигателя

кой, чтобы эта замена не отразилась на поведении части системы, оставленной неизменной. Эта операция называется *приведением системы к некоторому, выбранному в качестве основного, валу*. Обычно систему ЭП приводят к валу двигателя. Иными словами, некоторую реальную механическую систему, состоящую из двигателя, редуктора и нагрузки, нужно заменить эквивалентной системой, приведенной к валу двигателя (см. рис. 1.2, а).

Мощность, развиваемая двигателем,

$$P_{\text{дв}} = \omega M,$$

где ω и M — соответственно угловая скорость и момент сопротивления двигателя,

а мощность на нагрузке

$$P_{\text{нагр}} = \omega_{\text{м}} M_{\text{см}},$$

где $\omega_{\text{м}}$ и $M_{\text{см}}$ — соответственно угловая скорость и момент сопротивления на нагрузке.

Примем следующие допущения: система жесткая, без зазоров; моменты инерции, относящиеся к основным валам, неизменны, а относящиеся к промежуточным валам, если такие есть, равны нулю.

Тогда с учетом потерь в системе

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{см}} \omega_{\text{м}}}{\eta},$$

где η — результирующий КПД системы.

Заменим исследуемую систему эквивалентной (рис. 1.2, б), в которой к валу двигателя приложены два момента: момент M , развиваемый двигателем, и приведенный момент сопротивления системы M'_c . Движение эквивалентной системы определяется вторым законом Ньютона:

$$\pm M \pm M'_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.1)$$

где J — приведенный момент инерции всей системы.

В реальной (см. рис. 1.2, а) и приведенной (см. рис. 1.2, б) системах должна остаться неизменной мощность, развиваемая двигателем:

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{см}} \omega_{\text{м}}}{\eta} = \omega M'_{\text{с}}.$$

В результате приведенный момент сопротивления системы

$$M'_{\text{с}} = \frac{M_{\text{см}} \omega_{\text{м}}}{\omega \eta} = \frac{M_{\text{см}}}{i \eta},$$

где $i = \omega / \omega_{\text{м}}$ — передаточное отношение системы.

Потери всегда покрываются той частью системы, которая создает движение, поэтому при обратном потоке мощности — от нагрузки к двигателю (например, режим электрического торможения локомотива)

$$M'_{\text{с}} = \frac{M_{\text{см}} \eta}{i}. \quad (1.2)$$

Приведенный момент инерции системы J (рис. 1.2, б) определяют из условия равенства кинетических энергий реальной и приведенной систем

$$\frac{J \omega^2}{2} = \sum_{i=1}^n T_i,$$

где T_i — кинетическая энергия каждого элемента реальной системы.

Отсюда приведенное к валу электродвигателя значение момента инерции системы

$$J = \frac{2}{\omega^2} \sum_{i=1}^n T_i. \quad (1.3)$$

Пример. Определить момент инерции системы электропривода, кинематическая схема которого состоит из электродвигателя 1, муфты сцепления 2, понижающего редуктора 3, барабана 4 и приводного механизма (нагрузки) 5, совершающего поступательное движение (рис. 1.3). Кинетическая энергия приведенной к валу электродвигателя системы складывается из кинетических энергий всех элементов:

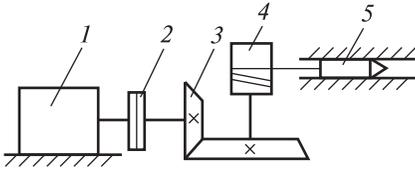


Рис. 1.3. Кинематическая схема электропривода
 1 — электродвигатель; 2 — муфта сцепления; 3 — понижающий редуктор; 4 — барабан; 5 — приводной механизм (нагрузка)

$$\frac{J \omega^2}{2} = \frac{J_{\text{дв}} \omega^2}{2} + \frac{J_{\text{м}} \omega_{\text{м}}^2}{2} + \frac{J_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}^2}{2} + \frac{J_{\text{зк}} \omega_{\text{зк}}^2}{2} + \frac{J_{\text{б}} \omega_{\text{б}}^2}{2} + \frac{m_{\text{нагр}} v_{\text{нагр}}^2}{2},$$

где $J_{\text{дв}}, J_{\text{м}}, J_{\text{ш}}, J_{\text{зк}}, J_{\text{б}}$ — соответственно значения моментов инерции вращающихся частей электродвигателя, муфты сцепления, шестерни и зубчатого колеса редуктора, барабана;

$\omega, \omega_{\text{м}}, \omega_{\text{ш}}, \omega_{\text{зк}}, \omega_{\text{б}}$ — соответственно угловые скорости ротора электродвигателя, муфты сцепления, шестерни и зубчатого колеса редуктора, барабана;

$m_{\text{нагр}}$ и $v_{\text{нагр}}$ — соответственно масса и линейная скорость нагрузки.

Отсюда приведенный к валу электродвигателя момент инерции системы

$$J = \frac{2}{\omega^2} \left(\frac{J_{\text{д}} \omega^2}{2} + \frac{J_{\text{м}} \omega_{\text{м}}^2}{2} + \frac{J_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}^2}{2} + \frac{J_{\text{зк}} \omega_{\text{зк}}^2}{2} + \frac{J_{\text{б}} \omega_{\text{б}}^2}{2} + \frac{m_{\text{нагр}} v_{\text{нагр}}^2}{2} \right).$$

1.1.3. Механические характеристики электропривода

Моменты M и $M_{\text{с}}$ могут зависеть от времени, от положения элементов ЭП, от их скорости ω . Наиболее важны для оценки статических и динамических режимов работы ЭП механические характеристики двигателя и нагрузки $\omega(M)$ и $\omega(M_{\text{с}})$.

Жесткостью механических характеристик электропривода называется величина $\beta = \frac{dM}{d\omega}$; она может быть отрицательной $\beta = \frac{dM}{d\omega} < 0$ или положительной $\beta = \frac{dM}{d\omega} > 0$ (рис. 1.4).

Механические характеристики двигателя и нагрузки, рассматриваемые совместно, позволяют очень просто определить координаты системы в установившемся режиме — скорость $\omega_{\text{уст}}$ и моменты $M_{\text{уст}}$. Поскольку величины M и $M_{\text{с}}$ имеют разные знаки, они располагаются в разных квадрантах плоскости $M\omega$ (рис. 1.5). Теперь,

если отразить зеркально относительно оси ω характеристику M_c , то точка A пересечения отраженной кривой $-M_c$ с характеристикой двигателя M определит установившийся режим работы ЭП; поскольку отрезки AB и BC будут равными, выполнится условие $M + (-M_c) = 0$ или $\sum M = 0$.

Этой операции соответствует запись уравнения движения (1.1) в виде:

$$\pm M - (\pm M_c) = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.4)$$

где знак « $-$ » перед $\pm M_c$ и означает зеркальный перенос характеристики нагрузки. Данный метод традиционно используется в теории электропривода, с учетом того что это лишь удобный прием, при котором установившийся режим получается при простом пересечении характеристик M и M_c .

Механические характеристики двигателя и нагрузки позволяют определить, будет ли система статически устойчива, т.е. вернется ли она к исходному статическому состоянию после любого случайного возмущения. Пусть под влиянием внешних воздействий система из устойчивого состояния со значением координаты скорости $\omega_{уст}$ переходит в новое состояние с меньшим значением скорости ω_1 (рис. 1.6). В первом случае (рис. 1.6, а) характеристики двигателя и нагрузки таковы, что любое случайное снижение скорости ($\omega_1 < \omega_{уст}$) сопровождается преобладанием движущего момента M над тормозящим M_c , равновесие можно восстановить изменением значения M , и система вернется в исходное состояние. Во втором случае (рис. 1.6, б) такое же случайное изменение ско-

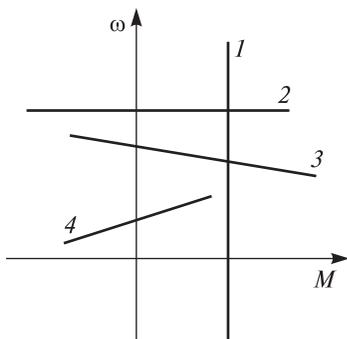


Рис. 1.4. Механические характеристики различной жесткости:

- 1 — абсолютно мягкие $\beta=0$;
- 2 — абсолютно жесткие $\beta=\infty$;
- 3 — с отрицательной жесткостью $\beta<0$;
- 4 — с положительной жесткостью $\beta>0$

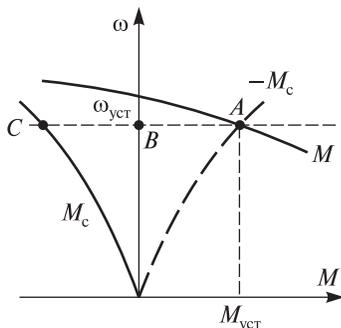


Рис. 1.5. К определению установившегося режима электропривода

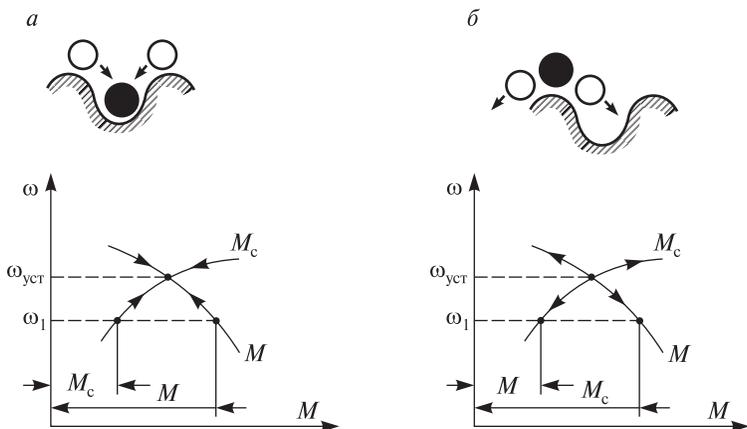


Рис. 1.6. К определению статической устойчивости работы электропривода:
а — устойчивая работа; *б* — неустойчивая работа

рости приводит к преобладанию тормозного момента и равновесие не восстановится, т.е. система с механическими характеристиками, приведенными на рис. 1.6, *б*, статически неустойчива.

1.1.4. Управление электроприводом с помощью контакторов

На локомотивах различают два класса ЭП: тяговый электропривод, управление которым подробно рассматривается в курсе «Электрические передачи локомотивов» [2], и электропривод вспомогательных систем, управление которым преимущественно осуществляется с помощью контакторов и реле.

Чаще всего управление ЭП с помощью коммутационных аппаратов сводится к выполнению операций включения и отключения электродвигателей, изменению частоты и направления их вращения.

Непосредственное включение на полное напряжение сети (без пускового резистора) допускают двигатели постоянного тока сравнительно небольшой мощности (до 1,5 кВт). Ограничение мощности двигателей здесь вызвано возможным нарушением их нормальной коммутации вследствие больших значений пусковых токов.

На переменном токе непосредственное включение на полное напряжение сети допускается для двигателей большей мощ-

ности. Ограничение мощности здесь вызывается необходимостью снижения провалов напряжения в питающей сети, что может привести к отключению других электродвигателей, имеющих минимальную защиту.

Цепь управления для двигателей обоих типов строится одинаково (рис. 1.7, а). Отличие состоит лишь в том, что для управления электродвигателями постоянного тока применяют контактор постоянного тока, а для управления асинхронным двигателем — трехполюсный контактор переменного тока. В общем случае включение электродвигателей осуществляется нажатием на кнопку «Пуск» КнП (или замыкания контактов цепей управления). Катушка контактора КЛ получает питание, и контактор, сработав, подключает своими замыкающими контактами обмотки электродвигателя к источнику напряжения.

Если кнопку КнП отпустить, то ее замыкающий контакт разомкнется. Однако двигатель остается включенным, так как питание катушки контактора КЛ сохраняется через вспомогательный контакт контактора КЛ (контактор КЛ встает на самопитание), шунтирующий контакт кнопки КнП.

Для отключения электродвигателя необходимо нажать кнопку «Стоп» КнС (или разомкнуть контакты цепей управления). Катушка контактора КЛ теряет питание, и контактор отключает электродвигатель от источника напряжения.

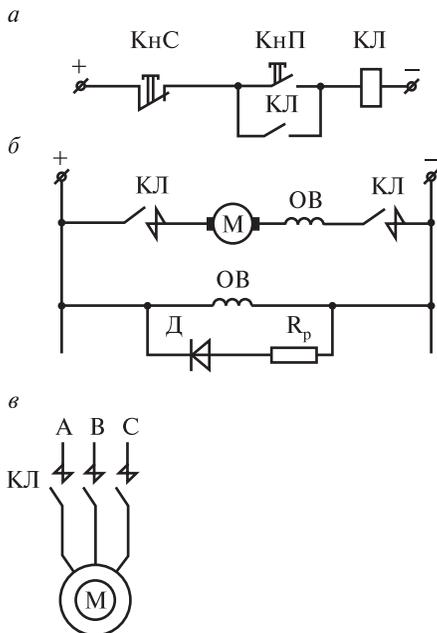


Рис. 1.7. Принципиальные схемы прямого пуска двигателей постоянного и переменного тока с контакторным управлением:
 а — схема цепи управления; б — схема включения двигателя постоянного тока; в — схема включения асинхронного двигателя

Как правило, силовая цепь питания электродвигателя постоянного тока собирается с помощью двухполюсного контактора КЛ с двумя замыкающими главными контактами (рис. 1.7, б). В принципе, включение и отключение двигателя можно осуществлять однополюсным контактором с одним замыкающим главным контактом. Однако в случае частых пусков машины со значительными пусковыми токами разрыв силовой цепи в двух местах является более предпочтительным, так как обеспечивает более надежное ее отключение и меньший износ контактов.

При включении двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением из-за значительной индуктивности обмотки параллельного возбуждения в ней возникают значительные ЭДС самоиндукции и перенапряжения, которые могут привести к повреждению изоляции обмотки. Для уменьшения этих перенапряжений параллельно этой обмотке включают разрядный (гасящий) резистор R_p (рис. 1.7, б).

Во избежание лишних потерь энергии в резисторе R_p при работающем двигателе последовательно с ним включают диод Д. При коммутации цепи возбуждения создается замкнутый контур, замедляющий изменение тока возбуждения, способствующий снижению ЭДС самоиндукции и перенапряжения в цепи.

Включение и отключение асинхронного двигателя осуществляют с помощью трехполюсного контактора с тремя замыкающими главными контактами (рис. 1.7, в). Иногда используют двухполюсный контактор с разрывом только двух фаз (схема с «глухой» фазой). Однако при пробое изоляции обмотки статора на корпус он может оказаться под напряжением относительно земли, что создает опасность поражения обслуживающего персонала электрическим током.

Общие принципы управления ЭП вспомогательных систем локомотивов различных серий одинаковые, однако схемы включения коммутационных аппаратов могут отличаться.

1.2. Магнитные усилители

1.2.1. Управляемый дроссель

Магнитным усилителем (МУ) называется ферромагнитное статическое устройство, предназначенное для усиления мощности,

тока или напряжения электрической цепи переменного тока [3,4]. Действие МУ основано на использовании нелинейного характера кривых намагничивания ферромагнитных материалов, образующих магнитные цепи усилителей.

Отсутствие у МУ движущихся частей, высокая степень надежности, большой срок службы, отсутствие необходимости в систематическом обслуживании и т. д. послужили причиной их широкого применения в качестве элементов автоматических систем.

Основой МУ является управляемый дроссель (реактор), свойства которого и определяют свойства МУ.

На рис. 1.8 приведен простейший управляемый дроссель, состоящий из ферромагнитного сердечника, на котором расположены две обмотки: рабочая (ОР) — со стороны переменного напряжения, и управления (ОУ) — со стороны постоянного напряжения.

При включении рабочей обмотки I на переменное напряжения ток в ней (действующее значение) будет равен:

$$I_p = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}},$$

где U — действующее значение напряжения;

r и $x = \omega L$ — активное и реактивное сопротивление рабочей обмотки;

L — индуктивное сопротивление рабочей обмотки;

ω — круговая частота напряжения $\sim u$ на рабочей обмотке дросселя.

В общем случае индуктивность обмотки зависит от ее параметров и магнитной проницаемости среды:

$$L = \mu_a \frac{w^2 S_c}{l},$$

где w — число витков обмотки;

S_c — площадь поперечного сечения сердечника;

l — средняя длина магнитных силовых линий, создаваемых током обмотки в сердечнике.

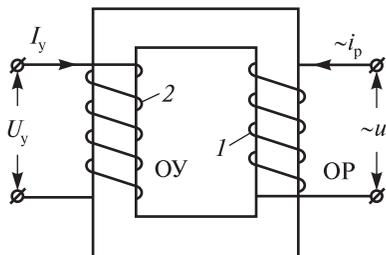


Рис. 1.8. Принципиальная схема управляемого дросселя

Так как обычно $r \ll x$, можно считать, что действующее значение тока в ОР (тока нагрузки):

$$I_p \approx \frac{U}{x} = \frac{U}{\omega L}.$$

Под действием переменного напряжения ОР в сердечнике создается переменное магнитное поле, индукция которого B пропорциональна приложенному напряжению U . Если ОУ подключить к источнику постоянного напряжения U_y , то в сердечнике на переменную составляющую магнитного поля B наложится постоянная составляющая магнитного поля B_y , создаваемая током управления I_y , которая будет его насыщать.

На рис. 1.9 приведены кривые изменения магнитной индукции $B = f(H)$ и магнитной проницаемости $\mu_a = f(H)$ ферромагнитного сердечника в зависимости от напряженности магнитного поля H . Нетрудно видеть, что возрастание насыщения сердечника дросселя приводит к уменьшению его магнитной проницаемости μ_a . Так как $x \sim L \sim \mu_a$, то уменьшение магнитной проницаемости вызовет уменьшение индуктивного сопротивления x и, следовательно, возрастание тока I_p .

Таким образом, изменяя значение постоянного тока в ОУ и тем самым изменяя насыщение сердечника, можно изменять индуктивное сопротивление и ток I_p .

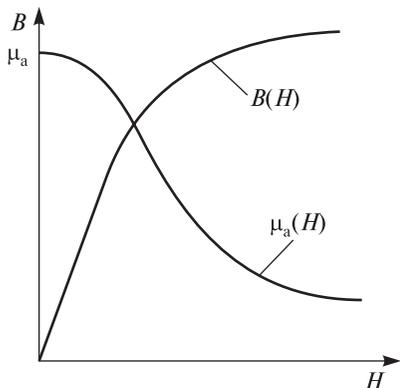


Рис. 1.9. Магнитные характеристики ферромагнитной стали

На рис. 1.10 представлены электромагнитные процессы, протекающие в сердечнике дросселя при протекании токов I_p и I_y в его обмотках. Магнитная характеристика сердечника — зависимость магнитного потока от намагничивающей силы — $\Phi = f(F)$ определяет всю работу дросселя. Пусть первоначально $I_y = 0$. Соответственно и намагничивающая сила F'_p , создаваемая током рабочей обмотки, синусоидальна и симметрична относительно оси. Она наводит в сердечнике переменный магнит-

ный поток $\Phi'_p = \Phi_m \sin(\omega t)$. Когда в обмотке управления появляется ток, он наводит в сердечнике постоянную составляющую намагничивающей силы F_y , которая, в свою очередь, создает постоянную составляющую магнитного потока Φ_y . Результирующий магнитный поток $\Phi_\Sigma = \Phi'_p + \Phi_y$ также будет синусоидальным, но увеличен на значение Φ_y по отношению к потоку Φ'_p . Проецируя на кривую $\Phi = f(F)$ значения Φ_Σ

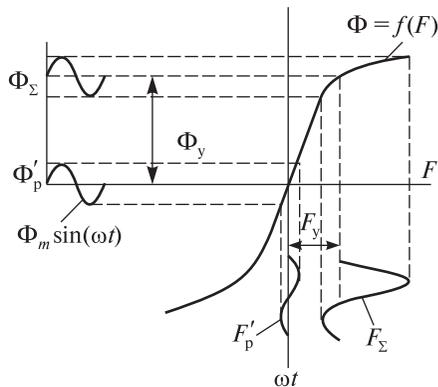


Рис. 1.10. К работе управляемого дросселя

в различные моменты времени можно построить кривые изменения во времени результирующей намагничивающей силы $F_\Sigma = f(\omega t)$. Из графических зависимостей видно, что при наличии подмагничивания сердечника потоком Φ_y амплитуда результирующей намагничивающей силы F_Σ резко возрастает, следовательно, возрастает и ток в рабочей обмотке дросселя. Вместе с тем кривая $F_\Sigma = f(\omega t)$ становится несинусоидальной и несимметричной относительно оси времени. Следовательно, кривая тока в рабочей обмотке будет содержать, кроме основной гармонической напряжения с частотой питающей сети еще и другие четные и нечетные гармоники (см. п. 3.7). Кроме того, в обмотке управления такого простейшего управляемого дросселя, как в обычном трансформаторе, индуцируются переменное напряжение и ток, который, замыкаясь на источник управляющего сигнала, может нарушить его работу. Поэтому управляемые дроссели, показанные на схеме рис. 1.8, широкого применения не получили.

На рис. 1.11, а, приведена схема управляемого дросселя, выполненного на двух сердечниках, рабочие обмотки которых соединяются последовательно-согласно (или параллельно), а обмотки управления — последовательно-встречно. Переменные ЭДС, индуцируемые током $\sim i_p$ в обмотках управления, будут всегда в противофазе и взаимно компенсируются. Поэтому переменная составляющая напряжения на зажимах обмотки управления будет

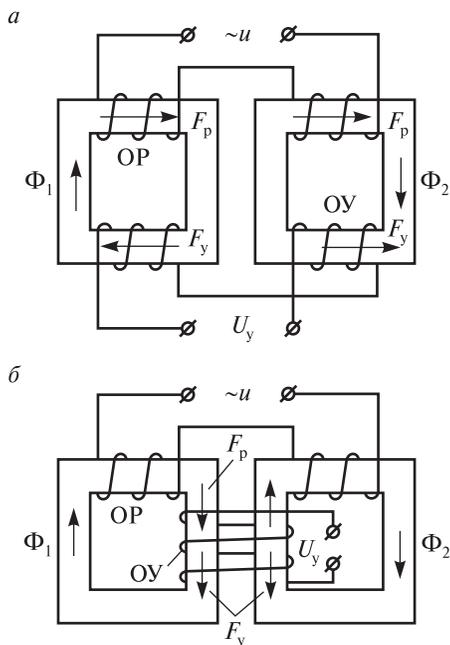


Рис. 1.11. Управляемые дроссели, выполненные на двух сердечниках с встречно включенными обмотками управления (а) и общей обмоткой управления (б)

отсутствовать. Однако на полуобмотках управления переменная составляющая напряжения будет присутствовать, и обычно более высокая, чем значение питающего напряжения $\sim u$. Это определяет повышенные требования к качеству изоляции обмотки управления и безопасности работы с такими управляемыми дросселями.

Лучшие технические характеристики имеет управляемый дроссель, схема которого приведена на 1.11, б. Обмотка управления этого дросселя охватывает оба сердечника. В этом случае суммарный магнитный поток от $\sim i_p$, в любой момент времени будет равен нулю и, следовательно, переменная составляющая напряжения на зажимах ОУ будет отсутствовать.

1.2.2. Дроссельные магнитные усилители

Если последовательно с рабочей обмоткой управляемого дросселя включить нагрузку, то такое устройство будет представлять собой дроссельный магнитный усилитель.

На рис. 1.12 приведен ряд схем дроссельных магнитных усилителей.

На схеме, приведенной на рис. 1.12, а, обмотки управления располагаются отдельно на каждом сердечнике и включены последовательно-встречно. Через нагрузку Z_n протекает переменный ток. Такие усилители принято называть МУ с выходом на переменном токе несущей частоты (частоты напряжения сети).

В схеме, приведенной на рис. 1.12, б, для питания нагрузки постоянного тока r_n предусмотрен выпрямитель В. В этом случае имеем МУ с выходом на постоянном токе.

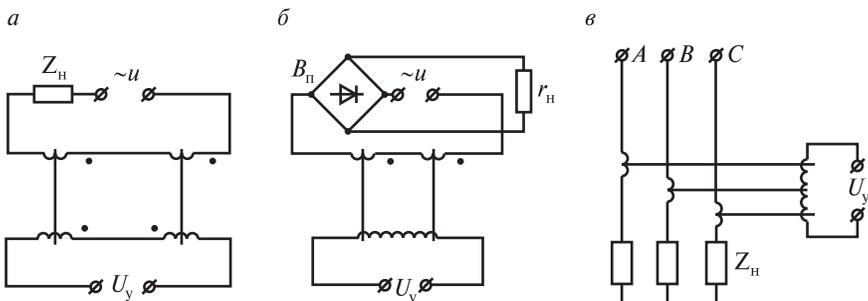


Рис. 1.12. Принципиальные схемы дроссельных магнитных усилителей

На рис. 1.12, в, приведена схема *трехфазного МУ с выходом на переменном токе*.

Рассмотрим совместную работу управляемого дросселя и нагрузки, включенной последовательно с его рабочей обмоткой. Схема замещения МУ состоит из дросселя и нагрузки (рис. 1.13, а). Нагрузка имеет в общем случае активную r_n и индуктивную x_n , составляющие сопротивления нагрузки. Дроссель с достаточной точностью можно считать переменной индуктивной нагрузкой $x_{др}$. Дроссель и нагрузка включены на источник переменного напряжения $\sim u$.

Соответственно со схемой замещения построена векторная диаграмма работы МУ (рис. 1.13, б). По оси абсцисс отложен вектор тока рабочей обмотки \dot{I}_p . Вектор падения напряжения на нагрузке \dot{U}_n повернут относительно вектора \dot{I}_p на угол φ_n . Вектор падения напряжения на дросселе $\dot{U}_{др}$ составляет прямой угол с вектором \dot{I}_p (так как нагрузка дросселя индуктивная). Напряжение источника переменного напряжения определится выражением

$$\dot{U} = \dot{U}_n + \dot{U}_{др}. \quad (1.5)$$

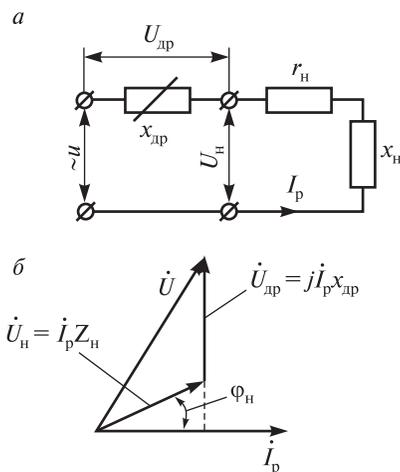


Рис. 1.13. Схема замещения (а) и векторная диаграмма магнитного усилителя (б)

На основании векторной диаграммы можно записать уравнение, которое описывает условие совместной работы управляемого дросселя и нагрузки МУ:

$$U^2 = U_{\text{н}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{н}} + (U_{\text{др}} + U_{\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}})^2,$$

где U — напряжение питающей сети (действующее значение);

$U_{\text{н}}$ — напряжение на нагрузке (действующее значение);

$\varphi_{\text{н}}$ — угол между векторами напряжения и тока в нагрузке;

$U_{\text{др}}$ — напряжение на управляемом дросселе (действующее значение).

Из предыдущей зависимости напряжение на управляемом дросселе выразится как

$$U_{\text{др}} = \sqrt{U^2 - U_{\text{н}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{н}}} - U_{\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}}.$$

Разделим обе части этого выражения на U и введем понятие коэффициента нагрузки $\frac{U_{\text{н}}}{U} = k_{\text{н}}$. Тогда

$$\frac{U_{\text{др}}}{U} = \sqrt{1 - k_{\text{н}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{н}}} - k_{\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}}. \quad (1.6)$$

Уравнение (1.6) называют уравнением эллипса нагрузки; оно определяет условие совместной работы управляемого дросселя и нагрузки. Это выражение говорит о том, что напряжение на рабочей обмотке управляемого дросселя является функцией двух параметров: коэффициента нагрузки $k_{\text{н}}$ и угла $\varphi_{\text{н}}$.

В общем случае напряжение сети $\dot{U} = \dot{U}_{\text{др}} + \dot{U}_{\text{н}}$, а напряжение на нагрузке $\dot{U}_{\text{н}} = \dot{I}_{\text{р}} Z_{\text{н}}$. Если падение напряжения на дросселе равно нулю $U_{\text{др}} = 0$, то $\dot{U} = \dot{U}_{\text{н}}$ и ток в рабочих обмотках будет максимальным $I_{\text{рmax}}$. При постоянном сопротивлении нагрузки $Z_{\text{н}} = \text{const}$ коэффициент нагрузки может быть представлен отношением токов нагрузки

$$k_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{U} = \frac{I_{\text{р}}}{I_{\text{рmax}}}.$$

Изменяя значение $k_{\text{н}}$ в пределах от $k_{\text{н}} = 0$ (все напряжение приложено к рабочей обмотке управляемого дросселя) до $k_{\text{н}} = 1$ (все напряжение приложено к нагрузке), для заданного значения $\varphi_{\text{н}}$

можно построить соответствующую характеристику нагрузки $U_{др} = f(I_p)$ (рис. 1.14).

При активной нагрузке, когда $\varphi_H = 0$ выражение (1.6) принимает вид

$$\frac{U_{др}}{U} = \sqrt{1 - k_H^2},$$

или
$$\frac{U_{др}^2}{U^2} + \frac{I_p^2}{I_{p\max}^2} = 1. \quad (1.7)$$

Выражение (1.7) представляет собой уравнение эллипса с полуосями U и $I_{p\max}$ (линия 1 на рис. 1.14).

При индуктивной нагрузке, т.е. когда $\varphi_H = \pi/2$:

$$\frac{U_{др}}{U} = 1 - k_H \sin \varphi_H, \text{ или } \frac{U_{др}}{U} = 1 - \frac{I_p}{I_{p\max}} \sin \varphi_H. \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) представляет собой уравнение прямой (линия 2 на рис. 1.14). В остальных случаях $0 < \varphi_H < \frac{\pi}{2}$ характеристики нагрузки будут располагаться между кривой 1 и прямой 2.

Имея точки пересечения характеристик нагрузки с вольт-амперными характеристиками управляемого дросселя, можно построить зависимости $I_p = f(I_y)$ (рис. 1.15), которые называются *характеристиками управления* (*нагрузочными характеристиками*, или характеристиками «вход—выход»).

Аппроксимируя характеристику управления прямой линией, можно записать:

$$I_p = I_{xx} + K_I I_y,$$

где отношение токов рабочей обмотки и обмотки управления называется *коэффициентом усиления МУ по току*:

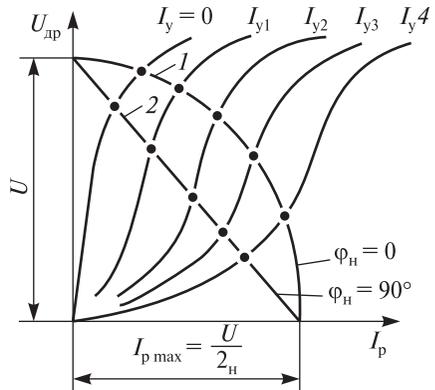


Рис. 1.14. Вольтамперные характеристики управляемого дросселя при различных значениях тока управления I_y и его характеристики нагрузки: 1 — при активной нагрузке ($\varphi_H=0$); 2 — при индуктивной нагрузке ($\varphi_H=\pi/2$)

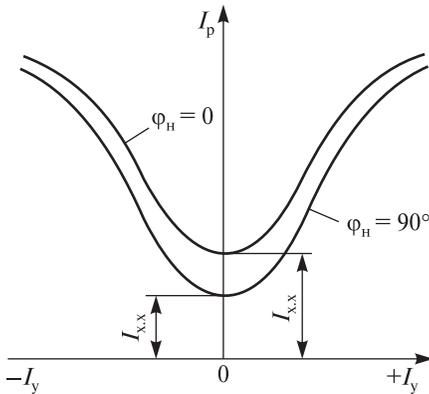


Рис. 1.15. Характеристики управления управляемого дросселя при активной ($\varphi_n=0$) и индуктивной ($\varphi_n=\pi/2$) нагрузке

$$K_I = \Delta I_p / \Delta I_y. \quad (1.9)$$

В зоне средних значений управляющих сигналов характеристика управления имеет наибольшую крутизну и близка к линейной. При малых и больших сигналах эта линейность нарушается. Когда управляющий сигнал равен нулю $I_y = 0$, ток нагрузки не равен нулю, а равен току холостого хода $I_p = I_{x,x}$. Это объясняется тем, что в реальных МУ сопротивление рабочих обмоток является конечной величиной.

Кроме наличия тока холостого хода $I_{x,x}$, к недостаткам такого МУ следует отнести малые значения коэффициента усиления при малых значениях управляющих сигналов и нечувствительность к полярности управляющего сигнала I_y . Действительно, одинаковым по значению управляющим сигналам разной полярности соответствует один и тот же ток нагрузки I_p .

Последние два недостатка могут быть исключены, если в МУ предусмотреть еще одну обмотку, накладываемую так же, как и обмотка управления, и питаемую от источника постоянного тока неизменного напряжения $U_{см}$ (рис. 1.16, а). Эта обмотка, называемая *обмоткой смещения (ОС)*, создает постоянное подмагничивание МУ. В результате действия ОС *характеристика управления МУ* сместится относительно оси ординат либо вправо, либо влево — в зависимости от направления намагничивающей силы обмотки смещения (рис. 1.16, б). Характеристика управления МУ при наличии ОС может быть получена из характеристики МУ без смещения путем переноса оси ординат либо вправо, либо влево, на величину

$$I'_{см} = I_{см} \frac{w_{см}}{w_y},$$

где $I'_{см}$ — ток обмотки смещения, приведенный к обмотке управления;
 $I_{см}$ — действительный ток обмотки смещения;
 $w_{см}; w_y$ — число витков обмоток смещения и управления.

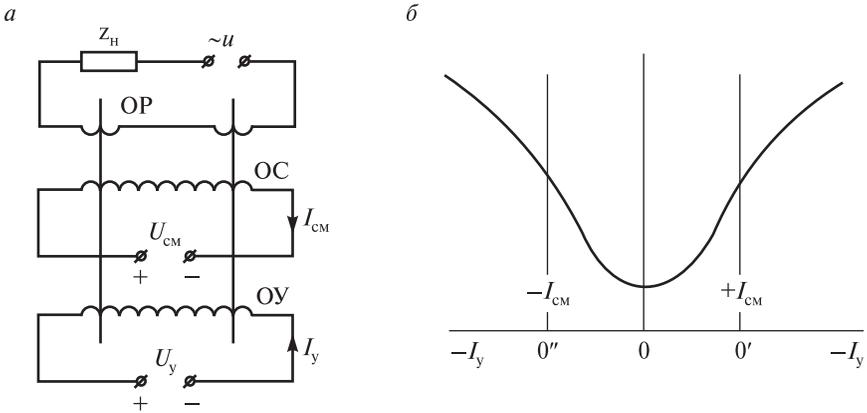


Рис. 1.16. Принципиальная схема (а) и характеристика управления (б) магнитного усилителя с обмоткой смещения

Смещая соответствующим образом характеристику управления, можно обеспечить расположение наиболее крутой ее области в зоне малых I_Y . При наличии обмотки смещения ток нагрузки МУ будет определяться как

$$I_p = I_{x.x} + K_I \left(I_y + I_{cm} \frac{w_{cm}}{w_y} \right).$$

1.2.3. Трансформаторные МУ

Наряду с дроссельными МУ находят применение *трансформаторные МУ*. Трансформаторный МУ имеет две рабочие обмотки: первичную ОР1 и вторичную ОР2 (рис. 1.17, а). Первичная обмотка подключается к питающей сети, а вторичная — замыкается на нагрузку. Напряжение, возникающее на нагрузке, в основном определяется значением взаимной индуктивности M между первичной и вторичной рабочими обмотками:

$$M = c\mu_a,$$

где c — конструктивная постоянная для данного МУ;

μ_a — абсолютная магнитная проницаемость сердечника.

При отсутствии насыщения сердечников ($I_y = 0$) μ_a , I_p и U_H будут иметь наибольшие значения. По мере насыщения магнитного

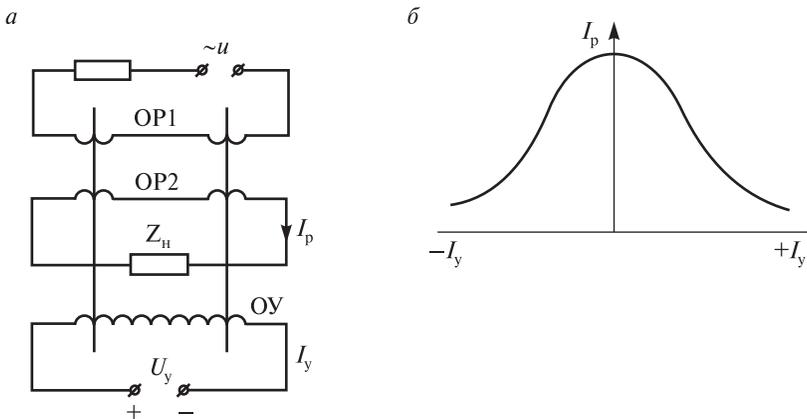


Рис. 1.17. Принципиальная схема (а) и характеристика управления (б) трансформаторного магнитного усилителя

усилителя μ_a будет уменьшаться, что приведет к уменьшению I_p и U_H .

Таким образом, по отношению к управляющему сигналу трансформаторный МУ по сравнению с дроссельным ведет себя наоборот. Это подтверждается видом характеристики управления, приведенной на рис. 1.17, б. Следует добавить, что в трансформаторном МУ цепь питания и цепь нагрузки разделены. Это дает возможность получать на выходе любое напряжение, которое требуется для питания нагрузки.

1.2.4. Магнитные усилители с положительными обратными связями

Рассмотренные выше МУ обладают сравнительно небольшими коэффициентами усиления. Наиболее существенным способом повышения коэффициента усиления МУ является введение положительных связей по току или напряжению выхода МУ.

На рис. 1.18 приведены схемы МУ с положительной обратной связью по току нагрузки. Ток нагрузки, выпрямляясь, подается в обмотку обратной связи ООС, наложенную так же, как и обмотка управления, и действующую согласно с ней. Наличие специальной обмотки обратной связи классифицирует такой МУ как *магнитный усилитель с внешней обратной связью*, или *магнитный усилитель*

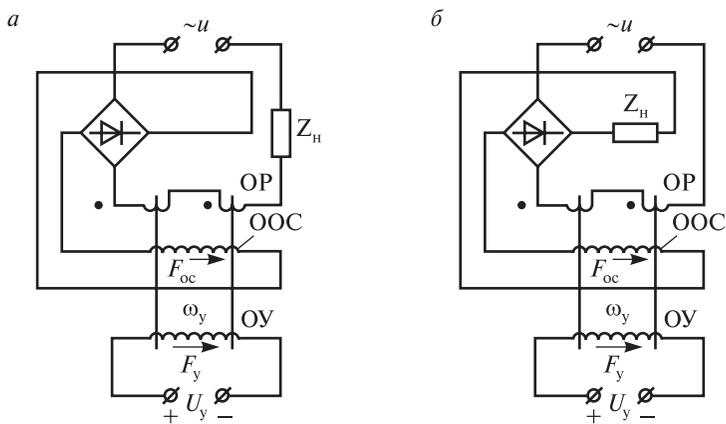


Рис. 1.18. Принципиальные схемы магнитных усилителей с положительной обратной связью с выходом на переменном (а) и постоянном (б) токе

с магнитной обратной связью. Таким образом, насыщение МУ осуществляется не только намагничивающей силой обмотки управления F_y , но также и намагничивающей силой обмотки обратной связи F_{oc} . В МУ с положительной обратной связью для достижения того же значения тока нагрузки, что и в МУ без обратной связи, потребуется меньшее значение F_y и, следовательно, его коэффициент усиления (1.9) будет бóльшим.

МУ с положительными обратными связями могут быть как с выходом на переменном токе (рис. 1.18, а), так и на постоянном токе (рис. 1.18, б).

На рис. 1.19, а, приведены характеристики МУ без обратной связи $I_p = f(F_y)$ (линия 1) и характеристика обратной связи (линия 2). Характеристику $I_p = f(F_y)$ также можно рассматривать как характеристику управления, так как намагничивающая сила управления пропорциональна току управления: $F_y = w_y I_y$, где w_y — число витков обмотки управления. При отсутствии обратной связи для достижения тока нагрузки I_{pl} потребовалось бы создать с помощью обмотки управления всю намагничивающую силу, равную F_{y1} .

При наличии положительной обратной связи та же намагничивающая сила создается двумя обмотками $F_{y1} = F_y + F_{oc}$, и главным образом обмоткой обратной связи, поэтому F_y , требуемая для управления, в этом случае становится значительно меньшей ($F_y \ll F_{y1}$).

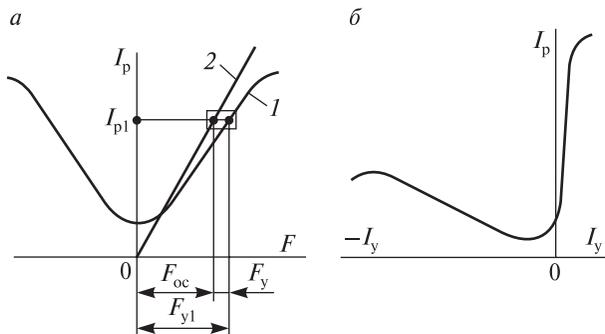


Рис. 1.19. Построение характеристики управления магнитного усилителя с внешней обратной связью: *а* — характеристика МУ без обратной (*1*) и обратной (*2*) связи; *б* — характеристика МУ с внешней обратной связью

Задавая различные значения I_p и определяя для них соответствующие значения F_y и $I_y = F_y / w_y$, можно построить характеристику управления МУ с положительной обратной связью $I_p = f(I_y)$, которая приведена на рис. 1.19, б. Нетрудно видеть, что при наличии обратной связи характеристика управления становится несимметричной относительно оси ординат. Для отрицательных значений I_y положительная обратная связь превращается в отрицательную, так как характеристика управления имеет вид пологой кривой.

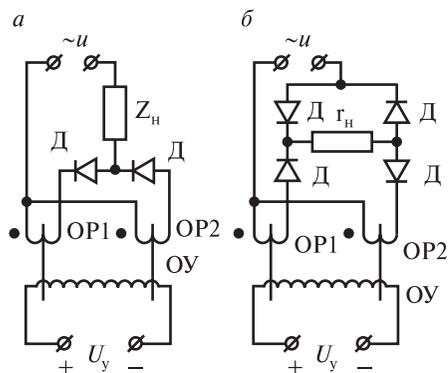


Рис. 1.20. Принципиальные схемы магнитных усилителей с внутренней обратной связью: *а* — с выходом на переменном токе; *б* — с выходом на постоянном токе

Более распространенным является другой способ исполнения положительной обратной связи, при котором необходимость в специальной обмотке отпадает. В этом случае рабочие полуобмотки МУ соединяются между собой параллельно и в их цепях предусматриваются вентили Д (рис. 1.20). Такие МУ получили название *магнитные усилители с внутрен-*

ней обратной связью, или магнитные усилители с самонасыщением. В этих схемах рабочие полуобмотки работают поочередно и только половину периода.

Пусть в первый полупериод у левой клеммы источника питания появился положительный потенциал (+), а у правого — отрицательный (-). Полуобмотка ОР1 будет заперта диодом Д и ток проходит только по полуобмотке ОР2. В следующий полупериод, при изменении полярности напряжения на источнике, ток проходит по полуобмотке ОР1, а полуобмотка ОР2 заперта. Рабочие полуобмотки, действуя поочередно, создают в сердечниках МУ пульсирующую намагничивающую силу, постоянная составляющая которой, складываясь с F_y обмотки управления, подмагничивает МУ.

На рис. 1.21 приведена характеристика управления рассматриваемого МУ. При отсутствии управляющего сигнала сердечники МУ по существу полностью насыщены, и при наличии положительных управляющих сигналов ток нагрузки возрастает незначительно. При отрицательных управляющих сигналах происходит резкое уменьшение тока нагрузки до минимального значения. Обычно с помощью дополнительной обмотки смещения изменяют характеристику управления так, чтобы минимальный ток нагрузки был при $I_y = 0$.

Магнитные положительные обратные связи и самонасыщение могут применяться в МУ как с выходом на переменном токе, так и с выходом на постоянном токе. На рис. 1.22 приведена схема трехфазного МУ с внутренней обратной связью и выходом на переменном токе.

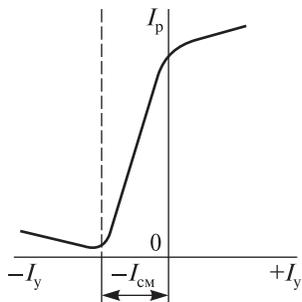


Рис. 1.21. Характеристика управления магнитного усилителя с внутренней обратной связью

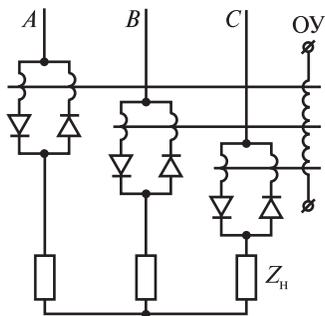


Рис. 1.22. Трехфазный магнитный усилитель с внутренней обратной связью

При большом токе в ООС (см. рис. 1.18, б) (сильная положительная обратная связь) характеристика обратной связи может занять положение относительно характеристики управления так, как это показано на рис. 1.23, а. В этом случае характеристика МУ $I_p = f(I_y)$ будет иметь вид, представленный на рис. 1.23, б. При $I_y = 0$ МУ насыщен действием только одной обмотки обратной связи и ток холостого хода практически равен максимальному току насыщенного МУ. Положительные значения тока управления, подаваемого на вход МУ, приведут лишь к незначительному увеличению тока нагрузки.

Если на вход МУ будет подан отрицательный управляющий сигнал, то при его изменении от $I_y = 0$ до $I_y = I_y'$ рабочая точка по нагрузочной характеристике переместится из положения 1 в положение 2. При этом ток выхода несколько уменьшится. В точке 2 происходит скачкообразный переход в точку 2', так как участок характеристики 2—3—2' является неустойчивым. Ток нагрузки при этом также скачком уменьшается почти до нуля. При обратном изменении I_y осуществляется переход из точки 2' в точку 3 и ток нагрузки несколько возрастает. В точке 3, когда $I_y = I_y''$, происходит скачкообразный переход в точку 3' и ток нагрузки скачком возрастает почти до значения $I_{x.x}$. Характеристики подобного вида называются *релейными характеристиками*. Таким образом, МУ с помощью сильной положительной обратной связи переводится в

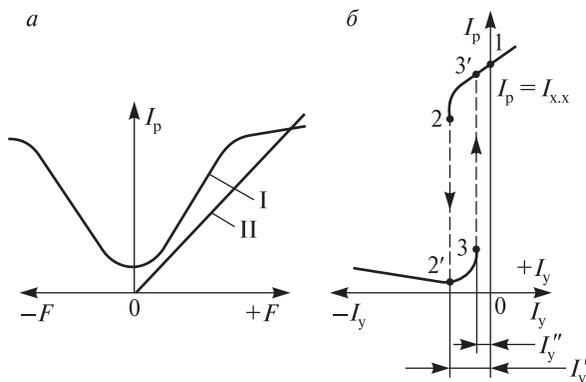


Рис. 1.23. Характеристика магнитного усилителя в релейном режиме: а — характеристика МУ без ОС (I) и характеристика ОС (II); б — характеристика управления МУ

релейный режим и может рассматриваться как бесконтактное реле. С помощью обмотки смещения характеристика такого бесконтактного реле может быть смещена относительно начала координат в любое положение.

1.2.5. Работа магнитного усилителя в режиме фазосдвигающего устройства

Во многих случаях МУ используется как фазосдвигающее устройство, например при формировании управляющих импульсов тиристоров управляемых выпрямителей (см. п. 4.4). Для того чтобы поучить представление о работе МУ в режиме фазосдвигающего устройства необходимо рассмотреть динамические процессы, происходящие в его обмотках и одном сердечнике дросселя при перемагничивании током рабочей обмотки.

В соответствии с (1.5) напряжение источника переменного напряжения распределится между нагрузкой \dot{U}_H и рабочей обмоткой дросселя $\dot{U}_{др}$:

$$\dot{U} = \dot{U}_H + \dot{U}_{др}.$$

При этом

$$U_{др} \approx -e_{др} = -w_p \frac{d\Phi}{dt},$$

где w_p — число витков рабочей обмотки дросселя;

Φ — магнитный поток в сердечнике дросселя.

Предположим, что по обмотке управления протекает ток I_y , создающий магнитодвижущую силу $F_y = w_y I_y$. Тогда к началу первого полупериода в сердечнике будет уже создан начальный поток Φ_0 , определяемый по кривой намагничивания сердечника (рис. 1.24, а). Под действием напряжения $\sim u$ будет происходить дальнейшее намагничивание сердечника (рис. 1.24, б). Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока сердечник не насытится. Время, в течение которого происходит намагничивание сердечника до значения насыщения Φ_H , называется интервалом возбуждения, характеризуется углом насыщения α и большой динамической индуктивностью рабочей обмотки дросселя

$$L_d = w_p \frac{d\Phi}{di_p},$$

где i_p — мгновенное значение тока нагрузки.

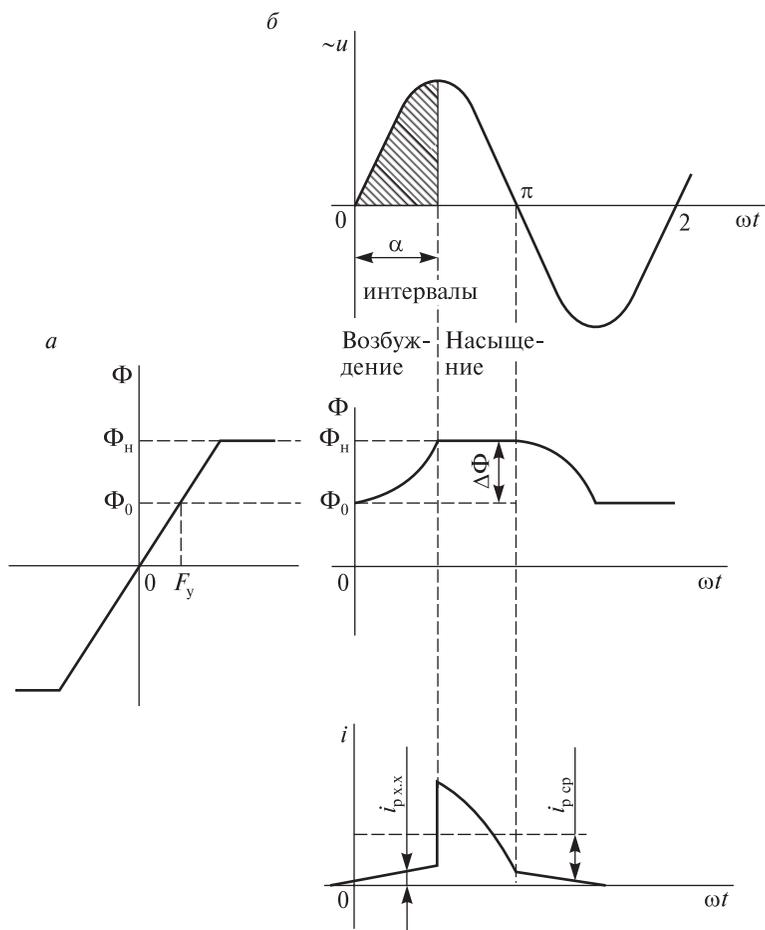


Рис. 1.24. Работа магнитного усилителя как фазосдвигающего устройства
 а — кривая намагничивания сердечника; б — напряжение и ток в рабочей обмотке МУ

На интервале возбуждения из-за большой индуктивности L_d практически все напряжение питания $\sim u$ прикладывается к рабочей обмотке дросселя $\dot{U} \approx \dot{U}_{др}$, поэтому через нагрузку протекает лишь небольшой ток $i_{p.x.x}$.

После того как сердечник МУ насытится, наступает *интервал насыщения дросселя*, продолжающийся до конца полупериода напряжения $\sim u$. На этом интервале магнитный поток в сердечнике не изменяется $d\Phi \rightarrow 0$, поэтому индуктивность дросселя будет мала и все напряжение $\sim u$ прикладывается к нагрузке $\dot{U} \approx \dot{U}_H$. Ток в нагрузке резко возрастает до значения, определяемого сопротивлением нагрузки, и протекает в течение всего интервала насыщения, т.е. на протяжении угла $(\pi - \alpha)$.

В течение другого полупериода напряжения $\sim u$ процессы в МУ протекают аналогично.

Таким образом, дроссель смещает начало протекания тока в нагрузке МУ. Угол этого смещения определяется фазой насыщения сердечника α . Соответственно и среднее значение тока в нагрузке $I_{H\text{ ср}}$ также будет зависеть от значения α .

Значение фазы α зависит от степени начального намагничивания сердечника, т.е. от значения потока Φ_0 . Чем больше начальное намагничивание Φ_0 , тем меньше значение фазы α и больше ток нагрузки $I_{H\text{ ср}}$.

Зависимость $I_{p\text{ ср}} = f(F_y)$ реального МУ представлена на рис. 1.25. Для того чтобы при $I_y = 0$ на выходе магнитного усилителя уже имелся значительный ток нагрузки

$I_{p\text{ ср}} = I_{01}$ на сердечниках МУ располагают обмотку смещения, которая питается от постороннего источника и создает магнитодвижущую силу F_{cm} . В этом случае регулирование величины $I_{p\text{ ср}}$ осуществляется током I_y при встречном включении обмотки управления. Из зависимости $I_{p\text{ ср}} = f(F_y)$ также следует, что значение тока нагрузки невозможно снизить до нуля. Даже при большом отрицательном токе управления в цепи нагрузки протекает ток холостого хода I_0 , определяемый магнитодвижущей силой, требуемой для перемагничивания сердечников.

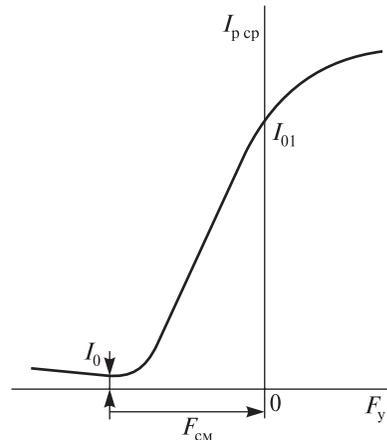


Рис. 1.25. Характеристика реального магнитного усилителя

Важным параметром МУ является его быстродействие, т.е. скорость установления выходного напряжения при изменении сигнала управления. Так как напряжение и ток нагрузки определяются значением фазы α (которая, в свою очередь, определяется значением Φ_0), то в конечном итоге быстродействие МУ определяется значением $\Delta\Phi$. Изменение потока в сердечнике происходит по экспоненциальному закону

$$\Phi_i = \Phi_n (1 - e^{t/T}),$$

где T — постоянная времени МУ.

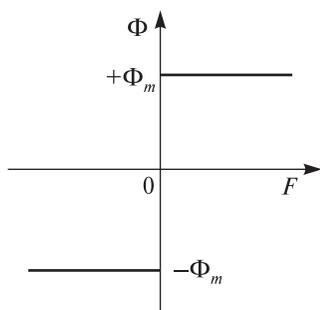
Постоянная времени T зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений рабочей обмотки и обмотки управления. В реальных МУ значения T лежат в пределах от сотых до нескольких десятых долей секунды.

1.2.6. Коэффициенты усиления магнитного усилителя

Для идеального МУ, кривая намагничивания которого приведена на рис. 1.26, справедлива формула равенства намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$I_{\text{р ср}} w_p = I_y w_y,$$

где $I_{\text{р ср}} = \frac{I_p}{k_\Phi}$ — среднее значение тока нагрузки;



I_p — действующее значение тока нагрузки;
 k_Φ — коэффициент формы кривой тока нагрузки.

Тогда коэффициент усиления тока

$$K_I = \frac{I_p}{I_y} = k_\Phi \frac{w_y}{w_p}; \quad (1.10)$$

коэффициент усиления напряжения

$$K_U = \frac{U_n}{U_y} = \frac{I_p}{I_y} \frac{Z_n}{r_y} = K_I \frac{Z_n}{r_y};$$

Рис. 1.26. Характеристика намагничивания идеального магнитного усилителя

коэффициент усиления мощности

$$K_H = \frac{P_H}{P_Y} = \frac{I_P^2 r_H}{I_Y^2 r_Y} = K_I^2 \frac{Z_H}{r_Y},$$

где Z_H и r_H — соответственно полное и активное сопротивления нагрузки.

Полученные выражения говорят о том, что коэффициенты усиления МУ будут тем большими, чем большим будет отношение $\frac{w_Y}{w_P}$.

Для МУ с положительной обратной связью можно воспользоваться тем же уравнением идеального МУ, но только к правой части уравнения следует прибавить намагничивающую силу обмотки обратной связи, равную $I_{\text{р ср}} w_{\text{ос}}$.

$$\text{Тогда } I_{\text{р ср}} w_P = I_Y w_Y + I_{\text{р ср}} w_{\text{ос}},$$

или

$$I_P w_P = k_{\Phi} I_Y w_Y + I_P w_{\text{ос}}.$$

Коэффициент усиления тока МУ с положительной обратной связью

$$K'_I = \frac{I_P}{I_Y} = k_{\Phi} \frac{w_Y}{w_P - w_{\text{ос}}} = k_{\Phi} \frac{w_Y}{w_P} \frac{1}{1 - \frac{w_{\text{ос}}}{w_P}} = K_I \frac{1}{1 - K_{\text{ос}}}, \quad (1.11)$$

где K_I — коэффициент усиления тока МУ без обратной связи;

$K_{\text{ос}}$ — коэффициент обратной связи.

Таким образом, коэффициент усиления тока МУ с положительной обратной связью (1.11) больше коэффициента усиления МУ без обратной связи (1.10) в $\frac{1}{1 - K_{\text{ос}}}$ раз. Если, допустим, $K_{\text{ос}} = 0,9$, то

K'_I больше K_I в 10 раз, если $K_{\text{ос}} = 0,99$, то K'_I больше K_I в 100 раз и т.д. Совершенно очевидно, что коэффициент усиления напряжения МУ с положительной обратной связью будет также больше в

$\frac{1}{1 - K_{\text{ос}}}$ раз, а коэффициент усиления мощности в $\left(\frac{1}{1 - K_{\text{ос}}}\right)^2$.

Опыт показывает, что использование уравнения идеального МУ и выражений (1.10) и (1.11), полученных на его основе, для реальных МУ не вносит больших погрешностей при расчетах.

1.3. Бесконтактное тахометрическое устройство

По принципу работы бесконтактное тахометрическое устройство (БТУ) представляет собой электромагнитную систему, преобразующую переменное напряжение источника $\sim u$ в постоянное напряжение, пропорциональное частоте [4]. Основным его элементом является насыщающийся трансформатор ТР1, сердечник которого выполнен из высококачественного магнитного материала — пермаллоя 50НП — с характеристикой намагничивания, близкой к прямоугольной (рис. 1.27). Первичная обмотка трансформатора ТР1 подключена через балластный резистор R_6 к источнику переменного напряжения; ко вторичной обмотке через выпрямительный мост подсоединяется нагрузка R_H (рис. 1.28).

Пока трансформатор не насыщен, к нему прикладывается напряжение источника за вычетом падения напряжения Δu на резисторе R_6 от протекающего тока нагрузки (рис. 1.29, а). Основное свойство насыщающегося трансформатора заключается в том, что в течение одного полупериода $T/2$ он может принять и передать во вторичную цепь вполне определенную величину вольт-секундной площади S приложенного напряжения (на рис. 1.29 заштрихована). После этого он переходит в насыщение и энергию во вторичную обмотку не передает. Поэтому в течение оставшейся части полу-

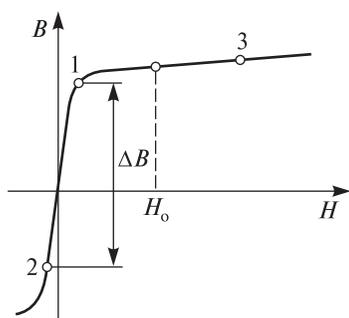


Рис. 1.27. Характеристика намагничивания пермаллоя 50НП

периода напряжение источника прикладывается к балластному резистору R_6 . Аналогично процесс протекает в отрицательный полупериод. Таким образом, выпрямленное напряжение на выходе моста будет представлять последовательность импульсов с удвоенной частотой источника 2ω . Колебания напряжения источника не сказываются на величине среднего выпрямленного напряжения U_{cp} , так как меняется только форма импульса, а вольт-секундная площадь его

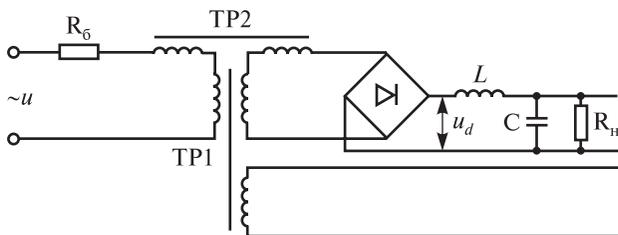


Рис. 1.28. Принципиальная схема бесконтактного тахометрического устройства

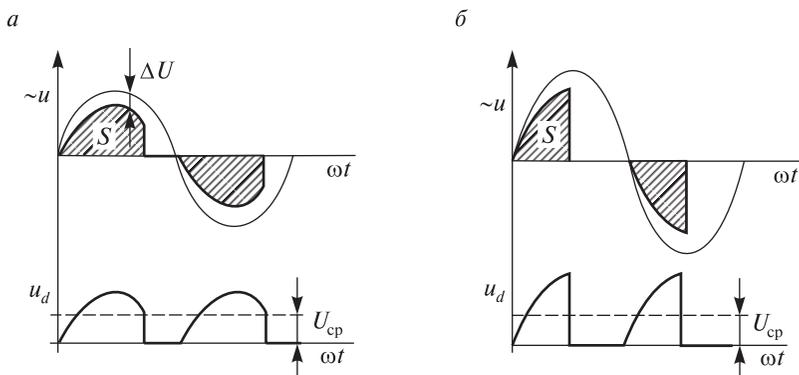


Рис. 1.29. К работе бесконтактного тахометрического устройства:
 u — напряжение возбудителя; u_d — напряжение на выходе блока БТУ;
 ωt — угловая координата

остается неизменной. При увеличении напряжения источника $\sim u$ трансформатор насыщается за меньший интервал времени и ширина импульса уменьшается, тогда как амплитуда его возрастает (рис. 1.29, б).

Очевидно, что величина среднего напряжения на выходе БТУ U_{cp} будет пропорциональна количеству импульсов в единицу времени, т.е. частоте напряжения источника.

Зависимость $U_{cp} \sim \omega$ обеспечивается трансформатором TP1 с определенной погрешностью, величина которой зависит от наклона насыщенной части характеристики намагничивания. Для устранения этой погрешности служит компенсирующий трансформатор TP2, выполненный на альсиферовом сердечнике, характеристика

намагничивания которого является прямолинейной. Благодаря встречному включению вторичных обмоток трансформаторов ТР1 и ТР2 и соответствующему выбору параметров трансформатора ТР2 напряжение на вторичной обмотке ТР1 в интервале насыщения уравнивается напряжением вторичной обмотки ТР2 и в нагрузку не проходит.

Выпрямленное напряжение на выходе блока БТУ сглаживается при помощи RLC-фильтра, который состоит из дросселя с регулируемым воздушным зазором, конденсатора и резистора (см. п. 1.7).

1.4. Датчик переменной индуктивности

Датчик переменной индуктивности (индуктивный датчик перемещения) ИД представляет собой переменную индуктивность, включенную в цепь переменного тока через выпрямительный мост. На выходе моста включен сглаживающий конденсатор С и резистора нагрузки $R_{ИД}$ (рис. 1.30).

Конструктивно датчик выполнен в виде катушки, помещенной в кольцевой корпус и залитой в нем компаундом на основе эпоксидной смолы (рис. 1.31). Внутри катушки расположен подвижный якорь. Датчик включается в схему при помощи штепсельного разъема. При перемещении якоря изменяется воздушный зазор магнитопровода датчика, который определяет индуктивность катушки (так как магнитная проницаемость воздуха несоизмеримо меньше магнитной проницаемости стального якоря). Индуктивное сопротивление катушки при увеличении перемещения якоря датчика Δl уменьшается:

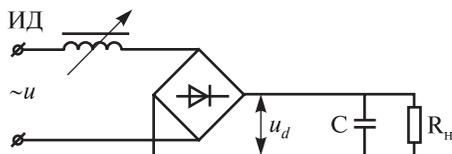


Рис. 1.30. Принципиальная схема датчика переменной индуктивности

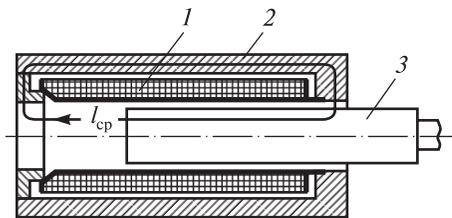


Рис. 1.31. Конструкция датчика переменной индуктивности
1 — катушка; 2 — корпус; 3 — якорь

$$L = \mu_a \frac{w^2 S}{\Delta l},$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость воздуха;
 w — число витков катушки датчика;
 S — сечение магнитопровода;
 Δl — перемещение якоря датчика.

Действующее значение тока в цепи катушки датчика

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}},$$

где U — действующее значение питающего напряжения;
 r и x — соответственно активное и индуктивное сопротивления цепи катушки;
 ω — частота питающего напряжения.

Поэтому увеличение перемещения якоря датчика Δl ведет к возрастанию тока в нагрузке.

1.5. Элементы теории релейных систем

1.5.1. Общие сведения

При разработке сложных релейных цепей применяется теория релейных систем, базирующаяся на математическом аппарате алгебры логики. Она позволяет создавать высоконадежные, совершенные релейные системы автоматического управления, в том числе на базе бесконтактных логических элементов.

Все элементы, входящие в состав релейной схемы (кнопки, реле, контакторы, электромагниты и т.д.), по выполняемым функциям могут быть разделены на следующие группы:

а) приемные элементы, воспринимающие воздействие на схему извне и являющиеся ее входами;

б) промежуточные элементы, передающие воздействие от приемных к исполнительным элементам и обеспечивающие заданный алгоритм работы схемы в целом;

в) исполнительные элементы, вырабатывающие выходные воздействия, т.е. являющиеся выходами схемы.

По характеру работы релейные устройства разделяют на одноктактные и многотактные.

Однотактные релейные устройства характеризуются тем, что состояние исполнительных элементов однозначно определяется состоянием приемных элементов в каждый данный момент времени.

В многотактных релейных устройствах предусматривается определенная последовательность поступления во времени воздействий на входы схемы, или определенная последовательность выдачи выходных воздействий, или и то и другое вместе. Поскольку в многотактных релейных устройствах каждому состоянию входов может соответствовать различное состояние выходов, то в них должны быть предусмотрены промежуточные элементы, назначение которых — изменять свое состояние при поступлении воздействий на входы, запоминая последовательность этих воздействий.

В связи с этим многотактные релейные устройства называют также релейными устройствами с памятью, а одноктактные — устройствами без памяти. Поэтому в одноктактных релейных устройствах промежуточные элементы отсутствуют.

Основными элементами релейных систем, реализующими заданный алгоритм управления работы тягового и вспомогательно-оборудования локомотива, являются электромагнитные реле и контакторы. В общем случае электромагнитное реле состоит из катушки (или нескольких катушек), якоря, замыкающих и размыкающих контактов. Контакт называется замыкающим (нормально разомкнутым), если при обесточенной катушке он разомкнут, и размыкающим (нормально замкнутым), если при обесточенной катушке он замкнут.

Общая основная характеристика реле и контактора — это характеристика управления, выражающая связь между воздействующей величиной током I и управляемой величиной напряжением U (рис. 1.32, а). При увеличении воздействующей величины до определенного значения, называемого током срабатывания $I_{\text{ср}}$, управляемая величина не изменяется, т.е. пока $I < I_{\text{ср}}$, управляемая величина $U_0 = \text{const}$. Когда управляющая величина достигает $I_{\text{ср}}$, то исполнительная часть реле производит скачкообразное изменение управляемой величины U (например, включает электрическую цепь) до значения $U_{\text{к}}$. Дальнейшее увеличение I не изменит значение U .

Не влияет на значение U и уменьшение управляющей величины I до некоторого значения, называемого параметром возврата $I_{\text{вз}}$ (тока возврата). Когда управляющая величина достигает значения $I = I_{\text{вз}}$, то исполнительная часть реле уменьшает управляемую величину до исходного значения U_0 .

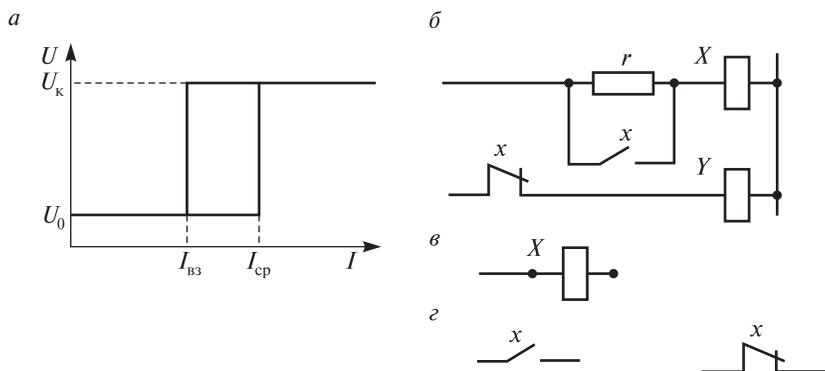


Рис. 1.32. Релейная характеристика коммутационного аппарата (а); графическое изображение электромагнитного реле на схеме (б); катушка реле (в); замыкающий контакт (г); размыкающий контакт (д)

Отношение $\frac{I_{вз}}{I_{ср}} = k_{вз}$ называется *коэффициентом возврата* реле, а зависимость $U = f(I)$ при работе реле — релейной характеристикой (см. рис. 1.32, а).

Обозначение реле и контакторов на электрических схемах выполняется в соответствии с ГОСТ 2.756, ГОСТ 2.755 и ГОСТ 2.755 (рис. 1.32, б—д) [5,6]. На электрических схемах состояние контактов реле изображаются при обесточенном состоянии их катушек.

1.5.2. Элементарные функции алгебры логики

Алгебра логики, называемая *булевой*, является алгеброй двух чисел. Каждый отдельный аргумент в алгебре логики может принимать только два значения: «истинно», условно обозначаемое 1, и «ложно», условно обозначаемое 0. Применительно к электромагнитным реле и контакторам смысловое значение символов приведено в табл. 1.1.

Следовательно, релейный элемент может рассматриваться как логический элемент, сигналы на входе и выходе которого могут принимать значения 1 и 0, а преобразование входных сигналов в выходные может выполняться по особым законам, аналогичным соответствующим законам алгебры логики.

Таблица идентификаторов состояния элементов реле с замыкающим контактом

Элемент	Символ	
	1	0
Контакт	Замкнут	Разомкнут
Катушка	Под током	Обесточена

Рассмотрим запись релейных схем в аналитической форме. Реагирующие органы (катушки реле, электромагниты, сигнальные лампы) обозначают прописными буквами X, Y, Z и т.д., замыкающие контакты — строчными буквами a, b, c , и d , а размыкающие контакты — строчными буквами с дефисом $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$, и т.д. Тогда исполнительная схема цепи катушки реле X (рис. 1.33, *a*) преобразуется в функциональную схему цепи этой катушки (рис. 1.33, *б*). Состояние же катушки выразится аналитической зависимостью:

$$f(X) = a \cdot b \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot \bar{d}.$$

Пользуясь указанным методом, можно выражать аналитически структуру схемы, содержащей не один, а несколько реагирующих органов.

Пусть схема содержит реагирующие органы X, Y, Z, \dots, W , на которые должны воздействовать контакты элементов a, b, c, \dots, q (рис. 1.34). Для каждого из элементов, реагирующие органы ко-

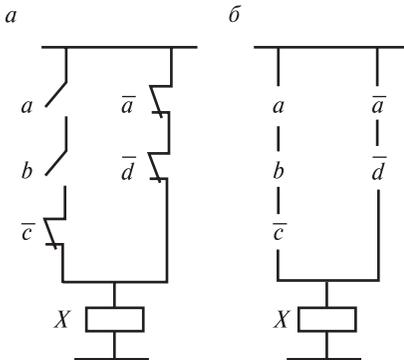


Рис. 1.33. Принципиальная релейно-контактная (*a*) и структурная (*б*) схемы цепи для аналитической записи алгоритма работы релейных систем

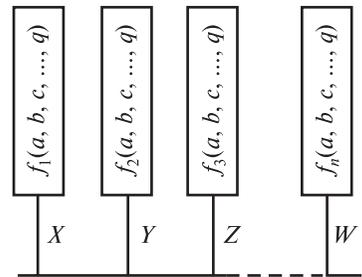


Рис. 1.34. Графическое представление аналитической записи алгоритма работы релейных систем

торых включены в схему, структурную формулу можно записать в виде:

$$\begin{cases} f(X) = f_1(a, b, c, \dots, q); \\ f(Y) = f_2(a, b, c, \dots, q); \\ f(Z) = f_3(a, b, c, \dots, q); \\ f(W) = f_n(a, b, c, \dots, q). \end{cases}$$

Пользуясь правилами аналитической записи параллельного и последовательного соединений элементов для системы структурная формула записывается как

$$F(X, Y, Z, \dots, W) = f_1(a, b, c, \dots, q)X + f_2(a, b, c, \dots, q)Y + \\ + f_3(a, b, c, \dots, q)Z + \dots + f_n(a, b, c, \dots, q)W.$$

1.5.3. Способы задания логических функций

Задание функций алгебры логики осуществляется с помощью *таблицы состояний (таблицы истинности)*. Рассмотрим этот способ на примере задания функции трех переменных $m = 3$: a , b и c (табл. 1.2), т.е. $f(y) = f_1(a, b, c)$.

Число различных комбинаций из трех аргументов равно $K = 2^m = 2^3 = 8$. При составлении таблицы ее целесообразно заполнять так, чтобы последовательность символов в каждом столбце образовывала двоичную запись номера столбца (K).

Проанализируем любой столбец, где $y = 1$, например с номером $K = 1$. Для этого столбца составим функцию в виде произведения (конъюнкции) $y_1 = a\bar{b}\bar{c}$. Эта функция принимает значение «1» тогда и только тогда, когда $a = 1$, $b = 0$ и $c = 0$ (соответственно $\bar{b} = 1$; $\bar{c} = 1$). Аналогичным образом, например, $y_3 = ab\bar{c}$, $y_4 = \bar{a}\bar{b}c$, $y_6 = \bar{a}bc$, $y_7 = abc$.

Полная запись функции y со значением «1»

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 = \bar{a}\bar{b}\bar{c} + ab\bar{c} + \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}bc + abc.$$

Таблица истинности

<i>K</i>	0	1	2	3	4	5	6	7
<i>a</i>	0	1	0	1	0	1	0	1
<i>b</i>	0	0	1	1	0	0	1	1
<i>c</i>	0	0	0	0	1	1	1	1
<i>y</i>	0	1	0	1	1	0	1	1

Такую форму записи функции называется *дизъюнктивной* (логическое умножение).

Аналитическая запись функции, заданной в табличной форме может быть задана в *конъюнктивной* форме (логического сложения). Рассмотрим столбцы, где $y = 0$:

$$y_0 = (a + b + c); \quad y_2 = (a + \bar{b} + c); \quad y_5 = (\bar{a} + b + \bar{c}).$$

Эти функции обращаются в 0 только при указанных в таблице значениях аргументов. Следовательно, полную функцию можно записать в виде

$$y = y_0 y_2 y_5 = (a + b + c) \cdot (a + \bar{b} + c) \cdot (\bar{a} + b + \bar{c}).$$

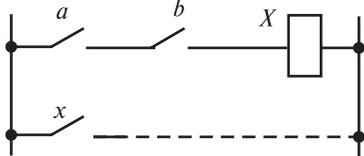
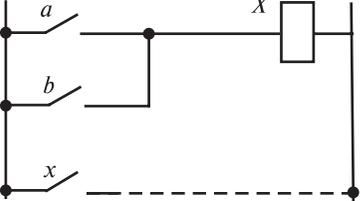
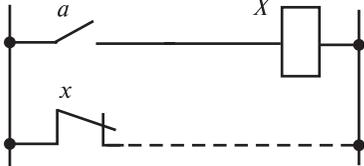
Обе формы записи логических функций являются равносильными.

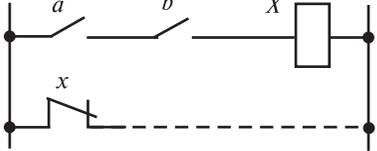
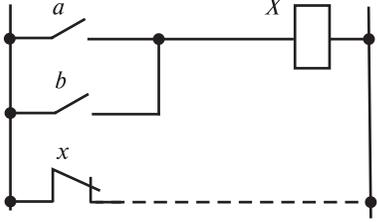
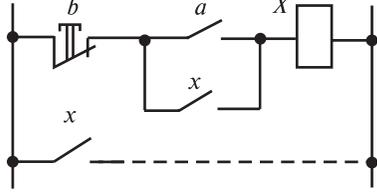
1.5.4. Бесконтактные логические элементы

С помощью логических операций *И*, *ИЛИ*, *НЕ*, *ПОВТОРЕНИЕ*, *И — НЕ*, *ИЛИ — НЕ*, *ПАМЯТЬ* можно реализовать любой алгоритм работы системы управления. В табл. 1.3 приведены релейные схемы, выполняющие логические операции релейных систем.

Существенным недостатком схем, реализуемых на контактных элементах, является их высокие массо-габаритные показатели и неизбежные коммутационные перенапряжения в схеме, возникающие при замыкании и размыкании контактов. Это привело к тому, что в последнее время все большее применение в системах управления находят бесконтактные транзисторные или цифровые логические элементы.

Таблица соответствия логических операций исполнительным схемам

Название оператора	Реализуемая функция, таблица истинности	Релейная схема оператора															
1	2	3															
И конъюнкция (логическое умножение)	$x = ab$ <table border="1" data-bbox="314 349 554 538"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>x</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	a	b	x	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	
a	b	x															
0	0	0															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	1															
ИЛИ дизъюнкция (логическое сложение)	$x = a + b$ <table border="1" data-bbox="314 606 554 795"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>x</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	a	b	x	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	
a	b	x															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	1															
НЕ инверсия (отрицание)	$x = \bar{a}$ <table border="1" data-bbox="352 886 519 991"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>x</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	a	x	0	1	1	0										
a	x																
0	1																
1	0																
ПОВТОРЕНИЕ	$x = a$ <table border="1" data-bbox="352 1090 519 1195"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>x</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	a	x	0	0	1	1										
a	x																
0	0																
1	1																

1	2	3															
<p><i>И–НЕ</i> (штрих Шеффера)</p>	$x = \overline{ab}$ <table border="1" data-bbox="323 247 563 450"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>x</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>x</i>	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>x</i>															
0	0	1															
1	0	1															
0	1	1															
1	1	0															
<p><i>ИЛИ–НЕ</i> (стрелка Пирса)</p>	$x = \overline{a + b}$ <table border="1" data-bbox="323 530 563 733"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>x</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>x</i>	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>x</i>															
0	0	1															
1	0	0															
0	1	0															
1	1	0															
<p><i>ПАМЯТЬ</i></p>	$x = (a + x)\overline{b}$																

1.6. Основные элементы преобразовательной техники

Основными элементами преобразовательной техники являются нелинейные элементы — *вентили*, *вольт-амперные характеристики (ВАХ)* которых (зависимости между током, проходящим через элемент, и приложенным к нему напряжением) приближаются к идеализированной ВАХ ключевого или релейного типа (рис. 1.35). Элементы с такими ВАХ имеют два явно выраженных состояния: включенное, соответствующее высокой проводимости, и выключенное, соответствующее низкой проводимости. В настоящее время функции ключевых элементов в преобразователях выполняют

полупроводниковые приборы, представляющие собой сочетание полупроводящих слоев с различными типами проводимости. В качестве основных полупроводниковых материалов получили распространение кремний и германий; добавление в них примесей различных веществ (например, алюминий и бор) изменяет характер проводимости полупроводника, в котором начинает преобладать либо электронная (n -типа) проводимость, либо дырочная (p -типа).

Кремниевый p - n -переход имеет более высокие допустимые значения обратного напряжения, плотности тока и температуры нагрева (140—200 °С), чем германиевый, допустимая температура которого составляет всего 70—80 °С. Поэтому кремниевые полупроводники получили большее распространение. Недостатком кремниевых вентиляей являются относительно высокие значения динамического сопротивления, однако при высоком рабочем напряжении их КПД больше германиевых.

По принципу действия полупроводниковые приборы подразделяются на три основные группы: *диоды (неуправляемые вентили)*, *тиристоры (управляемые вентили)* и *транзисторы*.

Основной недостаток полупроводниковых элементов — их низкая перегрузочная способность по току и напряжению — обычно компенсируется выбором элементов с запасом и применением специальной защиты.

При последовательном и параллельном соединениях вентиляей из-за несовпадения их ВАХ возникают неравномерные распределения напряжений или токов между отдельными вентилями. Так, в схемах с последовательно соединенными вентилями (рис. 1.36, *а*) из-за разницы ВАХ при одинаковом значении обратного тока $i_{обp}$ приложенное к ним обратное напряжение распределяется неравномерно: к вентилю V_1 прикладывается напряжение u_1 , а к вентилю V_2 — напряжение u_2 (рис. 1.36, *б*). Для выравнивания напряжений используются шунтирующие резисторы $R_{ш}$, включенные параллельно вентилям (рис. 1.34, *в*). Значения шунтирующих резисторов

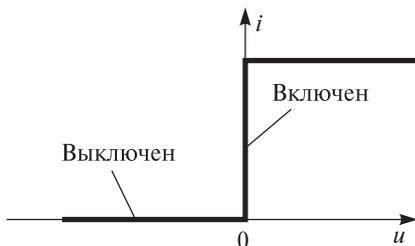


Рис. 1.35. ВАХ идеального ключевого элемента

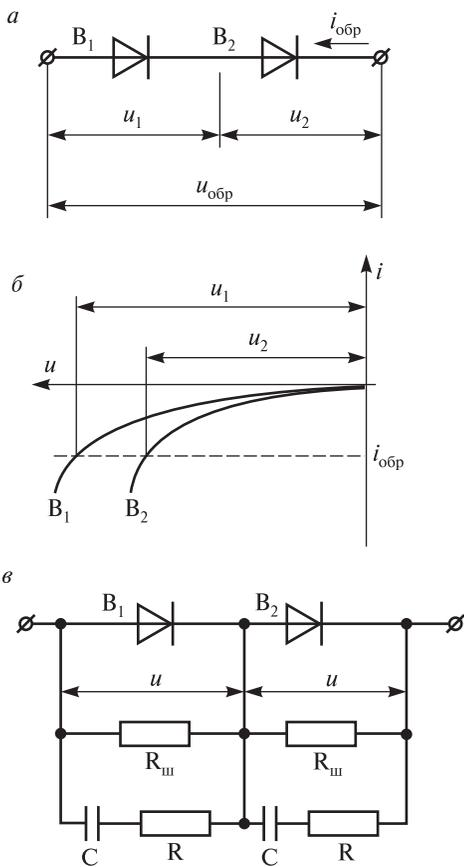


Рис. 1.36. Защита вентилях от неравномерности распределения напряжений

делители (рис. 1.37, в). Делитель может состоять из двух реакторов, вторичные обмотки которых соединены между собой. Принцип действия делителя основан на том, что магнитодвижущие силы первичных и вторичных обмоток реакторов должны быть между собой уравновешены. Поскольку через вторичные обмотки реакторов протекает один ток, токи первичных обмоток (токи вентилях) также должны быть равны между собой. При возникновении дисбаланса токов вентилях в реакторах будет возникать неуравнове-

определяют по зависимости [7, 8]:

$$R_{ш} \leq \frac{nU - U_{\max}}{(n-1)(I_m)_{обр}},$$

где n — число последовательно соединенных вентилях;

U — наибольшее допустимое напряжение вентилях;

U_{\max} — максимальное суммарное напряжение, приложенное к вентилях;

$(I_m)_{обр}$ — наибольший обратный ток (амплитудное значение).

Для выравнивания напряжений в переходных режимах параллельно вентилях включают конденсаторы с резисторами (RC-цепи) (см. рис. 1.36, в).

При параллельном соединении вентилях, протекающий по ним прямой ток i при одинаковых прямых падениях напряжения $u_{пр}$, распределяется неравномерно (рис. 1.37, а, б). Для выравнивания токов вентилях используют индуктивные делители

шенный магнитный поток, который создаст в первичных обмотках ЭДС выравняющие токи вентиляей.

Индуктивные делители эффективны для выравнивания токов в переходных режимах, или когда по вентилям протекают пульсирующие токи, изменяющиеся по величине. Если же по вентилям будет длительно протекать постоянный ток, то магнитопровод делителя насытится и выравнивание тока прекратится. Для выравнивания установившегося тока между параллельно включенными вентилями их подбирают по прямым падениям напряжений $u_{\text{пр} B_1} \approx u_{\text{пр} B_2}$.

1.6.1. Диоды

Вольт-амперная характеристика диода имеет прямую А и обратную Б ветви (рис. 1.38). Прямая ветвь диода соответствует проводящему состоянию, практически линейна и характеризуется малым значением падения напряжения на *p-n*-переходе:

$$\Delta U = U_0 + r_d I,$$

где U_0 — пороговое напряжение, необходимое для открытия вентиля (определяется криволинейным участком прямой ветви ВАХ);

$$r_d = \frac{\Delta U_{\text{ном}} - U_0}{I_{\text{ном}}} = \text{ctg} \gamma \quad \text{— динамическое сопротивление открытого диода,}$$

определяемого линейной частью прямой ветви ВАХ;

$I_{\text{ном}}, \Delta U_{\text{ном}}$ — значения номинального тока диода и прямого падения напряжения на нем.

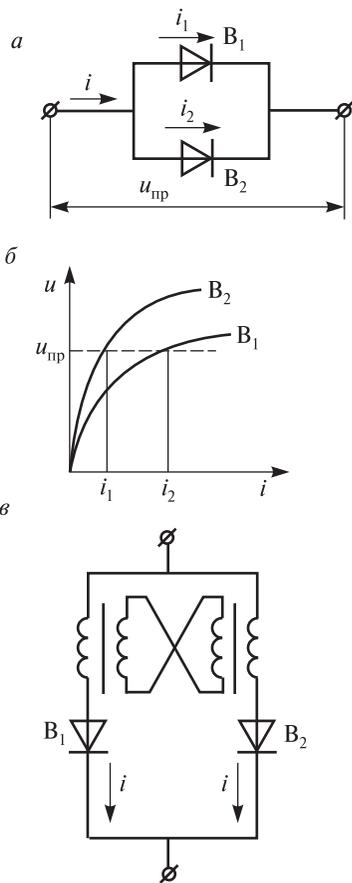


Рис. 1.37. Защита вентиляей от неравномерности распределения токов

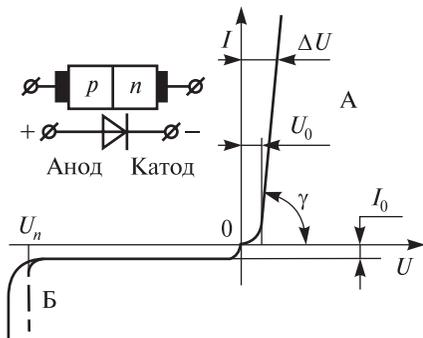


Рис. 1.38. ВАХ диода

порядков превышают значения I_0 и ΔU , поэтому для прямой и обратной ветвей ВАХ принимают разные масштабы. Обратная ветвь ВАХ диода описывается зависимостью:

$$I = I_0 g_d U,$$

где I_0 — пороговый обратный ток;

g_d — динамическая обратная проводимость.

Разновидностью выпрямительных диодов являются лавинные диоды. Лавинным диодом называется диод с контролируемым напряжением лавинообразования. При воздействии обратного напряжения, большего, чем напряжение пробоя, происходит резкое возрастание обратного тока через диод. Этот ток распределяется равномерно по поверхности p - n -перехода, а не сосредотачивается в отдельных точках, как у выпрямительного диода. Поэтому не происходит местного теплового пробоя, а наступает равномерный лавинный пробой, т.е. электрический разряд через диод. При таком разряде напряжение на диоде поддерживается на прежнем уровне и в p - n -переходе может выделяться энергия значительно большая, чем в обычных диодах. Таким образом, лавинные диоды способны выдерживать напряжение лавинообразования, вследствие чего перенапряжения прикладываются к другим элементам электрической цепи, менее чувствительным к ним.

Значения U_0 для диодов составляет 0,8–1,5 В; в зависимости от значений $I_{\text{НОМ}}$ динамическое сопротивление $r_d = (15-1500) \cdot 10^{-5}$ Ом.

Обратная ветвь ВАХ соответствует непроводящему состоянию диода и представляет собой зависимость обратного тока (тока утечки) I , от обратного напряжения U , приложенного к диоду. Прямой ток и обратное напряжение на диоде на несколько

Основу лавинного диода составляет кремниевый выпрямительный элемент, заключенный в герметичный корпус. Конструкция лавинного диода примерно такая же, как у обычного силового диода.

Наличие лавинных свойств диодов позволяет применять их в качестве элементов защиты цепей от импульсных перенапряжений, в том числе непосредственно в схеме выпрямителей. В последнем случае выпрямители на этих диодах надежно работают в условиях коммутационных перенапряжений, возникающих в индуктивных цепях в момент включения, выключения сети питания или нагрузки.

Охлаждение диодов может быть естественным и принудительным. При принудительном воздушном охлаждении поток воздуха в каналах охладителя диода должен иметь скорость не ниже 12 м/с при температуре не выше 40 °С. При водяном охлаждении по охладителям пропускается вода с температурой до 30 °С и расходом 3—4 л/мин.

Номинальные параметры диода наносят на его корпусе. К ним относятся:

1. Номинальный ток $I_{\text{НОМ}}$ — средний за период прямой ток, проходящий через диод, который при заданных условиях охлаждения нагревает его до номинальной температуры. В настоящее время выпускаются силовые лавинные диоды в таблеточном корпусе с $I_{\text{НОМ}} = 320\text{—}4000$ А. Значения $I_{\text{НОМ}}$ обычно устанавливаются при принудительном охлаждении; в случае естественного охлаждения диода значение $I_{\text{НОМ}}$ должно быть уменьшено в 3—4 раза.

2. Номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}}$, которое длительно может быть приложено к диоду в обратном направлении. Значение $U_{\text{НОМ}}$ составляет часть напряжения пробоя вентиля U_n : $U_{\text{НОМ}} = m U_n$. Коэффициент технологического запаса m обычных вентилях принимается равным 0,5, иначе может наступать необратимый пробой. Для лавинных вентилях коэффициент технологического запаса $m = 0,8$. В настоящее время выпускаются силовые лавинные диоды в таблеточном корпусе с $U_{\text{НОМ}} = 400\text{—}4500$ В. Номинальное напряжение характеризуется классом вентиля, который представляется как число сотен вольт номинального напряжения, $\frac{U_{\text{НОМ}}}{100}$.

Технические характеристики силовых диодов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Силовые полупроводниковые приборы

Тип прибора	Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} , В	Повторяющийся импульсный обратный ток I_{RRM} , мА	Максимально допустимый средний прямой ток $I_{F(AV)}$, А	Ударный прямой ток в течение 10 мс I_{FSM} , А
1	2	3	4	5
Диоды выпрямительные штывевого исполнения				
Д171-400	300—1899	50	400	760
Д222-32	100—1600	5	32	50
Д232-80	100—1600	6	80	125
Диоды выпрямительные таблеточного исполнения				
Д183-6300	1200—2200	250	6590	90
Д253-1600	400—2200	90	2420	35
Лавинные диоды штывевого исполнения				
ДЛ161-200	400—1800	25	200	280
ДЛ171-320	400—1800	25	320	600
Лавинные диоды таблеточного исполнения				
ДЛ153-2000	2200—3200	50	2000	30
ДЛ173-4000	1600—2400	100	3860	50
Тиристоры низкочастотные штывевого исполнения				
Тип прибора	Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} , В	Повторяющийся импульсный обратный ток I_{RRM} , мА	Максимальный средний ток в открытом состоянии $I_{T(AV)}$, А	Ударный ток в открытом состоянии в течении 10 мс I_{TSM} , А
Т161-160	300—1800	15	160	260
Т171-320	300—1800	30	320	500
Т222-20	100—1300	3,5	20	31,4
Т232-50	100—1300	5	50	78,5

1	2	3	4	5
ГТО тиристоры				
Тип прибора	Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} , В	Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии U_{DRM} , В	Максимальный средний ток в открытом состоянии $I_{T(AV)}$, А	Ударный ток в открытом состоянии в течении 10 мс I_{TSM} , А
5SGA 15F2502	17	2500	570	10 000
5SGA 25H2501	17	2500	830	16 000
5SGA 30J2501	17	2500	1300	30 000
5SGA 06D4502	17	4500	195	3000
5SGA 20H4502	17	4500	710	13 000
5SGA 30J4502	17	4500	930	24 000
5SGA 40L4501	17	4500	1000	25 000
IGBT-транзисторы				
Тип прибора	Напряжение коллектор—эмиттер U_{CES} , В	Максимальный ток коллектора I_C , А	Напряжение насыщения коллектор—эмиттер $U_{CE(sat)}$, В	Тепловое сопротивление корпус—переход $R_{th(j-c)}$, °K/Вт
FZ1200R12KE3	1200	1200	1,7	0,022
FZ1600R12KE3	1200	1600	1,7	0,016
FZ1800R12KL4C	1200	1800	2,1	0,011
FZ2400R12KE3	1200	2400	1,7	0,0125

1.6.2. Транзисторы

В зависимости от принципа действия и конструктивных признаков транзисторы подразделяются на два класса: биполярные и полевые.

Биполярные транзисторы. Основу транзистора составляют два электронно-дырочных перехода *p-n-p*-типа или *n-p-n*-типа. При

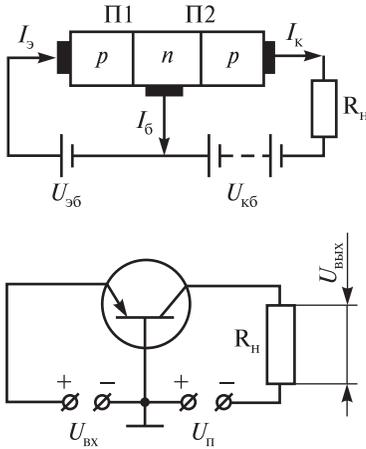


Рис. 1.39. Схема транзистора с общей базой

использовании транзистора $p-n-p$ -типа в качестве усилительного элемента его переход П1 включается в прямом направлении и называется *эмиттерным*, а переход П2 — в обратном направлении и называется *коллекторным*. Поэтому левая область с проводимостью p -типа называется *эмиттером*, а правая — *коллектором*; средняя область называется *базой* (рис. 1.39). Если потенциал эмиттера по отношению к базе равен нулю ($U_{эб} = 0$), то под действием напряжения $U_{кб}$ через смещенный в обратном направлении переход П2 от коллектора к базе будет протекать незначительный обратный ток $I_{к0}$.

Если между эмиттером и базой приложить напряжение $U_{эб} \ll U_{кб}$, то через открытый переход П1 будет протекать значительный ток $I_э$, образуемый основными носителями заряда — дырками. Одновременно основные носители заряда базовой области — электроны — будут проходить через переход П1 в эмиттер, создавая электронную составляющую тока $I_б$, значение которого составляет не более 1 % $I_э$. Так как концентрация дырок в эмиттере на несколько порядков больше концентрации электронов в базе, то основная их часть, проходя в базовую область, достигает коллекторного перехода, где под действием более сильного поля будет выноситься в коллектор. В результате в цепи коллектор—база создается выходной ток $I_к$, определяемый напряжением, приложенным между эмиттером и базой, и, следовательно, током базы $I_б$, являющимся входным.

При использовании в транзисторах перехода $n-p-n$ -типа полярности источников в схеме его включения должны быть обратными.

Пренебрегая обратным током коллекторного перехода $I_{к0}$, можно записать (см. рис. 1.39):

$$I_к = I_э - I_б; \quad I_к = I_э \left(1 - \frac{I_б}{I_э} \right) = \alpha I_э, \quad (1.12)$$

где $\alpha = 1 - \frac{I_{\bar{6}}}{I_{\bar{3}}} = K_I$ — коэффициент усиления тока.

Рассмотренная схема включения транзистора называется *схемой с общей базой*, поскольку база является общей как для входной, так и для выходной цепи. Коэффициент усиления тока транзистора, включенного по этой схеме $\alpha = 0,9 - 0,995$, т.е. усиления тока эта схема не дает. Но так как $U_{к\bar{6}} \gg U_{\bar{3}\bar{6}}$, то при определенных значениях сопротивления нагрузки R_H будет иметь место усиление напряжения и мощности.

Основной схемой для усиления тока является *схема включения транзистора с общим эмиттером* (рис. 1.40, а). Для такой схемы

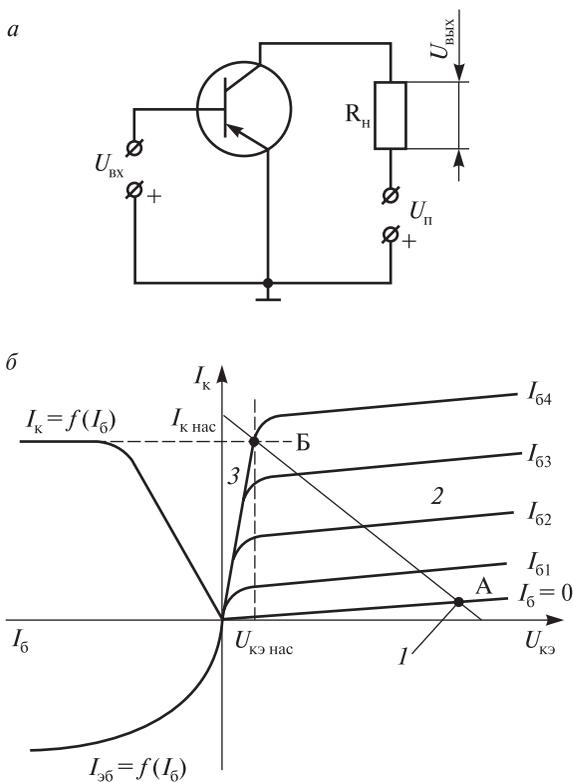


Рис. 1.40. Схема транзистора с общим эмиттером (а) и его характеристики (б)

входной величиной является ток базы I_6 , а выходной — ток коллектора $I_к$. С учетом (1.12) и того, что $\alpha = 1 - \frac{I_6}{I_э}$ или $\frac{I_6}{I_э} = 1 - \alpha$ можно записать:

$$I_к = I_э - I_6 = I_6 \left(\frac{I_э}{I_6} - 1 \right) = I_6 \left(\frac{1}{1 - \alpha} - 1 \right) = I_6 \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta I_6,$$

где $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$.

Коэффициент усиления по току транзистора в схеме с общим эмиттером $K_I = \beta$. Поскольку $\alpha = 0,9 - 0,995$ величина $\beta = 10 - 100$, т.е. в схеме с общим эмиттером имеет место усиление тока, напряжения и, соответственно, мощности.

Выходные ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером являются зависимости $I_к = f(U_{кэ})$ при $I_6 = \text{const}$, представленные в первом квадранте графика на рис. 1.40, б. При наличии в коллекторной цепи сопротивления нагрузки $R_н$ напряжение между эмиттером и коллектором будет равно

$$U_{кэ} = U_{\Pi} - I_к R_н$$

и определяется по нагрузочной прямой АБ, нанесенной на поле ВАХ. Точки пересечения нагрузочной прямой с ВАХ транзистора позволяют построить зависимость $I_к = f(I_6)$, изображенную во втором квадранте. Угол наклона этой кривой к оси абсцисс определяет значение *коэффициента усиления тока* схемы. В третьем квадранте (см. рис. 1.40, б) приведена входная характеристика схемы, представляющая собой зависимость $U_{кэ} = f(I_6)$.

Различают два режима работы транзистора: активный и ключевой. В *активном* режиме схема работает как усилитель; этому режиму соответствует область 2 поля ВАХ. *Ключевой* режим определяется двумя состояниями транзистора: состоянием отсечки и состоянием насыщения. Состояние *отсечки* (область 1) соответствует $I_6 = 0$. В этом состоянии практически все питающее напряжение U_{Π} приложено к транзистору и ток в цепи нагрузки незначителен.

Состояние *насыщения* (область 3) определяется точкой Б и характеризуется максимальным для данного сопротивления нагрузки током $I_{к \max}$ и малым значением остаточного напряжения $U_{кэ \text{ нас}}$.

Для перевода транзистора в это состояние ток базы должен быть не менее $I_{б1}$.

В схеме с общим коллектором (рис. 1.41) выходным током является ток эмиттера $I_э$, а входным — ток базы $I_б$. На основании (1.12) для этой схемы можно записать:

$$I_э = I_к + I_б = I_б \left(\frac{I_к}{I_б} + 1 \right) = I_б \left(\frac{I_э - I_б}{I_б} + 1 \right) = I_б \frac{I_э}{I_б} = I_б \frac{1}{1 - \alpha} = I_б (\beta + 1).$$

Коэффициент усиления по току

в этой схеме $K_I = \frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1$.

Так как выходное напряжение меньше входного на величину падения напряжения на переходе эмиттер—база, то $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{эб}}$. Следовательно, в схеме включения транзистора с общим коллектором коэффициент усиления напряжения $K_U < 1$.

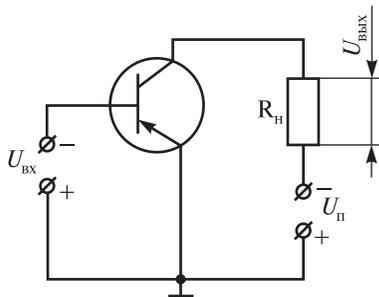


Рис. 1.41. Схема транзистора с общим коллектором

Полевые транзисторы. Принцип

работы полевых транзисторов основан на модуляции сопротивления полупроводникового материала поперечным электрическим полем [9]. В создании электрического тока этих транзисторов участвуют носители только одного типа (электроны или дырки). Полевые транзисторы бывают двух типов: с управляющим *p-n*-переходом и со структурой металл—диэлектрик—полупроводник — *МДП-транзисторы*.

Транзисторы с управляющим p-n-переходом представляют собой пластину из полупроводникового материала с тремя выводами: два вывода — *сток* и *исток* — образуют канал, по которому протекает электрический ток через *p-n*-переход (или барьер Шотки), а к третьему выводу — *затвору* — прикладывается напряжение, которое смещает *p-n*-переход в обратном направлении (рис. 1.42, а, б, в). Увеличение приложенного к затвору обратного напряжения $U_{\text{зи}}$ приводит к повышению электрического сопротивления канала. Канал может быть почти полностью перекрыт и тогда сопротивление между истоком и стоком будет очень высоким (десятки МОм).

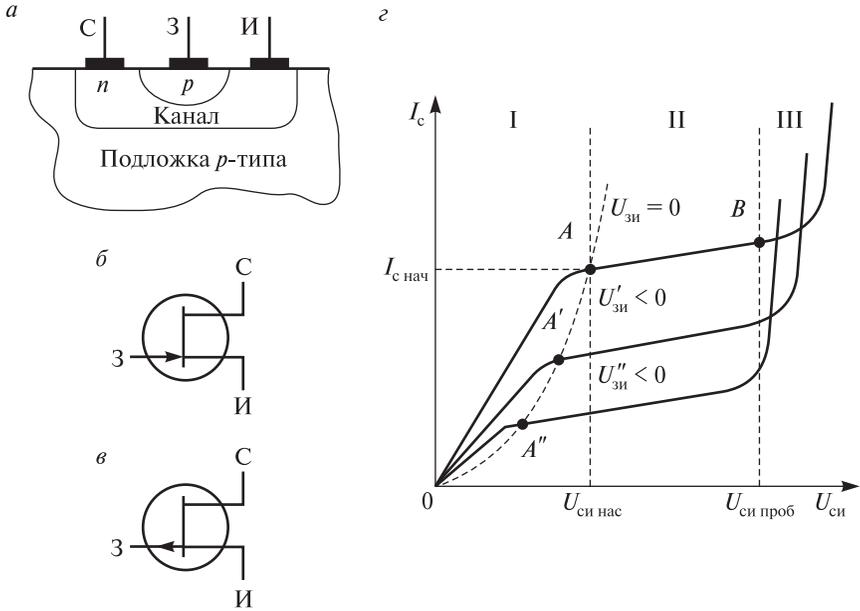


Рис. 1.42. Типовая структура (а) и условные обозначения полевого транзистора, имеющего канал n -типа (б) и p -типа (в); ВАХ полевого транзистора с управляющим p - n -переходом (г)

Напряжение между затвором и истоком, при котором ток стока достигает заданного минимального значения $I_c \rightarrow 0$, называют *напряжением отсечки полевого транзистора* $U_{зи\text{ отс}}$ (рис. 1.43).

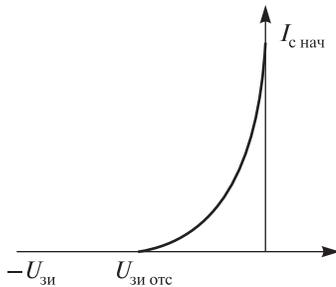


Рис. 1.43. Характеристика полевого транзистора (стокзатворная)

При малых значениях напряжения на канале $U_{си}$ и тока через канал I_c выходная характеристика транзистора $I_c = f(U_{си})$ линейна как у сопротивления (область I на рис. 1.42, г). С ростом $U_{си}$ характеристика отклоняется от линейной из-за сужения канала у стокового вывода транзистора, и в точке A наступает режим насыщения, когда с дальнейшим увеличением $U_{си}$ ток стока I_c через канал практически не меняется (область II на рис. 1.42, г). Напряжение, при котором наступает режим насыще-

ния, называется *напряжением насыщения*. Его значение меняется при изменении напряжения на затворе $U_{зи}$. Крутизна характеристики полевого транзистора уменьшается при увеличении напряжения, приложенного к его затвору. Ток стока при $U_{зи} = 0$ и напряжении на канале $U_{си \text{ нас}}$ называется *начальным током стока* $I_{с \text{ нач}}$.

В случае значительного увеличения напряжения $U_{си}$ за точку B стокового вывода наблюдается пробой p - n -перехода (область III на рис. 1.42, z). Напряжение, при котором наступает пробой перехода транзистора, называется *напряжением пробоя* $U_{си \text{ проб}}$.

В выходной характеристике полевого транзистора можно выделить две рабочие зоны: область I (участок OA) — крутая область; область II (участок AB) — область насыщения. В крутой области транзистор можно использовать как омическое сопротивление; в усилительных каскадах транзистор работает в области насыщения.

Современные полевые транзисторы, выполненные на основе кремния, работоспособны до температуры 150°C . Основными их преимуществами являются высокое входное сопротивление на затворе ($R_{вх} = 10^7$ — 10^9 Ом) и простота изготовления.

Еще большее значение входного сопротивления имеют МДП-транзисторы, у которых входное сопротивление достигает $R_{вх} = 10^{10}$ — 10^{14} Ом (рис. 1.44, a). У них, в отличие от транзисторов с p - n -переходом, металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод от кристалла, на котором выполнен прибор, называемый *подложкой* П. МДП-транзисторы могут быть двух типов: с встроенным каналом — канал формируется при изготовлении транзистора, и с индуцированными каналами — канал образуется под действием напряжения, приложенного к управляющему электроду. Напряжение на затворе МДП-транзистора с индуцированным каналом, при котором образуется (индуцируется) канал, называется *пороговым напряжением* $U_{си \text{ пор}}$.

В транзисторах с встроенным каналом ток в цепи стока будет протекать и при нулевом напряжении на затворе. Для прекращения его необходимо к затвору приложить положительное напряжение (при канале p -типа), большее напряжения отсечки $U_{зи \text{ отс}}$. При приложении отрицательного напряжения канал увеличивается и ток возрастает.

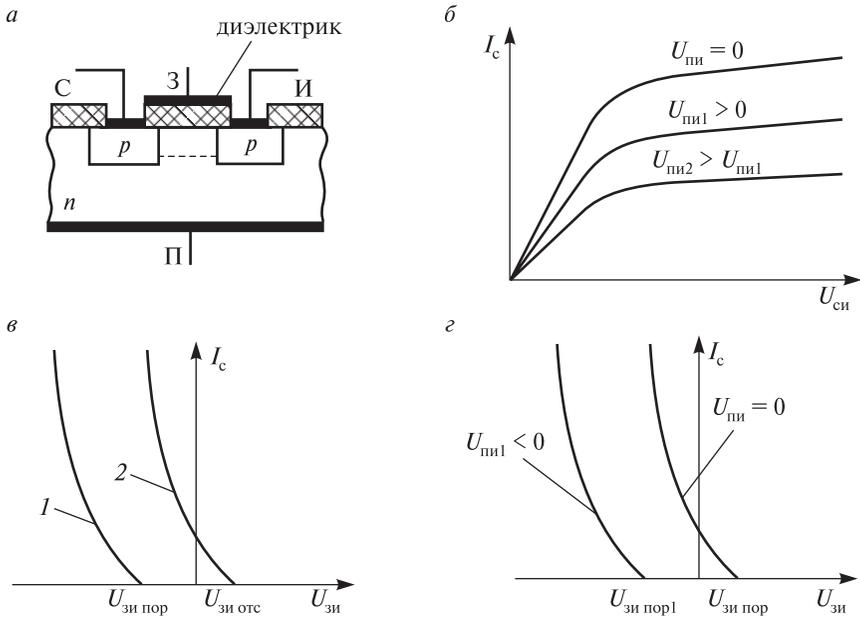


Рис. 1.44. Типовая структура МДП-транзистора (а) и его выходные характеристики:

при различных напряжениях на подложке (б); стокзатворные с индуцированным и встроенным каналами (в); при различных напряжениях на подложке и $U_{си} = \text{const}$ (г); 1 — при индуцированном канале; 2 — при встроенном канале

Управляющее напряжение на МДП-транзистор можно подавать как между затвором и подложкой, так и независимо на подложку и затвор. Под влиянием образующегося электрического поля у поверхности полупроводника образуется канал p -типа толщиной 1–5 нм. За ним следует участок толщиной сотни-тысячи нм, обедненный основными носителями (p - n -переход). Этот участок изолирует сток, исток и канал от подложки. Его ширину и ширину канала можно изменять за счет подачи на подложку дополнительного управляющего напряжения относительно электродов стока и истока. Изменение ширины канала меняет сопротивление и ток транзистора.

Выходные характеристики МДП-транзисторов аналогичны характеристикам транзисторов с управляющим p - n -переходом; в них можно выделить крутую область, область насыщения и область

пробоя (рис. 1.42, *з*). Однако при изменении напряжения на подложке выходные характеристики МДП-транзистора смещаются: на рис. 1.44, *б*, приведены выходные характеристики при различных значениях напряжения на подложке, из которых видно, что при увеличении напряжения на подложке $U_{\text{пи}}$ сопротивление канала увеличивается и ток I_c уменьшается.

Стокзатворные характеристики МДП-транзисторов наглядно показывают влияние напряжения $U_{\text{зи}}$ на значение тока стока I_c при индуцированных и встроенных каналах (рис. 1.44, *в*), а так же сильное влияние напряжения на подложке $U_{\text{пи}}$ на пороговое напряжение транзистора (см. рис. 1.44, *з*).

В настоящее время получили распространение МДП-транзисторы с диэлектриком из диоксида кремния SiO_2 , которые называются МОП-транзисторы. Они могут иметь два изолированных затвора, что позволяет управлять током транзистора с помощью двух управляющих напряжений. Характеристики двухзатворных полевых транзисторов аналогичны характеристикам однозатворных, так как они строятся для напряжения каждого затвора при постоянном напряжении на другом затворе; подача напряжений на затворы аналогична подаче напряжения на затвор однозатворного МОП-транзистора.

Основные характеристики полевых транзисторов общего назначения:

- постоянный ток стока: $I_{c \text{ max}} = 10\text{--}700 \text{ мА}$;
- начальный ток стока (при $U_{\text{зи}} = 0$): $I_{c \text{ нач}} = 0,2\text{--}600 \text{ мА}$ — у транзисторов с управляющим *p-n*-переходом; $I_{c \text{ нач}} = 0,1\text{--}100 \text{ мА}$ — у МДП-транзисторов с встроенным каналом; $I_{c \text{ нач}} = 0,01\text{--}0,5 \text{ мкА}$ — у МДП-транзисторов с индуцированным каналом;
- напряжение отсечки: $U_{\text{зи отс}} = 0,2\text{--}10,0 \text{ В}$;
- пороговое напряжение: $U_{\text{пи пор}} = 1,0\text{--}6,0 \text{ В}$;
- сопротивление сток—исток в открытом состоянии: $R_{\text{си отк}} = 2\text{--}300 \text{ Ом}$.

1.6.3. Тиристоры

Мощными управляемыми полупроводниковыми приборами, отличающимися от транзисторов очень высокими значениями коэффициентов усиления управляющего сигнала (более 1000), а также большими значениями рабочих токов и напряжений, являются ти-

ристоры. Основу управляемого вентиля (тиристора) образует четырехслойная структура $p-n-p-n$ -типа (или $n-p-n-p$ -типа) (рис. 1.45, а). Прибор имеет три вывода: *анод А*, *катод К* и *управляющий электрод УЭ*. Электрод, соединенный с крайней p -областью, является анодом, а электрод, соединенный с крайней n -областью, — катодом. При указанной на рис. 1.45, а, полярности напряжения переходы П1 и П3 будут включены в прямом направлении, а переход П2 — в обратном. При отсутствии управляющего сигнала тиристор заперт, а напряжение источника приложено к переходу П2. В пределе переключение $p-n-p-n$ -структуры из закрытого состояния в открытое может быть достигнуто простым увеличением напряжения между анодом и катодом до значения $U_a \geq U_{пр}$ (рис. 1.45, б), однако это

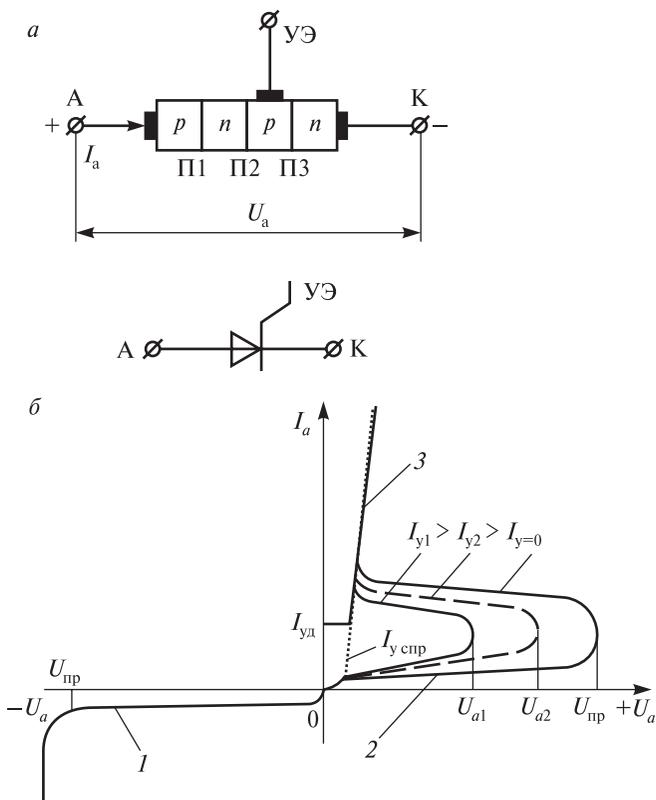


Рис. 1.45. Полупроводниковый тиристор (а) и его ВАХ (б)

соответствует аварийным режимам работы тиристора. Если к тиристорному приложить прямое напряжение и обеспечить протекание тока управления I_y через переход ПЗ, значение напряжения переключения уменьшается, и тем сильнее, чем большее значение будет иметь ток управления.

Проводящее состояние тиристора, вызванное протеканием тока I_y сходно с состоянием транзистора, работающего в ключевом режиме, с той лишь разницей, что тиристор остается в проводящем состоянии и при отключении тока I_y .

При определенном значении I_y прямая ветвь ВАХ становится такой же, как у обычных неуправляемых вентилях; значение тока, соответствующее этому режиму, называется *током управления спрямления* $I_{y,спр}$.

Для перевода тиристора в запертое состояние необходимо обеспечить спадание протекающего через него прямого анодного тока до значения тока удержания: $I_a \leq I_{уд}$. Однако, для того чтобы тиристор мог восстановить свои запирающие свойства по отношению к прямому напряжению, необходимо некоторое время на восстановление его запирающей способности, обусловленное процессом рекомбинации носителей в области среднего перехода.

При обратной полярности напряжения переходы П1 и ПЗ будут включены в обратном направлении, а переход П2 — в прямом; этому включению соответствует обратная ветвь ВАХ (см. рис. 1.45, б), аналогичная обратной ветви характеристики диода.

Кроме номинальных значений прямого тока и обратного напряжения, тиристоры характеризуются рядом других параметров:

— время включения $t_{вкл}$ и время выключения $t_{выкл}$; обычно $t_{вкл} \leq 30$ мкс, а $t_{выкл} = 200 - 250$ мкс (собственное время срабатывания быстродействующих электромагнитных реле составляет 1—5 мс, а контакторов — 20—400 мс);

— критическая скорость нарастания прямого напряжения $\frac{dU_a}{dt}$; в связи с тем, что коллекторный переход тиристора обладает емкостью C , зарядный ток $i_3 = C \frac{dU_a}{dt}$ существенно снижает напряжение переключения $U_{пр}$, поэтому при превышении допустимой скорости нарастания напряжения 10—500 В/с возможны ложные включения тиристоры;

– критическая скорость нарастания прямого тока $\frac{dI_a}{dt}$; в связи с неравномерным распределением тока по площади структуры при включении тиристора чрезмерная скорость нарастания I_a может вызвать быстрый разогрев структуры в зоне управляющего электрода и ее разрушение, это заставляет ограничивать $\frac{dI_a}{dt}$ значениями порядка 20–50 А/с.

Одна из важнейших характеристик тиристоров — характеристика управления $U_y = f(I_y)$ (рис. 1.46). Ее представляют в виде диаграммы управления, где нанесены граничные ВАХ тиристора. Значения $U_{y \min}$ и $I_{y \min}$ соответствуют минимальным для данной температуры структуры значениям U_y и I_y , при которых происходит открытие любого тиристора данного типа.

Диаграмма управления ограничена характеристиками максимально допустимых напряжения $U_{y \max}$, тока $I_{y \max}$ и мощности потерь $P_{y \max}$, создаваемых током управления. Значение $P_{y \max}$ зависит от относительной длительности управляющего импульса:

$$\gamma = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{и}}},$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса;
 $T_{\text{и}}$ — период следования импульсов.

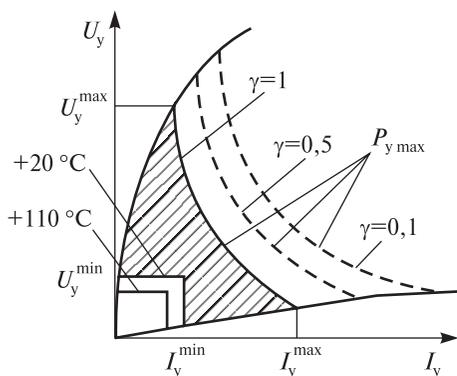


Рис. 1.46. Характеристики управления тиристоров

Таким образом, напряжения и токи, необходимые для управления тиристором, определяются областью диаграммы управления, ограниченной значениями $U_{y \min}$, $I_{y \min}$ и гиперболой максимально допустимой мощности управления $P_{y \max}$.

Технические характеристики силовых тиристоров, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 1.4.

1.6.4. Запираемые тиристоры и биполярные транзисторы с изолированным затвором

Запираемый тиристор (*GTO-тиристор*) — полностью управляемый полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами [10] (рис. 1.47). Подобно обычному тиристорному он имеет *анод А*, *катод К* и *управляющий электрод Г*. Как и обычный тиристор, перевод его из блокирующего состояния в проводящее возможно только при прямом напряжении между анодом и катодом. Включают и выключают GTO-тиристор подачей положительного и отрицательного импульсов тока на электрод управления *Г*.

В цикле работы GTO-тиристора различают четыре фазы: включение, проводящее состояние, выключение и блокирующее состояние.

Чтобы включить GTO-тиристор (рис. 1.48) в момент времени t_0 , к аноду и управляющему электроду прикладываются напряжения положительной полярности u и u_G и по цепи управления начинает протекать ток включения (ток управления) i_G . Так как цепь управляющего электрода обладает значительной индуктивностью, скорость нарастания тока включения тиристора составляет 30—40 А/мкс. Он достигает амплитудного значения $i_{G \text{ вкл}}$ по прошествии времени $t_1 - t_0$, после чего тиристор открывается и начинает пропускать анодный ток i , а падение напряжения u на нем начинает падать. Значение тока управления i_G в 3—5 раз меньше анодного тока тиристора i . Время, в течение которого падение напряжения на тиристоре снижается от максимального значения u_m до $0,1 u_m$, называется *временем включения* $t_{\text{вкл}}$.

В проводящем состоянии тиристора, если его анодный ток больше тока удержания, поддерживать ток управления в принципе не нужно; однако опыт показывает, что для устойчивой работы запираемого тиристора необходимо поддержание тока управления i_G .

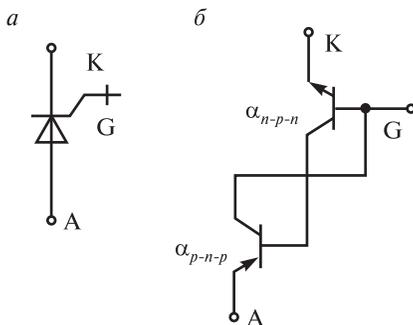


Рис. 1.47. Запираемый тиристор: *а* — условное обозначение; *б* — схема замещения

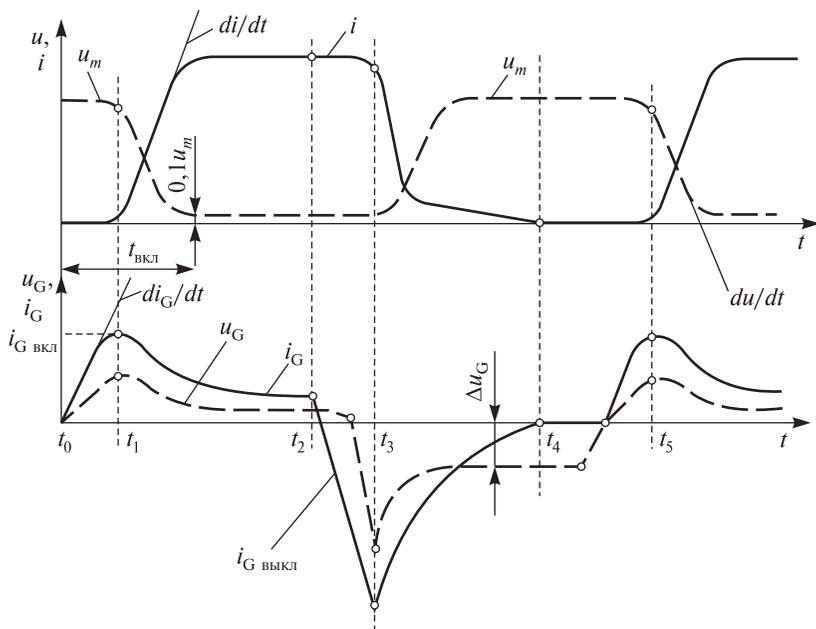


Рис. 1.48. Процесс коммутации ГТО-тиристора

Для выключения тиристора в момент t_2 при неизменной полярности напряжения между анодом и катодом необходимо поменять полярность напряжения на его управляющем электроде u_G . Это вызывает протекание тока выключения $i_{G \text{ выкл}}$ и при его заданном значении (в момент t_3), тиристор начинает закрываться. Наличие значительного времени закрытия тиристора $t_4 - t_3$, при котором продолжает протекать небольшой силовой ток через тиристор, объясняется наличием той же индуктивности цепей управления.

В режиме блокирующего состояния ($t_5 - t_4$) к управляющему электроду остается приложенным напряжение отрицательной полярности от блока управления. По цепи управления в этом режиме будет протекать ток, состоящий из тока утечки силовой цепи тиристора и тока управления.

Использование ГТО-тиристора, как и других силовых полупроводников, требует применения специальных защитных цепей, назначение которых — ограничить скорости нарастания прямого напряжения и прямого тока при коммутации тиристора (рис. 1.49).

Последовательно с тиристором Т устанавливают индуктивность (дроссель) L_c , которая ограничивает скорость нарастания прямого тока di/dt при включении тиристора. Конденсатор C_B подключают параллельно тиристорам Т — он ограничивает скорость нарастания прямого напряжения du/dt при выключении тиристора. Кроме того, в защитных цепях используют резистор R_B , который ограничивает ток разряда конденсатора C_B при включении тиристора Т, и диод D_B , который шунтирует резистор R_B при выключении тиристора Т.

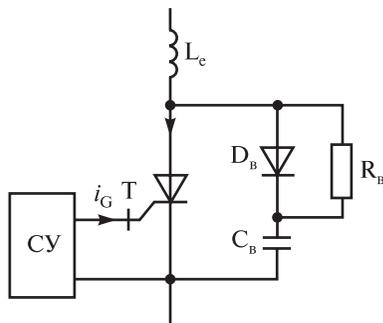


Рис. 1.49. Защитные цепи ГТО-тиристора

Основной недостаток ГТО-тиристора заключается в больших потерях энергии в защитных цепях прибора при его коммутации. Повышение частоты коммутаций увеличивает потери, поэтому на практике ГТО-тиристоры коммутируются с частотой не более 250—300 Гц. Основные потери возникают при включении тиристора Т, в резисторе R_B и конденсаторе C_B . Кроме того, ГТО-тиристоры имеют значительное время выключения; минимальное время выключения и блокирующего состояния составляет порядка 100 мкс.

Более совершенную конструкцию имеют *ГСТ-тиристоры*, которые разработаны на базе ГТО-тиристоров. Их основное преимущество — быстрое выключение, так как они нечувствительны к скорости нарастания прямого напряжения du/dt .

ГСТ-тиристоры управляются так же, как и ГТО-тиристоры с той лишь разницей, что:

- ток управления при выключении должен быть не меньше анодного тока тиристора $i_{G \text{ выкл}} \geq i$;
- управляющий электрод имеет низкую индуктивность, что позволяет увеличить скорость нарастания тока управления до 3000 А/мкс.

В настоящее время промышленностью выпускаются ГТО-тиристоры в таблеточном исполнении с двухсторонним охлаждением и параметрами по напряжению до 6000 В, по току до 6000 А;

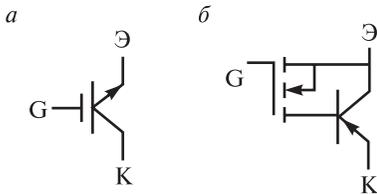


Рис. 1.50. Условное обозначение IGBT-транзистора (а); соединение полевого и биполярного транзисторов в структуре IGBT (б)

IGBT-транзистор представляет собой полностью управляемый полупроводниковый прибор: его включение и выключение осуществляется подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком.

IGBT-транзистор сочетает в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: *биполярный* — образующий силовой канал, и *полевой* — образующий канал управления (рис. 1.50, б). Таким образом, он имеет три внешних вывода: *эмиттер Э*, *коллектор К* и *затвор G*. Соединения эмиттера и стока, базы и истока являются внутренними в структуре транзистора. Соединение двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление, высокую допустимую нагрузку силового канала, малое сопротивление во включенном состоянии.

Включение IGBT-транзистора осуществляется подачей положительного напряжения между затвором и стоком; при этом происходит открытие полевого транзистора, а протекание через него тока открывает силовой канал биполярного транзистора.

В настоящее время промышленностью выпускаются IGBT-транзисторы в таблеточном исполнении с двухсторонним охлаждением и в виде модулей в прямоугольных корпусах с параметрами по напряжению до 1200 В, по току до 2400 А. В модуль наряду с IGBT-транзистором включены диоды для уменьшения количества внешних соединений полупроводниковых элементов и компактного формирования преобразователей.

Технические характеристики силовых IGBT-транзисторов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 1.4.

GCT-тиристоры с параметрами по напряжению до 4500 В, по току до 4000 А .

Технические характеристики силовых GTO-тиристоров, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 1.4.

Наряду с тиристорами в качестве ключей преобразователей используются *биполярные транзисторы с изолированным затвором* — *IGBT-транзисторы*

1.7. Фильтры

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя обычно устанавливают сглаживающие фильтры. Эффективность сглаживающего фильтра оценивают по его способности уменьшать пульсацию, т.е. по значению коэффициента сглаживания s_c .

Коэффициентом сглаживания s_c называют отношение коэффициентов пульсаций входного (до фильтра) и выходного (после фильтра) напряжений:

$$s_c = \frac{k_{\Pi}}{k'_{\Pi}}, \quad (1.13)$$

где $k_{\Pi} = \frac{(U_1)_m}{U_d}$ — коэффициент пульсаций напряжения до фильтра;

$k'_{\Pi} = \frac{(U'_1)_m}{U_d}$ — коэффициент пульсаций напряжения после фильтра;

$(U_1)_m$ — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения до фильтра;

$(U'_1)_m$ — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения после фильтра;

U_d — среднее значение (постоянная составляющая) выпрямленного напряжения.

Требование к значению коэффициента s_c фильтра является основным при его проектировании. Помимо этого к фильтрам предъявляют требования по массе, габаритам, влиянию на переходные процессы в динамических режимах и др.

Сглаживающие фильтры можно разделить на два класса: пассивные и электронные (активные). *Пассивные* фильтры обычно состоят из реактивных элементов: реакторов (катушек индуктивностей) и конденсаторов. *Электронные* фильтры содержат электронные элементы, например транзисторы. Класс пассивных фильтров является наиболее распространенным.

В зависимости от числа элементов и способа их соединения различают следующие основные типы пассивных фильтров:

простые фильтры — однозвенные (индуктивный фильтр, емкостный фильтр, Г-образный, П-образный) и многозвенные;

сложные фильтры, состоящие обычно из нескольких звеньев с резонансной настройкой отдельных цепочек.

Рассмотрим некоторые получившие наибольшее распространение типы пассивных сглаживающих фильтров, схемы которых приведены на рис. 1.51. Следует отметить, что фильтры с индуктивным входом применяются преимущественно в выпрямителях средней и большой мощности, а с емкостным — в маломощных системах при высоком сопротивлении нагрузки.

Индуктивный фильтр (L-фильтр, рис. 1.51, а) представляет собой реактор, включенный между выпрямителем и нагрузкой R_d . Напряжение на выходе выпрямителя содержит постоянную составляющую U_d и переменную (пульсацию) u_{\approx} :

$$u_d = U_d + u_{\approx}.$$

Пренебрегая изменением этих составляющих от нагрузки, можно считать, что на входе фильтра включены два последовательно соединенных источника напряжения: с постоянной ЭДС U_d и переменной ЭДС u_{\approx} . Постоянная ЭДС U_d не оказывает влияния на пульсацию, а в качестве переменной ЭДС можно рассматривать только ЭДС основной гармоники пульсации $(U_d)'_m$ (первой гармоники переменной составляющей, см. п. 3.5), так как она пре-

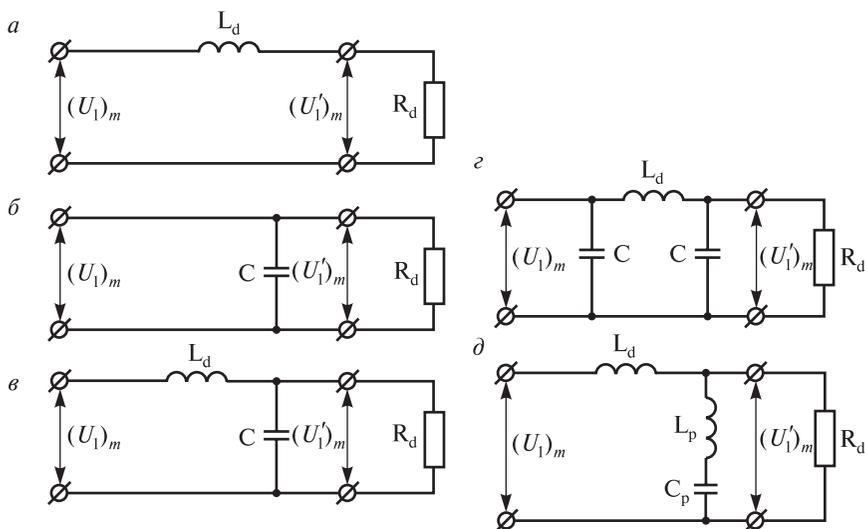


Рис. 1.51. Принципиальные схемы пассивных фильтров

имущественно определяет коэффициент пульсации. Тогда согласно (1.13) коэффициент сглаживания можно выразить:

$$s_c = \frac{(U_1)_m}{(U_1')_m}. \quad (1.14)$$

Амплитуду переменной составляющей напряжения на нагрузке для L-фильтра можно представить в виде соотношения:

$$(U_1')_m = (I_1)_m R_d = \frac{(U_1)_m R_d}{\sqrt{(R_d)^2 + (\omega_1 L_d)^2}}, \quad (1.15)$$

где $(I_1)_m$ — амплитуда переменной составляющей тока нагрузки;

ω_1 — частота основной гармоники пульсации;

L_d — индуктивное сопротивление фильтра.

Подставляя (1.15) в (1.14), получаем:

$$s_c = \frac{\sqrt{(R_d)^2 + (\omega_1 L_d)^2}}{R_d}. \quad (1.16)$$

Откуда для заданного значения коэффициента сглаживания находится необходимое значение индуктивного сопротивления фильтра

$$L_d = \frac{R_d}{\omega_1} \sqrt{s_c^2 - 1}. \quad (1.17)$$

Из (1.16) следует, что с приближением к режиму холостого хода выпрямителя (с увеличением R_d) коэффициент сглаживания $s_{\Pi} \rightarrow 1$. Поэтому расчет индуктивности фильтра L_d производят для режима минимальной нагрузки.

Емкостный фильтр (С-фильтр, рис. 1.51, б) представляет собой конденсатор, включаемый на выходе выпрямителя. Емкостные фильтры используются преимущественно в маломощных выпрямителях. Расчет необходимой емкости конденсатора в микрофарадах при заданном коэффициенте сглаживания s_c можно производить по приближенной формуле [11]:

$$C \approx \frac{\pi s_c}{\omega_1 R_d k_{\Pi}}.$$

Однозвенный Г-образный LC-фильтр (рис. 1.51, в) является наиболее распространенным типом фильтра благодаря своей простоте и эффективности. Для этого фильтра выбирают емкость конденсатора так, чтобы $\omega_1 C \gg \frac{1}{R_d}$. В этом случае выражение для коэффициента сглаживания LC-фильтра принимает вид:

$$s_c = \omega_1^2 L_d C - 1. \quad (1.18)$$

Задаваясь одним из параметров фильтра (как правило, L_d) с учетом требований к нагрузке при заданном значении s_c определяют другой параметр фильтра.

Таковыми требованиями обычно являются обеспечение непрерывности выпрямленного тока или обеспечение минимума массы, габарита и стоимости. В ряде случаев принимают во внимание факторы, учитывающие влияние параметров фильтра на динамические характеристики преобразователя, а именно необходимость исключить возможность возникновения резонансных явлений на частотах, близких к частоте пульсации. Для этого рекомендуется обеспечить соотношение

$$\omega_1 \geq 2\omega_\phi,$$

где $\omega_\phi = 1/\sqrt{L_d C}$ — собственная угловая частота фильтра.

Из изложенного следует, что в общем случае выбор параметров фильтра является многофакторной задачей, решение которой требует применения специальных методов оптимизации.

Наиболее просто параметры фильтра L_d и C определяются из условия непрерывности выпрямленного тока i_d , что характерно для фильтров мощных выпрямителей. В этом случае индуктивность L_d рассматривается как некое критическое значение $L_{d\text{кр}}$, обеспечивающее граничный непрерывный режим тока i_d .

Для того чтобы выпрямленный ток i_d был непрерывной функцией времени, необходимо выполнение условия

$$(I_1)_m \leq I_d, \quad (1.19)$$

где $(I_1)_m$ — амплитуда переменной составляющей тока нагрузки;

I_d — постоянная составляющая выпрямленного тока.

С учетом того что обычно $\omega_1 L_{d\text{кр}} \gg \frac{1}{\omega_1 C}$ индуктивность $L_{d\text{кр}}$ может быть определена согласно (1.19) из следующей приближенной формулы:

$$L_{d\text{кр}} = \frac{(U_1)_m R_{d\text{max}}}{\omega_1 U_d}. \quad (1.20)$$

Емкость С-фильтра определяется из (1.18). Полученные значения параметров фильтра проверяются по выполнению условия (1.19). В случае невыполнения этого условия следует увеличить значение емкости С.

П-образный LC-фильтр (рис. 1.51, з) можно представить как составной, состоящей из С-фильтра и Г-образного LC-фильтра. Общий коэффициент сглаживания всего фильтра определится произведением коэффициентов сглаживания его звеньев:

$$s_c = s_c C s_c LC,$$

где $s_c C$ — коэффициент сглаживания С-фильтра;

$s_c LC$ — коэффициент сглаживания LC-фильтра.

Для повышения устойчивости работы систем используют фильтры с параллельной резонансной цепочкой (рис. 1.51, д). Эта цепочка, состоящая из конденсатора с емкостью C_p и реактора индуктивностью L_p , настраивается в резонанс на основную гармонику пульсации (в общем случае резонансных цепочек может быть несколько, каждая из них настроена на определенную гармонику пульсации). Резонанс на основной гармонике возникает при условии $\omega_1 = 1/\sqrt{L_p C_p}$, а резонансная цепочка будет обладать активным сопротивлением R_p . В результате этого большая часть напряжения пульсации будет приложена к индуктивности L_d , а меньшая — к нагрузке R_d . Коэффициент сглаживания такого фильтра с достаточной для практики степенью точности можно определить по формуле

$$s_c = \frac{\sqrt{(\omega_1 L_d)^2 + (R_p)^2}}{R_p} \approx \frac{\omega_1 L_d}{R_p},$$

где R_p — сопротивление резонансной цепочки.

Подбором соответствующих значений L_d , C_p и L_p с помощью такого фильтра можно получить хороший коэффициент сглаживания.

Многозвенные фильтры состоят из последовательно включенных однозвенных фильтров различных типов. Общий коэффициент сглаживания n -звенного фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных его звеньев:

$$s_c = \prod_n s_{ci}.$$

В маломощных выпрямителях, помимо электрических реактивных фильтров, иногда применяют электронные фильтры, в частности транзисторные. Принцип действия такого фильтра основан на нелинейности ВАХ транзистора. Зависимость коллекторного тока I_k от напряжения эмиттер—коллектор $U_{ЭК}$ такова, что транзистор обладает весьма большим сопротивлением переменному току (большим динамическим сопротивлением).

Пример 1. Рассчитать индуктивный L-фильтр для управляемого трехфазного мостового выпрямителя. Исходные данные следующие:

- среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 110$ В;
- максимальное сопротивление нагрузки $R_{d\max} = 1$ Ом;
- частота питающего напряжения $f = 50$ Гц;
- режим работы выпрямителя с непрерывным током i_d ;
- коэффициент пульсации напряжения на выходе выпрямителя $k_{\pi} = 30$ %;
- коэффициент пульсации напряжения на нагрузке $k'_{\pi} = 3$ %.

Требуемый коэффициент сглаживания фильтра в соответствии с формулой (1.13) равен:

$$s_c = \frac{k_{\pi}}{k'_{\pi}} = \frac{30}{3} = 10.$$

Для трехфазного мостового выпрямителя число пульсаций в выпрямленном напряжении составляет $m = 6$, поэтому индуктивность фильтра согласно (1.17) должна быть равна:

$$L_d = \frac{R_{d\max}}{\omega_1} \sqrt{s_c^2 - 1} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6} \sqrt{10^2 - 1} = 5,27 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Пример 2. Рассчитать Г-образный LC-фильтр для однофазного двухполупериодного управляемого мостового выпрямителя. Исходные данные следующие:

- выпрямленный ток в реакторе фильтра непрерывен;
- частота питающего напряжения $f = 50$ Гц;
- максимальное сопротивление нагрузки $R_d = 5$ Ом;
- коэффициент пульсации напряжения на выходе выпрямителя $k_{\pi} = 100$ %;
- коэффициент пульсации напряжения на нагрузке $k'_{\pi} = 5$ %;
- среднее значение напряжения на нагрузке $U_d = 30$ В.

Требуемый коэффициент сглаживания в соответствии с формулой (1.13) равен:

$$s_c = \frac{k_{\pi}}{k'_{\pi}} = \frac{100}{5} = 20.$$

Для двухполупериодного выпрямителя число пульсаций в выпрямленном напряжении составляет $m = 2$, поэтому произведение $L_d C$ согласно (1.18) должно быть равно:

$$L_d C = \frac{s_c + 1}{\omega_1^2} = \frac{20 + 1}{(2\pi \cdot 50 \cdot 2)^2} = 5,32 \cdot 10^{-5}.$$

Индуктивность фильтра выбираем из условия обеспечения непрерывности тока i_d согласно (1.20):

$$L_{d \text{ кр}} = \frac{(U_1)_m R_{d \text{ max}}}{\omega_1 U_d} = \frac{k_{\pi} U R_d}{\omega_1 U_d} = \frac{5}{2\pi \cdot 50 \cdot 2} = 7,96 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Соответственно емкость фильтра должна быть равна:

$$C = \frac{5,32 \cdot 10^{-5}}{7,96 \cdot 10^{-3}} = 6,68 \cdot 10^{-3} \text{ Ф.}$$

Собственная угловая частота фильтра:

$$\omega_{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{L_d C}} = \frac{1}{\sqrt{7,96 \cdot 10^{-3} \cdot 6,68 \cdot 10^{-3}}} = 141 \text{ рад/с.}$$

Частота пульсации первой гармонической выпрямленного напряжения при однофазной мостовой схеме выпрямления будет соответствовать двойной частоте напряжения источника. Так как $2\omega_{1п} < \omega_{\phi}$, то возможность резонансных явлений на частотах пульсации напряжения исключается.

1.8. Сельсин

Сельсином называется электрическая машина переменного тока, обладающая свойствами самосинхронизации и работающая в индикаторном или трансформаторном режиме.

Сельсин-индикатор, как и редуктор, передает крутящий момент между валами, только этот момент передается не зубьями шестерен, а магнитодвижущей силой без непосредственного контакта между валами.

Простейший сельсин состоит из статора с трехфазной обмоткой и ротора с однофазной обмоткой (рис. 1.52). Два таких устройства электрически соединяются друг с другом одноименными выводами обмоток статоров и роторов. Обмотки роторов подключаются на общий источник переменного напряжения. Если углы поворота соответствующих фаз обмоток сельсина-датчика β_d и сельсина-приемника $\beta_{п}$ по отношению к осям полюсов одинаковы ($\beta_d = \beta_{п}$), то пульсирующие магнитные поля, созданные этими обмотками,

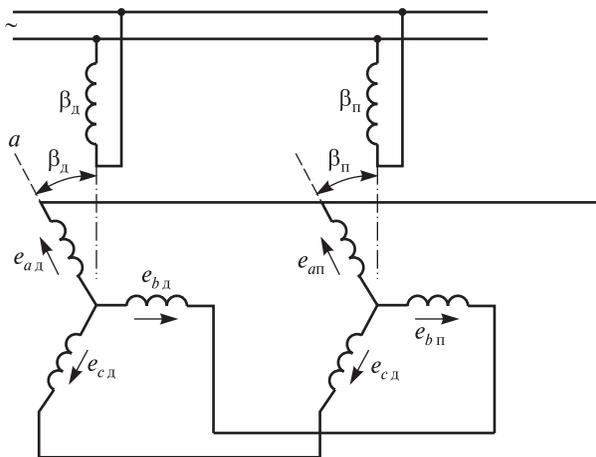


Рис. 1.52. К принципу работы сельсинов в индикаторном режиме

наведут в соединенных друг с другом одноименных обмотках одинаковые ЭДС $e_{aд} = e_{aп}$, $e_{bд} = e_{bп}$, $e_{cд} = e_{cп}$. Одноименные ЭДС сельсина-датчика и сельсина-приемника имеют встречное направление, поэтому электромагнитные моменты сельсинов равны нулю.

Если теперь повернуть ротор сельсина-датчика на какой-либо угол $\Delta\beta = \beta_{д} - \beta_{п}$, то одноименные фазы обмоток сельсинов окажутся не в одинаковых условиях по отношению к магнитным полям и их ЭДС не будут равны $e_{aд} \neq e_{aп}$, $e_{bд} \neq e_{bп}$ и $e_{cд} \neq e_{cп}$. Вследствие этого в обмотках возникнут токи, которые, взаимодействуя с магнитными полями, создадут вращающие моменты. Моменты, действующие на роторы сельсина-датчика и сельсина-приемника, направлены в противоположные стороны и под их влиянием угол рассогласования $\Delta\beta$ будет уменьшаться. Если после поворота ротор сельсина-датчика зафиксировать, то под действием возникшего момента повернется только ротор сельсина-приемника и опять выполнится равенство $\beta_{д} = \beta_{п}$.

При работе сельсинов в *трансформаторном режиме* ток статорной обмотки (обмотки возбуждения) сельсина-датчика создаст в обмотке ротора ЭДС $e_{aд}$, $e_{bд}$, $e_{cд}$, зависящие от угла $\beta_{д}$ (рис. 1.53). В результате этого магнитный поток статора сельсина-приемника будет поворачиваться синхронно с ротором сельсина-датчика. ЭДС,

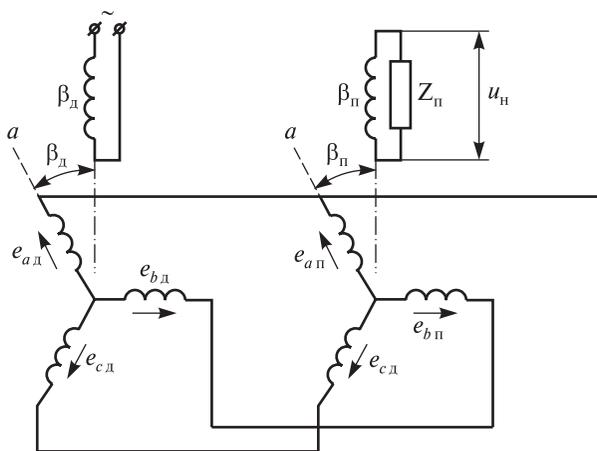


Рис. 1.53. К принципу работы сельсинов в трансформаторном режиме

наводимая в обмотке ротора сельсина-приемника, будет определяться углом $\Delta\beta = \beta_d - \beta_{\Pi}$ и на сопротивлении нагрузки Z_H появится напряжение $u_H = U \sin(\beta_d - \beta_{\Pi})$.

1.9. Широтно-импульсная модуляция переменного напряжения

Современные системы асинхронного электропривода широко используют инверторы на базе тиристоров или транзисторов, которые преобразуют постоянное напряжение в переменное напряжение нужной частоты, работая в режиме электронных ключей [2]. Однако те же электронные ключи могут управлять и амплитудой переменного напряжения с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1].

Идею построения автономного инвертора напряжения с ШИМ проиллюстрируем на простейшей идеализированной однофазной схеме с чисто активной нагрузкой (рис. 1.54, а). Пусть с помощью ключей 1—4 постоянное напряжение на входе схемы U_d преобразуется в переменное напряжение на активной нагрузке R . На первом полупериоде переменного напряжения должны коммутироваться ключи 1, 2, а на втором полупериоде — ключи 3, 4. Если не предпринимать специальных мер — переменное напряжение на нагрузке будет иметь форму прямоугольных импульсов постоянной амплитуды U_d с частотой коммутации ключей.

Для изменения амплитуды и формы напряжения на нагрузке раздробим каждый период T на n равных частей (интервалов) с продолжительностью каждого $\tau = \frac{T}{n}$ и будем коммутировать ключи 1, 2 на каждом интервале положительного полупериода, а ключи 3, 4 — на каждом интервале отрицательного полупериода, как показано на рис. 1.54, б. Тогда на каждом i -м интервале к нагрузке будет прикладываться не полное напряжение U_d , а лишь его часть, среднее значение которого определится как:

$$U_{i \text{ ср}} = \frac{U_d t_{i1}}{t_{i1} + t_{i2}} = \frac{U_d t_{i1}}{\tau} = U_d \varepsilon_i.$$

Меняя на каждом интервале относительную ширину импульса $\varepsilon_i = \frac{t_{i1}}{\tau}$, можно легко управлять средним за интервал напряжением

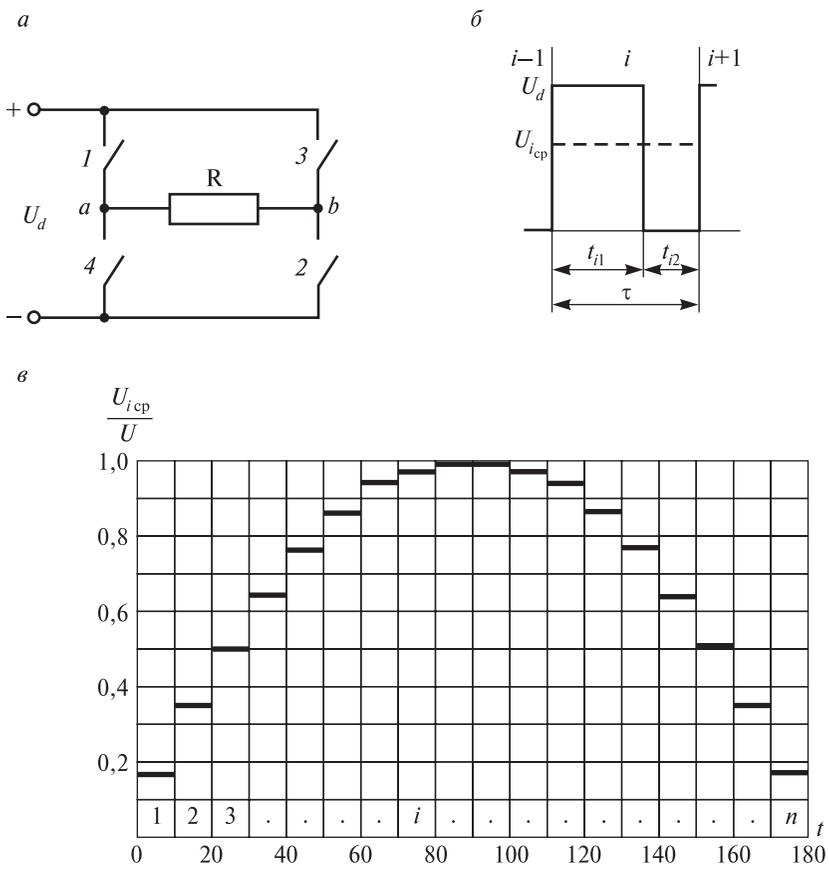


Рис. 1.54. К принципу широтно-импульсной модуляции напряжения: *a* — схема преобразования постоянного напряжения источника в переменное напряжение на нагрузке с помощью ключей; *б* — ШИМ на интервале напряжения; *в* — ШИМ на половине периода напряжения

ем $U_{i,cp}$, т.е. формировать на каждом полупериоде любую нужную форму напряжения, как показано на рис. 1.54, *в*. С увеличением n будет уменьшаться интервал τ и ступенчатая кривая будет приближаться к заданной плавной.

Величину, обратную относительной ширине импульса, называют скважностью импульса

$$s_i = \frac{\tau}{t_{il}}.$$

Используя широтно-импульсную модуляцию, можно формировать любые нужные формы кривой напряжения, учитывая изменяющиеся в процессе работы параметры нагрузки. В современных хорошо сделанных преобразователях частоты ШИМ позволяет при любой требуемой выходной частоте преобразователя изменять нужным образом амплитуду напряжения, управляя магнитным потоком двигателя, и формировать близкую к синусоидальной форму тока двигателя.

Наиболее полно реализовать широкие возможности ШИМ удалось лишь в последние 10 лет с появлением на рынке совершенных ключей, в частности транзисторных модулей IGBT с напряжением до 1200 В, током до 600 А и частотой коммутации до 30 кГц, а также средств управления ими.

Глава 2. АГРЕГАТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛОКОМОТИВОВ С ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Энергетическая система тепловоза

2.1.1. Энергетическая цепь

Передача энергии от дизеля к движущим осям тепловоза осуществляется совокупностью электромашинных и статических преобразователей, образующих энергетическую цепь. Современные тепловозы способны работать как в режиме тяги, так и в режиме электрического торможения, когда энергетическая система преобразует механическую энергию движения поезда в электрическую энергию, которая рассеивается на тормозных резисторах.

Основные операции по управлению тепловозом — увеличение и уменьшение мощности, изменение направления движения, переход на режим электрического торможения — осуществляются тремя рукоятками контроллера машиниста КМ.

На тепловозах с передачей переменного-постоянного тока от дизеля получает привод тяговый синхронный генератор (СГ) [2] (рис. 2.1). Статор тягового генератора имеет две самостоятельные обмотки, каждая из которых соединена по схеме «звезда» и сдвинута относительно другой на 30 электрических градусов. Фазы генератора включены на два трехфазных выпрямительных моста: от обмотки 1С (фазы 1С1, 1С2, 1С3); от обмотки 2С (фазы 2С1, 2С2, 2С3) [12]. Мосты соединены между собой параллельно и образуют выпрямительную установку ВУ. Выпрямленное напряжение каждой из «звезд» поступает на общие выводные шины ВУ, а от них через главные контакты электропневматических поездных контакторов П1—П6, тормозного переключателя ТП и реверсивного переключателя (реверсора) ПР на обмотки тяговых электродвигателей М1—М6. Тяговые электродвигатели (ТЭД) создают моменты на колес-

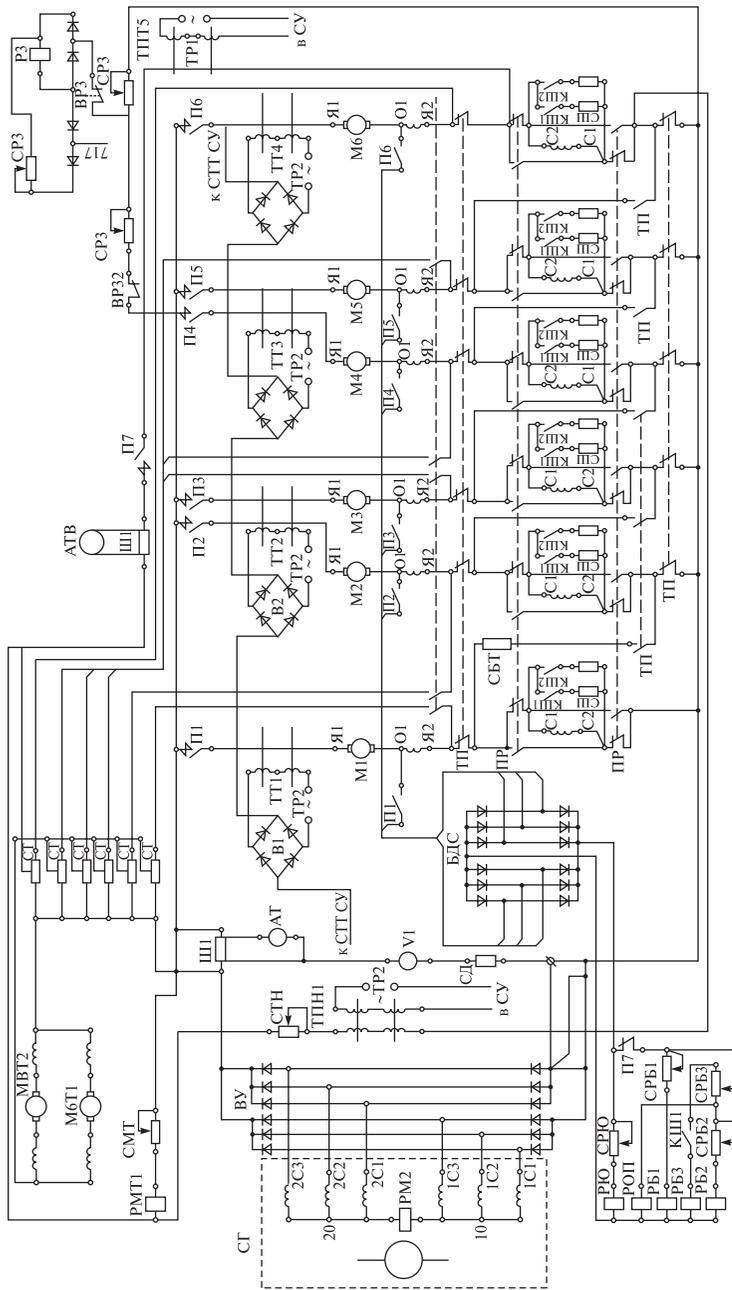


Рис. 2.1. Принципиальная схема энергетических цепей тепловоза с электрической передачей переменного-постоянного тока

ных парах тепловоза. В тяговом режиме все двигатели соединены параллельно и имеют последовательное возбуждение.

Направление движения тепловоза зависит от направления тока в обмотках тяговых электродвигателей, поскольку вектор тягового момента двигателя определяется векторным произведением его магнитного потока $\overline{\Phi}$ и тока якоря \overline{I}_a

$$\overline{M}_{\text{тэд}} = c_M \overline{\Phi} \overline{I}_a. \quad (2.1)$$

Изменение направления момента ТЭД на локомотивах (электровозах и тепловозах) осуществляется изменением направления $\overline{\Phi}$, т.е. тока в его обмотке возбуждения. Реализуется это переключением главных контактов реверсора ПР.

Скорость тепловоза и его тяговое усилие регулируются изменением режима работы дизеля (задается положением рукоятки контроллера машиниста) и возбуждением тягового генератора.

Для согласования допустимых режимов работы тяговых электрических машин (по допустимым значениям тока и напряжения) и требуемых режимов работы тепловоза (по скоростному диапазону) в энергетических системах тепловоза применяют режим ослабления возбуждения ТЭД [2]. На этом режиме параллельно обмоткам возбуждения тяговых двигателей С1—С2 подключаются резисторы СШ главными контактами групповых контакторов ослабления возбуждения КШ1 и КШ2. Ток возбуждения двигателя I_B снижается в α раз. Величина $\alpha = \frac{I_B}{I_a}$ называется *коэффициентом ослабления возбуждения*.

Обратимость электрических машин позволяет использовать ТЭД в режиме торможения. При включении электрического торможения схема энергетической цепи разбирается, а тяговые двигатели переходят в генераторный режим работы с приводом от колесных пар тепловоза (благодаря использованию инерции поезда) и независимым возбуждением.

Обмотка якоря каждого тягового электродвигателя Я1—Я2 главными контактами поездных контакторов П1—П6 и главными контактами тормозного переключателя ТП подключается к отдельной группе резисторов тормозного блока СТ. Обмотки возбуждения тяговых электродвигателей С1—С2 контактами ТП и главным контактом контактора П7 соединяются последовательно и подключаются

к выпрямительной установке ВУ. Перевод энергетической системы из режима тяги в тормозной режим и обратно производится с помощью тормозного переключателя ТП при отключенных контакторах П1—П7 (при обесточенном состоянии системы).

Для защиты от внешних коротких замыканий в системе ВУ—ТЭД установлено реле максимального тока РМ1, чувствительный элемент которого измеряет значение выпрямленного тока I_d . При срабатывании реле РМ1 система возбуждения тягового генератора разбирается.

Для защиты от внутренних коротких замыканий в системе СГ—ВУ используется реле максимального тока РМ2, чувствительный элемент которого включен между нулевыми точками статорных обмоток тягового генератора. При возникновении короткого замыкания в фазе генератора или в плече выпрямительной установки реле РМ2 срабатывает и также разбирает систему возбуждения тягового генератора.

Восстановить возбуждение тягового генератора после срабатывания реле РМ1 или РМ2 возможно только после перехода дизеля на нулевую позицию.

Энергетическая цепь тепловоза не имеет искусственного заземления, поэтому пробой на землю токоведущих элементов энергетического оборудования не приведет к появлению токов короткого замыкания. Однако замыкание на землю может привести к пробое изоляции статорных обмоток синхронного генератора. Чтобы исключить этот аварийный режим энергетическая цепь тепловоза оборудуется реле заземления РЗ, которое срабатывает при пробое на землю как со стороны «плюса», так и со стороны «минуса».

Для повышения механической устойчивости сцепления колес тепловоза с рельсами на тепловозе имеются системы защиты от боксования и юза. На напряжение полюсных катушек тяговых электродвигателей О1—С2 через блок диодного сравнения БДС включены реле боксования РБ1 и РБ2 и юза РЮ, которые при потере сцепления колеса с рельсом ступенчато снижают возбуждение тягового генератора, а соответственно и тяговый момент электродвигателя $M_{ТЭД}$ (2.1).

Вместе с катушками реле боксования на напряжение полюсных катушек включено реле защиты от обрыва цепи возбуждения тягового электродвигателя (реле обрыва полюсов) РОП, который

разбирает схему возбуждения тягового генератора в аварийном режиме.

Для полного использования мощности дизеля на всех режимах работы тепловоза, его энергетическая цепь оборудована автоматической системой регулирования напряжения генератора, которая на тяговом режиме во всем диапазоне изменения скорости тепловоза обеспечивает выполнение условия:

$$U_d I_d = N_{\text{св}} \eta_{\text{сг-ву}}, \quad (2.2)$$

где U_d, I_d — соответственно значения напряжения и тока генератора на выходе выпрямительной установки;

$N_{\text{св}}$ — свободная мощность дизеля;

$\eta_{\text{сг-ву}}$ — КПД системы СГ-ВУ.

Кроме того, автоматическая система регулирования напряжения генератора ограничивает ток и напряжение тягового генератора в пределах допустимых значений.

Принцип работы автоматической системы регулирования напряжения тягового генератора основан на сравнении режима работы дизеля и энергетической системы тепловоза для выполнения условия (2.2). Режим работы энергетической цепи тепловоза определяется напряжением генератора и током ТЭД. Ток двигателей измеряется датчиками тока — трансформаторами ТПТ1—ТПТ4; напряжение генератора измеряется датчиком напряжения — трансформатором ТПН1. Датчики ТПТ1—ТПТ4 и ТПН1 представляют собой простейшие магнитные усилители (см. п. 1.2). Токи рабочих обмоток ТПТ1—ТПТ4 и ТПН1 через выпрямительные мосты поступают в селективный узел СУ, который формирует сигнал на изменение тока обмотки возбуждения генератора СГ.

При электрическом торможении автоматическая система регулирования напряжения тягового генератора позволяют получать предельные и регулировочные характеристики тормозного режима.

В тяговом режиме автоматическая система регулирования напряжения тягового генератора обеспечивает:

- полное использование свободной мощности дизеля на всех режимах работы тепловоза;
- разгон тепловоза при максимально допустимом токе тяговых электродвигателей;
- ограничение величины тока и напряжения генератора на допустимом уровне;
- защиту от боксования.

В режиме электрического торможения система автоматического управления обеспечивает:

- торможение с заданной величиной тока тяговых двигателей до заданной скорости движения;
- поддержание заданной скорости движения тепловоза;
- автоматическое ограничение величины токов якорей и обмоток возбуждения тяговых двигателей на допустимом уровне;
- защиту от юза.

При выходе из строя системы автоматического регулирования напряжения тягового генератора предусмотрен аварийный режим, при котором генератор на каждой позиции контроллера работает при постоянном возбуждении с пониженной мощностью.

2.1.2. Вспомогательные системы

Для привода вентиляторов, компрессора и насосов дизеля на тепловозе используются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели постоянного тока.

Питание электродвигателей насосов дизеля при пуске осуществляется от аккумуляторной батареи.

Трехфазные асинхронные двигатели вентиляторов охлаждающего устройства дизеля, охлаждения тяговых двигателей и ВУ включаются на напряжение статорных обмоток СГ (тепловоз 2ТЭ116) или получают питание от вспомогательного синхронного генератора тягового агрегата (тепловоз 2ТЭ25А).

Для привода вентиляторов охлаждения тормозных резисторов используются электродвигатели постоянного тока МВТ1, МВТ2, которые включены на напряжение тормозных резисторов.

Питание низковольтных цепей тепловоза осуществляется номинальным напряжением 75 или 110 В от вспомогательного генератора или аккумуляторной батареи. Аккумуляторная батарея предназначена для питания вспомогательного оборудования и цепей управления при неработающем дизеле или его пуске.

На пассажирских тепловозах предусмотрена система энергообеспечения для отопления вагонов пассажирского поезда, которая включается контактором энергообеспечения (на схеме не показана). Ее энергетическая установка состоит из синхронного генератора и выпрямительной установки. Номинальное напряжение системы

энергоснабжения 3000 В постоянного тока. От токовых перегрузок и замыканий в цепях энергоснабжения система имеет защиту по максимальному току.

Цепи управления тепловоза обеспечивают его работу по системе многих единиц в режимах тяги и электрического торможения. Межсекционное соединение цепей управления выполнено съемными кабелями со штепсельными разъемами.

2.2. Энергетическая система электровоза

2.2.1. Энергетическая цепь электровоза постоянного тока

Передача энергии от контактного провода к движущим осям электровоза осуществляется совокупностью электромашинных и статических преобразователей, образующих энергетическую цепь. Современные электровозы способны работать как в режиме тяги, так и в режиме электрического торможения, когда энергетическая система преобразует механическую энергию движения поезда в электрическую энергию, которая либо рассеивается на тормозных резисторах, либо возвращается в контактную сеть [2].

На электровозе постоянного тока тяговые электродвигатели включены на напряжение контактного провода через секции пускового реостата. В тяговом режиме электродвигатели работают с последовательным возбуждением. Изменение напряжения на зажимах тяговых двигателей осуществляют применением различных схем их соединения — последовательного (С), последовательно-параллельного (СП) и параллельного (П), и сопротивлением пускового реостата. Чтобы ограничить ток двигателя в режиме пуска (при отсутствии или малых значениях его ЭДС) все двигатели соединяют последовательно и вводят в их цепь пусковой реостат (рис. 2.2). С увеличением скорости движения электровоза ток двигателей, а следовательно и создаваемый ими момент, уменьшаются. Для обеспечения постоянного значения силы тяги электровоза при его разгоне применяют ступенчатое изменение сопротивления пускового реостата — реостатные позиции.

Характеристики электровоза, соответствующие безреостатным ступеням соединений тяговых двигателей (С, СП, П), называются автоматическими (ходовыми) характеристиками. Каждая автоматическая характеристика лежит в определенном интервале ско-

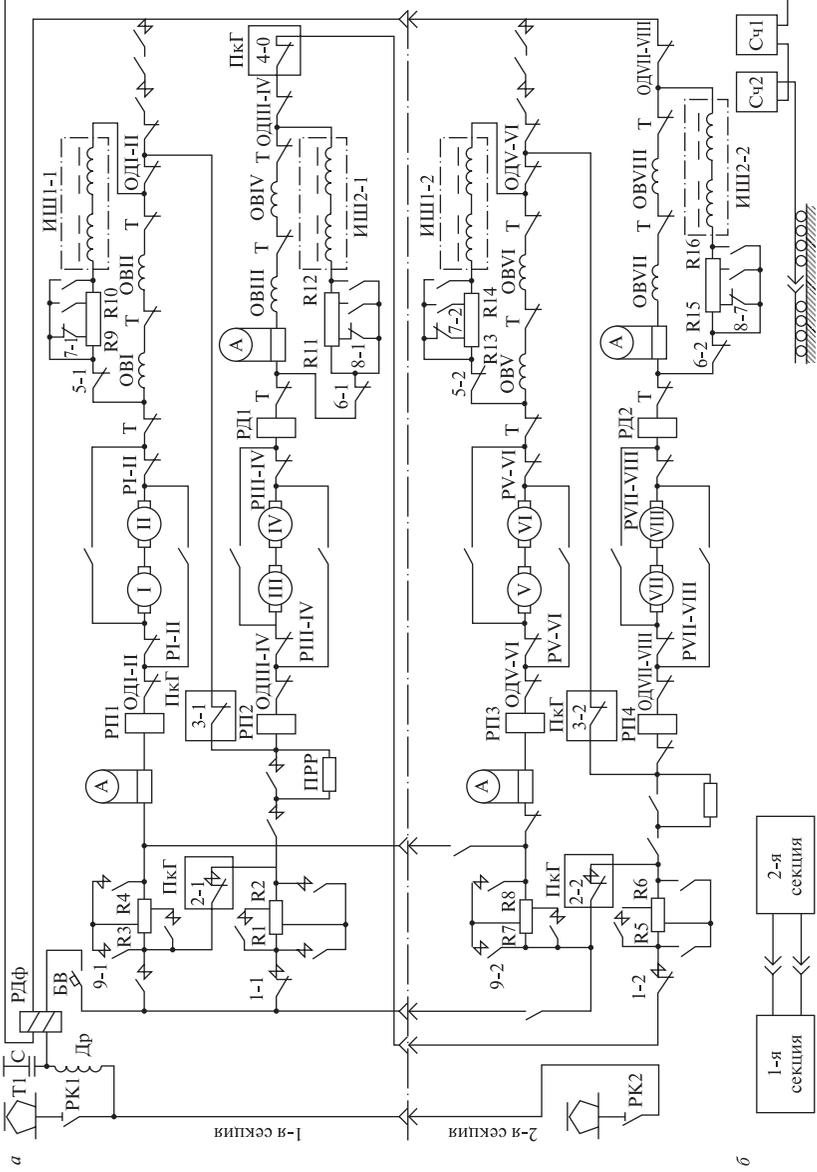


Рис. 2.2. Принципиальная схема силовых цепей электровоза постоянного тока ВЛ10 при последовательном соединении тяговых электродвигателей (а) и блок-схема соединения секций (б)

рости, поэтому для ограничения тока при переходе с одной автоматической характеристики на другую также используют реостатные позиции. Режим ослабления возбуждения тяговых двигателей применяют на ходовых позициях.

Пусковые сопротивления служат только для трогания и разгона электровоза; время работы на реостатных позициях ограничено, так как сопротивления обладают фиксированной теплорассеивающей способностью. Продолжительная работа электровоза разрешается только на ходовых позициях при полном или ослабленном возбуждении двигателей.

Энергетической цепью электровоза предусмотрены режимы электрического рекуперативного торможения, когда электрическая энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, передается в контактную сеть. В тормозном режиме тяговые двигатели имеют независимое возбуждение. Переключения в силовых цепях при переходе в режим электрического торможения выполняются тормозными переключателями после обесточивания цепей тяговых двигателей.

На электровозе применена дистанционная система управления, позволяющая управлять двух- и трехсекционным электровозом с одного поста.

Основные операции по управлению электровозом — набор и сброс реостатных позиций, изменение схем соединений тяговых электродвигателей, изменение направления движения электровоза, ослабление возбуждения тяговых электродвигателей, перевод тяговых электродвигателей на независимое возбуждение перед началом рекуперативного торможения, регулирование режима рекуперативного торможения, разбор цепей рекуперации — осуществляются тремя рукоятками контроллера машиниста КМ.

На электровозе ВЛ10 *реверсивно-селективная рукоятка* контроллера машиниста КМ имеет девять фиксированных положений:

0 (нулевое) — соответствует отключенному состоянию цепей тяговых электродвигателей (при этом блокируются остальные рукоятки КМ);

четыре положения «Вперед»: М — для пуска и разгона электровоза на последовательно-параллельном и параллельном соединениях тяговых электродвигателей при движении вперед; П, СП и С —

для рекуперативного торможения электровоза при соответствующих схемах соединения тяговых двигателей и движении вперед;

четыре положения «Назад»: М — для пуска и разгона электровоза на последовательно-параллельном и параллельном соединениях тяговых электродвигателей при движении назад; П, СП и С — для рекуперативного торможения электровоза при соответствующих схемах соединения тяговых двигателей и движении назад.

Тормозная рукоятка контроллера машиниста КМ служит для включения и регулирования режима рекуперативного торможения, а также для ослабления возбуждения тяговых электродвигателей в режиме тяги. Она имеет следующие фиксированные позиции:

0 (нулевая)— соответствует полному возбуждению тяговых электродвигателей в режиме «Тяга»;

ОП1—ОП4 — режимы ослабления возбуждения тяговых двигателей;

02 (подготовительная) — для подключения обмоток возбуждения тяговых электродвигателей к генератору преобразователя при переходе на режим рекуперации (при этом главная рукоятка КМ должна быть переведена в положение 1-й позиции);

1—15 — для регулирования тормозного момента тяговых двигателей в режиме рекуперативного торможения.

Главная рукоятка контроллера машиниста КМ имеет 38 фиксированных позиций: нулевую и 37 регулировочных. На электровозе ВЛ10 ходовыми являются 16-я (при схеме соединения электродвигателей С), 27-я (при схеме соединения электродвигателей СП), 37-я (при схеме соединения электродвигателей П).

Реверсивно-селективный, тормозной и главный валы контроллера КМ взаимно блокированы для предотвращения ошибочных действий машиниста при управлении электровозом:

— при установке реверсивно-селективной рукоятки в положение М («Вперед» или «Назад») главная рукоятка может быть установлена на любую позицию;

— при установке главной рукоятки на 16-, 27- или 37-ю позиции тормозная рукоятка может быть установлена на позиции ослабления возбуждения ОП1—ОП4 (при этом дальнейшее перемещение главной рукоятки невозможно до возвращения тормозной рукоятки на нулевую позицию);

– при установке реверсивной рукоятки в положение П, СП или С тормозная рукоятка может быть установлена на 2-ю позицию, после чего можно установить главную рукоятку на 1-ю позицию, а затем поворачивать тормозную рукоятку до 15-й позиции;

– обратный поворот тормозной рукоятки возможен до 1-й позиции включительно, а после установки главной рукоятки на нулевую позицию тормозную рукоятку также можно повернуть на нулевую позицию;

– при рабочих положениях главной и тормозной рукояток поворот реверсивно-селективной рукоятки невозможен.

Поскольку цепи управления секций двух- и трехсекционного электровоза электрически соединяются между собой межсекционными проводами, то переключения соответствующих аппаратов происходят одновременно на всех секциях.

Для подготовки электровоза к работе необходимо включить кнопку «Токоприемник» (при этом на двухсекционном электровозе поднимается один токоприемник (см. п. 10.1), а на трех- и четырехсекционном — два) и быстродействующий выключатель вспомогательных цепей.

Для приведения электровоза в движение необходимо включить вспомогательные машины (в том числе и для подачи воздуха к электропневматическим контакторам), быстродействующий выключатель БВ (см. п. 10.2) всех секций; реверсивно-селективную рукоятку КМ установить в положение «Вперед М» (или «Назад М») и главную рукоятку КМ — на 1-ю позицию (на рис. 2.2 представлена силовая схема электровоза ВЛ10 на 1-й позиции).

После перевода главной рукоятки КМ на 1-ю позицию включаются линейные контакторы 1-1, 1-2 (см. п. 10.7), соединяя последовательно тяговые двигатели обеих секций и подключая их к контактной сети через полностью включенный пусковой резистор (главные контакты реостатных контакторов типа ПК разомкнуты, см. п. 10.7), и главные контакты 5-1, 6-1, 5-2, 6-2, 7-1, 8-1, 7-2, 8-2 контакторов ослабления возбуждения. Электрический ток из контактной сети пройдет через поднятый токоприемник, например Т1, разъединитель РК1, дроссель Др, обмотку дифференциального реле РДФ, контакты быстродействующего выключателя БВ, линейного контактора 1-1, первую группу секций пускового реостата

R1—R2, контакторный элемент 2-1 группового переключателя ПкГ (см. п. 10.8), вторую группу секций пускового реостата R3—R4, шунт амперметра А, обмотку реле перегрузки РП1, ножи отключателей двигателей ОД1-П, контакты реверсора Р1-П, контакты тормозного переключателя Т в цепи обмоток якорей I, II и возбуждения ОВ1, ОВ2 тяговых двигателей. Далее ток через замкнутый контакторный элемент 3-1 группового переключателя ПкГ проходит в цепь двигателей III-IV, в которой включены реле перегрузки РП2 и аналогичные элементы коммутационных аппаратов.

Во вторую секцию электровоза ток поступает через замкнутый контакторный элемент 4-О группового переключателя Пк-Г («О» указывает, что контакторный элемент относится к групповому переключателю, общему для обеих секций кузова) и межсекционное соединение. Силовая цепь второй секции аналогична рассмотренной выше. Собранная силовая цепь двух секций электровоза замыкается на рельсы через вторую обмотку дифференциального реле РДФ и токовые обмотки двух счетчиков электрической энергии Сч1, Сч2. Дифференциальное реле предназначено для защиты тяговых электродвигателей от токов короткого замыкания, а также используется в качестве реле тока на режимах рекуперативного торможения.

Особенностью силовых схем электровоза ВЛ10 является то, что на 1-й позиции КМ включена первая ступень ослабления возбуждения ТЭД (т.е. замкнуты контакты 5-1, 6-1, 5-2, 6-2, 7-1, 8-1, 7-2, 8-2). Это необходимо, так как на 1-й позиции сопротивления пускового реостата недостаточно, чтобы обеспечить плавное трогание электровоза. Для ограничения тягового момента ТЭД при большом токе якорей уменьшают их магнитный поток — применяют ослабление возбуждения.

В цепь резисторов ослабления возбуждения ТЭД включены индуктивные шунты ИШ1-1, ИШ2-1, ИШ1-2, ИШ2-2 (см. п. 10.6); они улучшают токораспределение между обмотками возбуждения тяговых двигателей и резисторами ослабления возбуждения.

На 2-й позиции главной рукоятки КМ контакты 5-1, 6-1, 5-2, 6-2, 7-1, 8-1, 7-2, 8-2 размыкаются, возбуждение ТЭД восстанавливается, а сила тяги возрастает. На 3-й позиции включается контакт 9-2 реостатного контактора и выводится ступень пускового реостата. При дальнейшем перемещении главной рукоятки КМ происходит

ступенчатое уменьшение сопротивления пускового реостата с помощью контактов реостатных контакторов; полностью оно выводится на 16-й (ходовой) позиции.

В тяговом режиме работы электровозов изменение схемы соединения ТЭД выполняется шунтированием части тяговых двигателей резисторами, с использованием схемы моста и запирающих диодов [2]. На электровозах ВЛ10 переход с последовательного на последовательно-параллельное соединение ТЭД осуществляют замыканием части тяговых двигателей на группу пусковых резисторов. Переключение тяговых двигателей производит групповой переключатель (см. п. 10.8), а в цепь обмоток якорей двигателей вводятся секции пусковых реостатов.

Переходя с одной реостатной позиции на другую, машинист, ориентируясь на показания амперметров А, следит, чтобы ток двигателей не превышал допустимого значения, обеспечивая устойчивое сцепление колеса с рельсом. Чтобы предотвратить повышенный нагрев секций пускового реостата, рассчитанных на кратковременное включение, рукоятку контроллера задерживают на реостатных позициях не более чем на 30 с. После того как главная рукоятка КМ будет установлена на ходовую позицию, машинист для увеличения скорости уменьшает возбуждение тяговых двигателей. При движении чаще всего используют параллельное соединение двигателей. В том случае, когда необходимо значительно снизить скорость, машинист переводит рукоятку контроллера с 38-й на 27- или 16-ю ходовую позицию.

В случае отказа тягового двигателя на электровозе предусмотрена возможность его отключения ножами отключателей ОД. В аварийном режиме предусмотрена возможность работы электровоза с двумя отключенными двигателями (только в тяговый режим). Работа с двумя двигателями в режиме рекуперативного торможения исключается.

Питание низковольтных цепей электровоза осуществляется номинальным напряжением 50 В от генераторов управления или аккумуляторной батареи (на режимах пуска, проезде нейтральных вставок).

Изменение направления движения электровоза осуществляется реверсированием тока в обмотках возбуждения с помощью реверсивных переключателей Р.

Для быстрого отключения силовой цепи от контактной сети при коротком замыкании служат автоматические быстродействующие выключатели БВ. Если короткое замыкание на электровозе постоянного тока произойдет в цепи за тяговыми двигателями, соединенными последовательно, то быстродействующий выключатель может не сработать, так как ЭДС исправных двигателей, включенных в начале цепи, возрастут вследствие увеличения тока. Ток короткого замыкания будет невелик. Учитывая это, применяют чувствительное дифференциальное реле РДф, которое измеряет ток в начале и конце защищаемого участка. При большой разнице этих токов якорь реле РДф под действием пружины оторвется от магнитопровода и разорвет цепь удерживающей катушки БВ. Быстродействующий выключатель отключится и обесточит силовую цепь.

2.2.2. Энергетическая цепь электровоза переменного тока

На электровозах переменного тока применяется ступенчатое или плавное регулирование напряжения на стороне низкого напряжения тягового трансформатора [2]. Ступенчатый способ регулирования напряжения предполагает переключение секций обмоток тягового трансформатора под нагрузкой и использование неуправляемых статических преобразователей напряжения. В схемах плавного регулирования применяют зонно-фазовое регулирование напряжения с помощью статических управляемых преобразователей напряжения.

Принципиальная схема силовой цепи электровоза ВЛ80С со ступенчатым регулированием напряжения приведена на рис. 2.3.

Подключение электровоза к контактной сети обеспечивается токоприемником 1 (см. п. 10.1). Токоприемник соединен с выводом А первичной обмотки тягового трансформатора 3 (см. п. 10.4) через дроссель ДП, высоковольтный разъединитель 2, главный выключатель 4 (см. п. 10.2), фильтр 10 и трансформатор тока ТТ. Второй вывод Х первичной обмотки тягового трансформатора 3 соединяется с корпусом электровоза.

Высоковольтные разъединители 2 и 6 нормально находятся во включенном состоянии. Рукоятки их расположены в высоковольтной камере электровоза. В случае необходимости разъединителем 2 можно отключить неисправный токоприемник, а разъединителем 6 — неисправную секцию. Силовые контакты с дугогашением

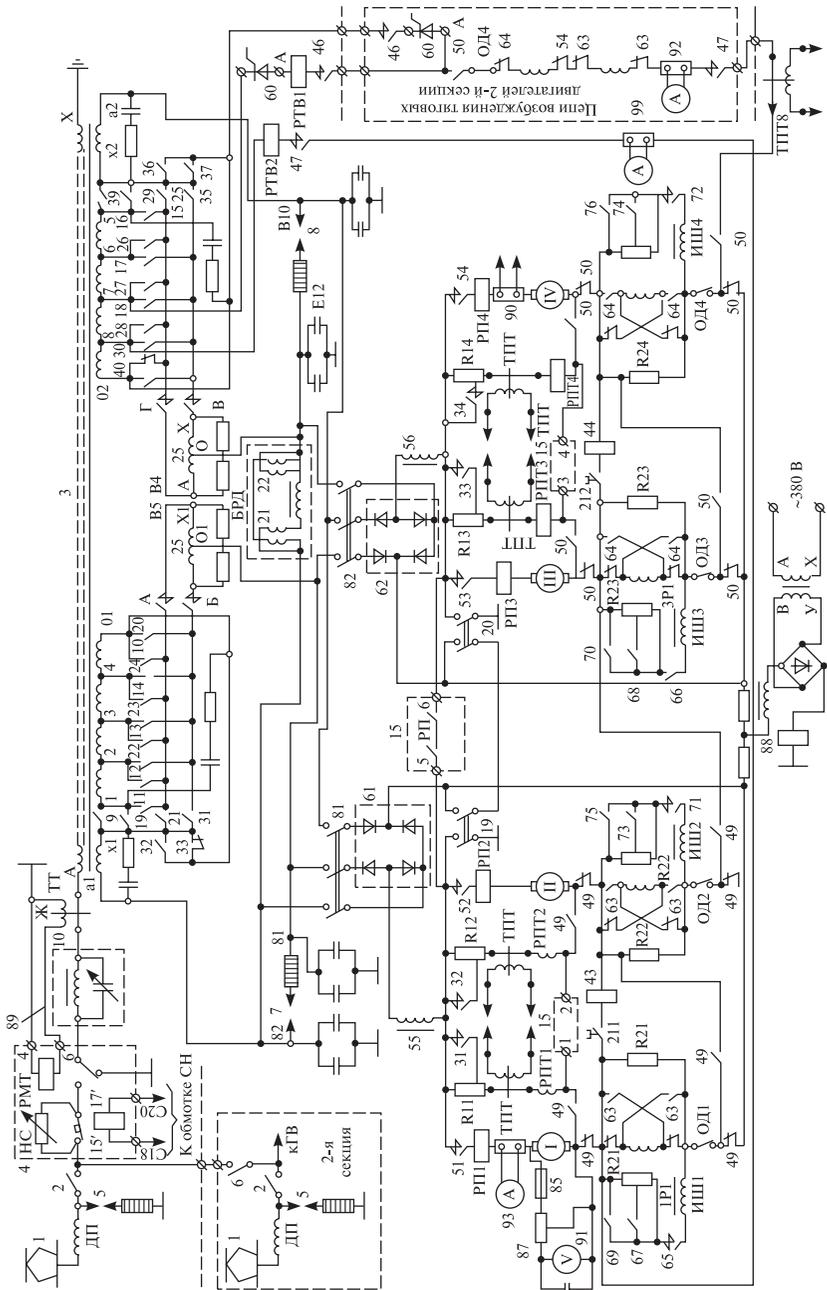


Рис. 2.3. Принципиальная схема силовых цепей электровоза ВЛ80С

главного выключателя 4 шунтированы нелинейным резистором для уменьшения перенапряжений, возникающих при их размыкании.

Тяговые двигатели электровоза питаются выпрямленным пульсирующим током. В режиме тяги тяговые электродвигатели I—IV работают с последовательным возбуждением. Преобразование однофазного тока контактной сети в выпрямленный ток для питания тяговых двигателей осуществляется двумя выпрямительными установками 61 и 62. Для снижения пульсаций в цепи выпрямленного тока установлены сглаживающие реакторы 55, 56 (см. п. 10.6). Включение и отключение тяговых двигателей I—IV производится главными контактами с дугогашением линейных контакторов 51-54 (см. п. 10.7).

Реверсивные переключатели 63, 64 обеспечивают изменение направления тока в обмотках возбуждения тяговых двигателей, а соответственно и направление движения электровоза.

Ослабление возбуждения тяговых двигателей осуществляется с помощью контакторов 65-76 (см. п. 10.7), резисторов R21—R24 и индуктивных шунтов ИШ1—ИШ4 (см. п. 10.6). Индуктивные шунты включены в цепь ослабления возбуждения для улучшения условий коммутации тяговых двигателей при колебании напряжения в контактной сети или его восстановления после кратковременного снятия.

В случае необходимости любой из тяговых двигателей может быть отключен соответствующим разъединителем ОД1—ОД4. Выпрямительные установки 61, 62 могут быть отключены разъединителями 81 и 82.

Регулирование напряжения на тяговых двигателях электровоза осуществляют ступенчатым изменением напряжения на вторичных обмотках тягового трансформатора (см. п. 10.4). Наименьшее напряжение на тяговых двигателях будет при встречном включении нерегулируемой и регулируемой обмоток, когда в один полупериод ток нерегулируемой обмотки направлен от вывода $x/$ к выводу $a1$, а в регулируемой — от вывода 01 к выводу 1, и выводы $x/$ и 01 соединены. Результирующее напряжение, подводимое к тяговым двигателям, будет равно разности напряжений обмоток. Напряжение холостого хода (х.х.) нерегулируемой обмотки равно 638 В, напряжение х.х. всех секций регулируемой обмотки — 580 В;

их разность, равная 58 В, определяет наименьшее напряжение, подводимое к тяговым двигателям на 1-й позиции.

Наибольшее напряжение к тяговым двигателям подводится при согласном включении нерегулируемой и регулируемой обмоток, т.е. когда соединены выводы $x/$ и 1. При этом напряжения обмоток направлены согласно и складываются, достигая значения 1218 В на 33-й позиции главного контроллера.

Переключение секций обмоток тягового трансформатора выполняется главным контроллером (см п. 10.5), который имеет тридцать четыре силовых контакторных элемента из них тридцать — без дугогашения (контакторные элементы 9-33, 35-37, 39-40) и четыре — с дугогашением (контакторные элементы А, Б, В и Г). Переключение контакторных элементов 9-33, 35-37, 39-40 происходит без тока. Разрыв силовой цепи в момент переключения секций обмоток трансформатора осуществляется контакторными элементами с дугогашением А, Б, В и Г.

Переход контроллера с одной позиции на другую осуществляется в следующем порядке: сначала размыкается контакторный элемент с дугогашением, обесточивая силовую цепь, затем переключаются контакторы без дугогашения, меняя схему соединения обмоток, после чего вновь замыкается контакторный элемент с дугогашением. Для ограничения переходного тока в момент одновременного замыкания контакторных элементов начала и конца секции трансформатора установлен переходной реактор 25. Обмотки реактора шунтированы резисторами для уменьшения на них коммутационных перенапряжений. Это снижает износ контакторных элементов с дугогашением главного контроллера.

Для регулирования скорости электровоза имеются 33 ступени напряжения трансформатора и три ступени ослабления возбуждения ТЭД. Ходовыми позициями являются 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 и 33-я, на которых происходит симметричное включение обмоток трансформатора. Только на ходовых позициях допустима длительная работа, а следовательно, и ослабление возбуждения тяговых двигателей. На этих позициях переходной реактор и трансформатор будут иметь наименьший нагрев. На 33-й позиции повышение скорости движения электровоза за счет увеличения напряжения на тяговых двигателях прекращается, и дальнейшее повышение ее может быть достигнуто ослаблением возбуждения тяговых двигателей.

В цепях электровоза предусмотрены три ступени ослабления возбуждения тяговых двигателей: 70 %; 52 %; 43 %. Ослабление возбуждения осуществляется шунтированием обмоток возбуждения резисторами R21—R24 с помощью электропневматических контакторов 65-76.

На электровозе применена схема электрического реостатного тормоза с индивидуальными тормозными резисторами. Тяговые двигатели в тормозном режиме работают в режиме генераторов постоянного тока с независимым возбуждением.

Переход из режима тяги в режим электрического торможения и наоборот производится машинистом при обесточенной силовой цепи. Переключение силовой цепи производится тормозными переключателями 49, 50 и контакторами 46, 47 (см. п. 10.7). При этом обмотки якорей всех тяговых двигателей отключаются от своих обмоток возбуждения и включаются на индивидуальные тормозные резисторы R11—R14. С помощью контактов 31-34 сопротивления тормозных резисторов могут меняться, расширяя диапазон тормозного режима в область низких скоростей. Одновременно контакторами 46, 47 управляемый выпрямитель возбуждения 60 обеих секций подключаются на часть вторичной обмотки тягового трансформатора 3.

Управляемые выпрямители 60 собраны по схеме двухполупериодного выпрямления переменного тока с нулевой точкой и обеспечивают питание обмоток возбуждения всех восьми тяговых двигателей, включенных последовательно. Ток в обмотках возбуждения тяговых двигателей меняется тиристорами выпрямителя 60 с помощью автоматической системы регулирования. Последовательное соединение восьми обмоток возбуждения обеспечивает равенство потоков возбуждения всех тяговых двигателей, что способствует равномерному распределению нагрузок между двигателями в режиме торможения.

Вспомогательное оборудование электровоза получает питание от обмотки собственных нужд тягового трансформатора. Все вспомогательное оборудование разделено на потребителей однофазного тока напряжением 380 и 220 В и потребителей трехфазного тока. Питание потребителей однофазного тока осуществляется непосредственно от выводов обмоток трансформатора; потребителей

трехфазного тока — от того же источника через расщепитель фаз (см. п. 2.2.3).

Электровоз переменного тока оборудован системами защиты от аварийных режимов и режимов коротких замыканий.

От атмосферных перенапряжений высоковольтное оборудование, рассчитанное на напряжение 25 кВ (включая тяговый трансформатор), защищено разрядником 5 (см. п. 10.3). На случай коммутационных перенапряжений вторичная обмотка трансформатора, контакторы главного контроллера и выпрямительные установки защищены разрядниками 7, 8 и R—C-цепями. Одновременно R—C-цепи совместно с дросселем ДП снижают уровень радиопомех на электровозе.

От коротких замыканий силовые цепи защищены главным выключателем 4, который отключается токовым реле РМТ при токах $250 \text{ А} \pm 10 \%$ в первичной обмотке трансформатора. От замыканий на землю силовые цепи защищены реле заземления 88, которое при срабатывании отключает главный выключатель 4. Реле заземления срабатывает при замыкании на землю любой точки силовой цепи на всех позициях главного контроллера.

Защита от коротких замыканий (к.з.) в выпрямительных установках осуществляется блоком дифференциальных реле БРД. Токовые катушки дифференциальных реле 21 и 22 вместе с дросселем включены между двумя точками цепи вторичных обмоток силового трансформатора, имеющими равные потенциалы. Поэтому по токовым катушкам в рабочих режимах ток не протекает. В случае к.з. в цепи одной из выпрямительных установок, например 61, через блок дифференциальных реле будет протекать уравнивающий ток к.з. В результате якорь реле 21 отпадет, а его контакты разорвут цепь питания удерживающей катушки главного выключателя 4.

При к.з. в выпрямительной установке 62 срабатывает реле 22. В случае срабатывания защиты машинист должен отключить выпрямительную установку, в цепи которой произошло к.з., при помощи разъединителя 81 или 82.

Тяговые двигатели защищены от перегрузки реле перегрузки РП1—РП4, срабатывание которых происходит при токе $(1500 \pm 50) \text{ А}$ и приводит к отключению главного выключателя 4.

В режиме электрического торможения обмотки возбуждения тяговых двигателей защищены от перегрузок токовым реле РТВ2,

который при токе $(1250 + 50)$ А отключает контакторы 46, 47 и схема электрического торможения разбирается. Для защиты от сквозного пробоя тиристоров управляемого выпрямителя возбуждения 60, обмоток возбуждения тяговых двигателей и их цепей от к.з. предусмотрено токовое реле РТВ1, которое срабатывает при токе (1500 ± 50) А и отключает главный выключатель 4. Токовые реле РТВ1 и РТВ2 установлены только на первой секции электровоза. Кроме того, в цепь обмотки якоря каждого тягового двигателя включены трансформаторы постоянного тока ТПТ, которые являются датчиками тока якоря для автоматической системы управления режимом электрического торможения. Аналогичный датчик измерения тока возбуждения электродвигателей ТПТВ установлен в цепи обмоток возбуждения тяговых двигателей первой секции электровоза.

Для защиты от боксования на электровозе применяются реле боксования 43, 44, катушки которых включены между эквипотенциальными точками цепей тяговых двигателей через высоковольтные блокировки реле времени 211 и 212. Реле боксования срабатывает при разности ЭДС боксующего и небоксующего двигателя, равной 2 В. При этом своими контактами реле боксования обеспечивают подачу песка под колесные пары и сигнализируют о возникновении боксования.

Для защиты от юза на электровозе установлен блок юза 15, где помещены реле юза РЗЮ1—РЗЮ4, включенные также между эквипотенциальными точками цепей тяговых двигателей. Реле юза срабатывают при достижении разности потенциалов между точками подключения $(100+5)$ В. При этом своими контактами реле юза соответствующего двигателя включают его контактор ослабления возбуждения (уменьшается тяговый момент на колесе) и сигнализируют об аварийной ситуации.

Управление электровозом осуществляется с помощью контроллера машиниста КМ, аппаратов управления, кнопочных выключателей и тумблеров (см. п. 10.10).

Контроллер КМ выполняет следующие функции:

в тяговом режиме — реверсирование движения электровоза, ручной и автоматический набор и сброс позиций главного контроллера, включение и отключение линейных контакторов, ослабление возбуждения тяговых двигателей;

в тормозном режиме — переключение силовой схемы и схемы цепей управления в тормозной режим, и наоборот; регулирование режима торможения.

Для правильного включения пневматической тормозной системы на электровозе имеется блокировочное устройство тормозов со съемной рукояткой.

Схемой цепей управления предусмотрена возможность управления электровозом по системе многих единиц.

2.2.3. Вспомогательные системы электровоза

Для привода вентиляторов, компрессора и насоса системы масляного охлаждения тягового трансформатора на электровозе используют трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Питание электродвигателей вспомогательных машин осуществляется от обмотки собственных нужд тягового трансформатора через специальную электрическую машину — асинхронный расщепитель фаз. Асинхронный расщепитель фаз состоит из статора и ротора с короткозамкнутой обмоткой. На статоре расположена двигательная обмотка, образующая две фазы (*a* и *b*) и генераторная обмотка, образующая одну фазу (*c*). Двигательные обмотки включены последовательно на напряжение обмотки собственных нужд трансформатора. Генераторная обмотка соединена с двигательными обмотками по схеме «звезда» и через пусковой резистор специальным реле также включена на напряжение обмотки собственных нужд трансформатора. В результате образуются магнитные системы, сдвинутые по фазе, что достаточно для раскручивания ротора. Как только ротор достигает заданной частоты вращения, реле размыкается, отключая генераторную обмотку от трансформатора, а на фазах машины создается трехфазная система напряжений.

На электровозах последних выпусков, например 2ЭС5К, применена система питания вспомогательных электроприводов с конденсаторным расщеплением фаз.

Защита цепей вспомогательных электродвигателей от токов короткого замыкания выполнена с помощью токового реле, отключающего главный выключатель 4 при его срабатывании.

Питание низковольтных цепей электровоза осуществляется номинальным напряжением 50 В от статического преобразователя и аккумуляторной батареи. В основном питание цепей управления

осуществляется от статического преобразователя, аккумуляторная батарея предназначена для питания цепей управления при отключенном статическом преобразователе, например при пуске электровоза, проезде нейтральных вставок и в других случаях.

Система энергоснабжения электровоза предназначена для отопления вагонов пассажирского поезда. Номинальное напряжение системы энергоснабжения 3000 В переменного тока частотой 50 Гц. Напряжение в поездную магистраль подается после замыкания контактора энергоснабжения, включаемого на электровозе с помощью ключа энергоснабжения. Этим же ключом запираются высоковольтные межвагонные соединители пассажирских вагонов. Такая система исключает возможность доступа обслуживающего персонала к неизолированным частям межвагонных соединителей после подачи высокого напряжения в поездную магистраль и обеспечивает выполнение требований электробезопасности.

От токовых перегрузок и замыканий в цепях энергоснабжения пассажирских вагонов используется токовое реле.

Энергетическая цепь и цепи управления электровоза обеспечивают работу как одного, так и двух электровозов по системе многих единиц в режимах тяги и электрического, в том числе и рекуперативного, торможения.

2.3. Источники и потребители электроэнергии на тепловозе

Электроэнергия в силу своей универсальности в средствах и способах передачи и преобразования широко применяется на тепловозах не только для тягового привода, но и для привода вспомогательных электрических машин, управления тяговым и вспомогательным электрооборудованием, обеспечения работы средств защиты, сигнализации и пожаротушения, нормальных условий локомотивной бригады и т.д.

На тепловозе имеются четыре источника электрической энергии — аккумуляторная батарея АБ, тяговый синхронный генератор СГ, синхронный возбудитель СВ и стартер-генератор СТГ (рис. 2.4).

Батарея используется на тепловозе как источник электрической энергии при пуске дизеля; она обеспечивает работу систем управления и стартер-генератора, работающего в режиме стартера. После

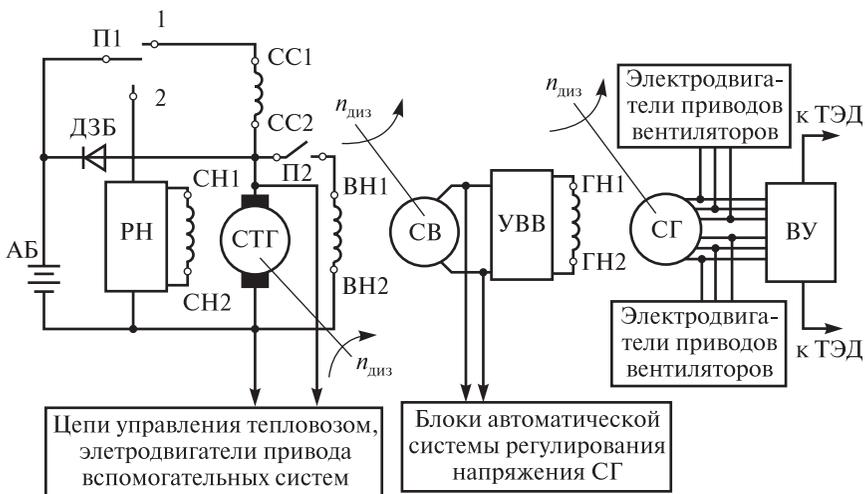


Рис. 2.4. Принципиальная схема включения источников энергии на тепловозе:

АБ — аккумуляторная батарея; СГ — синхронный генератор; ВУ — выпрямительная установка; ТЭД — тяговый электродвигатель; СТГ — стартер-генератор; СН1—СН2, СС1—СС2 — обмотки соответственно независимого и последовательного возбуждения стартер-генератора; СВ — синхронный возбудитель; РН — регулятор напряжения; УВВ — управляемый выпрямитель возбуждения; П1, П2 — переключатели; ВН1—ВН2 — обмотка независимого возбуждения СВ; ГН1—ГН2 — обмотка независимого возбуждения СГ; ДЗБ — диод зарядки батареи

завершения пуска дизеля батарея переводится в режим зарядки, а стартер-генератор — в режим генератора с приводом от дизеля.

Источником трехфазного переменного напряжения для питания асинхронных электродвигателей приводов вентиляторов охлаждения теплоносителей дизеля и тягового электрооборудования на тепловозе 2ТЭ116 является тяговый синхронный генератор. Однако из-за широкого диапазона изменения напряжения тягового генератора при движении тепловоза затруднительно обеспечить требуемое значение моментов асинхронных электроприводов вспомогательных систем. Поэтому на тепловозе 2ТЭ25А электропривод вспомогательных систем осуществляется от трехфазного вспомогательного генератора, который расположен на одном валу и в одном корпусе с тяговым генератором, образуя тяговый агрегат.

На ряде тепловозов (ТЭП70, ТЭП80, ТЭМ7) привод вентиляторов охлаждения теплоносителей дизеля гидравлический, а вентиляторов охлаждения тягового электрооборудования — механический.

Основной характеристикой генератора является его внешняя характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора от его тока нагрузки при постоянном токе возбуждения $I_B = \text{const}$, постоянной частоте вращения ротора $n = \text{const}$ и постоянном значении коэффициента мощности $\cos \varphi = \text{const}$ (см. рис. 2.5).

Напряжение на фазе синхронного генератора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - \dot{E}_{ad} - \dot{E}_{aq} - \dot{I}_1(r_1 + jx_1),$$

где \dot{E}_0 — ЭДС обмотки статора, наводимая внешним полем ротора (током возбуждения);

$\dot{E}_{ad}; \dot{E}_{aq}$ — ЭДС, создаваемые соответственно продольной и поперечной составляющими потока реакции якоря $\Phi_{ad}; \Phi_{aq}$;

\dot{I}_1 — ток якоря;

r_1, x_1 — соответственно активное и реактивное (определяемое потоком рассеяния) сопротивления фазы обмотки якоря.

У синхронного генератора влияние реакции якоря на значение напряжения с увеличением тока сильно возрастает. Кроме того, обмотка статора имеет высокие значения реактивного сопротивления: падение фазного напряжения на индуктивном сопротивлении генератора может составлять 10—15 % номинального значения. По-

этому внешняя характеристика СГ круто снижается с увеличением тока (рис. 2.5).

У генератора постоянного тока поперечная составляющая потока реакции якоря не оказывает значительного влияния на результирующее магнитное поле, а значения сопротивлений обмоток очень малы (см. табл. 2.1). Поэтому снижение его напряжения при увеличении нагрузки I_r также будет незначительным (рис. 2.5).

Синхронный возбудитель представляет собой однофазный син-

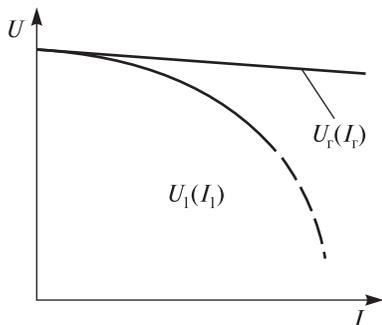


Рис. 2.5. Внешние характеристики генераторов:

$U_1(I_1)$ — синхронного генератора;
 $U_r(I_r)$ — генератора постоянного тока

хронный генератор. Он является источником однофазного переменного напряжения для питания обмотки возбуждения синхронного генератора, а также датчиков и блоков автоматической системы регулирования напряжения СГ. Обмотка возбуждения возбуждителя получает питание от стартер-генератора.

Стартер-генератор является электрической машиной постоянного тока, которая предназначена для работы в двух режимах: в стартерном — при пуске дизеля в качестве электродвигателя последовательного возбуждения с питанием от АБ, и в генераторном — в качестве вспомогательного генератора с независимым возбуждением от регулятора напряжения и выходным напряжением 110 ± 3 В (или 75 ± 3 В). Работая в качестве генератора, он осуществляет питание цепей управления, освещения, заряда АБ и электродвигателей постоянного тока привода вспомогательных систем тепловоза.

Потребителями электрической энергии на локомотивах являются тяговые электродвигатели (ТЭД), электродвигатели приводов вспомогательных систем тепловоза и различное вспомогательное электрооборудование.

Конструкция тяговых и вспомогательных электрических машин подробно рассмотрена в [2].

В настоящее время есть опыт использования в тяговом приводе локомотивов электродвигателей всех видов: постоянного тока, синхронных (вентильных) и асинхронных. Поскольку тяговый электродвигатель должен работать в условиях регулируемых значений момента и частоты вращения ротора, частых пусков и отключения нагрузки и т.п., при выборе типа двигателя необходимо сопоставлять его собственные механические характеристики с требуемыми механическими характеристиками привода.

Принято различать естественную и искусственную механические характеристики двигателя. Естественная характеристика двигателя определяется при номинальных параметрах напряжения питания и отсутствии каких-либо добавочных сопротивлений в цепях двигателя. Искусственные характеристики получаются при изменении параметров напряжения на входе двигателя, включении добавочных сопротивлений в цепи двигателя и соединении этих цепей по специальным схемам.

Таблица 2.1

Основные параметры тяговых генераторов

Генераторы постоянного тока						
Тип генератора	ГП-311Б	ГП-311В	ГП-300Б	ГП-312У	ГП-319	
Мощность номинальная, кВт	2000	2000	780	1270	955	
Применяется в передаче мощности тепловозов	2ТЭ10	ТЭП60	ТЭ2,ТЭ3	М62	ТЭМ6	
Мощность, используемая на тепловозе согласно ТУ, кВт	1780	1870	737	1232	882	
Напряжение при номинальной мощности $U_{\text{min}}/U_{\text{max}}$, В	465/700	465/635	645/870	356/570	5	16/870
Ток при номинальной мощности $I_{\text{max}}/U_{\text{min}}$, А	4320/2780	4320/3150	1210/900	3570/2230	1845/1100	
Номинальная частота вращения, с ⁻¹	14,17	12,50	12,50	12,50	16,67	
КПД на продолжительном режиме	0,942	0,940	0,940	0,945	0,936	
Сопротивление при 20 °С, Ом: обмотки якоря обмотки возбуждения пусковой обмотки	0,001178 0,863 0,00473	0,001178 0,863 0,00473	0,00607 0,720 0,00330	0,00103 0,900 0,00450	0,0036 0,766 0,00243	
Класс нагревостойкости изоляции: обмотки якоря обмотки возбуждения/пусковой обмотки	F H/H	F H/H	F B/B	F H/H	H H/H	

Продолжение табл. 2.1

Тип генератора	ГП-311Б	ГП-311В	ГП-300Б	ГП-312У	ГП-319
Якорь:					
диаметр сердечника, мм	1200	1200	840	990	990
длина сердечника, мм	494	494	440	500	250
число пазов	155	155	76	145	132
тип обмотки	Петлевая двухходовая	Петлевая двухходовая	Петлевая	Петлевая	Петлевая
число параллельных ветвей	20	20	8	20	8
Станина: диаметр наружный/длина, мм	1610/1500	1610/1500	1253/1139	1434/1334	1350/1250
Главные полюсы:					
количество полюсов	10	10	8	10	8
число витков обмотки возбуждения на полюс	105	105	99	109	114
Добавочные полюсы:					
количество полюсов	10	10	8	10	8
число витков на полюс	6	6	7	6	8
Масса, кг	8700	9000	4800	7400	4300

Продолжение табл. 2.1

Генераторы переменного тока			
Тип генератора	ГС-501АУ1	ГС-515У2	А-713У2*
Мощность номинальная активная, кВт	2800	1400	4060
Применяется в передаче мощности серий тепловозов	2ТЭ116, ТЭП70	ТЭМ7	ТЭП75
Максимальное выпрямленное напряжение $U_d \text{ max}$, В	750	360	980
Действующее значение линейного напряжения при номинальной мощности $U_{\text{л}} \infty / U_{\text{л}} \text{ max}$, В	360/580	175/280	580/770
Действующее значение линейного тока при номинальной мощности $I_{\text{л}} \infty / I_{\text{л}} \text{ min}$, А	2×2400/ 2×1500	2×2500/ 2×1540	2×2270/ 2×1650
Номинальная частота вращения ротора, с^{-1}	16,67	16,67	16,67
Частота напряжения, с^{-1}	100	100	100
Число фаз	6	6	6
Коэффициент мощности при $U_{\text{л}} \text{ min} / U_{\text{л}} \text{ max}$	0,935/0,925	0,925/0,938	0,920/0,920
КПД при $U_{\text{л}} \text{ min} / U_{\text{л}} \text{ max}$	0,950/0,958	0,955/0,958	0,950
			0,950/0,958

Окончание табл. 2.1

Тип генератора	ГС-501AU1	ГС-515У2	А-713У2*	А-714УХЛ*
Сопротивление обмотки ротора/статора при 20 °С, Ом	0,51/0,00115	0,44/0,00031	0,351/0,00124	0,51/0,00115
Класс нагревостойкости изоляции обмотки ротора/статора	F/H	F/H	F/B	F/H
Статор: диаметр наружный, мм диаметр внутренний, мм число пазов тип обмотки количество эффективных витков в фазе	1530 1230 144 Волновая 12	1260 980 144 Волновая 6	1530 1230 144 Волновая 12	530 1230 144 Волновая 12
Ротор: количество полюсов число последовательных витков на полюс	12 75	12 66	12 66	12 75
Масса, кг	6000	5200	9200**	8200**

* А-713У2 и А-714УХЛ — тяговые агрегаты; А-713У2 включает тяговый генератор, генераторы энергоснабжения и возбуждения; А-714УХЛ включает тяговый генератор и вспомогательный генератор.

** Указана масса тягового агрегата.

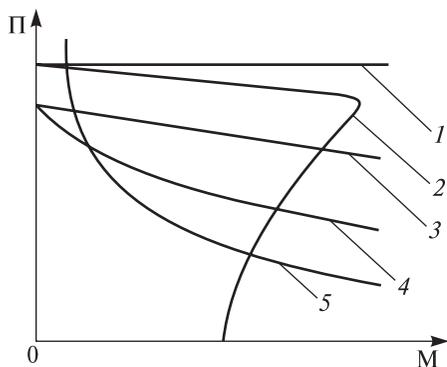


Рис. 2.6. Характеристики электродвигателей:

1 — абсолютно жесткая синхронного двигателя; 2 — асинхронного двигателя; 3 — жесткая двигателя параллельного возбуждения; 4 — мягкая двигателя последовательно-параллельного возбуждения; 5 — мягкая двигателя последовательного возбуждения

Важным критерием для оценки механических характеристик двигателей служит их жесткость (рис. 2.6)

$$\beta = \Delta \bar{M} / \Delta \bar{n},$$

где \bar{M} и \bar{n} — относительные момент и частота вращения ротора двигателя.

Жесткость может быть разной для различных участков механической характеристики двигателя. В зависимости от жесткости принято классифицировать механические характеристики на абсолютно жесткие ($\beta \rightarrow \infty$); жесткие характеристики ($\beta > 10$) и мягкие характеристики ($\beta \leq 10$).

Абсолютно жесткие характеристики имеют синхронные двигатели. Жесткая характеристика — у асинхронного двигателя (линейная часть характеристики) и у двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Мягкую характеристику имеют двигатели постоянного тока последовательного возбуждения. Требования к жесткости механической характеристики являются основанием для выбора типа тягового электродвигателя. Для тепловозов по условию использования свободной мощности дизеля на тягу необходима мягкая характеристика тягового электродвигателя. Поэтому основным видом двигателя, используемым в тяговом приводе тепловоза, является двигатель постоянного тока последовательного возбуждения.

Одновременно с этим, по условию устойчивого сцепления колеса с рельсом, в тяговом приводе локомотива должен использоваться электродвигатель с жесткой механической характеристикой, например синхронный или асинхронный.

Использование в электрических передачах локомотивов силовых автономных инверторов позволяет из естественных жестких характеристик синхронных и асинхронных двигателей получить

искусственные мягкие характеристики. Однако это требует глубокого регулирования выходного напряжения инвертора и может быть реализовано только сложными системами управления.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, как и асинхронный, имеет жесткую характеристику, которую при современных средствах управления можно преобразовать в мягкую. Но двигатель постоянного тока проигрывает двигателям переменного тока по простоте конструкции и обслуживания в эксплуатации. Кроме того, двигатель параллельного возбуждения работает неустойчиво при колебаниях подведенного к нему напряжения [14]. У этого двигателя электрическая постоянная времени цепи возбуждения значительно больше постоянной времени цепи якоря. Поэтому при резком изменении напряжения (например, при изменении позиции контроллера) скорость изменения магнитного потока и ЭДС будут значительно меньше скорости изменения тока якоря. В результате у двигателя может нарушаться коммутация, возникать резкие скачки тока при переходных процессах и появиться опасность перехода в генераторный режим работы. По этим причинам двигатель постоянного тока параллельного возбуждения не используется в тяговом приводе локомотивов.

Двигатель постоянного тока параллельно-последовательного возбуждения имеет мягкую характеристику, однако ему присущи недостатки двигателя параллельного возбуждения. Кроме того, его механическая характеристика более жесткая, чем у двигателя последовательного возбуждения, что осложняет его регулирование в электрической передаче локомотива.

При проектировании тяговые электрические машины рассчитываются на максимальные (номинальные) значения напряжения, тока и частоты вращения ротора. Однако для тяговых электрических машин ГОСТ 2582—82 устанавливает еще *продолжительный номинальный режим* (продолжительный режим) работы [15]. Для тяговых двигателей это режим работы с наибольшим током якоря, при котором работа в течение неограниченного времени при номинальном напряжении с возбуждением и вентиляцией, соответствующими данному режиму, не вызывает превышения предельно допускаемых температур обмоток и коллектора.

Для тяговых генераторов установлено два продолжительных номинальных режима:

Основные параметры тяговых электродвигателей тепловозов постоянного тока

Тип двигателя	ЭД126УХЛ1*	ЭД-118А	ЭДУ-133	ЭДУ-133
Серия тепловоза	ТЭП75	2ТЭ10; 2ТЭ116 М62; ТЭМ2; ТЭМ3	ТЭМ7; ТЭМ8 $\delta_{ПТ}=8,7\text{мм}^{**}$	ТЭП70 $\delta_{ПТ}=7,7\text{мм}^{**}$
Мощность номинальная, кВт	610	305	136	418
Напряжение (высшее/низшее), В	980/655	700/463	370/195	780/540
Ток при (высшем/низшем) напряжении, А	680/930	476/720	443/840	577/830
Сопротивление при 20 °С, Ом: обмотки якоря обмотки возбуждения; обмотки добавочных полюсов	0,012 0,0092 0,0078	0,013 0,0105 0,00821	0,0116 0,00675 0,0641	0,0116 0,00675 0,0641
Число витков катушки главного полюса	16	19	15	15
Число витков катушки добавочного полюса	11	17	18	18
Частота вращения максимальная, с ⁻¹	30,6	37,0	31,5	38,6
КПД, максимальный	91,5	91,5	83,0	92,9
Диаметр якоря, м	0,660	0,493	0,493	0,493
Длина якоря, м	0,380	0,420	0,4	0,4
Диаметр коллектора, м	0,53	0,40	0,40	0,4
Масса, кг	3250	3100	3100	3100
Вертикальный размер станины, м	1,05	0,815	0,815	0,815
Класс изоляции обмотки (якоря/полюсов)	Н/Ф	Ф/Ф	Н/Ф	Н/Ф
Тип подвески	Опорно-рамная	Опорно-осевая	Опорно-осевая	Опорно-рамная
Централь не менее, м	0,4688	0,4688	0,47	0,47
Расход охлаждающего воздуха, номинальный, м ³ /с	1,66	1,33	1,9	1,67

Тип двигателя	ЭДУ-133	ЭДУ-133	ЭДУ-133	ЭДУ-133
Серия тепловоза	ТЭП80 $\delta_{\text{ПП}}=7,7\text{мм}^{**}$	2ТЭ116У $\delta_{\text{ПП}}=7,7\text{мм}^{**}$	ТЭ10,ТЭ116 $\delta_{\text{ПП}}=7,7\text{мм}^{**}$	ТЭМ2, ТЭМ18 $\delta_{\text{ПП}}=8,7\text{мм}^{**}$
Мощность номинальная, кВт	461	365	311	108
Напряжение (высшее/низшее), В	810/596	750/450	695/449	290/203
Ток при (высшем/низшем) напряжении, А	610/830	533/890	479/750	424/605
Сопротивление при 20 °С, Ом: обмотки якоря обмотки возбуждения; обмотки добавочных полюсов	0,0116 0,00675 0,0641	0,0116 0,00675 0,0641	0,0116 0,00675 0,0641	0,0116 0,00675 0,0641
Число витков катушки главного полюса	15	15	15	15
Число витков катушки добавочного полюса	18	18	18	18
Частота вращения максимальная, с ⁻¹	38,7	38,7	38,7	21,7
КПД, максимальный	93,3	91,4	92,4	88,0
Диаметр якоря, м	0,493	0,493	0,493	0,493
Длина якоря, м	0,4	0,4	0,4	0,4
Диаметр коллектора, м	0,4	0,4	0,4	0,4
Масса, кг	3100	3100	3100	3100
Вертикальный размер станины, м	0,815	0,815	0,815	0,815
Класс изоляции обмотки (якоря/полюсов)	Н/Ф	Н/Ф	Н/Ф	Н/Ф
Тип подшипки	Опорно-рамная	Опорно-осевая	Опорно-осевая	Опорно-осевая
Централь не менее, м	0,47	0,47	0,47	0,47
Расход охлаждающего воздуха, номинальный, м ³ /с	1,85	1,3	1,3	1,05—1,3

* Электродвигатель ЭД126УХЛ1 имеет шестиполосную магнитную систему.

** Воздушный зазор под главными полюсами.

Таблица 2.3

Основные параметры тяговых электродвигателей тепловозов переменного тока

Тип двигателя	ДАТ-305	ДАТ-470
Серия тепловоза	ТЭМ21	2ТЭ25А
Мощность, кВт	305	470
Напряжение продолжительного режима работы, В	390	495
Ток продолжительного режима работы, А	327	429
Частота вращения максимальная, об/мин	2320	2778
Число полюсов	6	8
КПД, %	88,0	92,4
Масса двигателя, кг	2100	2100
Номинальный момент, Н·м	9315	10 200
Диаметр якоря (внешний), мм	490	495
Масса проводниковых материалов, кг	—	296
Масса магнитных материалов, кг	—	930
Масса изоляционных материалов, кг	—	—
Удельный расход проводниковых материалов, кг/кВт	—	0,63
Удельный расход магнитных материалов, кг/кВт	—	1,98
Удельный расход изоляционных материалов, кг/кВт	—	—
Относительная масса двигателя, кг/кВт	6,88	4,46
Отношение массы к моменту, кг/Н·м	0,23	0,21

продолжительный номинальный режим при наименьшем напряжении — это режим работы с наибольшим током якоря, при котором работа в течение неограниченного времени при номинальной мощности и наименьшем напряжении не вызывает превышения предельно допускаемых температур обмоток;

продолжительный номинальный режим при наибольшем напряжении — это режим работы с наибольшим напряжением, при котором работа в течение неограниченного времени при номинальной мощности и наименьшем токе не вызывает превышения предельно допускаемых температур обмотки возбуждения.

Допустимые температуры обмоток и коллектора тяговых двигателей и генераторов в зависимости от класса нагревостойкости изоляции приведены в [2].

Основные параметры тяговых генераторов и тяговых электродвигателей переменного и постоянного тока указаны в табл. 2.1—2.3.

2.4. Условия эксплуатации и требования, предъявляемые к электрооборудованию

Условия работы электрооборудования на локомотиве имеют особенности, главными из которых являются:

- повышенная запыленность и влажность воздуха;
- наличие в машинном отделении паров горюче-смазочных материалов;
- вибрация от работы дизеля и вспомогательных механизмов;
- возможность резких ударов при прохождении локомотивом стыков рельсовых плетей.

В связи с этим к электрооборудованию предъявляются повышенные требования.

1. *Надежность.* Это требование является основным из-за сложных условий работы электрооборудования и того, что локомотив на длительное время удаляется от своей ремонтной базы. Требование высокой надежности электрооборудования обеспечивается его изготовлением из высококачественных конструкционных и изоляционных материалов и дублированием сложных блоков и систем (например, система аварийного возбуждения тягового генератора).

2. *Минимальные масса и габариты.* Уменьшение массы и габаритов электрооборудования позволит более рационально разместить его в стесненных габаритах тепловоза. Выполнение этого требования возможно за счет внедрения электрических передач переменного тока, изготовления электрооборудования из прочных и легких материалов, использования высокооборотных электродвигателей и др.

3. *Максимальная унификация.* Уменьшение типов электрооборудования позволяет сократить количество запасных частей и повысить качество его технического обслуживания.

4. *Максимальная автоматизация энергетической системы локомотива.* Для выполнения этого требования необходимо сокращать количество коммутационных аппаратов, переходя на цифровые системы управления.

5. *Высокий КПД и коэффициент мощности электрических машин и статических преобразователей.*

6. *Малый шум и минимальные помехи.*

7. *Удобство в обслуживании.*

Электрооборудование локомотива должно обеспечивать надежную работу в условиях совместного влияния климатических факторов и механических воздействий.

В части воздействия механических факторов внешней среды электрооборудование должно быть рассчитано на вибрации, удары и другие механические нагрузки, указанные в ГОСТ 175161 [16] для группы условий эксплуатации не ниже М25.

Нормальные значения климатических факторов внешней среды — по ГОСТ 15150 [17] и ГОСТ 15543.1 [18], при этом верхнее значение температуры окружающего воздуха $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, нижнее значение $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Все компоненты электрооборудования должны сохранять свои характеристики после длительного хранения при минимальной температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Наряду с температурными ограничениями разработчики должны учитывать и большие местные температурные перепады, вызывающие конденсацию влаги в шкафах с электрооборудованием.

Электрическое оборудование должно быть стойким к увлажнению.

2.5. Аккумуляторные батареи

Стартерные батареи (АБ) применяются на тепловозе для питания стартер-генераторов при пуске дизелей (или тяговых генераторов, работающих в пусковом режиме), питания цепей управления и освещения, а также некоторых вспомогательных цепей при остановленном дизеле. Батарея состоит из отдельных аккумуляторных элементов. Аккумуляторные батареи должны удовлетворять следующим требованиям [19]:

- иметь большую емкость при небольших габаритах и массе;
- обладать малым внутренним сопротивлением для получения большого разрядного тока при пуске дизеля;
- сохранять работоспособность при низких температурах окружающей среды и повышенной влажности (до 98 % влажности при температуре воздуха $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- не требовать технического обслуживания большого объема;

– иметь длительный срок службы и сохранять работоспособность при вибрационных нагрузках с частотой до 100 Гц и при ускорениях в горизонтальном направлении 4 g;

– обладать малым саморазрядом.

На тепловозах получили распространение аккумуляторы: щелочные — железо-никелевые и никель-кадмиевые ; кислотные — свинцовые.

Железо-никелевые и никель-кадмиевые аккумуляторы имеют одинаковое номинальное напряжение одного элемента 1,2 В. Срок службы никель-кадмиевых аккумуляторов составляет 10—12 лет, а железо-никелевых — 6—7 лет. Железо-никелевые аккумуляторы, по сравнению с никель-кадмиевыми, имеют повышенный саморазряд, особенно при температуре электролита близкой к +40 °С, и меньшую емкость — при температуре ниже –20 °С. Кроме того, железо-никелевые аккумуляторы уступают никель-кадмиевым по удельным весо-габаритным показателям, и в том, что их зарядное напряжение на 5—6 % выше.

Кислотные аккумуляторы имеют номинальное напряжение одного элемента 2,0 В. Поэтому кислотная батарея, рассчитанная на одинаковую с щелочной батареей емкость и напряжение, имеет меньший объем и массу.

Тем не менее щелочные аккумуляторы имеют перед кислотными аккумуляторами преимущества:

– срок службы щелочных аккумуляторов больше в 3—5 раз по времени и в 5—6 раз по числу разрядных циклов;

– щелочные аккумуляторы менее чувствительны к глубоким разрядам, перезарядам, недозарядам;

– щелочные аккумуляторы имеют больший, чем кислотные, срок хранения, меньший саморазряд, просты в обслуживании и не требуют систематических подзарядов во время простоя.

На электровозах используются тяговые щелочные аккумуляторные батареи. В сравнении со стартерными аккумуляторными батареями они имеют меньшие значения тока разряда. Например, на электровозе ВЛ10 используется щелочная никель-кадмиевая аккумуляторная батарея типа 40КН-125 номинальной емкостью 125 А·ч, которая является источником напряжения 50 В.

На тепловозах применяются стартерные кислотные и щелочные аккумуляторные батареи, допускающие разряд токами 2000—2500 А.

В соответствии с Международной классификации они относятся к классу Н (короткий режим разряда). При этом токе момент стартера должен обеспечивать необходимую для пуска дизеля частоту вращения его вала.

Емкость аккумулятора, А·ч, определяется произведением разрядного тока $I_{\text{раз}}$ и его временем разряда $t_{\text{раз}}$:

$$Q = I_{\text{раз}} t_{\text{раз}}.$$

2.5.1. Кислотные аккумуляторы

На тепловозах применяются стартерные кислотные аккумуляторные батареи 32ТН-450 и 48ТН-450, состоящие из 32 или 48 элементов (аккумуляторов), соединенных последовательно. В обозначении указывается: Т — тепловозная; Н — вид электродных пластин (намазные), номинальная емкость 450 А·ч. Номинальная емкость кислотных аккумуляторов определяется при их разряде 10-часовым током.

Кислотный аккумулятор, например ТН-450, состоит из полимерного сосуда, в который погружено 19 положительных и 20 отрицательных пластин (рис. 2.7, б). Каждая пластина представляет собой отлитую из свинцового сплава решетку, ячейки которой заполнены активной массой. После формовки и зарядки аккумулятора активная масса положительной пластины состоит из окислов свинца (PbO_2), а отрицательная — из губчатого металлического свинца (Pb). Пластины изолированы друг от друга сепараторами из листового пористого полихлорвинила, стекловолокна или винипласта.

Сверху все положительные пластины соединены между собой, образуя блок, который посредством резьбовых соединений и резиновых уплотнений закреплен на полимерной крышке аккумулятора. Аналогично выполнен блок отрицательных пластин. Каждый блок имеет на крышке по два вывода — борна. Кроме того, в крышке предусмотрено отверстие для заливки электролита и воды, закрываемое пробкой. Конструкция пробки обеспечивает свободный выход газов из аккумулятора, но препятствует проникновению в него воздуха.

Электролитом для кислотных батарей служит раствор серной кислоты в дистиллированной воде. Плотность его в заряженных аккумуляторах должна составлять 1,24—1,25 г/см³. Увеличение плотности электролита несколько повышает напряжение на элементе,

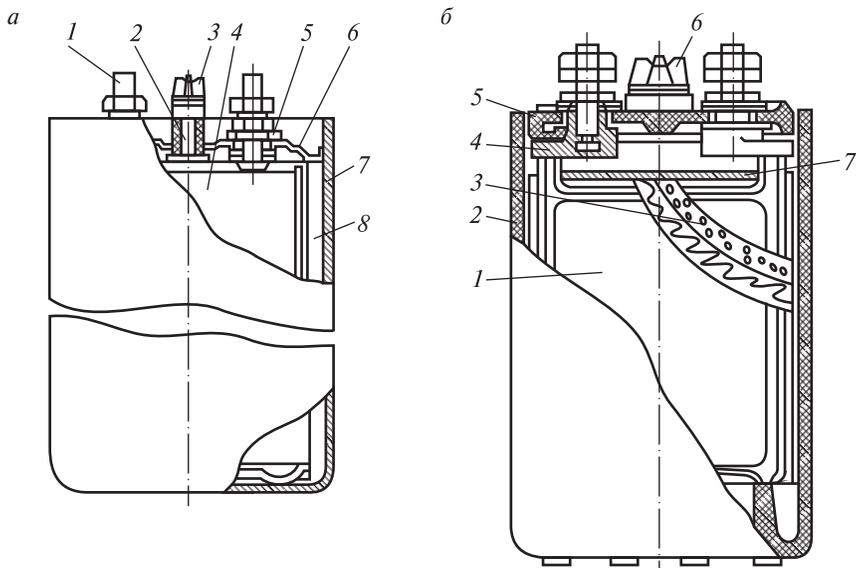


Рис. 2.7. Аккумуляторные элементы тепловозной батареи:

а — щелочной: 1 — борн; 2 — трубка для заливки электролита; 3 — пробка-клапан; 4 — пластины; 5 — втулка; 6 — крышка; 7 — корпус; 8 — электролит;
б — кислотной: 1 — электроды; 2 — корпус; 3 — сепараторы; 4 — борн; 5 — крышка; 6 — пробка-клапан; 7 — отражательный щиток

но резко снижает его срок службы. С точки зрения уменьшения коррозии решеток также целесообразно снижать концентрацию электролита. При вероятности замерзания электролита его плотность снижать нельзя, поскольку при этом пластины аккумулятора разрушаются.

Работа аккумулятора на тепловозе характеризуется чередующимися разрядами и зарядами. При разряде кислотного аккумулятора на пластинах обеих полярностей образуется сульфат свинца $PbSO_4$, а плотность электролита снижается. Сульфатация происходит также при систематическом недозаряде аккумулятора, применении электролита с повышенной плотностью, работе батареи при высокой температуре электролита, загрязнении его и длительном хранении аккумуляторов без подзаряда.

После заряда аккумулятора часть сульфата остается на пластинах, что может явиться причиной снижения их полезной емкости и напряжения при разряде.

2.5.2. Щелочные аккумуляторы

Промышленностью для тепловозов выпускаются стартерные щелочные батареи: никель-железные, например 46ТПНЖ-550, и никель-кадмиевые, например 72КН-150Р.

В обозначения типов батарей входят: 46, 72 — количество последовательно включенных аккумуляторов; ТП — тепловозная пусковая; НЖ — никель-железная, КН — кадмиевая короткого режима разряда (пусковая); 550, 150 — номинальная емкость, А·ч; Р — полимерный корпус. Номинальная емкость щелочных аккумуляторов определяется при их разряде 5-часовым током.

Щелочной аккумулятор имеет два блока положительных и отрицательных пластин, которые размещены в стальном или полимерном корпусе и чередуются между собой (рис. 2.7, а). Пластины представляют собой железные ламели (пакеты с прорезями), заполненные активными гранулами; ламели изолированы перфорированными сепараторами и резиновыми шнурами. Каждый блок ламелей имеет два борна, выведенных через уплотнительные кольца на поверхность крышки. Металлический сосуд аккумулятора покрыт изоляционной эмалью и резиновым чехлом.

В никель-железном аккумуляторе активными массами являются гидрат окиси никеля NiO (положительный электрод) и губчатое железо Fe (отрицательный электрод); в никель-кадмиевых аккумуляторах положительный электрод представляет собой гидрат окиси никеля $Ni(OH)_2$, отрицательный электрод — губчатый кадмий Cd с добавлением железа Fe .

Электролитом в щелочных аккумуляторах служит гидрат окиси калия KOH плотностью 1,19—1,21 г/см³ с добавкой гидроокиси лития 20 ± 2 г/л.

Электролит щелочных аккумуляторов в реакции не участвует и плотность его во время работы батареи не изменяется. Это несколько осложняет контроль за состоянием батареи в эксплуатации.

Масса щелочных аккумуляторов в перспективе может быть значительно уменьшена: разрабатываются конструкции пластин, допускающие возможность отказа от запрессовки активной массы в металлические ламели («безламельные» аккумуляторы).

Тяговая батарея типа 40КН-125 номинальной емкостью 125 А·ч состоит из 42 аккумуляторных элементов КН-125; из них два эле-

мента — запасные. Номинальное напряжение каждого элемента составляет 1,25 В. Режим заряда батареи рассчитан на 6 ч силой тока 31А; разряд батареи рассчитан на 8-часовой режим током 12,5 А.

2.5.3. Характеристики аккумуляторов

Работа аккумулятора определяется его вольт-амперной характеристикой, которая представляет зависимость напряжения на аккумуляторе от тока разряда $U = f(I_{\text{раз}})$ (рис. 2.8). Вольт-амперные характеристики позволяют определить напряжение на аккумуляторе в процессе его разряда, а также внутреннее сопротивление аккумулятора. Характеристики аккумуляторов должны соответствовать ГОСТ, а изготавливаются они в соответствии с ТУ (техническими условиями).

Блоки никель-железных аккумуляторных батарей должны соответствовать ГОСТ Р 52083 [20]; блоки никель-кадмиевых аккумуляторных батарей — ГОСТ Р МЭК 60623 [21]. В соответствии с ТУ на щелочные аккумуляторы рабочая температура их электролита допускается не ниже $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$; при этом блоки сохраняют свою работоспособность в случае пребывания в течении трех часов

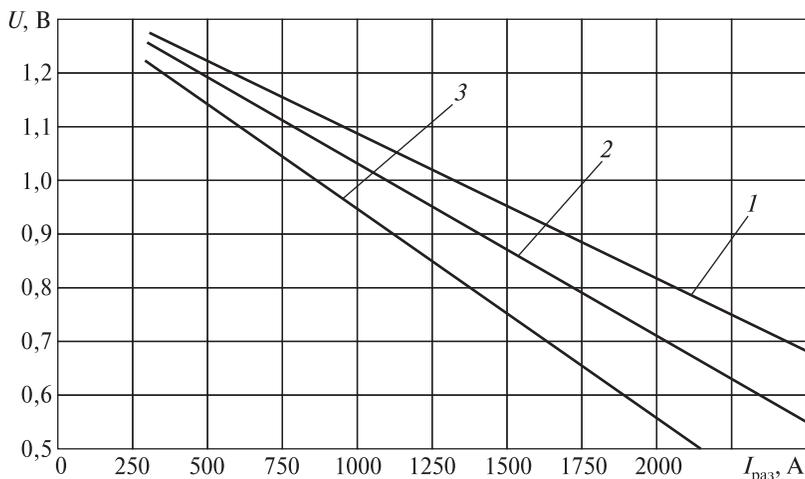


Рис. 2.8. ВАХ аккумулятора КН-150Р в зависимости от тока разряда при различных значениях времени разряда:
1 — через 1 с; 2 — через 10 с; 3 — через 60 с

при температуре: $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ — никель-кадмиевые; $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — никель-железные.

В свинцовых аккумуляторах по ТУ завода-изготовителя температура электролита во время эксплуатации не должна быть ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Технические характеристики тепловозных батарей определяются типом и количеством аккумуляторов, которые эту батарею составляют (табл. 2.4). В частности, батарея, составленная из 32 кислотных аккумуляторов, будет иметь номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}} = 32 \times 2\text{ В} = 64\text{ В}$, а составленная из 48 кислотных аккумуляторов — соответственно $U_{\text{НОМ}} = 48 \times 2\text{ В} = 96\text{ В}$.

Батареи с $U_{\text{НОМ}} = 64\text{ В}$ используются на маневровых тепловозах и магистральных тепловозах серии ТЭ10, М62 и ТЭП60 (табл. 2.5). Батареи с $U_{\text{НОМ}} = 96\text{ В}$ — на всех остальных сериях магистральных тепловозов и маневровых тепловозах серии ЧМЭЗ.

Таблица 2.4

Технические характеристики тепловозных аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	Номинальная емкость, А·ч	Номинальное напряжение, В	Тренировочный режим разряда		Режим пуска дизеля				Масса (с электролитом), кг	
			продолжительность/ток, ч/А	конечное напряжение, В, не менее	Пиковый разряд		Установившийся		аккумулятора	батареи
					ток, А	напряжение, В, не менее	ток, А	напряжение, В, не менее		
32ТН-450	450	64	10/45	57,6	1700	32	900	46,4	38	1270
48ТН-450	450	96	10/45	86,6	1700	48	900	69,6	38	1930
48ТН-350	350	96	10/35	86,6	1800	48	800	70,0	30	1710
46ТПНЖ-550	550	57,5	5/110	46,0	2200	28	900	46,0	45	2100
72КН-150Р	150	90	5/30	72,0	1800	47	900	64,8	14	1100

Таблица 2.5

Использование аккумуляторных батарей на тепловозах

Серия тепло-воза	2ТЭ10М(В,У) 2ТЭП10(Л)	М62 ТЭП60 2М62 ТЭМ2(У) ТЭМ18(Г)	2ТЭ116 2ТЭ121 ТЭП70 2ТЭ70 2ТЭ25 ТЭМ7	ЧМЭ3 (Э,Т)	Автомотри-са АЧ2	Дизель-поезд Д1
Тип батареи	46ТПНЖ550 32ТН450	32ТН450 50КН150Р	48ТН450 72КРSH220Р	72КН150Р	72КН150Р NKS150* 72КН150Р	2SK40*

Для аккумуляторов обоих типов характерно снижение емкости с увеличением тока разряда (табл. 2.6). Влияние тока разряда на значение емкости аккумулятора и его напряжение приводится на *разрядных характеристиках* (2.9). В качестве единицы разрядного тока для разрядных характеристик используется условная величина, численно равная номинальной емкости аккумуляторов. Например, $\bar{I}_{\text{раз}} = 5Q$ означает, что разряд аккумулятора КН-150Р выполнялся током $I_{\text{раз}} = 750$ А. У кислотных аккумуляторов уменьшение емкости с увеличением $I_{\text{раз}}$ связано со снижением плотности электролита в пограничных с пластинами слоях, что вызывает увеличение внут-

Таблица 2.6

Емкость аккумуляторных батарей при различных режимах разряда

Разрядный режим	Ток, А	Минимально допустимое напряжение на аккумуляторе, В	Емкость батареи, А·ч
<i>Кислотная батарея 48ТН-450</i>			
10-часовой	45	1,8	450
5-часовой	68	1,7	340
Прерывистый толчками	1700	1,0	70
Прокрутка (5 мин)	900	1,45	75
<i>Щелочная батарея 46ТПНЖ-550</i>			
5-часовой	110	1,0	550
Прерывистый толчками	2200	0,6	—
Прокрутка (5 мин)	1000	1,0	85

ренного сопротивления и падение напряжения в аккумуляторе. У щелочных аккумуляторов уменьшение емкости с увеличением $I_{\text{раз}}$ связано с процессом поляризации электродов. Емкость снижается особенно интенсивно при пуске дизеля, когда процесс протекает при $I_{\text{раз}} = 1800\text{--}2200\text{ А}$ за $5\text{--}20\text{ с}$, т.е. за время, недостаточное для равномерной диффузии электролита в элементах. Емкость, затрачиваемая на один пуск дизеля, не превышает $15\text{ А}\cdot\text{ч}$, но емкость батареи при пусковом режиме уменьшается в несколько раз (рис. 2.9). С течением времени плотность электролита выравнивается и емкость восстанавливается, хотя и не полностью. Поэтому между пусками дизеля необходима выдержка времени в $2\text{--}3\text{ мин}$.

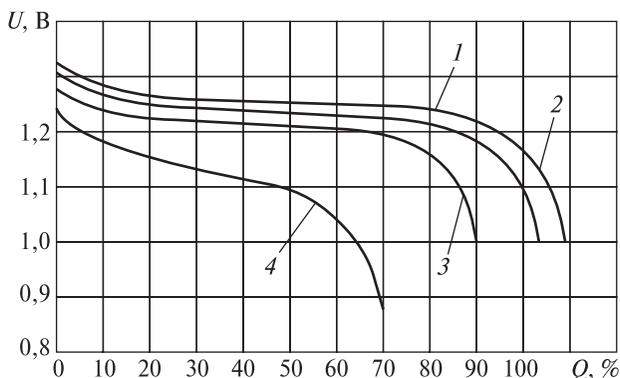


Рис. 2.9. Разрядные характеристики никель-кадмиевого аккумулятора при различных значениях тока разряда, численно равного его емкости:
 $1 - 0,1Q$; $2 - 0,2Q$; $3 - Q$; $4 - 5Q$

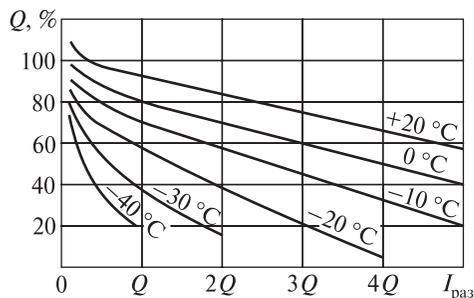


Рис. 2.10. Разрядные характеристики аккумулятора КН-150Р при различных температурах электролита

Температура электролита также оказывает влияние на емкость аккумулятора. С понижением температуры электролита его проводимость уменьшается, внутренние потери увеличиваются и емкость снижается (рис. 2.10). Особенно неблагоприятно сказываются эти закономерности на работе кислотных аккумуляторов,

плотность электролита которых находится в прямой зависимости от степени заряда и, следовательно, внутреннее сопротивление батареи зависит от остаточной емкости и плотности электролита одновременно. У щелочных аккумуляторов внутреннее сопротивление зависит практически только от остаточной емкости, поэтому работа щелочных элементов более устойчива.

Расчет необходимой емкости батареи для пуска дизеля выполняется с учетом параметров электрической цепи пуска и внешних характеристик аккумуляторов [2]. Для работы батареи в пусковом режиме в первые моменты раскрутки вала дизеля характерен резкий «бросок» разрядного тока $(I_{\text{раз}})_{\text{max}}$ (рис. 2.11). Для уменьшения пикового разрядного тока $(I_{\text{раз}})_{\text{max}}$ на двухсекционных тепловозах используется параллельное включение аккумуляторных батарей обеих секций. При такой схеме пиковый ток аккумуляторов снижается почти в 2 раза, а время пуска дизеля $t_{\text{пр}}$ сокращается с 10–20 с до 3–5 с.

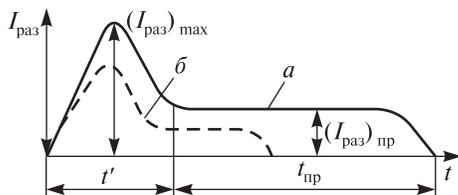


Рис. 2.11. Изменение тока аккумуляторной батареи при пуске дизеля:

a — пуск дизеля от одной батареи без ускорителя пуска; *б* — пуск дизеля от двух батарей с ускорителем пуска

Значение емкости тепловозных пусковых батарей может быть рассчитано по зависимости:

$$Q = k_3 \frac{(I_{\text{раз}})_{\text{ср}} t_{\text{п}} z_{\text{п}}}{3600},$$

где $k_3 = 3-4$ — коэффициент запаса;

$(I_{\text{раз}})_{\text{ср}} = \frac{(I_{\text{раз}})_{\text{max}} + (I_{\text{раз}})_{\text{min}}}{2}$ — среднее значение тока батареи при пуске, А;

$t_{\text{п}} = 15-40$ — время пуска, с;

$z_{\text{п}} = 13-15$ — количество пусков дизеля, которое должна выдержать батарея с перерывом между пусками 2–3 мин.

Токи разряда тепловозных батарей составляют: $(I_{\text{раз}})_{\text{max}} = 1500-2500$ А; $(I_{\text{раз}})_{\text{min}} = 200-400$ А.

Момент, который может создать батарея в пусковом режиме

$$M_{\text{п}} = 0,974 \frac{E_0 (I_{\text{раз}})_{\text{мин}}}{n_0},$$

где E_0 — ЭДС батареи;

n_0 — частота вращения вала генератора при пуске, об/мин.

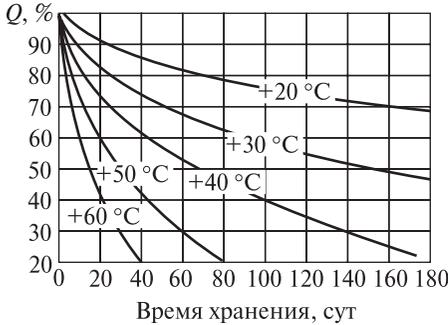


Рис. 2.12. Саморазряд никель-кадмиевого аккумулятора при различных температурах хранения

устройства, высокий потенциал поверхности заряженного оксидно-никелевого электрода постепенно снижается. Уровни заряженности поверхностных и глубинных слоев электрода выравниваются. В результате со временем скорость саморазряда понижается. Из-за различий в технологии изготовления аккумуляторов скорость их саморазряда и уровень остаточной емкости у аккумуляторов разных серий даже одного производителя могут существенно различаться.

Хранение аккумуляторов при низкой температуре понижает потери: обычно саморазряд при 0 °C в 2 раза меньше, чем при 20 °C.

На работу аккумуляторов вредное действие оказывает и их перезаряд. Признаками перезаряда является нагрев электролита до температуры, превышающей 45 °C, в результате чего разлагается электролит и вымывается активная масса.

Уход за батареей в эксплуатации сводится к доливке дистиллированной воды и содержанию аккумуляторов в чистоте. Аккумуляторы не требуют ремонта, который заменяется их промывкой.

Электролит аккумуляторов готовят в стеклянной или пластиковой посуде.

2.6. Импульсные конденсаторы

В последние десятилетия разработан новый класс электротехнических устройств емкостного типа с высокой плотностью накопления электрической энергии (до нескольких джоулей на кубический сантиметр). Эти устройства получили название импульсных конденсаторов сверхвысокой энергоемкости (или молекулярных накопителей) ИКЭ.

Накопление энергии в традиционных конденсаторах осуществляется электрическим полем в объеме диэлектрика. Предельная теоретическая плотность энергии таких конденсаторов 1 Дж/см^3 .

У молекулярных накопителей электрическое поле формируется не в объеме диэлектрика, а вблизи поверхности контакта материалов с различными электрофизическими свойствами. Кроме того, необходимым условием создания накопителей является большая площадь поверхности электродных материалов, в качестве которых используются дисперсные высокопористые материалы, обладающие высокой электронной проводимостью. Накопительный элемент состоит из двух пористых электродов толщиной до нескольких миллиметров, разделенных ионопроводящим и электроизолирующим сепаратором. Сравнительные показатели аккумулятора и накопителей энергии приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Технические характеристики аккумуляторов и молекулярных накопителей энергии

Элемент	Конденсатор	ИКЭ	Аккумулятор
Плотность энергии, Дж/см ³	0,1	0,5—2,5	25
Время перезарядки, с	10^{-3}	$0,025^{-5}$	10^4
Предельная максимальная мощность разряда, Вт/см ³	10	1,1—100	0,1
Количество циклов	10^6	$10^3—10^6$	10^3

Плотность энергии в ИКЭ в несколько раз выше, чем в лучших конденсаторах, а мощность импульсного разряда в несколько раз выше мощности аккумуляторных батарей. Импульсные накопители

особенно эффективны в системах, где требуется импульсное выделение энергии за время порядка 0,1—10 с. Именно в пределах этого времени осуществляется запуск двигателей внутреннего сгорания по нормативным требованиям.

Импульсные конденсаторы имеют характеристики, которые важны при проектировании систем электростартерного пуска дизелей:

- сверхвысокие плотности электрической емкости и энергии, заключенной в объеме пористого электрода, соответственно: 100 Ф/см^3 и 50 Дж/см^3 ;

- малое внутреннее сопротивление, в результате чего достигается мощность импульсного разряда до 10 Вт/см^3 ;

- устойчивость к кратковременным перенапряжениям;

- нормальная эксплуатация в диапазоне температур от -40 до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$;

- малое время постоянной времени заряда и разряда;

- малый ток утечки и возможность длительного хранения заряда в течении сотен часов, теоретически неограниченное количество циклов перезарядки;

- большой срок эксплуатации и устойчивость к токам короткого замыкания, пожаро- и взрывобезопасность;

- отсутствие необходимости обслуживания в процессе эксплуатации.

Для пуска дизеля разработаны модули, состоящие из комплекта ИКЭ, соединенных последовательно-параллельно в одном цилиндрическом корпусе (диаметр 236 мм, высота 390 мм). Модули имеют энергоемкость — 40 кДж и изготавливаются в двух исполнениях: емкостью 8,5 и 23,0 Ф. Номинальное напряжение заряда модуля емкостью 8,5 Ф составляет 110 В, модуля емкостью 23,0 Ф — 75В. Масса одного модуля 40 кг.

Использование ИКЭ в системах стартерного пуска дизеля практически не требует сложной модернизации. Накопитель на время пуска с помощью управляемого полупроводникового выключателя подключается параллельно к аккумуляторной батарее и образуется комбинированный источник питания, состоящий из батареи и модуля ИКЭ (рис. 2.13).

Включение системы заряда накопителей модуля ИКЭ осуществляется при включении кнопки «Пуск дизеля»: +АБ, модуль ИКЭ,

замыкающий контакт кнопки «Пуск дизеля», резистор r_y , управляющий электрод тиристора Т, катод тиристора Т, зарядный резистор r_3 , стартер-генератор СТГ, —АБ. Тиристор Т открывается, шунтирует кнопку «Пуск дизеля» и начинается зарядка накопителей от АБ. Продолжительность заряда накопителей будет определяться временем работы маслопрокачивающего насоса дизеля (см. п. 8.3). По истечении времени прокачки дизеля маслом включается пусковой контактор Д2, силовой контакт которого одновременно собирает три контура. В первом контуре напряжение заряда ИКЭ прикладывается к тиристору Т в обратном направлении и тот запирается. Два других контура — питание стартера от АБ и от модуля ИКЭ через диод Д.

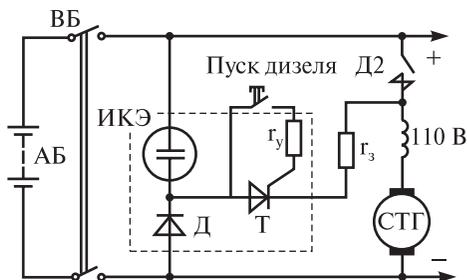


Рис. 2.13. Принципиальная схема пуска дизеля тепловозов 2ТЭ116 и ТЭП70 с использованием накопителей энергии

Стартер начинает раскручивать вал дизеля, поддерживая на тиристоре Т обратное напряжение и обеспечивая его закрытое состояние. Кроме того, диод Д отключает ИКЭ от АБ, исключая влияние накопителей на ток утечки АБ.

Опыт эксплуатации тепловозов с модулями ИКЭ показал, что применение накопителей позволяет в 1,5 раза снизить максимальные значения разрядного тока при пуске дизеля и повысить ресурс аккумуляторной батареи на 10—15 %, а также осуществлять надежный пуск дизеля при емкости батареи составляющей 20 % от номинального значения. Оборудование тепловозов с аккумуляторными батареями, выработавшими ресурс (остаточная емкость не более 60 %) модулями ИКЭ позволяет продолжить нормальную эксплуатацию локомотива без замены батарей еще в течение 2—3 лет. Кроме того, в таком комбинированном источнике питания возможно использовать вместо стартерных аккумуляторных батарей тяговые, которые имеют меньшую стоимость и больший ресурс.

Масса комплекта модулей ИКЭ энергоемкостью 108—120 кДж (комплект для секции тепловоза) не превышает 120 кг.

Глава 3. СИСТЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Общие сведения

Выпрямителем называется статический преобразователь электрической энергии переменного тока в постоянный ток.

Выпрямители классифицируются:

- по мощности;
- напряжению;
- числу фаз;
- схеме выпрямления;
- способу регулирования выходного напряжения.

По мощности выпрямители делятся на маломощные — до 1 кВт, средней мощности — до 100 кВт, мощные — свыше 100 кВт, а по напряжению — низкого — до 250 В, среднего — до 1000 В, высокого — свыше 1000 В.

По числу фаз источника переменного напряжения выпрямители делятся на однофазные и трехфазные.

По схеме выпрямления различают выпрямители:

- с одним вентилем (однофазные однополупериодные);
- со средней точкой (однофазные двухполупериодные и трехфазные);

мостовые (однофазные двухполупериодные и трехфазные).

По способу регулирования выходного напряжения выпрямители делятся на управляемые и неуправляемые. Управляемые выпрямители должны быть собраны на управляемых вентилях, например тиристорах. Наиболее распространенным способом регулирования напряжения или тока на выходе управляемого выпрямителя является непосредственное воздействие на вентильные элементы.

На тепловозах применяются в основном мостовые схемы выпрямления, поэтому принцип работы схем выпрямления со средней точкой здесь не рассматриваются, а их сравнительные характеристики приведены в табл. 3.1.

3.2. Однофазная однополупериодная схема выпрямления

Неуправляемая однополупериодная схема выпрямления состоит из источника переменного напряжения (например, однофазного трансформатора Тр), диода В и нагрузки. Рассмотрим простейший случай работы схемы на активную нагрузку — резистор R_d (рис. 3.1, а).

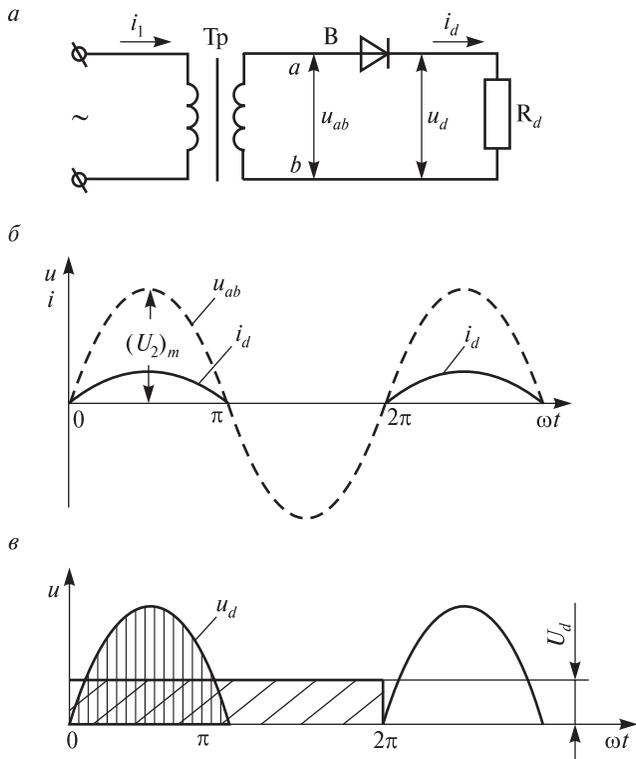


Рис. 3.1. Неуправляемый однофазный однополупериодный выпрямитель: а — схема; б — диаграмма напряжения источника и тока нагрузки; в — диаграмма выпрямленного напряжения

На вторичной обмотке трансформатора Тр формируется синусоидальное напряжение, мгновенное значение которого

$$u_{ab} = (U_2)_m \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t,$$

где $(U_2)_m$ и U_2 — соответственно амплитудное и действующее значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора (рис. 3.1, б);

$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ — угловая частота напряжения источника;

f и T — соответственно частота и период напряжения источника.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для цепи нагрузки можно записать:

$$u_{ab} = \Delta u_B + R_d i_d, \quad (3.1)$$

где $\Delta u_B = r_B i_d$ — падение напряжения на диоде;

i_d — выпрямленный ток в нагрузке;

r_B — сопротивление диода.

Когда к диоду приложено прямое напряжение $u_{ab} > 0$, диод открывается и во вторичной цепи протекает ток i_d . В проводящем состоянии диод имеет очень малое сопротивление $r_B \rightarrow 0$, поэтому для проводящего состояния цепи $\Delta u_B \rightarrow 0$, и напряжение источника будет приложено к нагрузке:

$$u_{ab} = R_d i_d,$$

а мгновенный ток через нагрузку определится как

$$i_d = u_{ab} / R_d. \quad (3.2)$$

Диод будет находиться в проводящем состоянии, пока проходящий через него ток i_d не снизится до нуля. При активной нагрузке (когда ток и напряжение совпадают по фазе) диод закроется, когда напряжение поменяет полярность и станет $u_{ab} < 0$. В этом случае $i_d = 0$ и в соответствии с (3.1)

$$u_{ab} = \Delta u_B,$$

т.е. все напряжение источника будет приложено к диоду в обратном направлении — обратное напряжение на диоде.

Таким образом, в соответствии с (3.1) напряжение источника с действующим значением U_2 в течение положительного полупериода будет приложено к нагрузке R_d , а в течение отрицательного полупериода — к диоду В в обратном направлении.

В результате через нагрузку будет протекать *постоянный пульсирующий ток* i_d (ток и напряжение считаются постоянными, если они не меняют направления) (рис. 3.1, в). Максимальное значение

выпрямленного напряжения на R_d будет равно амплитудному значению фазного напряжения вторичной обмотки Тр:

$$\left| (U_2)_m \right| = (u_d)_{\max}.$$

Среднее значение выпрямленного напряжения представляет собой постоянную составляющую в напряжении u_d (см. п. 3.7). Оно определяется путем деления площади кривой величины u_d на период повторяемости этой же величины. Для неуправляемой однополупериодной схемы выпрямления среднее значение выпрямленного напряжения на интервале периода $T = 2\pi$:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (u_d)_{\max} \sin(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{1}{2\pi} (U_2)_m [-\cos(\pi) + \cos(0)] = \frac{1}{2\pi} (U_2)_m \cdot 2 = \frac{(U_2)_m}{\pi} = \\ &= \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \approx 0,32 \sqrt{2} U_2 \approx 0,45 U_2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Значение U_d геометрически может быть представлено высотой прямоугольника с основанием, равным периоду (косая штриховка), площадь которого численно равна площади, ограниченной кривой выпрямленного напряжения на периоде (прямая штриховка) (рис. 3.1, в).

Соответственно среднее значение выпрямленного тока в данной системе выпрямления:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_d dt = \frac{(i_d)_{\max}}{\pi} = 0,32 (i_d)_{\max}, \quad (3.4)$$

где $(i_d)_{\max}$ — максимальное значение выпрямленного тока, которое в соответствии с (3.2) определится как

$$(i_d)_{\max} = \frac{(u_d)_{\max}}{R_d} = \frac{(U_2)_m}{R_d}. \quad (3.5)$$

С учетом (3.3) и (3.5) среднее значение выпрямленного тока:

$$I_d = \frac{(i_d)_{\max}}{\pi} = \frac{(U_2)_m}{\pi R_d} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi R_d} = \frac{U_d}{R_d}. \quad (3.6)$$

Для получения действующего значения выпрямленного тока I_B нужно приравнять электрические потери, создаваемые этим током, потерям, создаваемым током i_d на периоде его повторяемости

$$\frac{1}{2\pi} I_B^2 R_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_d^2 R_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [(i_d)_{\max} \sin(\omega t)]^2 R_d d(\omega t).$$

После интегрирования и с учетом (3.4) получим, что

$$I_B = \frac{(i_d)_{\max}}{2} = \frac{\pi I_d}{2}.$$

В общем случае мощность, выделяемая на нагрузке R_d , определяется мгновенными значениями тока и напряжения:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi u_d i_d d(\omega t) \quad (3.7)$$

или электрическими потерями на нагрузке действующего значения тока.

Учитывая что $U_d = R_d I_d$, мощность на активной нагрузке выразится как:

$$P = I_B^2 R_d = \frac{\pi^2 I_d^2 R_d}{4} = \frac{\pi^2 I_d U_d}{4} = \frac{U_d^2}{2 R_d}. \quad (3.8)$$

В то же время мощность постоянного тока системы выпрямления определяется произведением выпрямленных значений тока и напряжения и при активной нагрузке будет равно:

$$P_d = U_d I_d = \frac{2U_d^2}{\pi^2 R_d}.$$

Важно отметить, что значения P_d и P совпадают только в случае идеально сглаженного выпрямленного напряжения. Во всех других случаях $P > P_d$.

Для сравнения различных схем неуправляемых выпрямителей используют коэффициент схемы $k_{\text{сх}}$, который определяется как отношение между средним значением выпрямленного напряжения U_d и действующим значением переменного напряжения на входе выпрямителя U_2 :

$$k_{\text{сх}} = U_d / U_2. \quad (3.9)$$

Однофазная однополупериодная схема выпрямления в соответствии с (3.3) имеет значение $k_{\text{сх}} = 0,45$.

Во всех схемах выпрямления для выбора вентильного элемента необходимо знать максимальное и среднее значения тока, протекающего через него, а также максимальное значение обратного напряжения $(U_{\text{обр}})_{\text{max}}$, определяющее его класс (см. п. 1.6.1). В данной схеме выпрямления:

$$(U_{\text{обр}})_{\text{max}} = (U_2)_m = \sqrt{2}U_2 = \pi U_d.$$

Максимальное значение тока, проходящего по вентилю (максимальный анодный ток) в соответствии с (3.4):

$$(I_a)_{\text{max}} = (i_d)_{\text{max}} = \pi I_d.$$

Среднее значение тока вентиля (средний анодный ток) равно току нагрузки

$$(I_a)_{\text{ср}} = I_d.$$

Если вместо диода в схеме выпрямления установлен тиристор Т, неуправляемая схема выпрямления преобразуется в управляемую схему выпрямления (рис. 3.2, а). Характер процессов в такой схеме остается прежним, с той лишь разницей, что ток в нагрузку будет поступать с момента подачи управляющего импульса на тиристор — $\angle\alpha$ (рис. 3.2, б). Закроется тиристор, как и диод, при снижении тока через него до нуля. Изменяя $\angle\alpha$, можно регулировать значения выпрямленного напряжения на нагрузке (рис. 3.2, в).

При увеличении $\angle\alpha$ время пропускания тока тиристором за полупериод сокращается, поэтому для однополупериодной управляемой схемы выпрямления среднее напряжение на нагрузке:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} U_2 [1 + \cos \alpha].$$

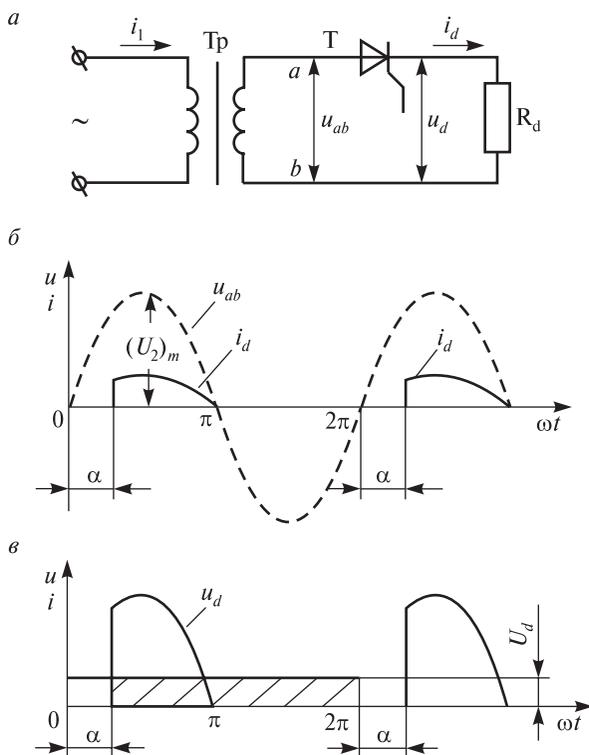


Рис. 3.2. Управляемый однофазный однополупериодный выпрямитель: *a* — схема; *б* — диаграмма напряжения источника и тока нагрузки; *в* — диаграмма выпрямленного напряжения

По значению U_d и зависимостям (3.4) и (3.7) можно вычислить значения I_d , P и другие параметры режима работы схемы.

Очевидно, что значение $\angle \alpha = 0$ соответствует режиму работы неуправляемой схемы выпрямления.

Основными элементами, параметры которых подлежат расчету в схемах выпрямления, являются вентильные элементы. Таким образом, исходными данными при расчете выпрямителя являются: выпрямленные значения напряжения U_d , тока I_d и мощность на нагрузке P .

При проведении анализа схем выпрямления необходимо учитывать, что на их работу оказывает существенное влияние характер

нагрузки: активная, активно-индуктивная или активно-емкостная. Для большей части выпрямителей средней и большой мощности характерна активная и активно-индуктивная нагрузка (например, электродвигатель).

Поскольку энергетические показатели однополупериодной схемы выпрямления низкие ($k_{сх} = 0,45$), она распространения не имеет.

3.3. Однофазная мостовая схема выпрямления

Неуправляемая однофазная схема выпрямления представляет собой мост, в плечи которого включены вентили, а в диагональ моста — нагрузка (рис. 3.3). Рассмотрим сначала работу системы выпрямления на активную нагрузку.

На интервале времени $0 < \omega t < \pi$ напряжение источника является прямым по отношению к диодам В1 и В4. Они открываются и пропускают ток в нагрузку R_d по цепи: вторичная обмотка источника — В1 — R_d — В4 (рис. 3.3, а, б).

Вентили В2 и В3 на этом интервале времени будут закрыты, так как напряжение источника по отношению к ним будет обратным. При $\omega t = \pi$ мгновенное значение напряжения источника и ток в цепи спадают до нуля, вентили В1 и В4 закрываются, а вентили В2 и В3 открываются, поскольку потенциал точки *b* становится положительным по отношению к потенциалу точки *a*. На интервале $\pi < \omega t < 2\pi$ ток в нагрузку будет протекать по цепи: вторичная обмотка источника — В3 — R_d — В2.

Таким образом, в нагрузке будет протекать постоянный пульсирующий ток i_d . При активной нагрузке ток i_d повторяют форму напряжения u_d (рис. 3.3, в). С учетом (3.3) и (3.6) средние значения выпрямленного напряжения и выпрямленного тока на интервале повторяемости $T/2 = \pi$:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (U_2)_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9U_2, \quad (3.10)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_2}{R_d}. \quad (3.11)$$

Амплитуда обратного напряжения на вентильях при мостовой схеме выпрямления определится амплитудой фазного напряжения,

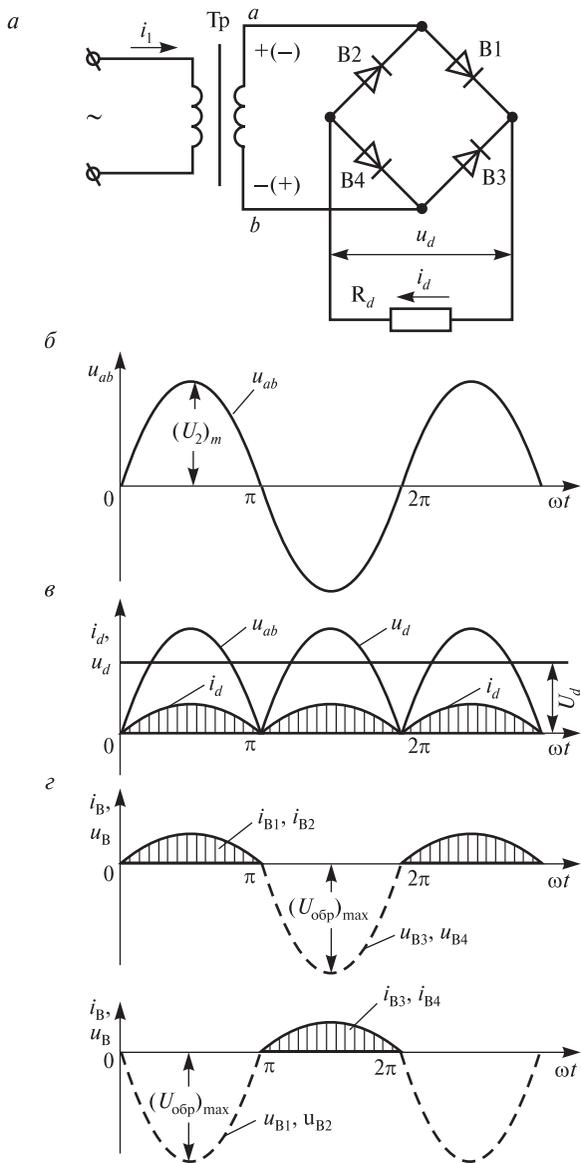


Рис. 3.3. Неуправляемый однофазный мостовой выпрямитель с активной нагрузкой:

a — схема; *б* — диаграмма напряжения источника; *в* — диаграмма тока и напряжения на нагрузке; *г* — диаграммы токов через вентили и обратных напряжений на них

так как к каждому непроводящему плечу моста приложено фазное напряжение источника (рис. 3.3, *з*)

$$(U_{\text{обр}})_{\text{max}} = (U_2)_m = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2}U_d \approx 1,57U_d. \quad (3.12)$$

Действующее значение выпрямленного тока $I_B = \frac{\pi}{4}I_d$.

Коэффициент схемы $k_{\text{сх}} = 2\sqrt{2}/\pi = 0,9$, а мощность на активной нагрузке с учетом (3.7)

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_d i_d dt = \frac{\pi^2 U_d I_d}{8} = \frac{U_d^2}{R_d}.$$

Максимальное значение тока, проходящего по вентилям

$$(I_a)_{\text{max}} = (i_d)_{\text{max}} = \frac{(U_2)_m}{R_d} = \frac{\sqrt{2}U_2}{R_d} = \frac{\pi}{2}I_d \approx 1,57I_d. \quad (3.13)$$

Среднее значение тока вентиля равно половине тока нагрузки, так как каждый вентиль проводит ток в течение полупериода:

$$(I_a)_{\text{ср}} = 0,5I_d.$$

В управляемой однофазной схеме выпрямления в плечах моста установлены тиристоры (рис. 3.4, *а*) [2]. На каждом полупериоде напряжение к нагрузке будет приложено на интервале $\alpha < \omega t < \pi$. Поэтому среднее значение напряжения U_d при активной нагрузке определится как

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha). \quad (3.14)$$

Соответственно среднее значение выпрямленного тока при активной нагрузке будет равно:

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_2}{R_d} (1 + \cos \alpha). \quad (3.15)$$

При работе управляемой схемы выпрямления значение $\angle \alpha$ может меняться, поэтому параметры элементов схемы целесообразно

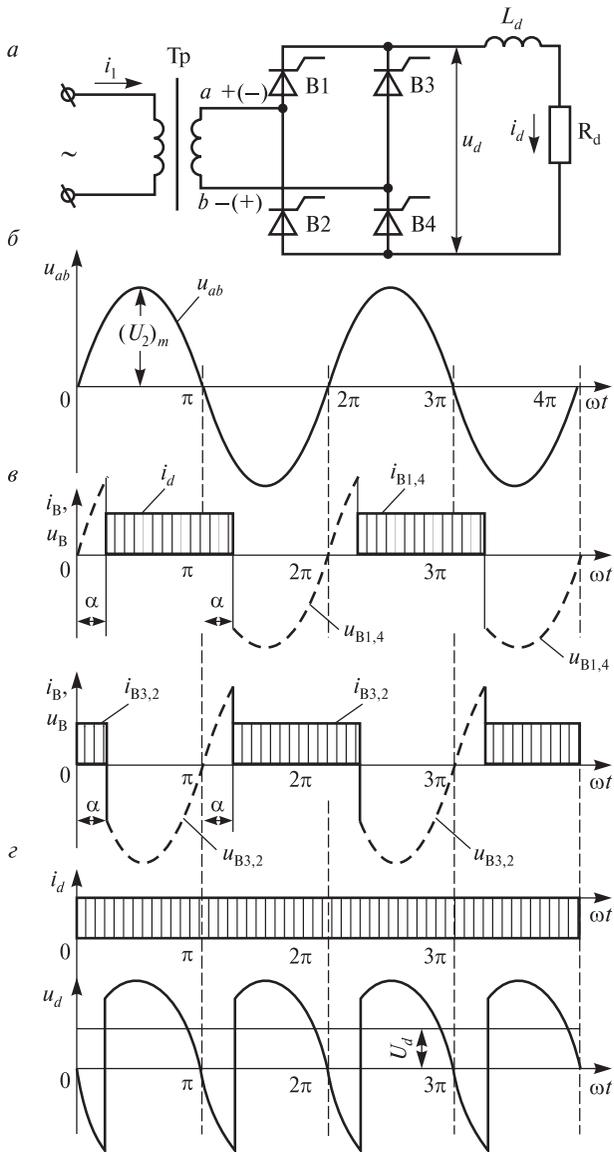


Рис. 3.4. Управляемый мостовой выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой при $\omega L_d \rightarrow \infty$ и $\angle \alpha < \pi/2$:

a — схема; *б* — диаграмма напряжения источника; *в* — диаграммы токов через вентили и обратных напряжений на них; *г* — диаграмма тока и напряжения на нагрузке

рассчитывать на напряжение и ток при $\alpha = 0$, т.е. по зависимостям (3.12) и (3.13).

Наличие индуктивности L_d в нагрузке меняет характер изменения токов и напряжений.

Если индуктивность очень велика, т.е. можно считать, что $\omega L_d \rightarrow \infty$, выпрямленный ток i_d непрерывен и идеально сглажен, т.е. не имеет пульсаций (рис. 3.4, з). Отсюда следует, что даже при снижении напряжения до нуля на проводящих вентилях, через них будет протекать ток за счет энергии, запасенной в индуктивности (рис. 3.4, в). Эти вентили будут пропускать ток до тех пор, пока не откроются два других вентиля (после подачи на них управляющих импульсов) и ток вытеснится в них. Таким образом, несмотря на то, что управляющие импульсы поступают на вентили через $\angle\alpha$ после смены полярности напряжения, длительность протекания тока через каждый диод составляет $T/2$.

Среднее значение выпрямленного напряжения является его постоянной составляющей и выделяется на R_d (см. п. 3.7), а переменная составляющая выделяется на L_d . Сдвиг тока относительно напряжения на $\angle\alpha$ приводит к появлению в выпрямленном напряжении u_d отрицательных участков, что вызывает снижение его среднего значения U_d (рис. 3.4, з). Очевидно, что с увеличением $\angle\alpha$ площадь отрицательных участков напряжения увеличивается, а среднее значение выпрямленного напряжения уменьшается:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha. \quad (3.16)$$

Согласно (3.16) U_d становится равным нулю при $\angle\alpha = \pi/2$, когда площади положительного и отрицательного участков u_d равны между собой и постоянная составляющая напряжения отсутствует.

Максимальное значение обратного напряжения на тиристорах

$$(U_{обр})_{\max} = \sqrt{2}U_2.$$

– максимальное значение токов через тиристоры

$$(I_a)_{\max} = I_d.$$

– среднее значение тока вентиля равно току нагрузки

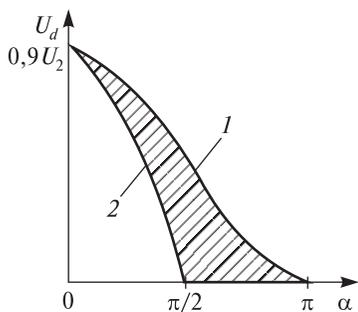


Рис. 3.5. Регулировочные характеристики управляемого однофазного мостового выпрямителя при активной (1) и индуктивной $\omega L_d \rightarrow \infty$ нагрузке (2)

$$(I_a)_{\text{ср}} = I_d.$$

Зависимость $U_d = f(\alpha)$ называется *регулировочной характеристикой выпрямителя*; она показывает изменение постоянной составляющей напряжения в зависимости от угла управления тиристорами. Регулировочная характеристика однофазной мостовой схемы выпрямления приведена на рис. 3.5.

При $\angle \alpha > \pi/2$ в соответствии с (3.16) постоянная составляющая напряжения становится отрицательной, т.е. прикладывается к нагрузке в обратном направлении (рис. 3.6).

Это свойство симметричных мостов используется для увеличения скорости затухания тока короткого замыкания в нагрузке при аварийных режимах.

Если рассмотреть цепь, где энергии, запасенной в индуктивности L_d , недостаточно для протекания в нагрузке непрерывного тока, то проводящие вентили закроются раньше, чем будут поданы отпирающие импульсы на другие два вентили (рис. 3.7). За счет энергии, запасенной в индуктивности, ток будет продолжать протекать через открытые вентили на протяжении угла γ после того, как напряжение u_{ab} станет для них отрицательным (рис. 3.7, б). Чем больше значение электрической постоянной времени цепи — L_d/R_d , тем больше будет угол γ . При этом форма выпрямленного тока значительно искажается по отношению к форме напряжения и имеет прерывистый характер (*режим работы с прерывистым выпрямленным током*). Сдвиг тока относительно напряжения на $\angle \alpha$ приводит к появлению в выпрямленном напряжении u_d отрицательных участков, что вызывает снижение его среднего значения. При такой нагрузке выпрямленные значения напряжения и тока нагрузки будут меняться в зависимости от $\angle \alpha$ и $\angle \gamma$ (рис 3.7, в).

Регулировочные характеристики данной схемы выпрямления зависят от отношения L_d/R_d и соответствуют приведенным на рис. 3.5.

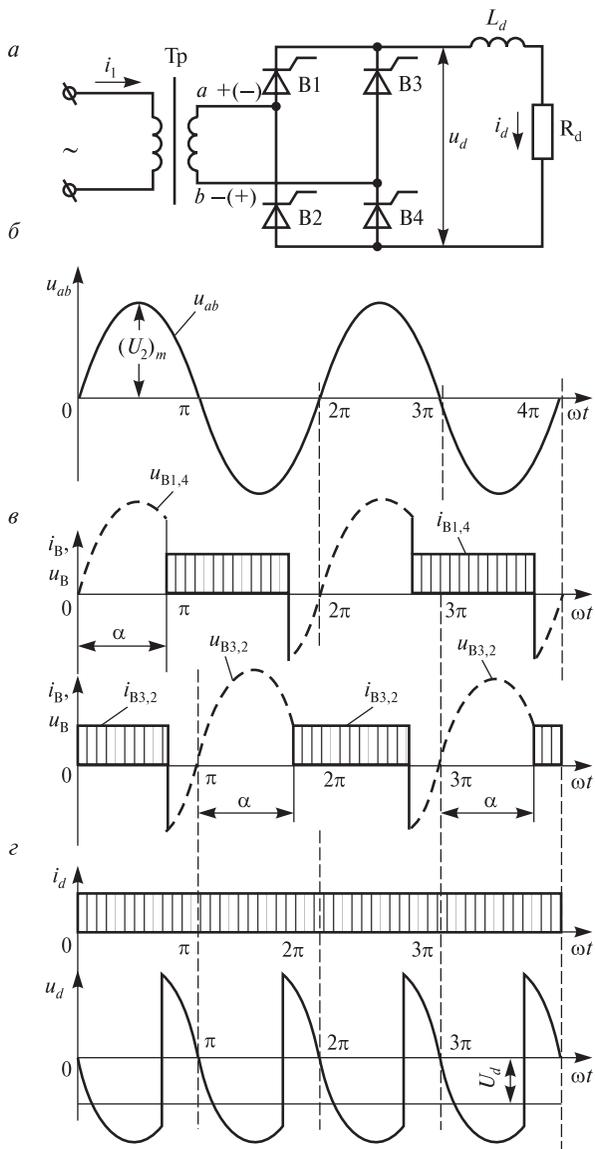


Рис. 3.6. Управляемый мостовой выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой при $\omega L_d \rightarrow \infty$ и $\angle \alpha > \pi/2$:

a — схема; *б* — диаграмма напряжения источника; *в* — диаграммы токов через вентили и обратных напряжений на них; *г* — диаграмма тока и напряжения на нагрузке

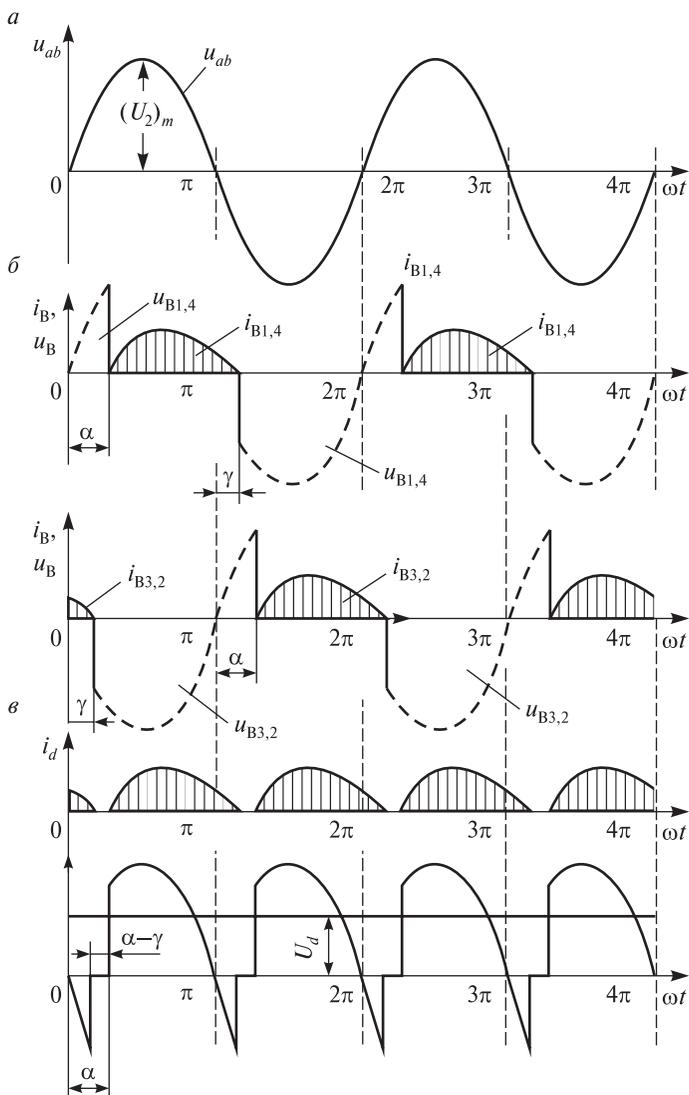


Рис. 3.7. Управляемый мостовой выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой:
 а — диаграмма напряжения источника; б — диаграммы токов через вентили и обратных напряжений на них; в — диаграмма тока и напряжения на нагрузке

3.4. Трехфазная мостовая схема выпрямления

Трехфазная мостовая схема образует *шестипульсную систему выпрямления* (по числу пульсаций выпрямленного напряжения в периоде напряжения фазы). В такой схеме нагрузка включается на линейное напряжение источника (рис. 3.8). При работе схемы на активную нагрузку каждый вентиль находится в проводящем состоянии в течение $\Delta\omega t = 2\pi/3$; например, с $\omega t = \Theta_0$ проводят вентили В1 и В6, а остальные вентили закрыты. Ток в нагрузку R_d протекает по цепи: фаза a (источника) — В1 — R_d — В6 — фаза b (от наибольшего положительного потенциала к наибольшему по модулю отрицательному потенциалу). На интервале $\Theta'_0 < \omega t < \Theta_1$ $|\varphi_c| > |\varphi_b|$, поэтому закрывается вентиль В6 и открывается вентиль В4, ток в нагрузку будет протекать по цепи: фаза a — В1 — R_d — В4 — фаза c . В момент $\omega t = \Theta_1$ закрывается вентиль В1 и открывается вентиль В5; и далее через интервалы $\Delta\omega t = \pi/3$ происходят коммутации следующих вентильных пар: В5—В4, В5—В2, В3—В2, В3—В6 и т.д. Таким образом, в течение периода питающего напряжения имеется шесть переключений вентилях через интервалы $\pi/3$: три — в *катодной группе* вентилях В1, В3, В5 (имеющих объединенные катоды) и три — в *анодной группе* вентилях В2, В4, В6 (имеющих объединенные аноды).

Поочередная работа различных пар вентилях в схеме обеспечивает поддержание на нагрузке R_d выпрямленного напряжения, мгновенное значение которого равно линейному напряжению источника $u_d = u_\Lambda$. Длительность прохождения тока через каждый вентиль равна $2\pi/3$; остальное время к нему приложено обратное напряжение.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения (среднее значение) вычисляется для интервала его повторяемости, равного $\pi/3$:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} (U_{2\Lambda})_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2,34 U_2, \quad (3.17)$$

где $(U_{2\Lambda})_m$ — амплитудное значение линейного напряжения источника;

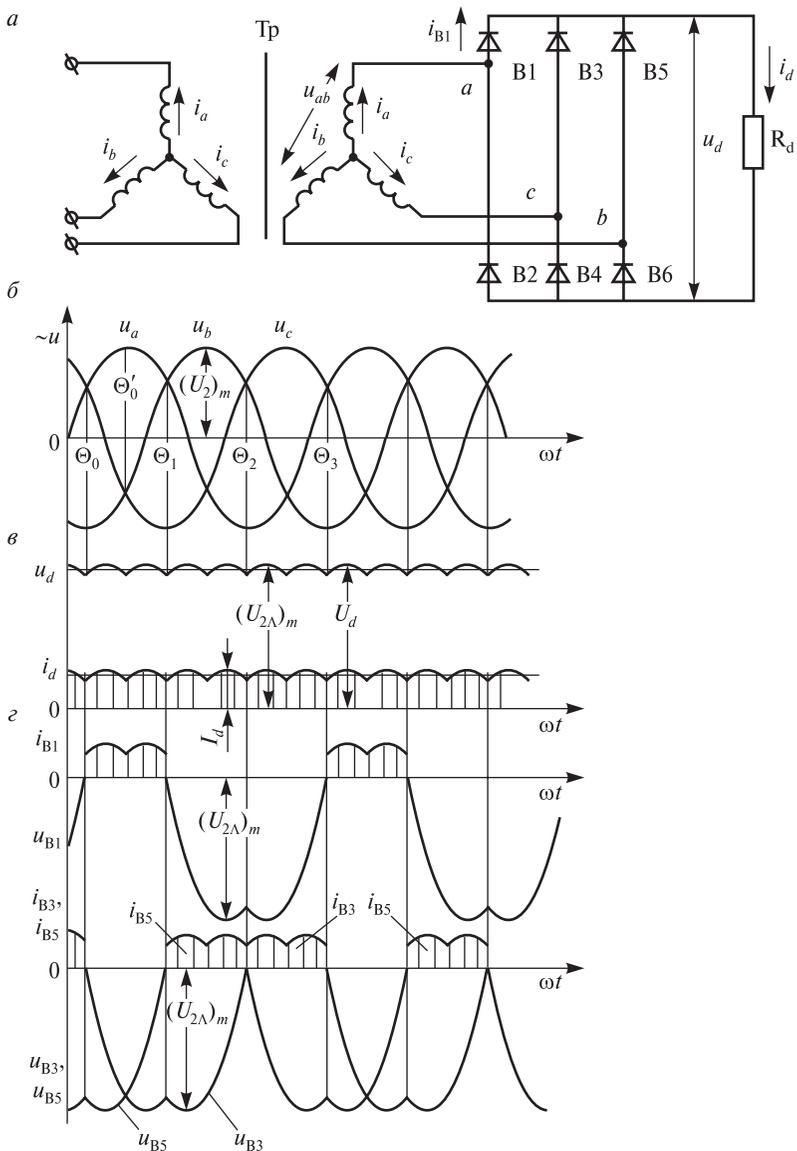


Рис. 3.8. Неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель с активной нагрузкой:

a — схема; *б* — диаграмма напряжения источника; *в* — диаграмма тока и напряжения на нагрузке; *з* — диаграммы токов через вентили катодной группы и обратных напряжений на них

- коэффициент схемы $k_{\text{сх}} = 3\sqrt{6}/\pi$;
- максимальное значение обратного напряжения на вентиле

$$(U_{\text{обр}})_{\text{max}} = (U_{2\Lambda})_m = \sqrt{6}U_2; \quad (3.18)$$

- максимальное значение тока вентиля:

$$(I_a)_{\text{max}} = \frac{(U_{2\Lambda})_m}{R_d} = \frac{\pi U_d}{3 R_d} \approx 1,047 I_d;$$

- действующее значение выпрямленного тока $I_B = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$;

– среднее значение тока, протекающего через вентиль — *анодный ток* — рассчитывается с учетом того, что каждый вентиль находится в проводящем состоянии одну треть периода

$$(I_a)_{\text{ср}} = I_d / 3. \quad (3.19)$$

Выражения (3.17), (3.18) и (3.19) справедливы для активной и активно-индуктивной нагрузки. Если система выпрямления работает на нагрузку $\omega L_d \rightarrow \infty$, токи принимают прямоугольную форму; соответственно выпрямленный ток i_d становятся идеально сглаженным:

$$(I_a)_{\text{max}} = I_d. \quad (3.20)$$

Трехфазная управляемая мостовая схема выпрямления. Пусть управляющие импульсы на соответствующие тиристоры моста поступают с задержкой на $\angle\alpha$ (рис. 3.9). В диапазоне $0 \leq \alpha < \pi/3$ кривая мгновенных значений выпрямленного напряжения расположена выше нуля $u_d > 0$, а выпрямленный ток будет непрерывным. Поэтому среднее значение выпрямленного напряжения при активной и активно-индуктивной нагрузках определится как

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} (U_{2\Lambda})_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos \alpha. \quad (3.21)$$

Гранично-непрерывному режиму выпрямленного тока соответствует $\angle\alpha = \pi/3$ (рис. 3.10). При $\angle\alpha > \pi/3$ и активной нагрузке в кривых напряжения u_d и тока i_d появляются интервалы с нулевыми

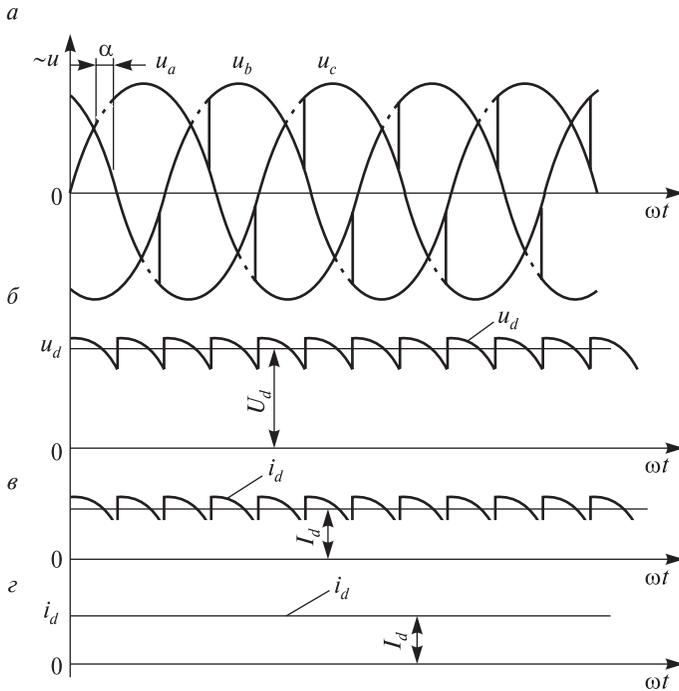


Рис. 3.9. Диаграммы напряжений и токов трехфазного мостового выпрямителя при $0 < \alpha < \pi/3$:

a — диаграмма напряжения источника; *б* — диаграмма выпрямленного напряжения; *в* — диаграмма токов при активной нагрузке ($\omega L_d = 0$); *г* — диаграмма токов при индуктивной нагрузке ($\omega L_d \rightarrow \infty$)

ми значениями. Среднее значение выпрямленного напряжения для этого случая может быть выражено следующим образом:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} (U_{2\lambda})_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right].$$

Расчет действующих и средних значений токов в элементах схемы выпрямления при активной и активно-индуктивной нагрузках и в режиме работы с прерывистыми токами выполняется путем интегрирования мгновенных значений токов по интервалам проводимости вентилей.

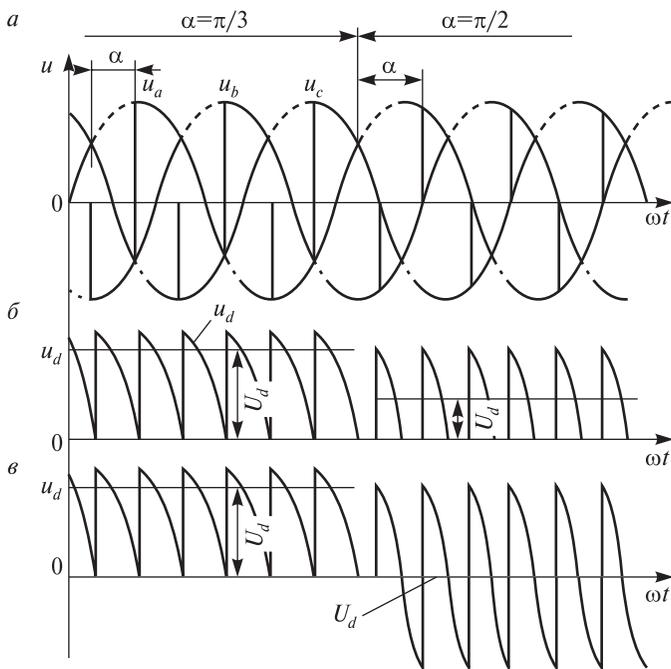


Рис. 3.10. Диаграммы напряжений управляемого трехфазного мостового выпрямителя при $\alpha \geq \pi/3$:

a — диаграмма напряжения источника; *б* — диаграмма выпрямленного напряжения при активной нагрузке ($\omega L_d = 0$); *в* — диаграмма выпрямленного напряжения при индуктивной нагрузке ($\omega L_d \rightarrow \infty$)

Если параметры схемы таковы, что обеспечивается режим непрерывного тока i_d ($\omega L_d \rightarrow \infty$), среднее значение выпрямленного напряжения определяется по (3.21), а токи вентилей по (3.19) и (3.20). При $\alpha = \pi/2$ среднее значение напряжения согласно (3.21) становится равным нулю. На диаграмме (см. рис. 3.10) это соответствует равенству площадей положительного и отрицательного напряжения, что свидетельствует об отсутствии в нем постоянной составляющей.

3.5. Гармонический состав выпрямленного напряжения

Во всех электрических цепях, содержащих полупроводниковые устройства, напряжение и ток чаще всего имеют несинусоидальную

форму. Это является основой рабочего процесса самого устройства.

Выпрямленное напряжение u_d можно представить в виде двух составляющих: постоянной, т.е. значения U_d , и переменной u_{\approx} , которая является периодической, но имеет несинусоидальную форму

$$u_d = U_d + u_{\approx}.$$

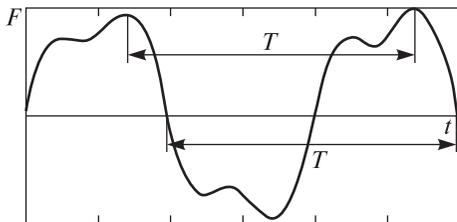


Рис. 3.11. Несинусоидальная периодическая функция

Несинусоидальная функция является периодической, если она удовлетворяет условию $F(t) = F(t + kT)$, где T — период функции, k — целое число (рис. 3.11). Как известно из математики, такая гармоническая функция может быть представлена в виде гармонического ряда.

Поэтому составляющая u_{\approx} выпрямленного напряжения выражается гармоническим рядом:

$$u_{\approx} = (U_1)_m \sin(m\omega t + \varphi_1) + (U_2)_m \sin(2m\omega t + \varphi_2) + \dots + (U_v)_m \sin(mv\omega t + \varphi_v)$$

или

$$u_{\approx} = \sum_{v=1}^{\infty} (U_v)_m \sin(mv\omega t + \varphi_v),$$

где m — число пульсаций в выпрямленном напряжении за один период фазного напряжения источника T ;

v — номер гармонической составляющей выпрямленного напряжения;

$(U_v)_m$ и φ_v — соответственно амплитуда и начальная фаза v -й гармонической составляющей выпрямленного напряжения.

Значения частот гармонических составляющих выпрямленного напряжения

$$f_v = mvf_1.$$

Например, для частоты напряжения источника $f_1 = 50$ Гц частота первой гармонической выпрямленного напряжения $v = 1$ будет иметь значения:

100 Гц для однофазной мостовой схемы ($m = 2$);

300 Гц для трехфазной мостовой схемы ($m = 6$).

Действующее значение напряжения u_d равно

$$U = \sqrt{U_d^2 + \sum_{v=1}^{\infty} U_v^2},$$

где U_v — действующие значения гармонических составляющих напряжения.

Амплитуда v -й гармонической составляющей выпрямленного напряжения для схем, работающих с углом управления $\angle\alpha = 0$ определяется как

$$(U_v)_m = U_d \frac{2}{m^2 v^2 - 1}. \quad (3.22)$$

Согласно (3.22) самое большое значение имеет амплитуда первой гармонической составляющей, а остальные убывают обратно пропорционально квадрату порядкового номера самой составляющей.

При угле управления системы выпрямления $\angle\alpha > 0$ гармонический состав в переменной составляющей выпрямленного напряжения меняется: из рис. 3.4, 3.6, 3.7, 3.9, 3.10 видно, что с ростом $\angle\alpha$ растет пульсация напряжения, а следовательно, увеличивается его переменная составляющая.

При условии непрерывности выпрямленного тока i_d , что соответствует наиболее распространенному режиму работы на активно-индуктивную нагрузку, амплитуды гармонических составляющих переменной составляющей выпрямленного напряжения в зависимости от угла управления $\angle\alpha$ выражаются зависимостью

$$(U_v)_m = U_{d0} \cos\alpha \frac{2}{v^2 m^2 - 1} \sqrt{1 + v^2 m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad (3.23)$$

где U_{d0} — среднее значение выпрямленного напряжения при $\angle\alpha = 0$:

$U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$ — для мостовой однофазной схемы выпрямления;

$U_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2$ — для мостовой трехфазной схемы выпрямления.

Значение переменной составляющей в выпрямленном напряжении оценивается коэффициентом пульсаций k_{Π} , который определяет

ся как отношение амплитуды первой гармонической выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения

$$k_{\pi} = \frac{(U_{v=1})_m}{U_d}. \quad (3.24)$$

В зависимости от числа пульсаций выпрямленного напряжения меняется значение k_{π} . С учетом (3.22) при однофазной мостовой схеме выпрямления и активной нагрузке $m = 2$ и $k_{\pi} = 2/3$; при трехфазной мостовой схеме выпрямления $m = 6$ и $k_{\pi} = 2/35$.

В общем случае, для того чтобы определить зависимость среднего значения выпрямленного напряжения при различном числе его пульсаций m (при любом значении m), в схемах с $\angle\alpha = 0$ достаточно проинтегрировать мгновенное значение напряжения

$$u_d = U_m \cos(\omega t)$$

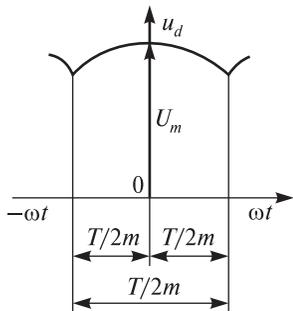


Рис. 3.12. К определению коэффициента пульсаций

на интервале одной пульсации $-\frac{T}{2m} \leq t \leq \frac{T}{2m}$ и взять его среднее значение (рис. 3.12). Вследствие повторяемости напряжения u_d его среднее значение на интервале T/m , будет таким же, как и на всем периоде T . С учетом того, что период фазного напряжения $T = 2\pi$ рад

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{m}{2\pi} \int_{-2\pi/2m}^{2\pi/2m} U_m \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} U_m \cos(\omega t) d(\omega t) = \\ &= \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} U_m \cos(\omega t) d(\omega t) = U_m \frac{\sin(\pi/m)}{(\pi/m)}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Например, при трехфазной неуправляемой мостовой схеме выпрямления $m = 6$ и $\frac{U_m}{U_d} = 1,047$ (см. рис. 3.8).

При использовании выпрямителей (даже если система включена на источник синусоидального напряжения) нагрузка чаще всего будет потреблять также несинусоидальный ток.

Действующие значения несинусоидального периодического тока равны

$$I = \sqrt{I_d^2 + \sum_{v=1}^k I_v^2},$$

где I_v — действующие значения гармонических составляющих тока.

Если учесть, что амплитуды гармонических составляющих $(I_v)_m$ связаны с амплитудой основной гармонической $(I_{v=1})_m$ соотношением $(I_v)_m \sim \frac{(I_{v=1})_m}{v}$, то очевидно, что с увеличением числа фаз схемы выпрямления (с увеличением числа пульсаций m) потребляемый из сети ток приближается к синусоидальному, так как амплитуды высших гармонических уменьшаются.

Если нагрузка активная или активно-индуктивная, но не обеспечивается режим непрерывного тока i_d , то с увеличением $\angle\alpha$ происходит увеличение амплитуд высших гармонических составляющих потребляемого тока.

Гармонический состав выпрямленного тока влияет на КПД системы, так как каждая гармоника вызывает дополнительные потери и искажает форму кривой питающего напряжения.

Активная мощность выпрямленного тока равна сумме мощности постоянной составляющей (мощности постоянного тока) и активных мощностей всех его гармонических составляющих:

$$P = U_d I_d + \sum_{v=1}^n U_v I_v \cos \varphi_v,$$

где φ_v — сдвиг фаз гармонических составляющих напряжения и тока.

Реактивной мощностью выпрямленного тока можно считать величину

$$Q = \sum_{v=1}^n U_v I_v \sin \varphi_v.$$

Однако полная (кажущаяся) мощность несинусоидального тока

$$S = UI > \sqrt{P^2 + Q^2}$$

так как в ее выражение входят также произведения типа $U_v^2 I_v^2$.

Мощностью искажения называется величина

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2},$$

так как она обусловлена только несинусоидальностью напряжений и токов.

3.6. Сравнительный анализ схем выпрямления

При выборе схемы выпрямления переменного тока руководствуются требованиями, предъявляемыми к выпрямителю по мощности, напряжению, коэффициенту пульсаций и др. Однофазные схемы используются обычно в выпрямителях малой и средней мощности при невысоких требованиях к величине пульсаций выпрямленного напряжения. Выпрямители средней и большой мощности обычно выполняют по трехфазной мостовой схеме, которая обладает хорошими показателями выпрямления переменного напряжения и использования вентилей. Для получения низких значений коэффициента пульсаций следует применять многофазные схемы.

Основные параметры схем выпрямления переменного тока при активной нагрузке сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Основные параметры неуправляемых схем выпрямления переменного тока при активной нагрузке

Схема	Характеристики выпрямленного напряжения		Показатели использования вентилей в схеме выпрямления		
	$k_{cx} = \frac{U_d}{U_2}$	$k_{\pi} = \frac{(U_{v=1})_m}{U_d}$ при $\alpha = 0$	$k_U = \frac{(U_{обр})_m}{U_d}$	$k_I = \frac{I_B^*}{I_d}$	$\frac{(I_d)_{cp}}{I_d}$
Однофазная однополупериодная	$\frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,45$	—	π	$\frac{\pi}{2}$	1
Однофазная двухполупериодная со средней точкой	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,9$	$\frac{2}{3}$	π	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{1}{2}$
Однофазная мостовая схема	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,9$	$\frac{2}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{1}{2}$
Трехфазная со средней точкой	$\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \approx 1,17$	$\frac{1}{4}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{3}$
Трехфазная мостовая	$\frac{3\sqrt{6}}{\pi} \approx 2,34$	$\frac{2}{35}$	$\frac{\pi}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}$	$\frac{1}{3}$

* I_B — действующее значение выпрямленного тока.

Использование вентиляей в схемах выпрямления характеризуется коэффициентами по току k_I и по напряжению k_U . Из табл. 3.1 видно, что для трехфазных схем выпрямления значения коэффициентов k_I неодинаково, т.е. при одном и том же значении выпрямленного тока I_d в мостовой схеме и в схеме со средней точкой нужно использовать вентили с разным допустимым током при одинаковых условиях охлаждения.

Значения коэффициентов k_U показывают, что в трехфазной мостовой схеме использование вентиляей по напряжению более эффективно, чем в схеме со средней точкой: при одном и том же значении выпрямленного напряжения U_d в схемах со средней точкой следует использовать вентили более высокого класса.

На практике при выборе схемы, помимо основных ее показателей, используется много других критериев, каждый из которых (например, надежность или стоимость) в конкретном случае может оказаться определяющим.

Пример 1. Рассчитать параметры основных элементов управляемого выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме и работающего при индуктивной нагрузке $\omega L_d \rightarrow \infty$ и $R_d = 1$ Ом и параметрах режима:

линейное напряжение на вторичной обмотке источника $U_{2\Delta} = 230$ В;

среднее значение выпрямленного напряжения изменяется в диапазоне $240 \leq U_d \leq 320$ В.

В трехфазном мостовом выпрямителе $k_{cx} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} = 2,34$
 $k_{\pi} = \frac{(U_{v=1})_m}{U_d}$. Режим работы выпрямителя при значении $\alpha_{\max} < \pi/3$ приведен на рис. 3.9, з.

Поскольку при $\omega L_d \rightarrow \infty$ форма тока на выходе выпрямителя I_d будет практически сглажена, то среднее значение тока нагрузки

$$(I_d)_{\max} = \frac{(U_d)_{\max}}{R_d} = \frac{320}{1} = 320 \text{ А.}$$

Среднее значение тока вентиля

$$(I_B)_{\text{cp}} = \frac{I_d}{3} = \frac{320}{3} = 107 \text{ А.}$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле

$$(U_{\text{обр}})_{\text{max}} = \sqrt{2} U_{2\Lambda} = \sqrt{2} \cdot 230 = 325 \text{ В.}$$

Таким образом, в данной схеме выпрямления должны использоваться вентили класса не ниже четвертого.

Пример 2. Рассчитать значения амплитуды первой гармонической составляющей выпрямленного напряжения и коэффициента пульсации в однофазной управляемой мостовой схеме, работающей на активно-индуктивную нагрузку с непрерывным выпрямленным током, при $U_2 = 200 \text{ В}$ и $\angle\alpha = 57^\circ$.

В соответствии с (3.16) среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos(57^\circ) \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 200 \cdot 0,545 \approx 98 \text{ В.}$$

При условии непрерывности выпрямленного тока i_d по (3.23) определяем амплитуду первой гармонической составляющей напряжения в зависимости от $\angle\alpha$:

$$(U_{v=1})_m = U_{d0} \cos\alpha \frac{2}{v^2 m^2 - 1} \sqrt{1 + v^2 m^2 \text{tg}^2\alpha},$$

где $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$ — среднее значение выпрямленного напряжения при $\angle\alpha = 0$;
 $m = 2$ — число пульсаций выпрямленного напряжения на периоде.

Таким образом, амплитуда первой гармонической составляющей выпрямленного напряжения

$$(U_{v=1})_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 200 \cos(57^\circ) \frac{2}{4-1} \sqrt{1 + 4 \text{tg}^2(57^\circ)} = 212 \text{ В,}$$

а коэффициент пульсации напряжения в соответствии с (3.24)

$$k_{\text{п}} = \frac{(U_{v=1})_m}{U_d} = \frac{212}{98} = 2,16.$$

3.7. Коммутация и режимы работы выпрямителя

3.7.1. Коммутация в однофазном мостовом управляемом выпрямителе

Выше процесс перехода тока из одного вентиля в другой (процесс коммутации) рассматривался как мгновенный. В действительности из-за наличия в цепи переменного тока индуктивных сопротивлений коммутация имеет определенную длительность. Эти сопротивления обусловлены в основном индуктивностями рассеяния обмоток источника и определяются, как правило, из опыта короткого замыкания или расчетным путем. Помимо индуктивного сопротивления на процессы коммутации влияет и активное сопротивление обмоток, но его влияние значительно меньше.

Рассмотрим процессы коммутации с учетом только индуктивных сопротивлений обмоток источника $x_S = \omega L_S$, полагая при этом выпрямленный ток идеально сглаженным и непрерывным ($\omega L_d \rightarrow \infty$). Поскольку характер процессов коммутации в различных выпрямительных схемах одинаков, он рассмотрен на примере простейшей схемы выпрямления — однофазной мостовой (рис. 3.13).

Предположим, что в проводящем состоянии находятся вентили В1 и В4 и через них протекает ток $i_{В1,4}$. Спустя $\angle\alpha$ после смены полярности фазного напряжения в момент θ_1 поступают отпирающие импульсы на вентили В2 и В3. Поскольку потенциалы анодов В2 и В3 в этот момент положительны относительно катодов, вентили открываются и через них протекает ток $i_{В2,3}$.

Начиная с момента θ_1 все вентили оказываются открыты, и вторичная обмотка источника будет замкнутой через них накоротко (ток в нагрузку не идет, так как $\sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2} \gg \omega L_S$. Под действием ЭДС источника в контуре коммутации возникает ток короткого замыкания i'_k , который является коммутирующим током. Этот ток можно представить в виде двух составляющих, одна из которых продолжает протекать на интервале коммутации через вентили В1 и В4 на протяжении угла $\angle(\alpha + \gamma)$, где $\gamma = \theta_2 - \theta_1$:

$$i'_k = -\frac{\sqrt{2}U_2}{2x_S} \cos(\alpha + \gamma),$$

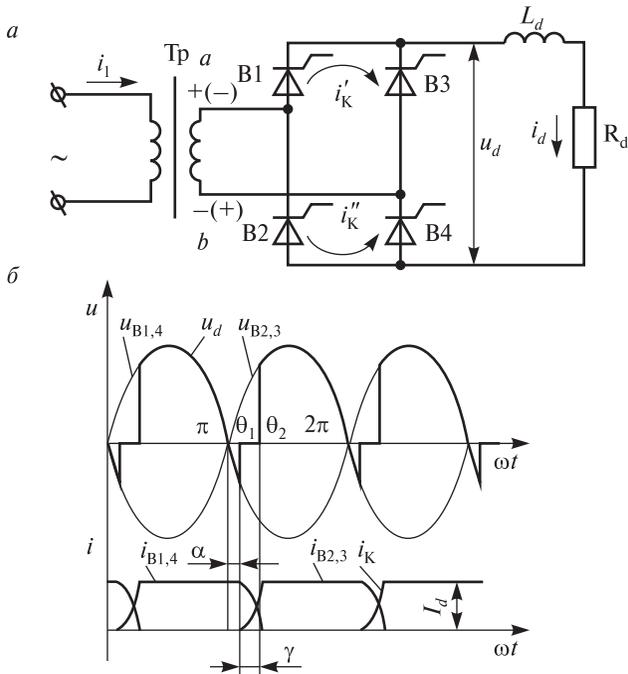


Рис. 3.13. Процесс коммутации вентилей в однофазном мостовом выпрямителе:
a — эквивалентная схема выпрямителя; *б* — диаграммы напряжений и токов
 а вторая начинает протекать через вентили В2 и В3 начиная с $\angle \alpha$

$$i''_K = \frac{\sqrt{2} U_2}{2x_S} \cos \alpha.$$

Результирующий ток короткого замыкания

$$i_K = i'_K + i''_K = \frac{\sqrt{2} U_2}{2x_S} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]. \quad (3.26)$$

Он направлен от положительного потенциала к отрицательному. Учитывая, что при $\omega L_d \rightarrow \infty$ выпрямленный ток остается неизменным даже в процессе коммутации вентилей, т.е. можно записать:

$$i_{B1,4} + i_{B2,3} = I_d = \text{const}, \quad (3.27)$$

где I_d — среднее значение выпрямленного тока (тока нагрузки).

Выражение (3.27) справедливо для любого момента времени. Пока ток проводят вентили В1 и В4 получаем: $i_{\text{В1,4}} = I_d$ и $i_{\text{В2,3}} = 0$. На интервале одновременной проводимости всех вентилях $i_{\text{В1,4}} = I_d - i_{\text{к}}$ и $i_{\text{В2,3}} = i_{\text{к}}$ (см. рис. 3.13), и в конце процесса коммутации ток из вентилях В1, В4 вытесняется в вентили В2, В3, т.е. $i_{\text{В1,4}} = 0$, а

$$i_{\text{В2,3}} = i_{\text{к}} = I_d. \quad (3.28)$$

Значение угла коммутации вентилях $\gamma = \theta_2 - \theta_1$ определяется из следующих соображений.

В конце коммутационного процесса на основании (3.26) и (3.28) имеем

$$i_{\text{к}} = I_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_S} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (3.29)$$

или
$$\frac{I_d x_S}{\sqrt{2}U_2} = [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (3.30)$$

где $i_{\text{к}} = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_S}$ — амплитудное значение тока короткого замыкания.

Если выпрямитель неуправляемый, то $\angle \alpha = 0$. Обозначив угол коммутации вентилях для этого режима как γ_0 , в конце процесса коммутации имеем

$$I_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{x_S} [1 - \cos \gamma_0],$$

или
$$\frac{I_d x_S}{\sqrt{2}U_2} = 1 - \cos \gamma_0. \quad (3.31)$$

Подстановка (3.31) в (3.30) дает:

$$1 - \cos \gamma_0 = \cos \alpha - \cos(\alpha - \gamma),$$

или

$$\cos(\alpha - \gamma) = \cos \alpha + \cos \gamma_0 - 1.$$

Отсюда угол коммутации вентилях в управляемом однофазном двухполупериодном выпрямителе

$$\gamma = \arccos(\cos \alpha + \cos \gamma_0 - 1) - \alpha. \quad (3.32)$$

Таким образом, наличие периода коммутации вентиля выпрямителя увеличивает время протекания тока в них по сравнению с идеализированной схемой на угол γ , т.е. становится равным $\pi + \gamma$.

Кроме того, процесс коммутации оказывает непосредственное влияние на выпрямленное напряжение, так как на интервалах коммутации мгновенное значение выпрямленного напряжения u_d снижается до нуля. В результате этого происходит уменьшение среднего значения выпрямленного напряжения на величину

$$\Delta U_x = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \sqrt{2} U_2 [-\cos(\alpha + \gamma) + \cos \alpha].$$

С учетом (3.19)

$$\Delta U_x = \frac{2I_d x_S}{\pi}.$$

Следовательно, для однофазного управляемого мостового выпрямителя при $\omega L_d \rightarrow \infty$ среднее значение выпрямленного напряжения с учетом коммутационных процессов в тиристорах:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha - \frac{2I_d x_S}{\pi}. \quad (3.33)$$

Наличие участков коммутации вентиля снижает среднее значение выпрямленного напряжения, а снижение напряжения приведет к уменьшению значения выпрямленного тока.

3.7.2. Коммутация в трехфазном мостовом управляемом выпрямителе

При коммутации в трехфазных схемах выпрямления возникают частичные контуры короткого замыкания между отдельными фазами. При этом мгновенное значение выпрямленного напряжения не падает до нуля, а становится равным среднему арифметическому значению напряжений фаз, в вентилях которых коммутируются токи. Так для трехфазной схемы выпрямления значение выпрямленного напряжения на интервале коммутации тока между вентилями фаз a и b равно:

$$u_d = \frac{u_a + u_b}{2},$$

где u_a и u_b — мгновенные значения фазных напряжений источника.

На рис. 3.14 представлена диаграмма мгновенных значений выпрямленного напряжения для трехфазной мостовой схемы. Длительность протекания тока через вентили при индуктивной нагрузке, когда $\omega L_d \rightarrow \infty$ (например через вентиль В1) увеличивается на угол γ и становится равной $\frac{1}{3}\pi + \gamma$.

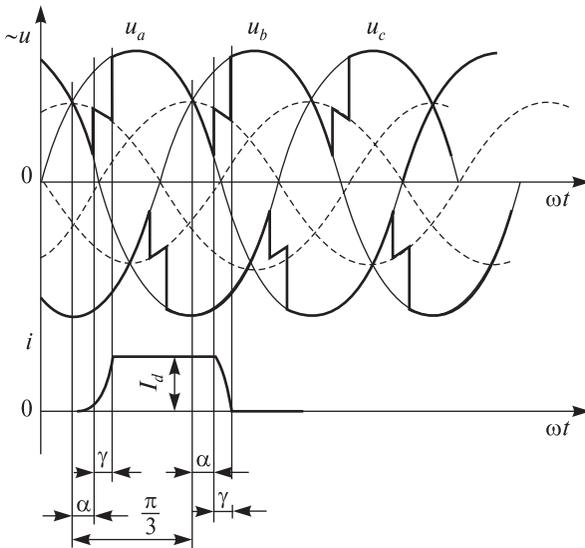


Рис. 3.14. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока в трехфазной мостовой схеме с учетом процесса коммутации

Угол коммутации вентиляей связан с выпрямленным током I_d и углом управления α соотношением

$$I_d = \frac{\sqrt{6} U_2}{2 x_S} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)].$$

Падение напряжения, на которое уменьшаются средние значения выпрямленного напряжения, равно:

в трехфазной схеме со средней точкой

$$\Delta U_x = \frac{3I_d x_S}{2\pi};$$

в трехфазной мостовой схеме

$$\Delta U_x = \frac{3I_d x_S}{\pi}.$$

3.8. Внешние характеристики выпрямителей

Внешней характеристикой выпрямителя называется зависимость выпрямленного напряжения от среднего значения тока нагрузки, т.е. $U_d = f(I_d)$. Внешняя характеристика определяется внутренним сопротивлением выпрямителя и сопротивлением нагрузки, которые снижают выпрямленное напряжение с ростом тока.

Внешнюю характеристику мостового выпрямителя при непрерывном выпрямленном токе $\omega L_d \rightarrow \infty$ можно записать в виде уравнения

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_R - \Delta U_B - \Delta U_x, \quad (3.34)$$

где U_{d0} — среднее значение выпрямленного напряжения для неуправляемого выпрямителя (при $\angle \alpha = 0$);

ΔU_R — снижение напряжения, обусловленное активным сопротивлением схемы выпрямления;

ΔU_B — падение напряжения на вентиллях;

ΔU_x — снижение напряжения, обусловленное процессами коммутации вентиллях.

Следует отметить, что при значениях тока нагрузки, не превышающих номинальное, внутреннее падение напряжения выпрямителей не превышает $0,15U_{d0}$. Однако при перегрузках и режимах, близких к короткому замыканию, становится существенным влияние внутренних сопротивлений схемы. Кроме того, в трехфазных схемах выпрямления при перегрузках изменяется характер электромагнитных процессов, влияющих на форму их внешней характеристики.

Внешнюю характеристику выпрямителей чаще всего представляют в относительных координатах, принимая в качестве базисного среднее значение выпрямленного напряжения для неуправляемого выпрямителя U_{d0} . Тогда относительное значение выпрямленного

$$\begin{aligned} \text{напряжения } \bar{U}_d &= \frac{U_d}{U_{d0}} \\ \bar{U}_d &= \cos \alpha - \bar{\Delta U}_R - \bar{\Delta U}_B - \bar{\Delta U}_X. \end{aligned} \quad (3.35)$$

3.8.1. Внешняя характеристика однофазного мостового выпрямителя

Базисное значение выпрямленного напряжения для неуправляемого однофазного выпрямителя на основании (3.5) $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$. Тогда относительные падения напряжения могут быть представлены в следующем виде [21]:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\Delta U}_R &= \frac{R_{\text{ист}} I_d}{2\sqrt{2}} (\pi - \gamma); \\ \bar{\Delta U}_B &= \frac{\pi \Delta U_B}{\sqrt{2} U_2}; \\ \bar{\Delta U}_X &= \frac{x_S I_d}{\sqrt{2} U_2}, \end{aligned} \right. \quad (3.36)$$

где $R_{\text{ист}}$ — эквивалентное активное сопротивление фазы источника.

Если в качестве источника переменного напряжения используется однофазный трансформатор, то его эквивалентное активное сопротивление определится активным сопротивлением фазы вторичной обмотки $R_{\phi 2}$ и приведенным ко вторичной обмотке активным сопротивлением фазы первичной обмотки $R'_{\phi 1}$:

$$R_{\text{ист}} = R'_{\phi 1} + R_{\phi 2}.$$

В качестве базисного значения тока для построения внешней характеристики выпрямителя в относительных координатах используют ток короткого замыкания схемы I_{dk} (при $R_d = 0$), который выражается как [21]

$$I_{dk} = \frac{\sqrt{2}}{x_S} U_2. \quad (3.37)$$

Тогда внешняя характеристика однофазного выпрямителя в относительных координатах будет представлена зависимостью

$$\bar{U}_d = \cos \alpha - \bar{I}_d \left[1 + \frac{R_{\text{ист}}}{x_S} (\pi - \gamma) \right] - \Delta \bar{U}_B, \quad (3.38)$$

где $\bar{I}_d = \frac{I_d}{I_{dк}} = \frac{I_d x_S}{\sqrt{2} U_2}$.

Из (3.36) следует, что ΔU_R , ΔU_x и ΔU_B возрастают с увеличением I_d . Поэтому для однофазных выпрямителей внешняя характеристика будет представлена прямыми, определяемыми значениями $\angle \alpha$ (рис. 3.15, а).

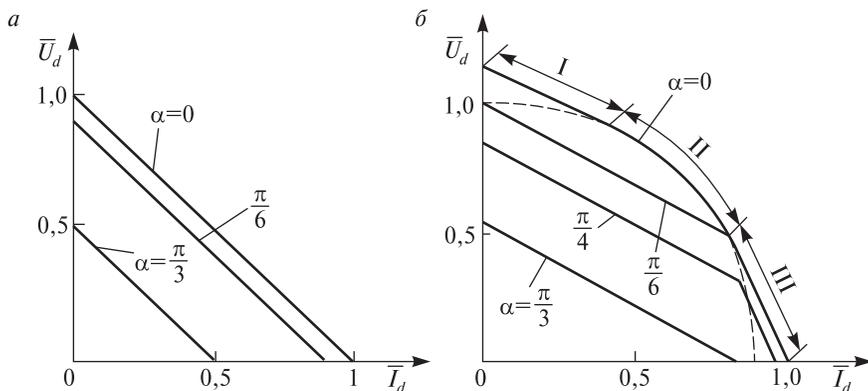


Рис. 3.15. Внешние характеристики мостовых выпрямителей в относительных координатах:

а — однофазного; б — трехфазного; зона I — угол коммутации $0 \leq \gamma < \pi/3$ эл. град.; зона II — угол коммутации $\gamma = \pi/3$ эл. град = const, дополнительный угол регулирования $0 \leq \alpha' \leq \pi/6$ эл. град.; зона III — угол коммутации $\pi/3 < \gamma < 2\pi/3$ эл. град., дополнительный угол регулирования $\alpha' = \pi/6$ эл. град = const

3.8.2. Внешняя характеристика трехфазного мостового выпрямителя

По характеру протекания электромагнитных процессов в трехфазном выпрямителе выделяют три разных режима работы (рис. 3.15, б). Если пренебречь падением напряжения на вентилях выпрямителя

ля и на активной нагрузке системы, то можно получить достаточно простые зависимости для его внешней характеристики всех трех режимов работы.

В режиме I при $0 \leq \gamma < \pi/3$ внешняя характеристика $\bar{U}_d = f(\bar{I}_d)$ линейна, а работа вентиля соответствует рассмотренной в п. 3.4. На этом режиме одновременно пропускают ток два вентиля, а третий подключается на интервале коммутации (п. 3.8.2). Уравнение внешней характеристики выпрямителя для этого режима в относительных координатах

$$\bar{U}_d = \cos \alpha - \frac{\bar{I}_d}{\sqrt{3}}, \quad (3.39)$$

где

$$\bar{U}_d = \frac{U_d}{U_{d0}} = \frac{\pi U_d}{3\sqrt{6} U_2};$$

$$\bar{I}_d = \frac{I_d}{I_{dk}} = \frac{x_S I_d}{\sqrt{2} U_2}.$$

Режим II наступает при угле коммутации тиристоров $\gamma = \pi/3$, когда одновременно включены три вентиля. Дальнейшее увеличение нагрузки на этом режиме не вызывает увеличения угла γ , который остается равным $\gamma = \pi/3$. Однако начало процесса коммутации вентиля будет происходить с задержкой на некоторый угол α' , называемый дополнительным углом регулирования, в результате чего кривая выпрямленного напряжения u_d будет иметь провалы, достигающие нулевых значений.

Для этого режима характерно: $\gamma = \pi/3 = \text{const}$, $0 \leq \alpha' < \pi/6$, а внешняя характеристика выпрямителя будет описываться уравнением

$$\frac{4}{3} \bar{I}_d + \frac{4}{3} \bar{U}_d = 1. \quad (3.40)$$

На этом режиме внешняя характеристика трехфазного мостового выпрямителя имеет вид эллипса с равными полуосями (ее продолжение за режим II показан пунктиром на рис. 3.15, б).

Режим III возникает при дальнейшем росте нагрузки, когда чередуются одновременные проводимости трех вентилях, а на интервалах коммутации — четырех вентилях схемы. В этом режиме угол

коммутации тиристоры вновь начинают возрастать, изменяясь в диапазоне $\pi/3 < \gamma < 2\pi/3$, а дополнительный угол регулирования, напротив, остается постоянным $\alpha' = \pi/6 = \text{const}$. Внешняя характеристика выпрямителя вновь становится линейной и ее уравнение имеет вид:

$$\begin{cases} \bar{U}_d = \sqrt{3}(1 - \bar{I}_d) & \text{при } \alpha < \frac{\pi}{6}; \\ \bar{U}_d = \sqrt{3} \left[\cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) - \bar{I}_d \right] & \text{при } \alpha > \frac{\pi}{6}. \end{cases} \quad (3.41)$$

Следует отметить, что перечисленные режимы не всегда будут иметь место при изменении тока нагрузки от холостого хода до короткого замыкания.

Для трехфазного выпрямителя все три режима работы возможны при угле управления $0 < \alpha < \pi/6$. При $\pi/6 < \alpha < \pi/3$ в работе выпрямителя возможны только режимы I и III. При $\alpha > \pi/3$ выпрямитель может работать только в режиме III.

3.9. Особенности выпрямительной установки тепловоза и ее характеристики

Как было показано выше (см. табл. 3.1), наиболее рациональной схемой выпрямления трехфазного тока является мостовая, обеспечивающая хорошие показатели преобразования переменного напряжения и относительно малую амплитуду пульсаций U_d . Для еще большего снижения пульсаций напряжения и повышения их частоты (что важно для работы энергетического оборудования) на тепловозах применяют синхронный генератор с двумя статорными обмотками, сдвинутыми друг относительно друга на 30 эл. град. Каждая обмотка включена на свой трехфазный мостовой выпрямитель (рис. 3.16) [4]. Двухмостовая схема образует *двенадцатипульсную систему выпрямления*, при которой $k_{\pi} = \frac{2}{143}$ и $\frac{U_m}{U_d} = 1,012$; столь низкие значения пульсаций выпрямленного напряжения u_d

обеспечивают темную коммутацию на коллекторах тяговых электродвигателей. Мосты соединены между собой параллельно со стороны выпрямленного напряжения; это позволяет получить большой ток

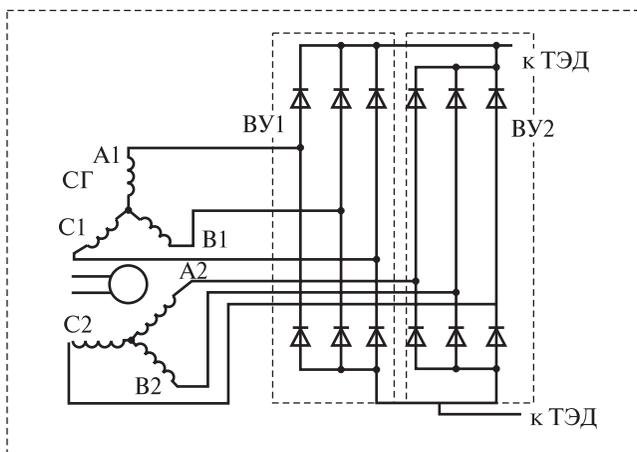


Рис. 3.16. Принципиальная схема системы СГ-ВУ тепловоза

тяговых двигателей, а следовательно, и тяговый момент на колесе тепловоза. Каждый мост состоит из шести плеч. В плече вентили включены по два последовательно [2]. На продолжительном режиме работы КПД ВУ может достигать 98 %.

Процессы, происходящие в каждом выпрямителе тепловозной ВУ, аналогичны рассмотренным в п. 3.4 и 3.7.2 (рис. 3.15, б); здесь также можно выделить три характерных режима.

Режим I — увеличение тока нагрузки I_d вызывает возрастание угла коммутации в диапазоне $0 \leq \gamma < \pi/3$ эл. град. (зона I, см. рис. 3.15, б); в катодной и анодной группах постоянно работают по одному вентилю, а на время их коммутации присоединяется дополнительный вентиль из катодной или анодной группы.

Режим II — за счет увеличения тока I_d угол коммутации $\gamma = \pi/3$ эл. град. = const, появляется дополнительный угол регулирования $0 \leq \alpha' \leq \pi/6$ эл. град. (зона II, см. рис. 3.15, б); постоянно работают три вентилья моста.

Режим III — дальнейшее возрастание тока I_d увеличивает угол коммутации в диапазоне $\pi/3 < \gamma < 2\pi/3$ эл. град., дополнительный угол регулирования $\alpha' = \pi/6$ эл. град. = const (зона III, см. рис. 3.15, б); постоянно работают три вентилья, на интервалах коммутации — четыре вентилья.

Мгновенное выпрямленное напряжение u_d содержит спектр высших гармонических составляющих, частота и амплитуда которых определяются свойствами этой системы. Пульсации тока в силовой цепи неблагоприятно сказываются на коммутации тяговых электродвигателей и КПД электропередачи в целом, поэтому целесообразно, насколько это возможно, уменьшать их амплитуду и увеличивать частоту.

Мгновенные значения выпрямленного напряжения равны мгновенным значениям линейных напряжений тягового генератора за вычетом падений напряжений на вентилях. Поскольку нагрузка в трехфазных мостовых схемах выпрямления включена на линейное напряжение генератора U_Λ , в соответствии с (3.18) максимальное значение амплитуды выпрямленного напряжения определится амплитудой линейного напряжения генератора $(U_\Lambda)_m$:

$$U_{d \max} = (U_\Lambda)_m = \sqrt{2}U_\Lambda = \sqrt{2}\sqrt{3}U_\Phi = \sqrt{6}U_\Phi = 2,45U_\Phi,$$

где U_Φ — действующие значения фазного напряжения генератора.

Среднее значение выпрямленного напряжения с учетом его пульсаций в соответствии с (3.12) составит

$$U_d = (U_\Lambda)_m \frac{\sin(\pi/m)}{(\pi/m)} = \sqrt{6}U_\Phi \frac{\sin(\pi/12)}{\pi/12} = 2,42U_\Phi.$$

К каждому вентилю в непроводящем состоянии приложено амплитудное значение выпрямленного напряжения (обратное напряжение)

$$(U_{\text{обр}})_m = \sqrt{2}U_\Lambda = \sqrt{6}U_\Phi = 1,012U_d.$$

Характеристики выпрямителя позволяют определить зависимости выпрямленного напряжения $U_d = f(\gamma + \alpha')$ и выпрямленного тока $I_d = f(\gamma + \alpha')$ при различных режимах работы (рис. 3.17, 3.18).

В частности, по рис. 3.18 можно определить, как меняется результирующий угол коммутации вентиля выпрямителя при возрастании тока нагрузки I_d . А увеличение угла коммутации вентиля неизбежно снижает значение выпрямленного напряжения. Так, например, уже при $\gamma + \alpha' = \pi/3$ $U_d = 1,8U_\Phi$.

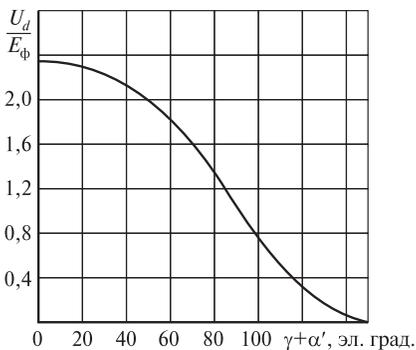


Рис. 3.17. Относительное значение выпрямленного напряжения в зависимости от углов коммутации вентилей трехфазного мостового выпрямителя (без учета падений напряжений на диодах)

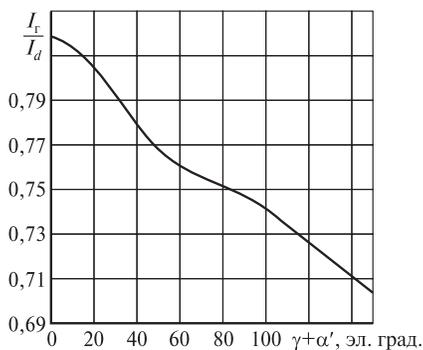


Рис. 3.18. Относительное значение выпрямленного тока в зависимости от углов коммутации вентилей трехфазного мостового выпрямителя I_Γ — действующее значение фазного тока генератора

Режимы коммутации вентилей тепловозной ВУ выбираются так, чтобы рабочая часть характеристики системы СГ—ВУ $U_d = f(I_d)$ полностью располагалась в зоне I коммутации вентилей выпрямителей (рис. 3.19). В этой зоне располагаются участки ограничения напряжения генератора (линии 1—2) и мощности (линии 2—3). И только на участках ограничения тока генератора (линии 3—4), т.е. при кратковременных режимах трогания тепловоза, допускается работа системы СГ—ВУ с углами коммутации вентилей $(\gamma + \alpha') \geq \pi/3$. Поэтому можно считать, что внешняя характеристика тепловозной ВУ линейна в рабочем диапазоне характеристики генератора [2].

Из-за наличия пульсаций выпрямленного напряжения его мгновенное значение, помимо постоянной составляющей U_d , содержит высшие гармоники, кратные 12:

$$u_d = U_d + \sum u_\nu,$$

где $\nu = 12, 24, 36 \dots$

Поскольку тепловозная выпрямительная установка содержит два трехфазных мостовых выпрямителя, соединенных параллельно, т.е. представляет собой 12-пульсную систему выпрямления, из состава

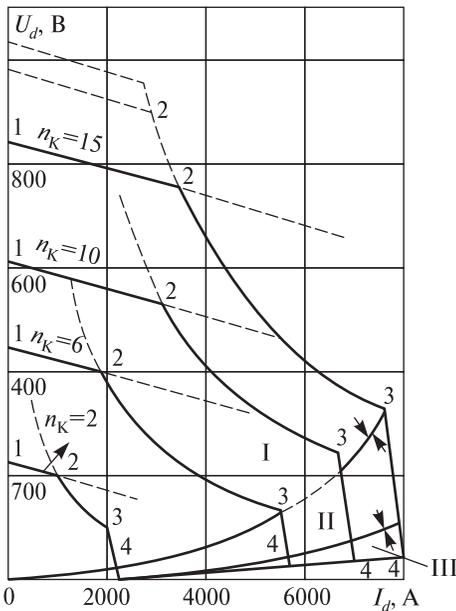


Рис. 3.19. Характеристики системы СГ—ВУ с граничными кривыми режимов работы выпрямителя:
 n_k — позиция контроллера; I, II, III — области первой, второй и третьей зон коммутации вентилей выпрямителя

Очевидно, что если $\omega L_d \rightarrow \infty$, выпрямленный ток не содержит высших гармоник, т.е. $i_d = I_d$.

Так как продолжительность прохождения тока через каждый вентиль равна 120 эл. град., постоянная (средняя) составляющая

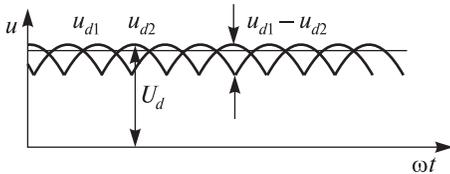


Рис. 3.20. К работе системы СГ—ВУ тепловоза

выпрямленного напряжения исключаются и гармонические, кратные шести.

На режимах, когда индуктивное сопротивление нагрузки $X_d \rightarrow 0$, кривая выпрямленного тока по форме совпадает с кривой напряжения u_d . В этом случае можно считать, что выпрямленный ток

$$i_d = I_d + \sum i_v,$$

где

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}, \text{ а } i_v = \frac{u_v}{R_d}.$$

Амплитуда анодного тока вентилей на этом режиме имеет наибольшее значение

$$(I_a)_{\max} = (I_d)_{\max} = \frac{(U_d)_{\max}}{R_d} = 1,012 I_d.$$

$$\text{анодного тока } (I_a)_{\text{cp}} = \frac{1}{3} I_d.$$

Особенностью работы шестифазной (12-пульсной) системы СГ—ВУ является то, что выпрямленные значения напряжения каждой «звезды» генератора u_{d1} и u_{d2} сдвинуты относительно друг друга на

30 эл. град. (рис. 3.20). В результате в каждый момент времени между выходами мостов будет иметься разность потенциалов, равная $u_{d1} - u_{d2}$. Разность потенциалов $u_{d1} - u_{d2}$ создаст уравнивающий ток i_0 , который будет циркулировать между параллельно включенными мостами, минуя нагрузку. Этот ток не выполняет полезной работы, а только дополнительно нагружает вентили, увеличивая потери в них и нагрев, а также несколько снижает КПД ВУ.

Глава 4. ОСНОВНЫЕ БЛОКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННО- ПОСТОЯННОГО ТОКА ТЕПЛОВОЗА

4.1. Назначение автоматической системы регулирования напряжения тягового генератора

Экономичная работа дизеля возможна только на установившихся режимах при полном использовании его мощности $N_{\text{диз}}$. В соответствии с универсальными характеристиками дизеля каждому значению частоты вращения коленчатого вала $n_{\text{диз}}$ соответствует свое максимальное значение $N_{\text{диз}}$. От дизеля получают привод тяговый генератор и вспомогательные системы тепловоза, т.е. $N_{\text{диз}} = N_{\text{св}} + N_{\text{всп}}$ (рис. 4.1). Условие экономичной работы дизеля в эксплуатации определяет основное требование, предъявляемое к электрической передаче тепловоза: на каждой позиции контроллера обеспечить использование свободной мощности дизеля тяговым генератором

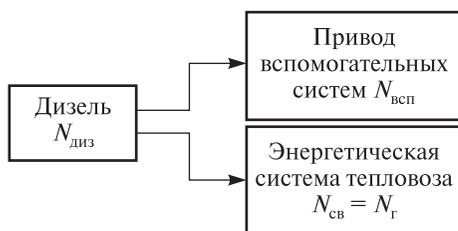


Рис. 4.1. Распределение мощности дизеля между системами тепловоза

$N_{\text{диз}}$ — полная мощность дизеля; $N_{\text{всп}}$ — мощность, затрачиваемая на привод вспомогательных систем; $N_{\text{св}}$ — свободная мощность дизеля; $N_{\text{Г}}$ — мощность на валу тягового генератора

$N_{\text{св}} = N_{\text{Г}}$, где $N_{\text{Г}}$ — механическая мощность генератора. Тогда на выходе генератора будем иметь электрическую мощность, которая определится как

$$P_{\text{Г}} = N_{\text{св}} \eta_{\text{Г}}, \quad (4.1)$$

где $\eta_{\text{Г}}$ — КПД тягового генератора.

Если принять, что на каждой позиции контроллера $N_{\text{св}} = \text{const}$ (не меняются затраты мощности на привод вспомогательных систем теп-

ловоза), требование к алгоритму работы электрической передачи для каждой позиции контроллера выразится как

$$P_{\Gamma} \approx \text{const.}$$

Графически это требование выражается гиперболической зависимостью напряжения на зажимах тягового генератора U_{Γ} от его нагрузки — силы тока I_{Γ} [2]. Поскольку на тепловозах применяются энергетические цепи с параллельным соединением тяговых двигателей (см. рис. 2.1), то можно записать:

$$U_{\Gamma} = U_{\text{ТЭД}}; I_{\Gamma} = 6I_{\text{ТЭД}} \text{ и } P_{\Gamma} = 6P_{\text{ТЭД}}, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{ТЭД}}$, $I_{\text{ТЭД}}$ и $P_{\text{ТЭД}}$ — соответственно напряжение, сила тока и мощность тягового электродвигателя.

Из (4.2) следует, что зависимость $U_{\Gamma} = f(I_{\text{ТЭД}})$ также будет иметь гиперболический характер (рис. 4.2, а).

Поскольку тяговый генератор является источником напряжения, то $U_{\Gamma} \approx E_{\Gamma}$, где E_{Γ} — ЭДС, создаваемая в его обмотках. При постоянном значении $n_{\text{диз}}$ ЭДС генератора будет зависеть от его магнитного потока $E_{\Gamma} = f(\Phi_{\Gamma})$. Для управления магнитным потоком Φ_{Γ} и формирования гиперболической зависимости $U_{\Gamma} = f(I_{\text{ТЭД}})$ предназначена автоматическая система регулирования напряжения тягового генератора.

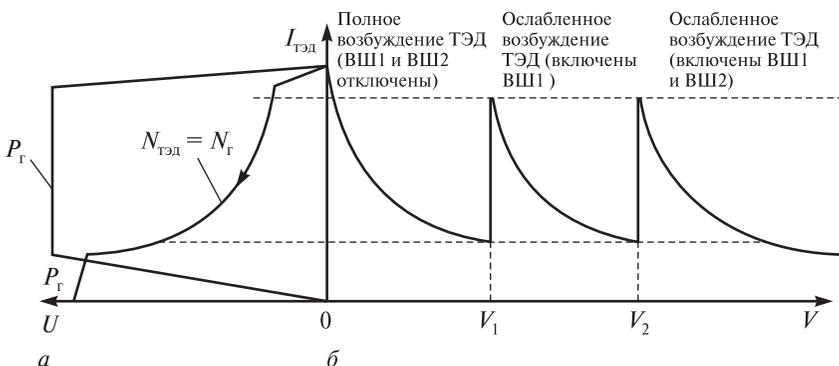


Рис. 4.2. Зависимости напряжения на зажимах тягового генератора U_{Γ} и его мощность P_{Γ} от тока тяговых электродвигателей $I_{\text{ТЭД}}$ (а); расширение интервала скоростей движения тепловоза V при полном использовании мощности энергетической установки за счет ослабления возбуждения тяговых двигателей (б)

Известно, что требуемые режимы работы тепловоза обеспечиваются не только регулированием напряжения тягового генератора, но и регулированием возбуждения тягового электродвигателя. Шунтирование обмоток возбуждения электродвигателя с помощью контакторов ослабления возбуждения ВШ1 и ВШ2 позволяет при ограничении значений напряжения и тока тягового электрооборудования расширить диапазон изменения скорости тепловоза (см. рис. 2.1, 4.2, б).

Электроэнергетическая цепь и автоматическая система регулирования напряжения тягового генератора образуют электрическую передачу тепловоза.

Основные требования, предъявляемые к передаче мощности тепловоза [4] перечислены ниже:

1. Использование для тяги всей свободной мощности дизеля во всем диапазоне изменения скорости движения тепловоза при изменении атмосферных условий и других факторов, влияющих на величину мощности дизеля.

2. Ограничение в пределах допустимых значений напряжения и тока тягового электрооборудования (тягового генератора, выпрямительной установки и тяговых электродвигателей) с возможностью их изменения в широких пределах для обеспечения требуемой силы тяги.

3. Защита тягового оборудования тепловоза от аварийных режимов работы.

4. Точность регулирования, устойчивость, быстродействие.

К работоспособности системы автоматического регулирования напряжения тягового генератора предъявляются жесткие требования, так как от нее зависят тяговые характеристики локомотива, надежность и экономичность его работы.

Значение свободной мощности дизеля может колебаться в зависимости от затрат мощности на привод вспомогательных систем тепловоза, а также от температуры воздуха, атмосферного давления и т.д. На номинальной частоте вращения коленчатого вала дизеля колебания его свободной мощности могут составлять до 15 % номинального значения.

Зависимость мощности дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116 в функции от частоты вращения вала дизеля $P_d = f(n_{\text{диз}})$ приведена

на рис. 4.3, где P_d — мощность на выходе ВУ при нормальных атмосферных условиях.

На тепловозах первого поколения (ТЭ1, ТЭ2, ТЭ3, ТЭМ1, ТЭМ2) гиперболическая характеристика генератора $U_{\Gamma} = f(I_{\text{ТЭД}})$ формировалась разомкнутой системой регулирования, основным элементом которой являлся возбудитель с системой насыщенных и ненасыщенных полюсов [2]. Недостатками таких систем являются низкая точность регулирования U_{Γ} и необходимость использования специальной электрической машины постоянного тока в канале регулирования возбуждения генератора (возбудителя).

Тепловозы следующего поколения (серий ТЭ10, ТЭП60, М62) уже оборудовались комбинированной системой регулирования напряжения тягового генератора [2]. Эта система обладала хорошей точностью регулирования, была проста в настройке, однако по-прежнему требовала использования возбудителя (генератора постоянного тока как электромашиного усилителя) и синхронного подвозбудителя (однофазного генератора), который являлся источником переменного напряжения для устройств автоматики. Основным элементом регулятора в ней являлся магнитный усилитель с внутренней обратной связью и несколькими обмотками управления, получивший название в тепловозостроении — амплистат возбуждения; в качестве датчиков использовались бесконтактные электромагнитные устройства (простейшие магнитные усилители, бесконтактное тахометрическое

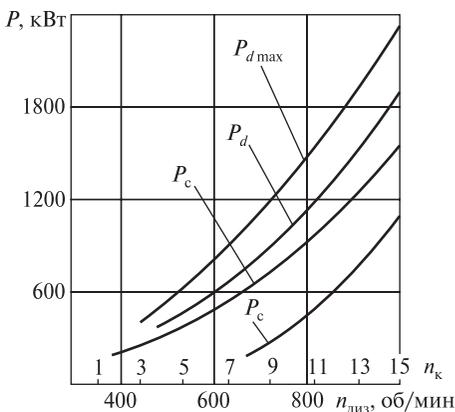


Рис. 4.3. Мощность дизель-генератора 1А-9ДГ на выходе ВУ тепловоза 2ТЭ116 от частоты вращения его вала:

P_d — мощность генератора при работе вспомогательных систем; P_c — мощность генератора по селективным характеристикам; $P_{d \max}$ — полная мощность дизель-генератора (при отключенных вспомогательных системах); P'_c — мощность генератора по селективным характеристикам при работе системы энергоснабжения поезда (работа тепловоза в пассажирском движении); $n_{\text{к}}$ — позиция контроллера

устройство, датчик переменной индуктивности), которые применяются и в настоящее время.

Развитие силовой полупроводниковой техники позволило внедрить на тепловозах энергетические цепи переменного тока с комбинированным регулятором напряжения генератора (тепловозы серий ТЭ114, 2ТЭ116, ТЭП70, ТЭП75, ТЭП80, 2ТЭ121, 2ТЭ136, ТЭМ7) [2]. Возбудитель был заменен статическим управляемым выпрямителем на силовых тиристорах (управляемым выпрямителем возбуждения). Тиристорные выпрямители обладают малыми габаритами при большой мощности и высоком быстродействии, высокими значениями коэффициента усиления и КПД. В результате в системе регулирования напряжения генератора осталась только одна электрическая машина переменного тока — однофазный возбудитель, который является источником энергии для питания обмотки возбуждения тягового генератора и блоков автоматики. Преимущество возбудителя переменного тока — его простота по сравнению с возбудителем постоянного тока и большая мощность в тех же габаритах машины. Исключение из цепи возбуждения подвозбудителя и применение бесконтактного выпрямителя возбуждения УВВ позволило повысить быстродействие системы регулирования напряжения генератора, по сравнению с передачей постоянного тока. Это улучшило противобоксовочные свойства тепловоза и обеспечило устойчивость работы передачи в режиме электрического торможения.

Электрическая передача переменного тока с комбинированной автоматической системой регулирования напряжения тягового генератора является основной на современных тепловозах.

В последнее время на тепловозах стали применяться передачи мощности переменного тока и переменного тока со поосным управлением тяговыми электродвигателями и цифровой системой управления статическими преобразователями тягового привода, использующей тот же комбинированный принцип регулирования (тепловозы 2ТЭ25К и 2ТЭ25А).

4.2. Алгоритм работы автоматической системы регулирования напряжения генератора

4.2.1. Тяговый режим тепловоза

Автоматическая система регулирования электрической передачи имеет один контур регулирования; в тяговом режиме это контур регулирования напряжения тягового генератора U_d (рис. 4.4, а) [4]. Она формирует требуемые регулировочные характеристики тягового генератора: $I_{вг} = f(I_d)$, где $I_{вг}$ — ток возбуждения генератора, I_d — ток на выходе ВУ.

Дизель Д, тяговый генератор СГ, выпрямительная установка ВУ и тяговые электродвигатели ТЭД образуют энергетическую цепь. Поскольку все ТЭД включены на напряжение ВУ, $I_d = 6I_a$, где I_a — ток якоря ТЭД.

Ток I_a зависит от напряжения на ВУ U_d и частоты вращения его якоря $n_{тэд}$; в тяговом режиме

$$I_a = \frac{U_d - c_e n_{тэд} \Phi_d}{R_{тэд}}, \quad (4.3)$$

где c_e , Φ_d , $R_{тэд}$ — соответственно конструктивная постоянная, магнитный поток и сопротивление обмоток тягового электродвигателя.

При изменении режима движения тепловоза (из-за изменения сопротивления движения) меняется I_a , поэтому его значение можно рассматривать как сигнал о внешнем воздействии (возмущение).

Центральным блоком системы регулирования является селективный узел СУ. Кроме того, система содержит:

- бесконтактное тахометрическое устройство, которое выполняет функции блока задания возбуждения БЗВ (см. п. 1.3);
- датчики напряжения тягового генератора и тока тяговых электродвигателей (трансформаторы постоянного напряжения ТПН и тока ТПТ), в качестве которых используются простейшие магнитные усилители (см. п. 1.2);
- корректирующее устройство (индуктивный датчик ИД), в качестве которого используется датчик переменной индуктивности (см. п. 1.4);

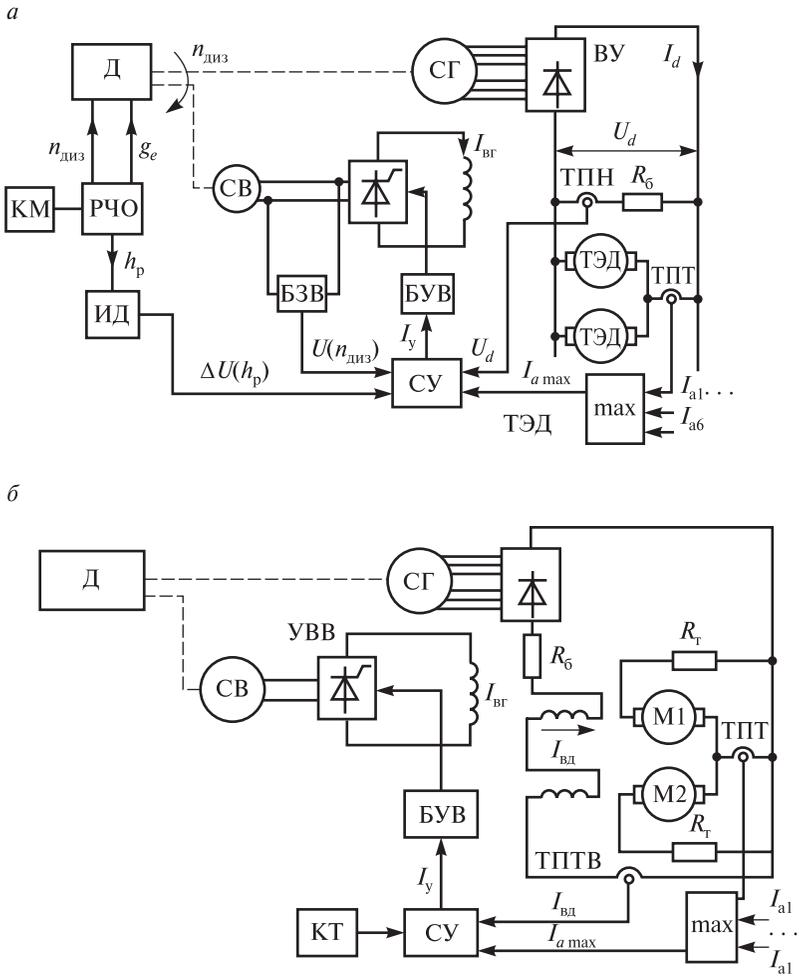


Рис. 4.4. Принципиальная блок-схема автоматической системы регулирования электрической передачи переменного-постоянного тока без поосного управления тяговыми электродвигателями в тяговом (*a*) и тормозном (*б*) режиме

– узел выделения максимального сигнала \max , который обеспечивает работу системы по максимальному из всех токов тяговых двигателей, что повышает устойчивость тяговых двигателей к развитию боксования;

– несимметричный управляемый мост (управляемый выпрямитель возбуждения УВВ), изменяющий ток в обмотке возбуждения тягового генератора $I_{вг}$;

– блок управления возбуждением БУВ, который формирует управляющие импульсы тиристоров УВВ.

Источником питания для УВВ, БУВ, БЗВ, ИД, ТПН, ТПТ является синхронный возбудитель СВ.

Алгоритм работы системы регулирования напряжения тягового генератора следующий.

В СУ поступают:

– напряжения от БЗВ и ИД, в результате чего формируется уставка напряжения тягового генератора, пропорциональная $n_{диз}$;

– сигнал обратной связи — от ТПН;

– сигнал по возмущению — от ТПТ.

Селективным узлом формируется ток управления I_y , который с помощью БУВ изменяет угол управления тиристорами УВВ, а соответственно напряжение тягового генератора U_d .

Так, например, при возрастании тока тяговых двигателей I_a (в результате увеличения сопротивления движения) ток управления I_y таким образом изменит угол открытия тиристоров УВВ, чтобы напряжение тягового генератора и U_d уменьшились, сохранив постоянное значение мощности на тягу $P_d = 6U_d I_a = \text{const}$.

При увеличении нагрузки на валу дизеля (например, при включении компрессора) регулятор дизеля РЧО увеличивает цикловую подачу топлива g_e . Рейки топливных насосов, перемещаясь, изменят положение якоря ИД, корректирующий сигнал на его выходе $\Delta U(h_p)$ и ток управления I_y . Изменение тока I_y приведет к увеличению угла открытия тиристоров УВВ, снижению тока возбуждения тягового генератора $I_{вг}$ и напряжения U_d ; мощность дизеля, передаваемая на тягу, уменьшается.

Корректирующий сигнал позволяет изменять мощность генератора в сравнительно небольшом диапазоне. Однако благодаря его действию обеспечивается полное использование свободной мощности дизеля при ее колебаниях, а также компенсируются погрешности в регулировании мощности, обусловленные температурной нестабильностью блока БЗВ и ошибкой в формировании сигнала обратной связи по напряжению генератора.

При увеличении позиции контроллера, а соответственно частоты вращения вала дизеля $n_{\text{диз}}$, за счет возрастания выходного напряжения блока БЗВ изменяется ток управления I_y . В результате напряжение U_d также будет меняться по позициям контроллера.

Поскольку система регулирования напряжения тягового генератора замкнутая, ее точность достаточно высока, и на всех режимах работы обеспечивается полное использование свободной мощности дизеля на тягу.

Кроме управления мощностью, передаваемой на тягу, система регулирования с помощью тех же блоков формирует участки ограничения напряжения и тока тягового генератора.

4.2.2. Тормозной режим работы тепловоза

При переходе в тормозной режим дизель автоматически переводится на 13-ю позицию; это необходимо для того, чтобы обеспечить устойчивость работы всех систем и нормальное охлаждение тягового электрооборудования. Автоматическая система регулирования электрической передачи в тормозном режиме предназначена для регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей $I_{\text{вд}}$ [4]. Она формирует требуемые регулировочные характеристики тяговых электродвигателей: $I_{\text{вд}} = f(I_a)$. Принципиальная схема электрической передачи в тормозном режиме приведена на рис. 4.4, б.

При переходе в тормозной режим двигатели отсоединяются от тягового генератора с помощью тормозного переключателя (рис. 4.5); обмотка якоря каждого двигателя включается на тормозной резистор СТ1—СТ6, а обмотки возбуждения всех двигателей соединяются последовательно и включаются на напряжение выпрямительной установки через балластный резистор R_6 . Электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{эм}} = c_m \Phi_d I_a, \quad (4.4)$$

где $c_m = \frac{c_e}{2\pi}$ — конструктивная постоянная двигателя.

Ток якоря ТЭД в тормозном режиме определяется его ЭДС и зависит от частоты вращения якоря $n_{\text{ТЭД}}$ и магнитного потока Φ_d двигателя:

$$I_a = \frac{c n_{\text{ТЭД}} \Phi_d}{R_T + R_a},$$

где R_a — сопротивление якоря ТЭД; R_T — сопротивление тормозного резистора.

Поскольку частота вращения якоря ТЭД определяется скоростью тепловоза, то тормозной момент двигателя регулируется изменением его тока возбуждения (магнитным потоком). Ток возбуждения

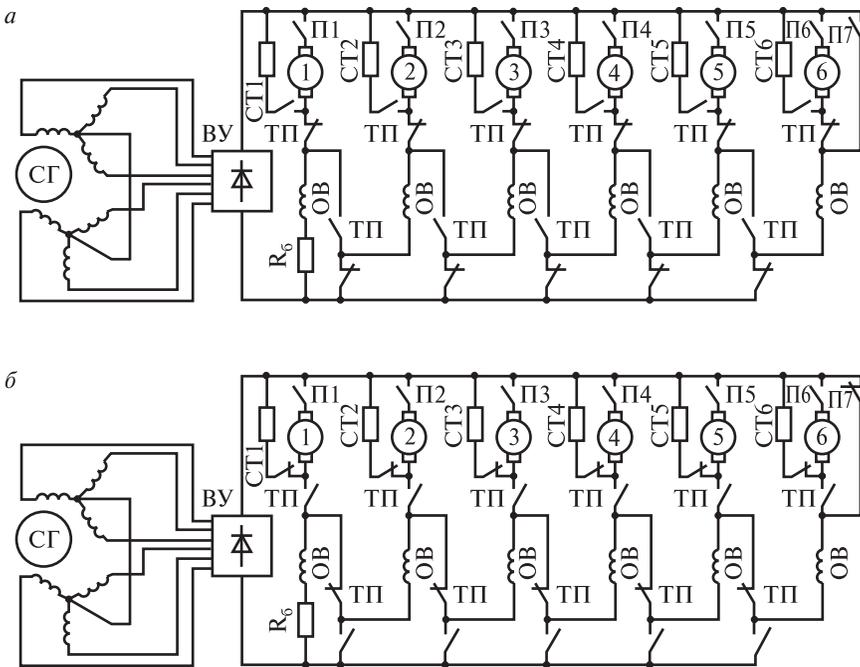


Рис. 4.5. Переключение схемы соединений обмоток тяговых двигателей при переходе в режим электрического торможения:

а — тяговый режим; *б* — тормозной режим; СГ — тяговый синхронный генератор; ВУ — выпрямительная установка; 1–6 — обмотки якорей 1–6 тяговых электродвигателей; ОБ — обмотки главных полюсов тяговых электродвигателей; СТ1–СТ6 — тормозные сопротивления; R_6 — балластный резистор; ТП — контакты тормозного переключателя; П7 — главный контакт тормозного контактора

тяговых двигателей линейно зависит от напряжения тягового генератора:

$$I_{\text{вд}} = \frac{U_d}{6R_{\text{в}} + R_{\text{г}}},$$

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения ТЭД.

Для ограничения значений $I_{\text{вд}}$ в режиме электрического торможения используется балластный резистор $R_{\text{г}}$. На 13-й позиции контроллера напряжение $U_d = (0,8 - 0,85)U_{d\text{ном}}$, а сопротивление обмотки возбуждения ТЭД очень мало (для тягового электродвигателя ЭД-118 при температуре обмотки 20 °С $R_{\text{в}} = 0,0105$ Ом [22]). При отсутствии в цепи обмоток возбуждения резистора $R_{\text{г}}$ ток $I_{\text{вд}}$ будет недопустимо большим. Включением в эту цепь резистора $R_{\text{г}}$ ограничивают ток возбуждения двигателей значением $(I_{\text{вд}})_{\text{max}} \approx 400$ А [4].

В режиме электрического торможения при регулировании тормозного момента ТЭД используются те же агрегаты и блоки, что и в тяговом режиме (см. рис. 4.4). Регулирование тока возбуждения тягового генератора осуществляется управляемым выпрямителем возбуждения УВВ. Управление тиристорами УВВ выполняется блоком БУВ по току управления селективного узла $I_{\text{у}}$. Однако сам СУ в тормозном режиме меняет свою конфигурацию. Это вызвано тем, что если в тяговом режиме назначение системы регулирования напряжения тягового генератора — обеспечить полное использование свободной мощности дизеля на тягу, т.е. $U_d I_d \approx \text{const}$, то в тормозном режиме — обеспечить заданное значение тормозного момента ТЭД ($M_{\text{т}}$)_з:

$$M_{\text{эм}} = c_{\text{м}} \Phi_{\text{д}} I_{\text{а}} = (M_{\text{т}})_{\text{з}},$$

т.е. при текущем значении $I_{\text{а}}$ поддерживать такое значение $I_{\text{вд}}$, чтобы создать заданное значение момента.

Поэтому в тормозном режиме ток управления в СУ формируется по значениям токов $I_{\text{а}}$ и $I_{\text{вд}}$. Ток якоря тяговых двигателей $I_{\text{а}}$ измеряется теми же трансформаторами тока ТПТ, что и в тяговом режиме. Ток возбуждения двигателей $I_{\text{в}}$ измеряется трансформатором тока возбуждения ТПТВ, в качестве которого также используется простейший магнитный усилитель.

Следует отметить, что как в тяговом, так и в тормозном режиме управление возбуждением тягового генератора осуществляется по максимальному значению тока тяговых двигателей $I_{a \max}$, который формируется узлом выделения максимального сигнала \max . Это повышает устойчивость сцепления колеса с рельсом, так как препятствует развитию боксования при работе тепловоза в тяговом режиме и юза — в тормозном режиме.

4.3. Селективный узел в тяговом режиме работы тепловоза

4.3.1. Принцип работы селективного узла

В электропередаче переменного-постоянного тока используется диодно-потенциметрический селективный узел с тремя каналами регулирования (рис. 4.6) [4]. Селективный узел включает потенциометр обратной связи ПОС и потенциометр задания ПЗ (потенциометр уставки). Потенциометр обратной связи состоит из резисторов R_1 , R_2 , R_3 и диодов Д4, Д5; резисторы R_1 и R_3 являются нагрузкой со стороны выпрямленного напряжения для ТПТ и ТПН (см. п. 1.2).

Как и все магнитные усилители ТПТ и ТПН являются источниками тока (имеют большое внутреннее сопротивление). Поэтому

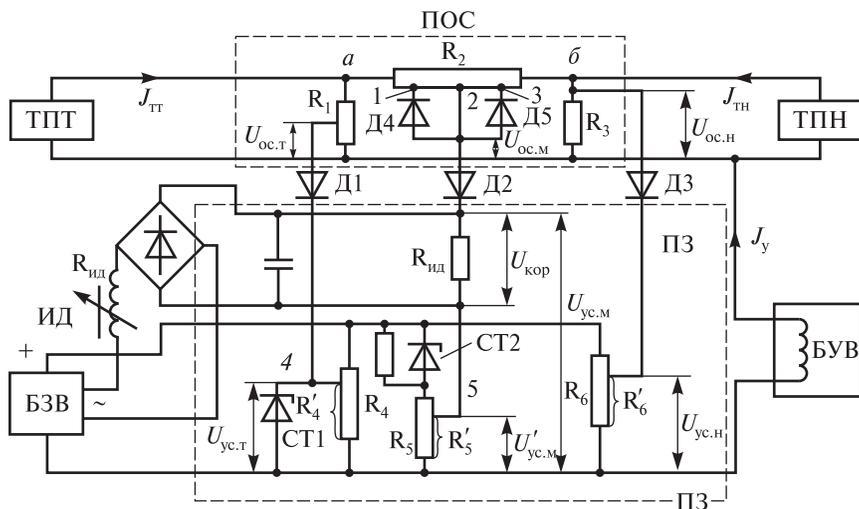


Рис. 4.6. Принципиальная схема селективного узла тепловоза 2ТЭ116

значения токов в их рабочих обмотках не зависят от параметров ПОС, а определяются только токами обмоток управления (максимальным током тяговых двигателей и выпрямленным напряжением тягового генератора):

$$I_{\text{ТТ}} = k_{\text{ТТ}} I_{a \text{ max}}; \quad I_{\text{ТН}} = k_{\text{ТН}} U_d, \quad (4.5)$$

где $k_{\text{ТТ}}$ и $k_{\text{ТН}}$ — соответственно коэффициенты усиления ТПТ и ТПН.

При параллельной схеме соединения тяговых двигателей выпрямленный ток тягового генератора $I_d = 6I_a$, где I_d — выпрямленное значение тока тягового генератора. Поэтому можно записать:

$$I_{\text{ТТ}} \approx k'_{\text{ТТ}} I_d. \quad (4.6)$$

Значит, на резисторах R_1 , R_2 и R_3 в виде падений напряжений выделяются сигналы обратных связей по току и напряжению тягового генератора: на R_1 — напряжение обратной связи по току $U_{\text{ос.т}}$; на R_2 — напряжение обратной связи по мощности $U_{\text{ос.м}}$; на R_3 — напряжение обратной связи по напряжению $U_{\text{ос.н}}$. В любом случае напряжение обратной связи

$$U_{\text{ос}} = K_{\text{т}} I_d + K_{\text{н}} U_d,$$

где $K_{\text{т}}$ и $K_{\text{н}}$ — коэффициенты, определяемые параметрами ПОС.

Потенциометр уставок состоит из резисторов R_4 , R_5 , R_6 , $R_{\text{ид}}$ и двух стабилитронов СТ1 и СТ2. Резисторы R_4 , R_5 , R_6 включены на выходное напряжение блока задания возбуждения БЗВ, а через $R_{\text{ид}}$ протекает ток обмотки ИД. На сопротивлениях R_4 , R_5 , R_6 формируются напряжения уставок (в соответствии с сигналами обратных связей): по току — $U_{\text{ус.т}}$; по мощности — $U_{\text{ус.м}}$; по напряжению — $U_{\text{ус.н}}$. Стабилитроны СТ1 и СТ2 шунтируют части сопротивлений R_4 , R_5 , изменяя значения уставок по току и мощности, начиная с некоторых позиций контроллера.

Каждая пара сигналов обратной связи и уставки — например, $U_{\text{ос.т}}$ и $U_{\text{ус.т}}$ — образует канал регулирования. Таким образом, между плюсами потенциометров через разделительные диоды Д1, Д2 и Д3 организованы три канала регулирования: через Д1 — канал регулирования тока; через Д2 — канал регулирования мощности; через Д3 — канал регулирования напряжения.

Между «минусами» ПОС и ПЗ включена обмотка управления магнитного усилителя блока БУВ. Под действием разности потенциалов сигналов обратной связи и уставки в обмотке управления протекает ток управления $I_y \sim (U_{oc} - U_{yc})$. Значение I_y определяет фазу управляющих импульсов тиристоров блока УВВ, а соответственно и значение тока возбуждения тягового генератора.

Таким образом, сопротивления ПОС, разделительные диоды, сопротивления ПЗ и обмотка управления БУВ образуют замкнутый контур.

Диоды Д1, Д2 и Д3 в СУ выполняют двойную функцию. Во-первых, они обеспечивают постоянное направление тока в обмотке управления магнитного усилителя БУВ (благодаря диодам Д1—Д3 каждый из каналов вступает в работу только в случае превышения сигналом ОС сигнала уставки); во-вторых — очередность в работе каналов регулирования.

Рассмотрим, как происходит работа канала регулирования. На установившемся режиме работы передачи

$$U_{oc} \approx U_{yc}.$$

Считая, что прямое падение напряжения на диодах Д1, Д2 и Д3 равно нулю, можно записать:

$$U_{oc} = U_{yc}. \quad (4.7)$$

При этом на выходе СУ поддерживается I_y , соответствующий, предположим, точке 1 на характеристике $I_{вг} = f(I_y)$ (рис. 4.7). Если по каким-либо причинам это равенство нарушается, то система регулирования изменяет ток возбуждения генератора таким образом, чтобы равенство восстановить. Например, если скорость тепловоза снижается и увеличивается ток генератора I_d , то на основании (4.7) значение U_{oc} возрастет, нарушая равновесие напряжений на ПОС и ПЗ. Это вызывает увеличение значения I_y , и рабочая точка системы регулирования переместится из первоначального состояния 1 в состояние 2, уменьшая возбуждение генератора. Напряжение U_d снижается,

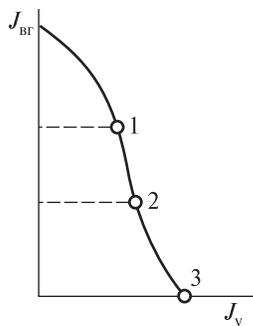


Рис. 4.7. Значение тока возбуждения тягового генератора $I_{вг}$ от тока управления I_y при работе системы регулирования напряжения

уменьшая значение U_{oc} и восстанавливая равенство $U_{oc} = U_{yc}$. Если ток I_d уменьшится, процесс носит обратный характер, но равновесие $U_{oc} = U_{yc}$ восстановится за счет увеличения значения U_d .

Поскольку в пределах одной позиции дизеля величина $U_{yc} = \text{const}$ (так как напряжение на выходе БЗВ определяется значением $n_{\text{диз}}$), значит, с учетом (4.7) для каждой позиции контроллера справедливы зависимости

$$K_T I_d + K_H U_d = \text{const}$$

и

$$U_d = \frac{U_{yc}}{K_H} - \frac{K_T}{K_H} I_d = a - b I_d. \quad (4.8)$$

Таким образом, каждый канал регулирования СУ формирует линейную зависимость $U_d = f(I_d)$ (рис. 4.8, а). Для того чтобы приблизить линейные характеристики, формируемые селективным узлом, к требуемой характеристике тягового генератора, необходимо обеспечить нужные значения коэффициентов уравнения (4.8) с соблюдением неравенств $a_3 > a_2 > a_1$; $|b_3| > |b_2| > |b_1|$ и последовательное переключение каналов регулирования в точках 1 и 2.

Однако такая характеристика все равно значительно отличается от требуемой. Практически на всем участке ограничения мощности тяговый генератор будет перегружать дизель. Чтобы исключить перегрузку дизеля на всех режимах работы, линейный участок ограничения мощности 1—2 заменяют ломаной из трех участков, расположенной ниже требуемой характеристики. Этим характеристика генератора $U_d = f(I_d)$ приближается к гиперболической и обеспечивается некоторый запас мощности, которую при необходимости можно передать на привод вспомогательных систем тепловоза (рис. 4.8, б, и 4.3). Для получения такой характеристики сигнал $U_{oc,м}$ снимают поочередно с точек 1, 2, 3 плеча R_2 (рис. 4.6). Переключение участков плеча R_2 осуществляется автоматически открытием и закрытием диодов Д4 и Д5.

Полное использование свободной мощности дизеля на тягу (когда меняется мощность на привод вспомогательных систем) осуществляется за счет изменения уставки по мощности $U_{uc,м}$. Сигнал уставки по мощности в СУ разбит на две составляющие: $U'_{uc,м}$, определяемый позицией дизеля, и $U_{кор}$, снимаемый с ИД

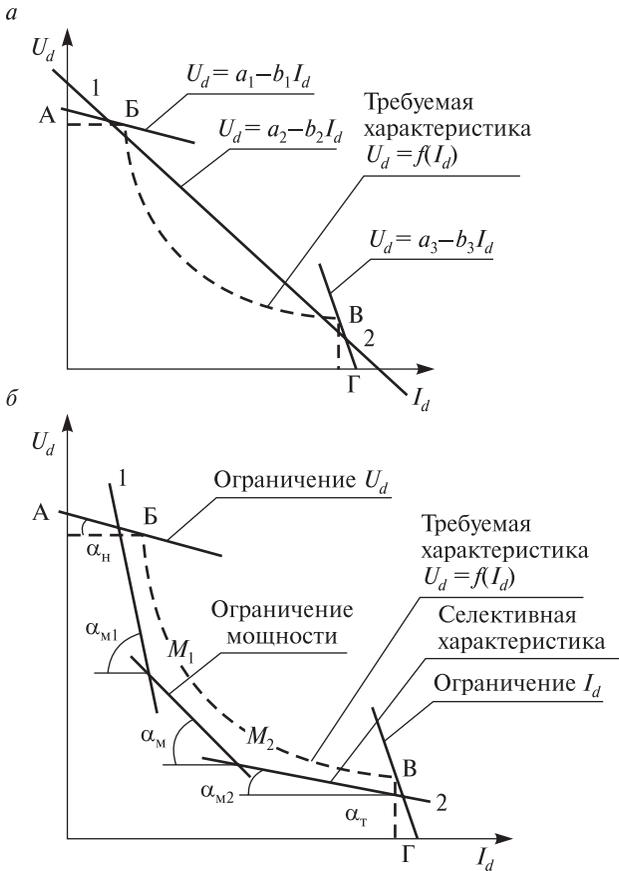


Рис. 4.8. К работе селективного узла

и определяемый положением реек топливных насосов дизеля, т.е. $U_{ус.м} = U'_{ус.м} + U_{кор}$. При отсутствии сигнала $U_{кор}$ мощность генератора определяется только составляющей $U'_{ус.м}$. Характеристика генератора $U_d = f(I_d)$ при $U_{кор} = 0$ получила название селективной характеристики. Селективная мощность генератора P_c несколько меньше свободной мощности дизеля P_d (рис. 4.3) и за счет уменьшения сигнала $U_{кор}$ регулятор дизеля всегда может устранить его перегрузку.

На ограничение тока и напряжения тягового генератора корректирующий сигнал влияние не оказывает.

На рис. 4.3 приведена также зависимость $P_{d \max}$, соответствующая максимальному значению $U_{\text{кор}}$.

4.3.2. Цепи обратных связей селективного узла и их влияние на селективную характеристику генератора

Определим, как параметры ПОС влияют на селективную характеристику тягового генератора. Рассмотрим равновесное состояние ПОС, используя принцип наложения и пренебрегая прямым падением напряжения на диодах Д4 и Д5. Контуры токов будут определяться распределением потенциалов в узлах ПОС.

На режиме ограничения тока тягового генератора величина I_d имеет достаточно высокое значение, а величина U_d — относительно низкое (линия ВГ на рис. 4.8, б) и $\varphi_a \gg \varphi_b$ (рис. 4.9). При таком распределении потенциалов диод Д4 будет закрыт, а Д5 — открыт. Если $U_{\text{ос.т}} > U_{\text{ус.т}}$, то откроется диод Д1 и начинает работать канал ограничения тока генератора (рис. 4.6). Поскольку прямое падение напряжения на Д1 очень мало, φ_a сложится с потенциалом плюсовой цепи ПЗ и закроет диоды Д2 и Д3 (к ним будет приложено обратное напряжение). В результате каналы ограничения мощности и напряжения генератора оказываются закрытыми.

Используя законы Кирхгофа, выразим напряжение обратной связи в канале ограничения тока $U_{\text{ос.т}}$ (напомним, что если диод открыт прямым напряжением, условно через него может протекать обратный ток) (рис. 4.9):

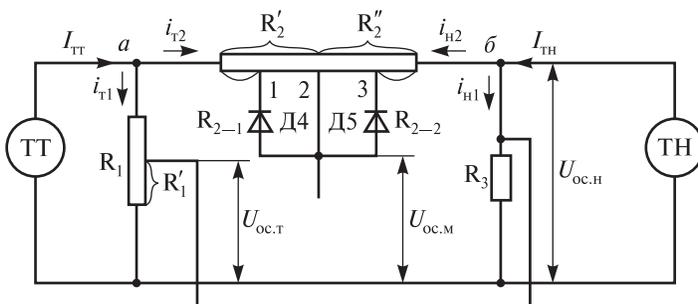


Рис. 4.9. Принципиальная схема потенциометра обратной связи селективного узла

$$\begin{cases} I_{\text{ТТ}} = i_{\text{Т1}} + i_{\text{Т2}}; & (4.9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{\text{Т1}} R_1 = i_{\text{Т2}} (R_2' + R_{2-2} + R_3); & (4.10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{\text{ТН}} = i_{\text{Н1}} + i_{\text{Н2}}; & (4.11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{\text{Н1}} R_3 = i_{\text{Н2}} (R_2' + R_{2-2} + R_3); & (4.12) \end{cases}$$

$$U_{\text{ос.т}} = i_{\text{Т1}} R_1' + i_{\text{Н2}} R_1. \quad (4.13)$$

Из (4.9) и (4.11) имеем:

$$\begin{cases} i_{\text{Т2}} = I_{\text{ТТ}} - i_{\text{Т1}}; \\ i_{\text{Н1}} = I_{\text{ТН}} - i_{\text{Н2}}; \end{cases}$$

и подставляем соответственно в (4.10) и (4.12):

$$\begin{cases} i_{\text{Т1}} R_1 = (I_{\text{ТТ}} - i_{\text{Т1}})(R_2' + R_{2-2} + R_3); & (4.14) \\ (I_{\text{ТН}} - i_{\text{Н2}})R_3 = i_{\text{Н2}} (R_2' + R_{2-2} + R_3). & (4.15) \end{cases}$$

Решая (4.14) и (4.15) относительно $i_{\text{Т1}}$ и $i_{\text{Н2}}$, получаем:

$$\begin{cases} i_{\text{Т1}} = I_{\text{ТТ}} \frac{R_2' + R_{2-2} + R_3}{R_1 + R_2' + R_{2-2} + R_3}; & (4.16) \\ i_{\text{Н2}} = I_{\text{ТН}} \frac{R_3}{R_1 + R_2' + R_{2-2} + R_3}, & (4.17) \end{cases}$$

а из (4.13)

$$U_{\text{ос.т}} = i_{\text{Н2}} R_1' + i_{\text{Т1}} R_1 = I_{\text{ТН}} \frac{R_1' R_3}{R_1 + R_2' + R_{2-2} + R_3} + I_{\text{ТТ}} \frac{R_1' (R_2' + R_{2-2} + R_3)}{R_1 + R_2' + R_{2-2} + R_3}.$$

С учетом (4.5)

$$U_{\text{ос.т}} = \frac{1}{k_{\text{ТН}}} U^d \frac{R_1' R_3}{R_1 + R_2' + R_{2-2} + R_3} + \frac{1}{k_{\text{ТТ}}} I^d \frac{R_1' (R_2' + R_{2-2} + R_3)}{R_1 + R_2' + R_{2-2} + R_3}$$

ИЛИ

$$U_d = k_{\text{ТН}} U_{\text{ос.т}} \frac{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3}{R'_1 R_3} - \frac{k_{\text{ТН}}}{k'_{\text{ТТ}}} I_d \frac{(R'_2 + R_{2-2} + R_3)}{R_3}. \quad (4.18)$$

Поскольку в пределах каждой позиции контроллера на установившихся режимах работы передачи $U_{\text{ос.т}} \approx U_{\text{ус.т}} = \text{const}$, зависимость (4.18) в координатах $I_d \ 0 U_d$ представляет собой наклонную прямую. Угол наклона селективной характеристики на участке ограничения тока определяется как

$$\alpha_{\text{Т}} = \frac{dU_d}{dI_d} = -\frac{k_{\text{ТН}}}{k'_{\text{ТТ}}} \left(1 + \frac{R'_2 + R_{2-2}}{R_3} \right). \quad (4.19)$$

Из (4.19) следует, что для изменения наклона участка ограничения тока селективной характеристики необходимо регулировать значения резисторов R'_2 , R_{2-2} и R_3 : повышение R'_2 , R_{2-2} увеличивает $|\alpha_{\text{Т}}|$, а повышение R_3 уменьшает $|\alpha_{\text{Т}}|$. Зависимости (4.19) соответствует прямая ГБ селективной характеристики (см. рис. 4.8, б).

При снижении тока генератора, когда падение напряжения на резисторе R'_4 оказывается выше, чем на R'_1 (точка В на рис. 4.8, б), диод Д1 закрывается. Если $U_{\text{ос.м}} > U_{\text{ус.м}}$ и потенциалы в СУ распределяются таким образом, что $\varphi_2 > \varphi_5$, диод Д2 открывается и запирает диод Д3 (рис. 4.9). Начинает работать канал ограничения мощности генератора.

На этом режиме равновесие в ПОС будет представлено уравнениями (4.9)—(4.12) (поскольку по-прежнему $\varphi_a > \varphi_6$, диод Д4 — закрыт, а диод Д5 — открыт). Сигнал обратной связи по мощности будет сниматься с точки 2 сопротивления R_2 :

$$U_{\text{ос.м}} = R_{2-2} (i_{\text{Т2}} - i_{\text{Н2}}) + R_3 (i_{\text{Т2}} + i_{\text{Н1}}). \quad (4.20)$$

Решением уравнений (4.9)—(4.12) являются зависимости (4.16) и (4.17). Учитывая, что $I_{\text{ТТ}} = i_{\text{Т1}} + i_{\text{Т2}}$ и $I_{\text{ТН}} = i_{\text{Н1}} + i_{\text{Н2}}$ получим:

$$\begin{cases} i_{T2} = I_{TT} - i_{T1} = I_{TT} \frac{R_1}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3}; \\ i_{H2} = I_{TH} \frac{R_3}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3}; \\ i_{H1} = I_{TH} - i_{H2} = I_{TH} \frac{R'_2 + R_{2-2} + R_1}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3}. \end{cases}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} U_{\text{ос.м}} &= R_{2-2} \left(I_{TT} \frac{R_1}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} - I_{TH} \frac{R_3}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} \right) + \\ &+ R_3 \left(I_{TT} \frac{R_1}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} + I_{TH} \frac{R'_2 + R_{2-2} + R_1}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} \right) = \\ &= I_{TH} \frac{R_3 (R'_2 + R_1)}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} + I_{TT} \frac{R_1 (R_{2-2} + R_3)}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} = \\ &= \frac{U_d}{k_{TH}} \frac{R_3 (R'_2 + R_1)}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3} + \frac{I_d}{k_{TT}} \frac{R_1 (R_{2-2} + R_3)}{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Из (4.21) получаем уравнение линии M_2-B :

$$U_d = k_{TH} U_{\text{ос.м}} \frac{R_1 + R'_2 + R_{2-2} + R_3}{R_3 (R'_2 + R_1)} - \frac{k_{TH}}{k'_{TT}} I_d \frac{R_1 (R_{2-2} + R_3)}{R_3 (R'_2 + R_1)} \quad (4.22)$$

и выражение для угла ее наклона к оси $0I_d$

$$\alpha_{M2} = - \frac{k_{TH}}{k_{TT}} \frac{R_1 (R_{2-2} + R_3)}{R_3 (R'_2 + R_1)}. \quad (4.23)$$

Регулируя значения резисторов R_1 , R'_2 , R_{2-2} и R_3 изменяют угол наклона прямой $2-M_2$ к оси $0I_d$.

При дальнейшем снижении I_d наступит момент, когда $\varphi_2 - \varphi_3 < (U_{д5})_0$, где $(U_{д5})_0$ — пороговое напряжение на диоде Д5 (см. рис. 4.9). При таком распределении потенциалов в ПОС $\varphi_a \approx \varphi_b$ и диоды Д4 и Д5 будут закрыты. Запишем уравнения Кирхгофа для ПОС с закрытыми диодами Д4 и Д5 и выразим напряжение обратной связи в канале регулирования мощности:

$$\begin{cases} I_{\text{тТ}} = i_{\text{т1}} + i_{\text{т2}}; \\ i_{\text{т1}} R_1 = i_{\text{т2}} (R_2 + R_3); \\ I_{\text{тН}} = i_{\text{н1}} + i_{\text{н2}}; \\ i_{\text{н1}} R_3 = i_{\text{н2}} (R_2 + R_3); \end{cases} \quad (4.24)$$

$$U_{\text{ос м}} = (i_{\text{т2}} - i_{\text{н2}}) R_2'' + (i_{\text{н1}} + i_{\text{т2}}) R_3. \quad (4.25)$$

Решим (4.24) относительно $i_{\text{т2}}$ и $i_{\text{н1}}$

$$\begin{cases} i_{\text{т2}} = I_{\text{тТ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}; \end{cases} \quad (4.26)$$

$$\begin{cases} i_{\text{н1}} = I_{\text{тН}} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3}. \end{cases} \quad (4.27)$$

Поскольку $I_{\text{тН}} = i_{\text{н1}} + i_{\text{н2}}$ с учетом (4.27) получим

$$i_{\text{н2}} = I_{\text{тН}} \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (4.28)$$

Подставляя (4.26)—(4.28) в (4.25) получим аналитическую зависимость для линии М₁—М₂ участка ограничения мощности селективной характеристики генератора (рис. 4.8, б):

$$\begin{aligned} U_{\text{ос м}} = & \left(I_{\text{тТ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} - I_{\text{тН}} \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \right) R_2'' + \\ & + \left(I_{\text{тН}} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} + I_{\text{тТ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \right) R_3 = I_{\text{тТ}} \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + I_{\text{TH}} \left(\frac{R_3 (R_1 + R_2 - R_2'')}{R_1 + R_2 + R_3} \right) = \\
& = I_{\text{TT}} \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} + I_{\text{TH}} \frac{R_3 (R_1 + R_2')}{R_1 + R_2 + R_3}
\end{aligned}$$

или

$$U_d = k_{\text{TH}} U_{\text{ос м}} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3 (R_1 + R_2')} - \frac{k_{\text{TH}}}{k'_{\text{TT}}} I_d \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_3 (R_1 + R_2')}. \quad (4.29)$$

Угол наклона селективной характеристики на линии $M_1 - M_2$:

$$\alpha_{\text{м}} = - \frac{k_{\text{TH}}}{k'_{\text{TT}}} \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_3 (R_1 + R_2')}. \quad (4.30)$$

Регулируя значения резисторов R_1 , R_2' , R_2'' и R_3 изменяют угол наклона прямой $M_1 - M_2$ к оси $0I_d$.

На участке ограничения мощности тягового генератора, когда ток в сопротивлении R_2 меняет свое направление (при дальнейшем снижении I_d) $\varphi_a < \varphi_6$ диод Д4 открывается, а диод Д5 остается закрытым (см. рис. 4.9). Равновесие в ПОС и напряжение обратной связи в канале регулирования мощности будут представлены уравнениями:

$$\begin{cases} I_{\text{TT}} = i_{\text{T1}} + i_{\text{T2}}; \\ i_{\text{T1}} R_1 = i_{\text{T2}} (R_{2-1} + R_2'' + R_3); \\ I_{\text{TH}} = i_{\text{H1}} + i_{\text{H2}}; \\ i_{\text{H1}} R_3 = i_{\text{H2}} (R_{2-1} + R_2'' + R_3); \end{cases} \quad (4.31)$$

$$U_{\text{ос м}} = (i_{\text{T2}} - i_{\text{H2}}) R_2'' + (i_{\text{H1}} + i_{\text{T2}}) R_3.$$

После аналогичных преобразований получим:

$$U_{\text{ос м}} = \frac{U_d}{k_{\text{TH}}} \frac{R_3 (R_{2-1} + R_1)}{R_1 + R_{2-1} + R_2'' + R_3} + \frac{I_d}{k_{\text{TT}}} \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_1 + R_{2-1} + R_2'' + R_3}.$$

Уравнение линии Б— M_1 селективной характеристики (рис. 4.8, б)

$$U_d = k_{\text{TH}} U_{\text{ос.м}} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3 (R_2' + R_1)} - \frac{k_{\text{TH}}}{k'_{\text{TT}}} I_d \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_3 (R_2' + R_1)}. \quad (4.32)$$

и угол наклона селективной характеристики на участке ограничения мощности

$$\alpha_{M1} = - \frac{k_{\text{TH}}}{k'_{\text{TT}}} \frac{R_1 (R_2'' + R_3)}{R_3 (R_{2-1} + R_1)}. \quad (4.33)$$

Когда $U_{\text{ос.м}} < U_{\text{ус.м}}$, канал регулирования мощности закрывается. Если падение напряжения на R_3 становится больше, чем на R_6' , отпирается диод Д3 и начинает работать канал ограничения напряжения СУ (см. рис. 4.9). На этом режиме $\varphi_a \ll \varphi_6$, диод Д4 открыт, а диод Д5 закрыт. Уравнения равновесия СУ и напряжения обратной связи по напряжению генератора на этом режиме принимают вид:

$$\begin{cases} I_{\text{TH}} = i_{\text{H1}} + i_{\text{H2}}; \\ i_{\text{H1}} R_3 = i_{\text{H2}} (R_2' + R_{2-1} + R_1); \\ I_{\text{TT}} = i_{\text{T1}} + i_{\text{T2}}; \\ i_{\text{T1}} R_3 = i_{\text{T2}} (R_{2-1} + R_2' + R_3); \\ U_{\text{ос.н}} = i_{\text{H1}} R_3 + i_{\text{T2}} R_3. \end{cases} \quad (4.34)$$

Решение системы (4.34) позволяет получить:

$$U_{\text{ос.н}} = I_{\text{TH}} \frac{R_3 (R_2'' + R_{2-1} + R_1)}{R_1 + R_2'' + R_{2-1} + R_3} + I_{\text{TT}} \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2'' + R_{2-1} + R_3}.$$

Уравнение прямой АБ селективной характеристики (см. рис. 4.8, б):

$$U_d = k_{\text{TH}} U_{\text{ос.н}} \frac{R_1 + R_2'' + R_{2-1} + R_3}{R_3 (R_2'' + R_{2-1} + R_1)} - \frac{k_{\text{TH}}}{k'_{\text{TT}}} I_d \frac{1}{\left(\frac{R_2'' + R_{2-1} + 1}{R_1} \right)}, \quad (4.35)$$

а угол наклона линии АБ к оси $0I_d$:

$$\alpha_H = -\frac{k_{\text{ГН}}}{k_{\text{ГТ}}} \frac{1}{\left(\frac{R_2'' + R_{2-1} + 1}{R_1} \right)}. \quad (4.36)$$

Таким образом, зависимости (4.18), (4.22), (4.29), (4.32) и (4.35) полностью определяют положение селективной характеристики на плоскости $I_d 0U_d$, а выражения (4.19), (4.23), (4.30), (4.33) и (4.36) позволяют рассчитать значения сопротивлений ПОС, при которых каждый участок селективной характеристики будет составлять требуемый угол с осью $0I_d$.

Зависимости (4.18), (4.22), (4.29), (4.32) и (4.35) позволяют решить и обратную задачу: при заданной селективной характеристике определить параметры настройки СУ, поскольку все его плечи являются потенциометрами и допускают требуемую регулировку. Так, например, ПОС СУ тепловоза ТЭ140 имеет следующие параметры настройки селективной характеристики: $R_1 = 10,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 150,0 \text{ Ом}$, $R_3 = 20,4 \text{ Ом}$, $R_2' = 78,0 \text{ Ом}$, $R_2'' = 72,0 \text{ Ом}$, $R_{2-1} = 36,0 \text{ Ом}$ и $R_{2-2} = 39,0 \text{ Ом}$. В общем случае при достаточно больших отношениях R_2/R_1 и R_2/R_3 (обычно не менее четырех) удастся добиться приближения прямой АБ к горизонтальной, ВГ — к вертикальной линиям [4]. Значение угла α_M , как было показано выше, определяется положением вывода, с которого снимается сигнал $U_{\text{ос.м}}$. Очевидно, что смещение вывода к точке *a* ПОС увеличивает составляющую сигнала, пропорционального току I_d , а значит, и величину наклона участка селективной характеристики. Смещение же вывода к точке *b* приводит к уменьшению ее наклона. Поскольку сигнал $U_{\text{ос.м}}$ снимается поочередно с выводов 1, 2, 3 плеча R_2 (см. рис. 4.9), участок ограничения мощности генератора представляет собой ломаную из трех отрезков.

4.3.3. Цепи уставок селективного узла и их влияние на селективную характеристику генератора

При изменении позиции контроллера пропорционально изменяется напряжение на выходе блока БЗВ (см. рис. 4.6). Соответственно пропорционально $n_{\text{диз}}$ изменяются напряжения на резисторах

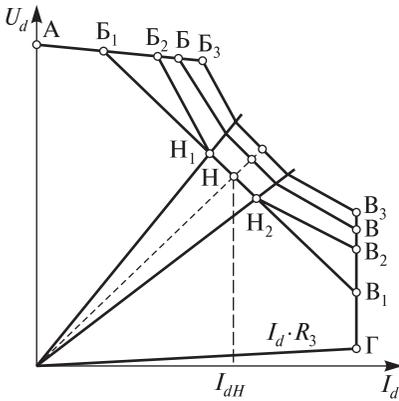


Рис. 4.10. Изменение положения селективной характеристики при изменении значений уставок

ности генератора) будет выражаться тождеством

$$U_{\text{ус.м}} = U_{\text{ос.м}} = I_{\text{тТ}} R_1 = I_{\text{тН}} R_3.$$

С учетом (4.5) и (4.6) получим

$$U_{\text{ус.м}} = \frac{I_d}{k'_{\text{тТ}}} R_1 = \frac{U_d}{k_{\text{тН}}} R_3,$$

откуда

$$U_d = \frac{k_{\text{тН}} U_{\text{ус.м}}}{R_3} \quad \text{и} \quad I_d = \frac{k'_{\text{тТ}} U_{\text{ус.м}}}{R_1}. \quad (4.37)$$

Таким образом, селективная мощность генератора:

$$P_d = U_d I_d = \frac{k_{\text{тН}} k'_{\text{тТ}} U_{\text{ус.м}}^2}{R_1 R_3},$$

т.е. на участке ограничения мощности генератора она будет меняться пропорционально $U_{\text{ус.м}}^2$ или $n_{\text{диз}}^2$.

Мощность дизеля по позициям контроллера не соответствует квадратичной зависимости от $n_{\text{диз}}$ (см. рис. 4.3). Чтобы прибли-

установок СУ. Из выражений (4.18), (4.22), (4.29), (4.32) и (4.35) следует, что все участки селективной характеристики будут смещаться параллельно самим себе, так как $\alpha_{\text{т}}$, $\alpha_{\text{м}}$ и $\alpha_{\text{н}}$ не зависят от значений $U_{\text{ост}}$, $U_{\text{осм}}$ и $U_{\text{осн}}$ (рис. 4.10). Определим, как будет меняться по позициям контроллера селективная мощность генератора, если $U_{\text{ус.м}} \sim n_{\text{диз}}$. Рассмотрим режим работы СУ, когда в ПОС $\varphi_a \approx \varphi_{\text{б}}$, т.е. ток в плече R_2 $i_{\text{т2}} - i_{\text{н2}} = 0$. Тогда сигнал обратной связи по мощности генератора (а соответственно и сигнал уставки по мощ-

зять характеристику тягового генератора к характеристике дизеля в канале ограничения мощности используется резистор R_5 с изменяющимся значением сопротивления (см. рис. 4.6, 4.11, а).

Уставка по мощности в СУ снимается с резистора R'_5 . Пока стабилитрон СТ2 заперт, зависимость уставки $U'_{ус.м} = f(n_{диз})$ изменяется по линии 1 (см. рис. 4.11, а). При $n_{диз} \approx 520$ об/мин напряжение на выходе БЗВ достигает такого значения, что стабилитрон СТ2 пробивается и шунтирует часть резистора R_5 . Ток в цепи резистора R_5 возрастает, увеличивая падение напряжения на R'_5 и угол наклона характеристики а

$U'_{ус.м} = f(n_{диз})$ — линия 2. В результате зависимость $U'_{ус.м} = f(n_{диз})$ представляет собой ломаную линию. Координату точки излома и наклоны линейных участков характеристики можно менять, регулируя значение R'_5 ; это позволяет получить зависимость $U'_{ус.м} = f(n_{диз})$, обеспечивающую работу дизеля без перегрузки на всех режимах ограничения мощности.

Другие ограничения селективной характеристики — напряжения и тока тягового генератора — в соответствии с (4.37) меняются пропорционально первой степени напряжений уставок. Уставка канала ограничения напряжения генератора снимается непосредственно с сопротивления R'_6 , включенного на напряжение БЗВ. Поэтому

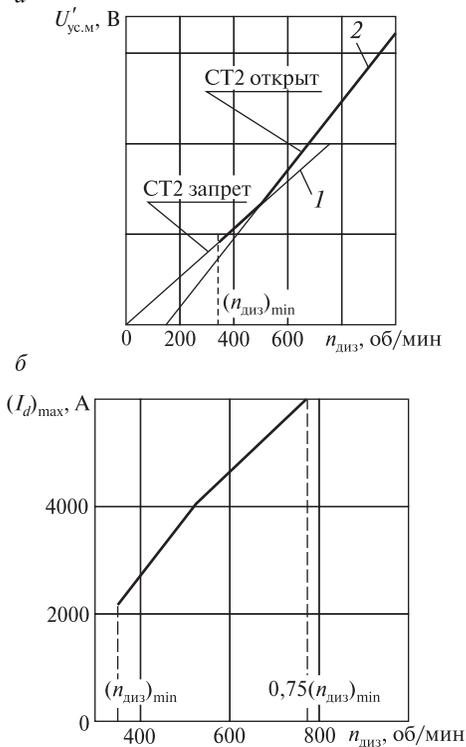


Рис. 4.11. Напряжение уставки СУ в канале ограничения мощности (а) и ограничение значений тока генератора (б) в зависимости от частоты вращения вала дизеля тепловоза 2ТЭ116

напряжение уставки канала ограничения напряжения представляет прямую линию, выходящую из начала координат $U_{ус.н} = k n_{диз}$.

Уставка канала ограничения тока генератора $U_{ус.т}$ снимается с сопротивления R'_4 , которое также включено на выходное напряжение БЗВ. Параллельно R'_4 включен стабилитрон СТ1 (см. рис. 4.6). На низких позициях контроллера падение напряжения на R'_4 недостаточно для пробоя стабилитрона СТ1 и величина уставки меняется пропорционально частоте вращения коленчатого вала $U_{ус.т} = k n_{диз}$ (рис. 4.11, б). При $n_{диз} \geq (0,75 - 0,8)(n_{диз}^{пот})$ напряжение на выходе БЗВ возрастает настолько, что стабилитрон СТ1 пробивается и значение $U_{ус.т}$ остается постоянным и равным напряжению стабилизации стабилитрона.

Значения напряжения на выходе блока БЗВ пассажирского тепловоза ТЭП70 и уставок по напряжению, мощности и току генератора его СУ приведены на рис. 4.12.

На рис. 4.13 приведены характеристики тяговых генераторов тепловозов ТЭП70 и 2ТЭ116 при работе автоматической системы регулирования напряжения, которые иногда называют также *внешними*. Системой регулирования напряжения тягового генератора тепло-

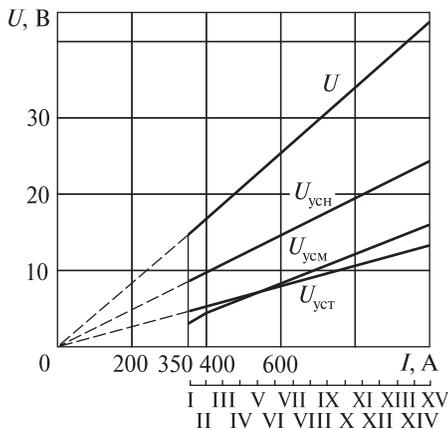


Рис. 4.12. Значения напряжения на выходе блока БЗВ, уставок по току ($U_{ус.т}$), мощности ($U_{ус.м}$) и напряжения ($U_{ус.н}$) по позициям дизеля (I—XV) тепловоза ТЭП70

воза 2ТЭ116 предусмотрено, что с первой по пятую позиции дизеля якорь ИД остается неподвижным и $U_{кор} = \min$. Поэтому работа генератора на этих позициях происходит по характеристикам, близким к селективным.

При работе селективного узла образуются ошибки регулирования напряжения. Первая из них — статическая — обусловлена параметрами и режимом работы СУ; вторая — погрешность переключения — обусловлена режимом вытеснения тока управления I_y из одного канала в другой. Подробно расчет ошибок ре-

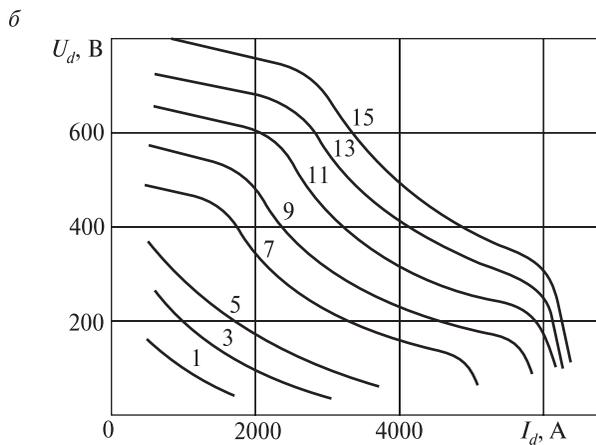
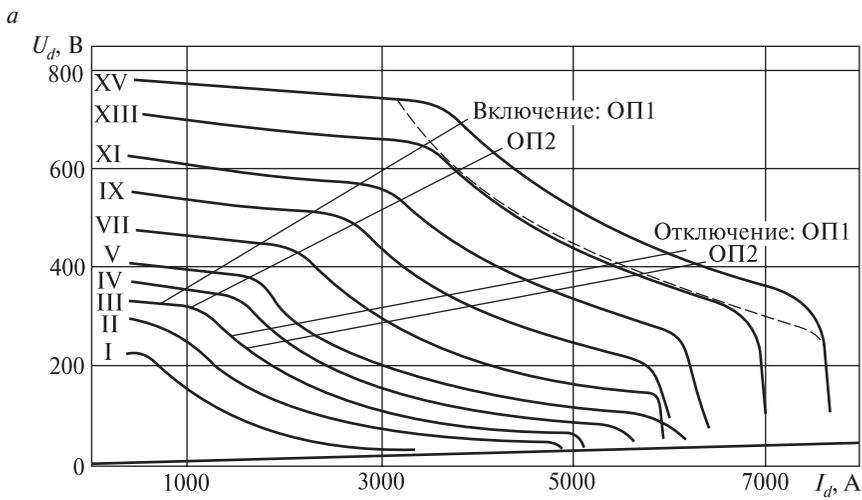


Рис. 4.13. Характеристики тяговых генераторов тепловоза ТЭП70 (*a*) и тепловоза 2ТЭ116 (*б*) при работе автоматической системы регулирования напряжения при различных позициях дизеля

гулирования напряжения генератора приведен в [4]. Здесь лишь отметим, что статическая ошибка любого канала регулирования пропорциональна квадратному корню из отношения мощностей всей цепи управления и цепи обратной связи канала.

4.4. Блок управления возбуждением

Блок управления возбуждением БУВ предназначен для генерирования управляющих импульсов и регулирования момента их подачи на тиристоры управляемого выпрямителя возбуждения генератора УВВ (см. рис. 4.4, *a*). Принципиальная схема блока БУВ приведена на рис. 4.14 [4, 22].

В блоке управления можно выделить четыре основных узла: преобразователь напряжения П, магнитный усилитель с внутренней обратной связью МУ, распределительная цепь и два выходных блокинг-генератора БГ1 и БГ2. Выходными каналами БУВ являются цепи, по которым управляющие импульсы подаются на тиристоры УВВ (см. рис. 4.4).

Преобразователь напряжения П преобразует постоянное напряжение в переменное прямоугольной формы. Его основным элементом является блокинг-генератор, выполненный на двух транзисторах и трансформаторе Тр. Преобразователь П имеет два входных канала:

- канал постоянного тока, включенный через контакт контактора возбуждения возбудителя ВВ (на схеме не показан) на источник постоянного напряжения 110 В; стабилитроны в блоке П предназначены для получения стабилизированного напряжения на входе при колебаниях напряжения стартер-генератора;

- канал синхронизации, включенный через резистор и распределительный трансформатор Тр на напряжение синхронного возбудителя СВ; посредством этой цепи управляющие импульсы тиристоров блока УВВ оказываются синхронизированы по частоте и фазе с напряжением возбудителя.

Рассмотрим работу преобразователя напряжения. При положительной полуволне напряжения (например, «плюс» на клемме *c*) ток от клеммы *c* протекает по цепи: диод D_4 , переход эмиттер—база транзистора T_3 , резистор R_1 , клемма *d* (рис. 4.14). Ток эмиттер—база открывает транзистор T_3 и от источника постоянного напряжения начинает протекать ток: «плюс» (клемма *f*), переход эмиттер—коллектор T_3 , обмотка *b* трансформатора Тр, «минус» (клемма *e*). При этом в остальных обмотках Тр наводятся ЭДС одинаковой полярности (в данном случае — положительной). ЭДС обмотки 7 увеличивает ток перехода эмиттер—база транзистора T_3 , что ускоряет

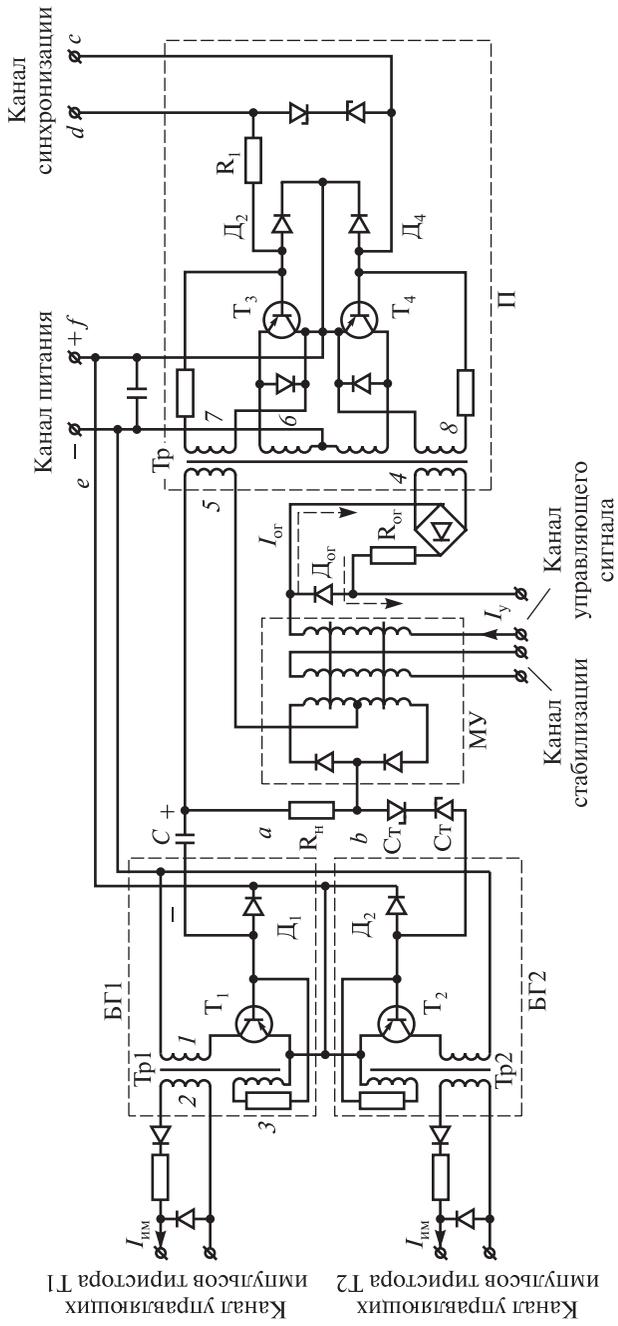


Рис. 4.14. Принципиальная схема блока управления возбуждением

ет процесс его открытия и обеспечивает создание крутого переднего фронта напряжения на вторичных обмотках трансформатора Тр. В отрицательный полупериод напряжения синхронного возбудителя аналогичные процессы протекают в цепи транзистора Т₄.

В результате на выходе преобразователя формируется напряжение прямоугольной формы u_{Π} (рис. 4.15), синхронизированное с напряжением возбудителя u_{\sim} . Фаза переднего фронта напряжения γ_1 преобразователя u_{Π} относительно напряжения источника u_{\sim} и угол γ_2 обусловлены наличием коммутационных процессов в вентильях УВВ (см. п. 4.5).

Магнитный усилитель (модулятор) БУВ работает как фазосдвигающее устройство (пп. 1.2.5). Он регулирует фазу подачи управляющих импульсов на тиристоры блока УВВ. Его рабочая обмотка получает питание от преобразователя П и включена на нагрузку R_{Π} . Магнитный усилитель имеет три обмотки управления:

- обмотка тока управления I_y , поступающего от СУ, — изменяет фазу (угол) подачи управляющих импульсов на тиристоры блока УВВ в *тяговом режиме*;

- обмотка стабилизации — предназначена для предотвращения незатухающих колебаний в работе системы регулирования напряжения генератора;

- обмотка тока управления I_{yT} (на схеме не показана), поступающего от СУ, — изменяет фазу (угол) подачи управляющих импульсов на тиристоры блока УВВ в *тормозном режиме*.

В каждый полупериод напряжение на нагрузочном резисторе R_{Π} возрастает скачком после того, как намагничивающий ток обеспечивает насыщение соответствующего сердечника МУ и значение индуктивного сопротивления рабочей обмотки станет ничтожно малым (см. пп. 1.2.5). Тогда практически все напряжение обмотки 5 трансформатора Тр будет приложено к резистору R_{Π} . Как следует из принципа работы МУ, фаза насыщения Тр и появление полного напряжения на R_{Π} зависит от значения I_y . Изменение значения I_y вызывает перемещение переднего фронта напряжения $u_{\text{МУ}}$ и изменение угла α' (см. рис. 4.15). Поскольку по каналу управления возбуждением тягового генератора реализуется отрицательная обратная связь, то увеличение значения I_y приводит к увеличению угла α' (намагничивание сердечника уменьшается), а уменьшение значения I_y — к уменьшению угла α' (намагничивание сердечника

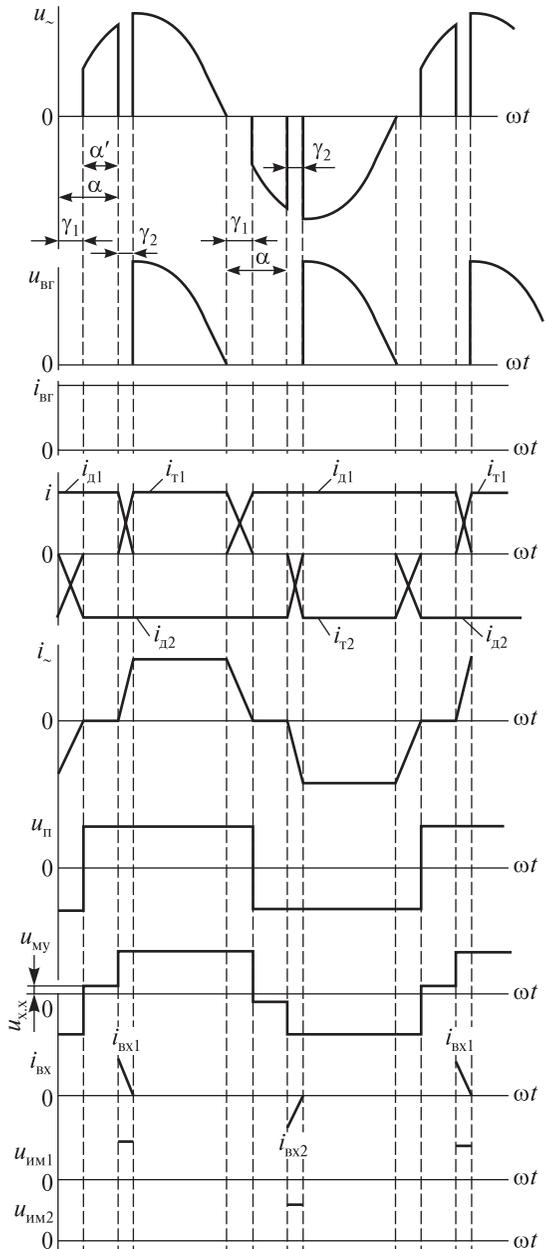


Рис. 4.15. К работе блоков БУВ:

u_{\sim} , i_{\sim} — напряжение и ток в обмотке якоря возбудителя; $u_{п}$ — напряжение на выходе преобразователя П; $u_{му}$ — напряжение на выходе МУ; $u_{им1}$, $u_{им2}$ — напряжение управляющих импульсов на выходе БГ1 и БГ2; $i_{д1}$, $i_{д2}$, $u_{вг}$, $i_{вг}$ — напряжение и ток обмотки возбуждения тягового генератора; $i_{т1}$, $i_{т2}$ — токи вентиля управляемого выпрямителя возбуждения; $i_{вх}$ — импульсы тока через нагрузку МУ; ω — частота напряжения возбудителя

увеличивается). На интервале α' , когда через R_H протекает небольшой ток i_{xx} , значения u_{xx} недостаточно, чтобы запускать блокинг-генераторы БГ1 и БГ2.

Для управления блокинг-генераторами предназначена распределительная цепь, состоящая из конденсатора C , двух стабилитронов $Ст$ и диодов D_1 и D_2 . Источником питания распределительной цепи является напряжение на резисторе R_H .

Блокинг-генераторы БГ1 и БГ2 вырабатывают управляющие импульсы для тиристоров блока УВВ (см. рис. 4.17). Каждый блокинг-генератор состоит из транзистора T_1 (или T_2), трансформатора $Tr1$ (или $Tr2$) и диодов D_1 и D_2 . Блокинг-генераторы работают в ждущем режиме, т.е. при отсутствии входного сигнала напряжение на вторичных обмотках трансформаторов $Tr1$ (или $Tr2$) отсутствует.

Рассмотрим работу одного блокинг-генератора, например БГ1. Под действием напряжения на обмотке 5 трансформатора Tr конденсатор C распределительной цепи зарядился, как показано на рис. 4.14. Тогда в следующий полупериод спустя угол α' напряжение обмотки 5 приложится к резистору R_H таким образом, что точка $в$ окажется под положительным потенциалом, а точка $а$ — под отрицательным (на протяжении угла α' напряжение обмотки 5 будет приложено к рабочей обмотке МУ, насыщая его сердечник, а в момент насыщения сердечника напряжение скачком приложится к резистору R_H , формируя передний фронт напряжения $u_{му}$ (см. рис. 4.15). Под действием изменяющегося напряжения $u_{му}$ через резистор R_H будет протекать ток $i_{вх1}$ по цепи: точка $в$, стабилитроны $Ст$, диод D_2 , переход эмиттер—база транзистора T_1 , конденсатор C , точка $а$ резистора R_H (см. рис. 4.14). При этом конденсатор C перезаряжается, а транзистор T_1 открывается, создавая цепь: клемма f , эмиттер—коллекторный переход T_1 , обмотка 1 трансформатора $Tr1$, клемма $е$. ЭДС, наводимая в обмотке 3 трансформатора $Tr1$, увеличивает ток базы транзистора T_1 . Это ускоряет открытие T_1 и создает крутой передний фронт импульса напряжения $u_{им}$ на обмотке 2 трансформатора $Tr1$. Длительность импульса напряжения $u_{им}$ определяется временем насыщения трансформатора $Tr1$, после чего происходит резкое уменьшение ЭДС в обмотках $Tr1$ и транзистор T_1 запирается. Амплитудное значение импульса $u_{им} = 7 \text{ В} \pm 10 \%$ при $R_H = 20 \text{ Ом}$; его длительность — $300 \text{ мкс} \pm 30 \%$.

Таким образом, каждый блокинг-генератор создает управляющий импульс напряжения в соответствующий полупериод напряжения синхронного возбудителя. Момент генерации импульса совпадает с моментом формирования на R_H переднего фронта напряжения $u_{МУ}$. Фаза α' переднего фронта напряжения $u_{МУ}$ определится значением тока управления I_y . Результирующая фаза α управляющих импульсов $u_{ИМ}$, которая отсчитывается от начала полупериода напряжения возбудителя u_{\sim} , представляет сумму углов γ_1 и α' .

Включенные последовательно с конденсатором C два стабилитрона $Ст$ создают порог чувствительности, необходимый для предотвращения ложного пуска блокинг-генераторов от напряжения $u_{ХХ}$, обусловленного током холостого хода МУ и от импульсов разрядного тока конденсатора C .

Характеристика БУВ — зависимость угла $\alpha' = f(I_y)$ — приведена на рис. 4.16. В работе используется лишь часть характеристики в пределах изменения тока управления от нуля до значения $I_{y \max}$, соответствующего перегибу характеристики. При изменении тока управления $0 \leq I_y \leq I_{y \max}$ происходит постепенное закрытие тиристор УВВ. Значению тока $I_{y \max}$ соответствует закрытое состояние тиристор УВВ ($\alpha = \pi$). Работа блока при токах, больших $I_{y \max}$, недопустима, так как из-за перегиба характеристики $\alpha' = f(I_y)$ обратная связь канала регулирования напряжения из отрицательной становится положительной (ток возбуждения генератора будет возрастать при увеличении тока управления) и возникает заброс напряжения и тока генератора. Для предотвращения этого в цепи обмотки управления МУ предусмотрено ограничительное устройство в виде диода $D_{ог}$ и вторичной обмотки трансформатора Tr (см. рис. 4.14). Под действием ЭДС, наведенной в обмотке δ , через выпрямительный мост и диод $D_{ог}$ протекает прямой ограничительный ток $I_{ог}$. Значение $I_{ог}$ выбирается равным по величине допустимому значению тока управления $I_{ог} = I_{y \max}$. Если $I_y < I_{ог}$, то диод $D_{ог}$ открыт и по обмотке управления МУ протекает ток управления,

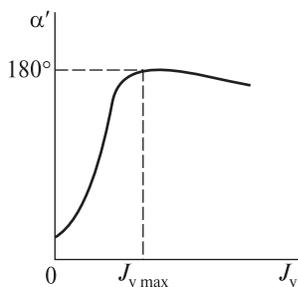


Рис. 4.16. Характеристика блока управления возбуждением

регулируя фазу импульса $u_{\text{им}}$. При $I_y \geq I_{\text{ог}}$ диод $D_{\text{ог}}$ закрывается и ток управления протекает по обходной цепи через резистор $R_{\text{ог}}$, где он ограничивается благодаря большому сопротивлению $R_{\text{ог}}$.

Поскольку блок БУВ содержит полупроводниковые элементы, которые ненадежны при перегрузках, часто возникающих в электрических цепях тепловозов, в высоковольтной камере устанавливаются два блока БУВ, один из которых является резервным. Конструктивно они выполнены в одном аппарате типа БА-520. Резервный блок вводится в работу переключением штепсельного разъема на аппарате БА-520.

4.5. Силовая система управления возбуждением генератора

4.5.1. Управляемый выпрямитель возбуждения

Выпрямитель выполнен по несимметричной мостовой схеме; в два его плеча включены тиристоры Т1 и Т2, а в два другие — диоды Д1 и Д2 (см. рис. 4.17) [4]. Кроме тиристоров в те же плечи моста включены диоды Д3 и Д4; они предназначены для работы моста в режиме аварийного возбуждения тягового генератора, когда по какой-либо причине не могут открываться тиристоры Т1 и Т2. Чаще всего аварийный режим возбуждения возникает по причине неисправности блока БУВ, поэтому он всегда дублируется. При исправной системе регулирования возбуждения генератора диоды Д3 и Д4 влияния на работу блока УВВ не оказывают. Параллельно диодам и тиристорам включены RC-цепи, которые уменьшают скорость нарастания прямого напряжения на тиристорах и устраняют коммутационные перенапряжения на них, повышая надежность работы блока. Защита блока УВВ в режимах короткого замыкания, в том числе и при пробое вентилей, осуществляется плавкими предохранителями.

Рассмотрим работу блока УВВ (рис. 4.18). При этом следует учесть индуктивность обмотки якоря возбудителя, так как в машинах переменного тока она оказывает значительное влияние на процессы, протекающие в контуре. Будем также считать, что ток возбуждения генератора $i_{\text{вг}}$ на выходе УВВ полностью сглажен благодаря индуктивности обмотки возбуждения генератора.

Пусть к моменту перехода через нуль ЭДС возбудителя $e_{\text{в}}$ ток в обмотку возбуждения генератора Г протекал через тиристор Т2

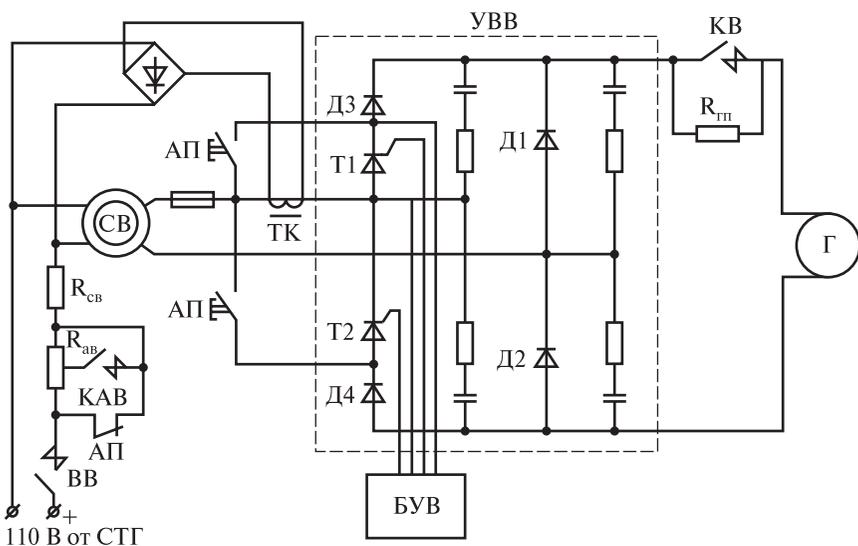


Рис. 4.17. Силовая схема возбуждения генератора:

В — возбудитель; Г — обмотка возбуждения генератора; УВВ — управляемый выпрямитель возбуждения; БУВ — блок управления возбуждением; ТК — трансформатор коррекции; КВ — контактор возбуждения генератора; ВВ — контактор возбуждения возбудителя; АП — аварийный переключатель; КАВ — контактор аварийного возбуждения генератора

и диод Д1; при этом вентили Т1 и Д2 были закрыты. После того как ЭДС возбудителя стала положительной и противоположной направлению тока i_{\sim} , ток i_{\sim} вытесняется из тиристора Т2 в диод Д2 (в цепи тиристора он постепенно уменьшается, а цепи диода — постепенно увеличивается). Из-за большой индуктивности обмотки якоря возбудителя спадание в ее цепи тока происходит не мгновенно, а в течение некоторого интервала γ_1 , который называют первым углом коммутации (см. рис. 4.15, 4.18). На этом интервале оказываются открытыми вентили Т2, Д1 и Д2. В результате обмотка якоря возбудителя будет замкнута накоротко, а напряжение на ее клеммах станет равным нулю. Это создаст провал в кривой u_{\sim} , и напряжение на обмотке возбуждения генератора $u_{вр}$ также будет равно нулю. ЭДС возбудителя окажется полностью приложенной к индуктивности его обмотки якоря в обратном направлении, вызывая уменьшение тока i_{\sim} . Однако ток в обмотке Г $i_{вр}$ не изменится

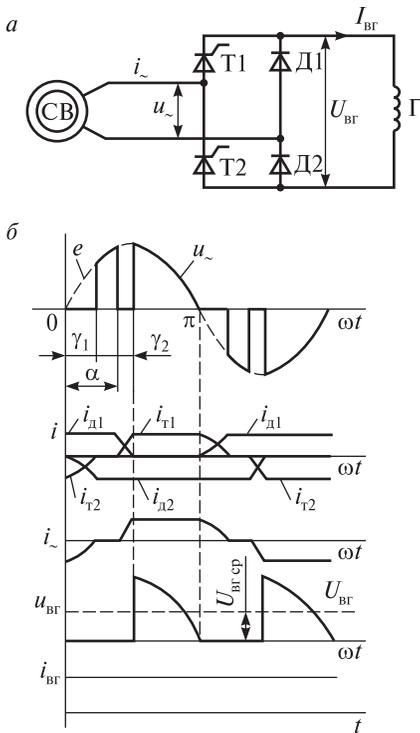


Рис. 4.18. Принципиальная силовая схема возбуждения тягового генератора (а); изменение тока и напряжения в силовой схеме возбуждения генератора (б):

e_{\sim} и u_{\sim} — соответственно ЭДС и напряжение возбудителя; i_{\sim} — ток обмотки якоря возбудителя; i_{T1} , i_{T2} — токи тиристоров Т1 и Т2; i_{D1} , i_{D2} — токи диодов Д1 и Д2; u_{BG} и i_{BG} — соответственно напряжение и ток в Γ ; $U_{BG\text{ ср}}$ — среднее значение напряжения на Γ ; ωt — угловая частота напряжения возбудителя; γ_1 , γ_2 — углы коммутации тиристоров; α — угол управления тиристорами

из-за ее большого индуктивного сопротивления. В конце интервала γ_1 тиристор Т2 закрывается.

Напряжение возбудителя оказывается приложенным к тиристоры Т2 в обратном направлении, а к тиристоры Т1 — в прямом направлении, но цепь между возбудителем и Γ оказывается разомкнутой, так как на тиристор Т1 не подано управление и он заперт. Поэтому на интервале $(\alpha - \gamma_1)$ ток возбудителя $i_{\sim} = 0$, а неизменный ток i_{BG} замыкается в контуре, образованном обмоткой Γ и диодами Д1 и Д2, где он поддерживается за счет энергии, запасенной в обмотке возбуждения. При $i_{\sim} = 0$ напряжение на клеммах возбудителя равно его ЭДС $u_{\sim} = e_{\sim}$.

Когда при угле α на тиристор Т1 подается управляющий импульс, тиристор открывается и начинается процесс вытеснения тока из диода Д1 в цепь тиристора Т1 (ток в цепи диода уменьшается, а в цепи тиристора — увеличивается). Этот процесс происходит в течение интервала γ_2 , который называется вторым углом ком-

мутации. На интервале γ_2 вентили Т1, Д1 и Д2 открыты, обмотка якоря возбудителя замкнута накоротко. Под действием ЭДС возбудителя ток i_- увеличивается, а напряжение на клеммах возбудителя опять станет равным нулю. Это создаст еще один провал в кривой u_- и напряжение на обмотке возбуждения генератора $u_{вг}$ снова будет равно нулю.

В результате форма напряжения возбудителя будет иметь характерные коммутационные провалы, площадь которых определяется величиной индуктивности якоря возбудителя и амплитудным значением тока нагрузки. Коммутационные провалы уменьшают напряжение возбудителя.

При снижении тока в диоде Д1 до нуля он закрывается, и ток будет протекать в Г через тиристор Т1 и диод Д2; т.е. в оставшуюся часть полупериода, которую называют интервалом проводимости выпрямителя, к Г будет приложено напряжение возбудителя. В этом интервале ток возбудителя является неизменным по величине $i_- = \text{const}$, и поэтому падение напряжения на индуктивном сопротивлении обмотки якоря возбудителя равно нулю.

В отрицательный полупериод процесс повторится аналогично.

Таким образом, при изменении значения угла коммутации тиристоров α можно менять продолжительность интервала проводимости выпрямителя УВВ, а соответственно в широких пределах регулировать среднее значение тока возбуждения генератора $I_{вг}$. При угле управления $\alpha = \pi$ среднее значение напряжения возбуждения генератора $U_{вг\text{ ср}} = 0$; при $\alpha \rightarrow 0$ напряжение и ток возбуждения генератора будут максимальны.

Из-за большой индуктивности Г даже при аварийном закрытии тиристоров Т1 и Т2 (например, при срабатывании системы защиты) ток $I_{вг}$ будет еще некоторое время протекать по замкнутому контуру, образованному ОВГ и диодами Д1, Д2, уменьшаясь с постоянной времени, величина которой может достигать 1 с. Для более быстрого отключения возбуждения генератора предназначен контактор КВ (см. рис. 4.17). Во избежание перенапряжений при размыкании контактов КВ в цепь Г вводится резистор гашения поля $R_{гп}$. Сопротивление резистора $R_{гп}$ в 5—6 раз превышает сопротивление Г, поэтому ток возбуждения генератора $I_{вг}$ быстро уменьшается.

4.5.2. Регулировочная характеристика тягового генератора тепловоза

Назначение системы регулирования возбуждения тягового генератора — обеспечить требуемую зависимость $I_{\text{вг}} = f(I_{\text{г}})$, которая называется регулировочной характеристикой [2]. Для определения зависимости $I_{\text{вг}} = f(I_{\text{г}})$ проанализируем соответствие

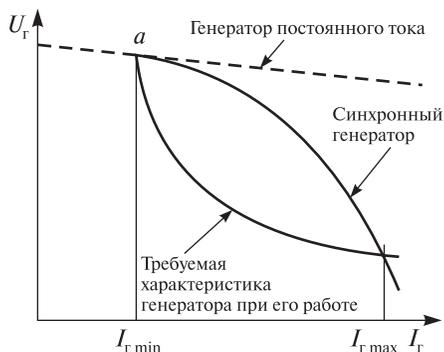


Рис. 4.19. Внешние характеристики генераторов и требуемая характеристика генератора при его работе в передаче тепловоза

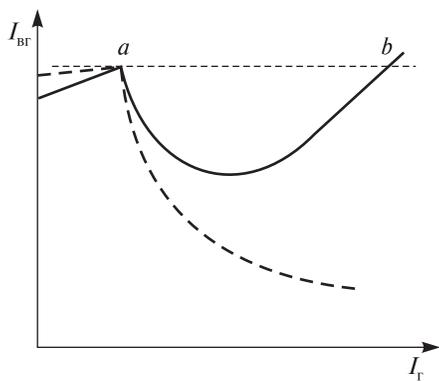


Рис. 4.20. Регулировочные характеристики генераторов постоянного (- - -) и переменного тока (—) при их работе в передаче тепловоза

внешней характеристики генератора требуемой по условию (4.1) (рис. 4.19). Напомним, что согласно ГОСТ 27471—87 «Машины электрические вращающиеся. Термины и определения» *внешней характеристикой генератора* называется зависимость $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{Г}})$ при постоянном значении тока возбуждения $I_{\text{вг}} = \text{const}$.

Для генератора постоянного тока $U_{\text{Г}} \approx c \Phi n_{\text{диз}}$ и для фиксированного значения $n_{\text{диз}}$ уменьшение значения магнитного потока приведет к примерно пропорциональному уменьшению значения $U_{\text{Г}}$. Соответственно форма регулировочной характеристики генератора постоянного тока $I_{\text{вг}} = f(I_{\text{Г}})$ должна повторять гиперболическую зависимость $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{Г}})$ (рис. 4.20). Иными словами, во всем рабочем диапазоне изменения тока генератора $I_{\text{Г min}} < I_{\text{Г}} < I_{\text{Г max}}$ его необходимо размагничивать (уменьшать магнитный поток), а соответственно и ток возбуждения $I_{\text{вг}}$.

Внешняя характеристика синхронного генератора значительно отличается от внешней характеристики генератора постоянного тока (см. рис. 4.19). Из-за сильного размагничивающего действия реакции якоря и большого значения индуктивного сопротивления синхронного генератора его внешняя характеристика в зоне больших токов круто снижается. Для того чтобы из внешней характеристики СГ получить гиперболическую, в зоне низких значений I_T генератор необходимо размагничивать, уменьшая ток возбуждения $I_{вг}$, а затем подмагничивать, увеличивая возбуждение. Очевидно, что в точках *a* и *b*, где пересекаются внешняя и требуемая характеристики СГ, значения $I_{вг}$ должны быть одинаковыми (см. рис. 4.19, 4.20).

Поэтому регулировочная характеристика тепловозного тягового синхронного генератора имеет вогнутый вид, принципиально отличаясь от аналогичной характеристики тягового генератора постоянного тока (рис. 4.21).

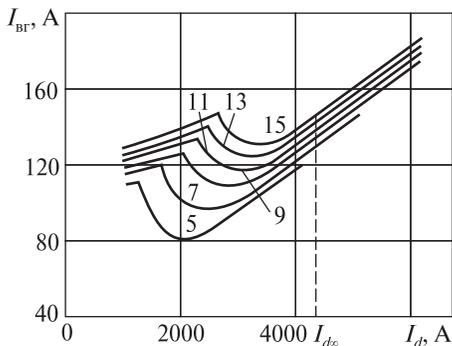


Рис. 4.21. Регулировочные характеристики тягового генератора ГС-501А тепловоза 2ТЭ116 на 5, 7, 9, 11, 13 и 15-й позициях контроллера

4.6. Система гибкой обратной связи

Для устранения колебаний напряжения генератора и повышения устойчивости работы его системы регулирования в ней предусматривается отрицательная гибкая обратная связь (ГОС) (рис. 4.22) [4]. Гибкая обратная связь представляет собой фильтр с резонансной цепочкой (см. п. 1.7), и состоит из нагрузочного резистора R_d , конденсаторов C_d и C_ϕ и обмотки управления МУ блока БУВ, которая в соответствии со своей функцией называется стабилизирующей ОС (см. рис. 4.22, 4.17). На вход ГОС подается напряжение, снимаемое с потенциометра $R_{п}$, включенного на напряжение $u_{вг}$.

Напряжение возбуждения тягового генератора $u_{вг}$ имеет форму пульсаций (см. рис. 4.15, 4.18), поэтому кроме постоянной составляющей оно содержит высокочастотную переменную составляющую

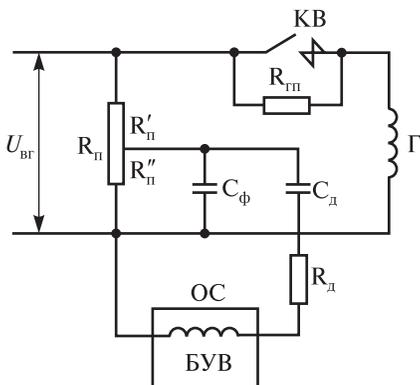


Рис. 4.22. Принципиальная схема гибкой обратной связи

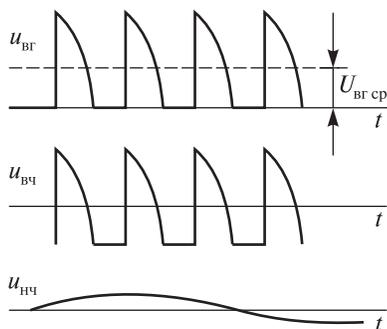


Рис. 4.23. К работе системы гибкой обратной связи:

$u_{ВГ}$ — напряжение возбуждения генератора; $u_{ВЧ}$ — высокочастотная составляющая напряжения $u_{ВГ}$; $u_{НЧ}$ — низкочастотная составляющая напряжения $u_{ВГ}$; t — время

$u_{ВЧ}$ (150—440 Гц) (рис. 4.23). Емкость конденсатора $C_Ф$ выбрана таким образом, что его емкостное сопротивление для высокочастотной составляющей напряжения $u_{ВЧ}$ мало, поэтому эта составляющая напряжения не поступает на вход цепи $R_Д—C_Д$ (см. рис. 4.22).

Если в системе возбуждения генератора возникают периодические колебания, то в напряжении $u_{ВГ}$ появляется низкочастотная составляющая (2—6 Гц) (см. рис. 4.23). Высокочастотная составляющая напряжения $u_{ВГ}$ поглощается (шунтируется) конденсатором $C_Ф$, а низкочастотная составляющая проходит в обмотку ОС магнитного усилителя блока БУВ. Если напряжение $U_{ВГ}$ на выходе блока УВВ увеличивается, то в обмотке стабилизации ОС магнитного усилителя БУВ появляется ток, который препятствует увеличению напряжения $U_{ВГ}$. Аналогично, при уменьшении напряжения $U_{ВГ}$ гибкая обратная связь будет препятствовать его уменьшению. Таким образом, демпфирующее действие обмотки ОС МУ устраняет колебания напряжения и тока возбуждения тягового генератора. В установившемся режиме, когда среднее значение $U_{ВГ}$ не меняется, ток в обмотке ОС равен нулю и обратная связь не влияет на работу системы регулирования напряжения генератора.

4.7. Система аварийного возбуждения тягового генератора

На случай неисправности системы автоматического регулирования предусматривается аварийное возбуждение тягового генератора. Для перехода на аварийное возбуждение генератора необходимо переключатель режима АП установить в положение, соответствующее аварийному возбуждению (см. рис. 4.17). При этом тиристоры Т1 и Т2 выпрямителя УВВ и узел коррекции замыкаются накоротко. Выпрямитель УВВ начинает работать как неуправляемый мост, в плечах которого установлены диоды Д1—Д4. В результате ток возбуждения генератора на каждой позиции дизеля будет определяться напряжением синхронного возбудителя. С уменьшением частоты вращения вала дизеля ток возбуждения $I_{ВГ}$ также уменьшается вследствие уменьшения напряжения возбудителя.

Одновременно размыкающие контакты переключателя АП вводят в цепь возбуждения возбудителя часть резистора аварийного возбуждения $R_{ав}$. Это необходимо, чтобы снизить возбуждение возбудителя; в противном случае из-за невозможности уменьшить ток возбуждения, генератор, работая по своим внешним характеристикам, будет перегружать дизель.

Для плавного трогания тепловоза при работе системы аварийного возбуждения мощность тягового генератора на 1—3-й позициях контроллера уменьшают. Для этого в цепь возбуждения возбудителя вводится еще дополнительная часть резистора $R_{ав}$. На более высоких позициях контроллера эта ступень $R_{ав}$ шунтируется контактами контактора аварийного возбуждения КАВ.

Внешние характеристики генератора тепловоза 2ТЭ116 при аварийном возбуждении представлены на рис. 4.24. Они имеют круто падающий характер и всегда расположены ниже характеристик тягового генератора при работе автоматической системы регу-

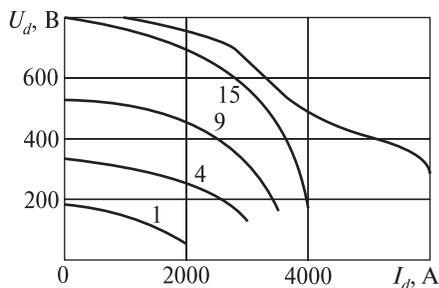


Рис. 4.24. Внешние характеристики генератора тепловоза 2ТЭ116 на 1, 4, 9- и 15-й позициях дизеля (а) и характеристика генератора на 15-й позиции дизеля (б) при работе автоматической системы регулирования напряжения

лирования напряжения. Максимальный ток тягового генератора при аварийном возбуждении достигает значения продолжительного режима.

4.8. Настройка системы регулирования напряжения тягового генератора

Систему автоматического регулирования напряжения тягового генератора настраивают при неподвижном тепловозе [4]. Тяговые двигатели отключают от ВУ, а нагрузка на генератор создается регулируемым реостатом большой мощности (как правило, водяным реостатом). Настройку ведут в такой последовательности.

1. Предварительная регулировка всех резисторов в цепях возбуждения возбuditеля, селективного узла на заданные значения.

2. Проверка работы основных элементов системы регулирования.

Для проверки работы системы «возбудитель—управляемый выпрямитель» при помощи реостата на пульте управления испытательного участка собирается схема ручного управления, позволяющая изменять величину уставок по каналам регулирования СУ. Регулируя реостатом величину тока управления, проверяют работу управляемого выпрямителя во всем диапазоне изменения угла управления тиристорами. Возможные неисправности (частичное или полное отсутствие управляющих импульсов, сбой в работе тиристорov) обнаруживается при контроле формы напряжения возбuditеля с помощью осциллографа.

На 15-й позиции контроллера регулируется напряжение возбuditеля резистором $R_{св}$ (см. рис. 4.17), проверяются значения напряжений распределительных трансформаторов, блока БЗВ, коэффициентов трансформации трансформаторов ТПТ и ТПН, напряжения возбuditеля.

3. Настройка селективной характеристики. Настройку характеристики выполняют при замкнутом резисторе индуктивного датчика $R_{ид} = 0$ по заданному планшету (рис. 4.25). Потенциометром уставки СУ устанавливают необходимую величину напряжения уставки в канале мощности, затем производится регулировка «нуля» потенциометра ПОС селективного узла. Для этого, установив определенное сопротивление нагрузочного реостата, соответствующее линии ОМ планшета, изменением сопротивления R_1 доби-

ваются, чтобы $\varphi_a - \varphi_b = 0$ (см. рис. 4.6). Регулировкой напряжения уставки в канале мощности получают напряжение генератора в пределах поля I планшета. При этом мощность генератора при работе по селективной характеристике будет соответствовать заданной. Далее поочередно регулируют наклоны селективной характеристики на участках БВ, АВ, ВГ, изменяя положение регулировочных выводов 1, 2, 3 на резисторе R_2 .

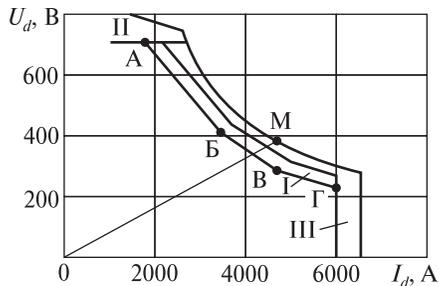


Рис. 4.25. Планшет настройки селективной характеристики тягового генератора ГС-501 (тепловоз 2ТЭ116) и его характеристика на 15-й позиции при работе автоматической системы регулирования напряжения

4. Настройка характеристики генератора. В режиме максимального выхода индуктивного датчика регулировкой сопротивления $R_{ид}$ устанавливают нужную величину напряжения $U_{кор}$. При помощи потенциометра уставки регулируют напряжение генератора на участке ограничения в поле II планшета.

Ограничение тока тягового генератора регулируют потенциометром уставки R_4 , добиваясь того, чтобы стабилитрон в канале регулирования тока ограничивал напряжение уставки начиная с 10-й позиции. Затем на 15-й позиции контроллера изменением регулировочного вывода резистора R_1 регулируют максимальный ток генератора в поле III планшета.

Участок ограничения мощности характеристики тягового генератора при настроенном регуляторе дизеля получается автоматически. На этом участке проверяют работу индуктивного датчика: во всем диапазоне изменения тока генератора якорь ИД не должен достигать положений минимального и максимального выходов. Поддерживаемая мощность генератора должна соответствовать заданной величине с учетом атмосферных условий и состояния вспомогательных нагрузок дизеля. На 1-й позиции дизеля изменением сопротивления резистора R_5 регулируют мощность генератора для обеспечения плавного трогания тепловоза.

5. Настройка внешней характеристики тягового генератора при аварийном возбуждении. Переключателем АП (см. рис. 4.17) пере-

водят схему в режим аварийного возбуждения генератора. Настройка характеристики генератора на 15-й позиции дизеля производится в одной точке регулировкой резистором $R_{ав}$ (регулируется напряжение генератора при фиксированном токе нагрузки). Настройку внешней характеристики генератора на 1-й позиции контроллера производят аналогично при помощи секции резистора $R_{ав}$, шунтируемой контактором КАВ.

4.9. Работа блоков системы регулирования в тормозном режиме

4.9.1. Селективный узел в тормозном режиме

Система автоматического регулирования момента тягового двигателя в режиме электрического тормоза выполняется замкнутой и служит для формирования его регулировочных тормозных характеристик и ограничения предельных значений нагрузок.

При переходе тепловоза в тормозной режим в схеме селективного узла происходят переключения: отключается цепь датчика напряжения генератора (трансформатора напряжения), а вместо нее подключается цепь датчика тока возбуждения тяговых двигателей (трансформатора тока возбуждения двигателей). В результате на потенциометре обратной связи ПОС (резисторах R_1 , R_2 , R_3) формируются сигналы обратных связей по току якоря тягового электродвигателя $U_{ос.я}$, по току возбуждения тяговых электродвигателей $U_{ос.в}$ и по тормозному моменту двигателей $U_{ос.торм}$ (рис. 4.26).

Сигнал уставки по токам I_a и $I_{вд}$ снимается со стабилизатора Ст, подключенного к блоку БЗВ. Сигнал уставки по тормозному моменту формируется на потенциометре тормозного контроллера КТ, включенного на напряжение 110 В цепи управления. Величина уставки тормозного момента изменяется тормозным контроллером КТ (как правило, тормозной контроллер имеет пять ступеней). Между «минусом» ПОС и «минусом» потенциометра уставок ПЗ включена обмотка управления блока БУВ тормозного режима (см. п. 4.4); «плюсы» сигналов обратной связи и уставок соединены между собой попарно через разделительные диоды Д1, Д2, Д3, как и в тяговом режиме работы системы. Таким образом, образуются три канала регулирования токов I_a , $I_{вд}$ и тормозного момента двигателя, которые действуют поочередно. Работа каналов регулирования происходит так же, как это было описано выше в тяговом режиме.

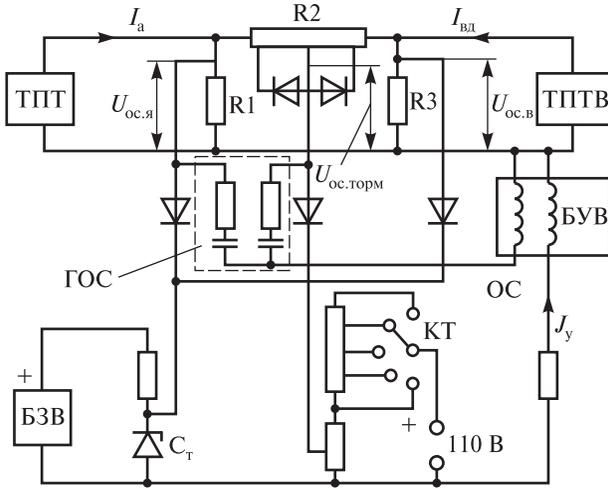


Рис.4.26. Селективный узел в тормозном режиме:

ТПТ — трансформатор постоянного тока якоря электродвигателя; ТПТВ — трансформатор постоянного тока возбуждения электродвигателя; БЗВ — блок задания возбуждения; БУВ — блок управления возбуждением; КТ — тормозной контроллер

На тепловозах более позднего выпуска система регулирования электрического торможения собрана в блоке системы УСТА [2].

4.9.2. Регулировочная характеристика тягового двигателя в тормозном режиме

В результате работы СУ формируется регулировочная характеристика тормозного режима тягового электродвигателя $I_{вд} = f(I_a)$ (рис. 4.27), в которой можно выделить участки ограничения токов I_a , $I_{вд}$ и участок ограничения тормозного момента (тормозной силы B). На участке ограничения величины B произведение $I_a I_{вд} \approx \text{const}$. Приближение селективной характеристики

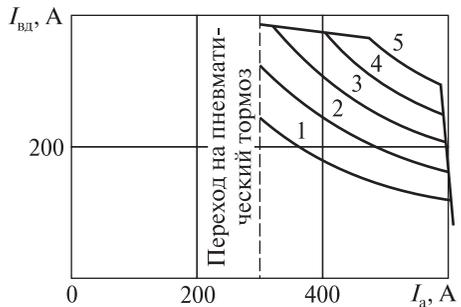


Рис. 4.27. Регулировочные характеристики системы электрического торможения

$I_{\text{ВД}} = f(I_a)$ к гиперболической зависимости (что обеспечивает постоянство тормозного момента на колесе тепловоза) на этом участке достигается переключением плеч резистора R2, как на участке постоянной мощности селективной характеристики генератора в тяговом режиме (см. п. 4.3).

Различным значениям сигнала уставки по тормозному моменту, создаваемым КТ, соответствуют зависимости $I_{\text{ВД}} = f(I_a)$, причем величина тормозного усилия меняется пропорционально квадрату напряжения уставки (см. п. 4.3.3). Получаемые при этом тормозные характеристики тепловоза $B = f(V_{\text{лок}})$ приведены на рис. 4.28.

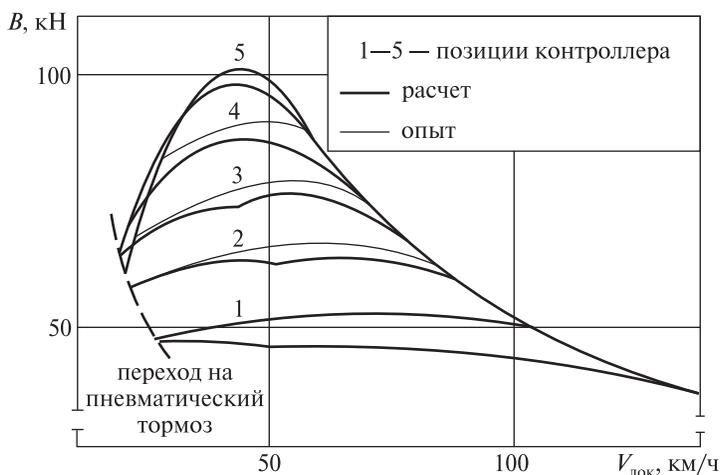


Рис. 4.28. Тормозные характеристики тепловоза 2ТЭ116 по позициям контроллера

4.9.3. Система гибкой обратной связи тормозного режима

В селективном узле тормозного режима предусмотрены отрицательные гибкие обратные связи (ГОС) по току якоря и по тормозному моменту (рис. 4.26). Они выполнены в виде дифференцирующих цепей (фильтров с резонансными цепочками) (см. п. 1.7), состоящими из последовательно включенных конденсаторов и резисторов. Сигналы ГОС поступают на дополнительную обмотку управления ОС (обмотку стабилизации) блока БУВ. Гибкая обрат-

ная связь по току якоря двигателя предназначена для обеспечения устойчивой работы системы регулирования. Гибкая обратная связь по тормозному моменту вводится в работу только при движении с грузовыми поездами и обеспечивает замедленное нарастание тормозного момента в течение первых 7—10 с. Это необходимо для исключения слишком больших продольных усилий в сцепных приборах поезда при переходе в режим торможения.

Рассмотрим работу ГОС по тормозному моменту более подробно. Процесс перехода в тормозной режим тепловоза начинается с обесточенного состояния силовых цепей. Поэтому ток возбуждения двигателей $I_{вд}$ и создаваемый ими магнитный поток $\Phi_{д}$ в первый момент будут равны нулю. Соответственно будет равен нулю ток якорей ТЭД

$$I_a = \frac{c n_{\text{ТЭД}} \Phi_{д}}{R_{\text{Т}} + R_a} \quad (4.38)$$

и создаваемые ими тормозные моменты

$$M_{\text{ТЭД}} = c_M I_a \Phi_{д} . \quad (4.39)$$

Для того чтобы создать режим плавного нарастания тормозной силы до заданного значения, необходимо обеспечить определенную скорость увеличения $I_{вд}$. Поскольку обмотки возбуждения ТЭД получают питание от тягового генератора, значит необходимо плавно увеличивать напряжение тягового генератора, а фактически его ток возбуждения $I_{вг}$.

Из характеристики $I_{вг} = f(I_y)$ (см. рис. 4.7) следует, что в первый момент при $I_{вд} = 0$, а соответственно $I_{вг} = 0$, режим работы системы регулирования тормозного момента определится точкой 3. Для повышения тормозного момента до заданного значения необходимо увеличить возбуждение тягового генератора, т.е. переместить режим его работы в точку 2. Однако на интервале $0 \leq I_{вг} < I_{вг2}$ канал регулирования тормозного момента СУ закрыт, так как возбуждения тягового генератора недостаточно, чтобы обеспечить условие работы канала $U_{\text{ос.торм}} \geq U_{\text{ус.торм}}$. Для того чтобы ток возбуждения генератора все-таки увеличился, используется ГОС тормозного режима. На интервале $0 \leq I_{вг} < I_{вг2}$ увеличение значения $I_{вг}$ достигается за счет протекания тока по обмотке ОС, которая включена на напряжение

$U_{\text{ос.торм}}$ и выполняет функцию обмотки управления МУ в БУВ. Цепь этой обмотки не содержит напряжения уставки, поэтому ток в ней будет возрастать вместе с увеличением значения $U_{\text{ос.торм}}$. Если же в эту цепь установить конденсатор, то можно будет управлять скоростью изменения самого значения $U_{\text{ос.торм}}$, а соответственно и темпом нарастания тормозного момента тягового двигателя. Действительно, для цепи постоянного тока с емкостной нагрузкой C в режиме коммутации справедливо уравнение при нулевых н.у.

$$U = \int_0^t C I dt,$$

где U, I — напряжение и ток нагрузки.

Следовательно, для цепи обмотки ОС с конденсатором C при тех же условиях будет справедливо выражение

$$I_{\text{ос}} = C \frac{dU_{\text{ос.т}}}{dt},$$

где $I_{\text{ос}}$ — ток в цепи обмотки ОС.

В соответствии с рис. 4.7 на участке 3—2 характеристика $I_{\text{вг}} = f(I_{\text{y}})$ имеет большую крутизну, т.е. можно считать, что вход в тормозной режим происходит при $I_{\text{ос}} = \text{const}$. Значит, если в дифференцирующую цепь установить конденсатор большой емкости C ,

значение $\frac{dU_{\text{ос.торм}}}{dt}$ будет небольшим. А это может выполняться только тогда, когда малое значение будет иметь скорость возрастания тормозного момента двигателя, так как $U_{\text{ос.торм}} \sim M_{\text{тэд}}$. Таким образом, за счет большой крутизны участка 3—2 характеристики $I_{\text{вг}} = f(I_{\text{y}})$ и подбора параметров дифференцирующей цепи в СУ можно обеспечить требуемую скорость нарастания тормозной силы тепловоза.

Ток в обмотке ОС будет протекать до тех пор, пока $U_{\text{ос.торм}} \leq U_{\text{ус.торм}}$; при $U_{\text{ос.торм}} > U_{\text{ус.торм}}$ канал регулирования тормозного усилия вступит в действие, поддерживая постоянным напряжение $U_{\text{ос.торм}}$. При этом цепь ГОС обесточится и в дальнейшем будет работать только при переходных процессах. Осциллограмма

процесса начала торможения на грузовом тепловозе приведена на рис. 4.29. Плавное нарастание тока якоря двигателей (соответственно и тормозного момента) происходит в течение примерно 7 с. При тех же параметрах схемы в режиме пассажирского движения ГОС обеспечивает нарастание тока якоря до заданного значения за 1,5 — 2 с.

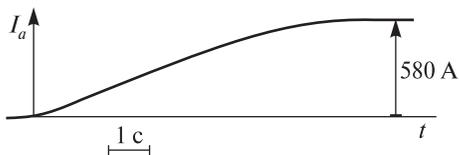


Рис. 4.29. Оциллограмма изменения тока якоря тягового электродвигателя при входе в тормозной режим

4.9.4. Особенности настройки системы регулирования электрического тормоза

Настройка системы автоматического регулирования напряжения генератора в тормозном режиме производится так же, как и в тяговом режиме при неподвижном тепловозе и отсоединенных тяговых электродвигателях. При настройке получают заданные регулировочные характеристики тяговых двигателей $I_{\text{вд}} = f(I_a)$. Особенность настройки системы электрического торможения заключается в том, что тяговые двигатели при неподвижном тепловозе не могут быть объектом регулирования, поскольку неспособны вырабатывать энергию.

Роль объекта регулирования выполняет в данном случае тяговый генератор, работающий на нагрузочный реостат. Такая замена для настройки характеристик вполне допустима, однако при этом необходимо, чтобы система была замкнутой и регулируемая величина могла бы поддерживаться изменением тока возбуждения генератора.

Для настройки канала тормозного усилия необходимо одновременно иметь сигналы по токам $I_{\text{вд}}$ и I_a с возможностью изменения соотношения между ними в широких пределах. При отключенных ТЭД сделать это невозможно. Поэтому на практике используют другое решение. В канал ограничения тока возбуждения СУ вместо ТПТВ включают ТПН, используемый в тяговом режиме. При этом напряжение генератора U_a в определенном масштабе замещает ток возбуждения тягового электродвигателя $I_{\text{вд}}$.

Для того чтобы характеристики ТПН соответствовали характеристикам отключенного ТПТВ изменяют коэффициент трансформации ТПН при помощи резистора R_6 в цепи его обмотки управления (рис. 4.4).

Затем настраивают характеристики $U_d = f(I_d)$, повторяющие в выбранном масштабе характеристики $I_{вд} = f(I_a)$. Требуемый диапазон изменения I_a , а фактически I_d , достигается изменением сопротивления нагрузочного реостата.

Настройку системы регулирования электрического тормоза ведут по планшету, аналогичному планшету тягового режима, на котором представлено поле настройки характеристик на 3-й и 5-й позициях тормозного контроллера. Гиперболический участок регулировочной характеристики формируется на 3-й позиции КТ, изменением положения выводов на резисторе R2 (см. рис. 4.26).

Произведение $I_{вд} I_a = \text{const}$, или фактически $U_d I_d = \text{const}$, на гиперболическом участке тормозной характеристики регулируется на каждой позиции КТ при помощи секционированного резистора $R_{КТ}$ в цепи уставки канала тормозного момента. Проверяют также время нарастания тока I_d (тормозного тока) при включении схемы, что имитирует процесс входа в режим торможения.

4.10. Расчет силовой системы возбуждения генератора

Данный пример позволяет определить параметры, необходимые для проектирования силовой схемы возбуждения. Как правило, расчет выполняется для режимов максимального кратковременного тока возбуждения генератора и продолжительного режима. Расчет кратковременного режима дает предельные параметры возбудителя и управляемого выпрямителя; расчет продолжительного режима необходим для определения тока возбудителя на продолжительном режиме работы системы.

Для того чтобы обеспечить полное использование мощности дизеля при работе тепловоза, необходимо, чтобы система регулирования возбуждения тягового генератора могла сформировать требуемые регулировочные характеристики (см. рис. 4.21). Регулировочные характеристики $U_{вг} = f(I_d)$ формируются системой «возбудитель—управляемый выпрямитель». В пределах одной позиции дизеля, благодаря работе блока коррекции, напряжение возбудителя

остается приблизительно постоянным (см. п. 5.1). Управляемый выпрямитель представляет собой систему электрических ключей (см. п. 4.5, рис. 4.17), поэтому может только снижать напряжение на выходе по отношению к напряжению на входе.

Расчет системы возбуждения тягового генератора сводится к определению требуемого значения напряжения возбудителя и нагрузок элементов системы:

- напряжение возбудителя (действующее и среднее значения) $U, U_{\text{ср}}$;
- ток обмотки якоря возбудителя (действующее и среднее значения) $I, I_{\text{ср}}$;
- углы коммутации тиристоров γ_1, γ_2 ;
- активную мощность возбудителя P ;
- средний ток тиристорного и диодного плеча выпрямителя;
- углы проводимости тиристорного и диодного плеча ϕ_T и ϕ_D .

Исходными данными для расчета являются:

- требуемое значение тока возбуждения генератора (среднее значение) $I_{\text{вг}}$;
- напряжение на обмотке возбуждения генератора, при котором обеспечивается требуемое значение тока возбуждения (среднее значение) $U_{\text{вг}}$;
- активное сопротивление обмотки возбуждения генератора $R_{\text{вг}}$;
- активное сопротивление обмотки якоря возбудителя R_a ;
- индуктивное сопротивление возбудителя x_s при заданном значении $n_{\text{диз}}$;
- минимальный угол сдвига управляющих импульсов α'_{min} , обеспечиваемый блоком БУВ (рис. 4.20, б).

Для того чтобы рассчитать требуемое напряжение возбудителя, необходимо определить рабочую точку системы «управляемый выпрямитель—обмотка возбуждения генератора» (рис. 4.17, 4.30). Рабочая точка определяется из внешних характеристик выпрямителя УВВ.

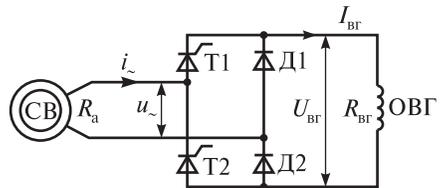


Рис. 4.30. Расчетная схема системы возбуждения генератора

В обмотке возбуждения тягового генератора протекает пос-

тоянный пульсирующий ток $I_{\text{вг}}$, который нельзя рассматривать как сглаженный (индуктивность цепи имеет ограниченное значение), поэтому среднее значение напряжения на выходе выпрямителя с достаточной точностью можно определить (3.34):

$$U_{\text{вг}} = U_{\text{ср}} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \Delta U_R - \Delta U_{\text{в}} - \Delta U_{\text{х}}, \quad (4.40)$$

где $U_{\text{ср}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U$ — среднее значение выпрямленного напряжения однофазного мостового выпрямителя при угле управления тиристорами $\alpha = 0$;

ΔU_R — снижение напряжения, обусловленное активным сопротивлением схемы выпрямления;

$\Delta U_{\text{в}}$ — падение напряжения на вентилях;

$\Delta U_{\text{х}}$ — снижение напряжения, обусловленное процессами коммутации вентиляей.

Поскольку падения напряжения на вентилях малы, (4.40) без особой погрешности можно записать как

$$U_{\text{вг}} = U_{\text{ср}} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \Delta U_R - \Delta U_{\text{х}}. \quad (4.41)$$

В соответствии с (3.36) для однофазной мостовой схемы выпрямления

$$\overline{\Delta U_{\text{х}}} = \frac{x_S I_{\text{вг}}}{\sqrt{2} U_2}.$$

Тогда абсолютное значение снижения напряжения, обусловленное процессами коммутации вентиляей

$$\Delta U_{\text{х}} = \frac{x_S I_{\text{вг}}}{\sqrt{2} U_2} \cdot \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} = \frac{2 x_S I_{\text{вг}}}{\pi}.$$

Падение напряжения на активном сопротивлении схемы выпрямления — это фактически падение напряжения на активном сопротивлении якоря возбуждателя

$$\Delta U_R \approx R_a I_{\text{ср}},$$

которое также может быть выражено через выпрямленное значение тока нагрузки $I_{\text{вг}}$

$$I_{\text{ср}} = k_{\text{пр}} I_{\text{вг}}, \quad (4.42)$$

где $k_{\text{пр}}$ — коэффициент проводимости выпрямителя, который является переменной величиной.

Коэффициент проводимости выпрямителя определяется из соотношения токов до выпрямителя и после выпрямителя и зависит от углов коммутации вентиляей.

Значения углов коммутации рассчитываются при решении уравнения для тока обмотки якоря возбудителя на различных интервалах проводимости выпрямителя. В общем случае при любых значениях α действующее I и среднее $I_{\text{ср}}$ значения тока обмотки якоря возбудителя и ток обмотки возбуждения тягового генератора связаны зависимостью:

$$I = I_{\text{вг}} \sqrt{1 - \frac{\alpha + \frac{2}{3}\gamma_2}{\pi} + \frac{2\gamma_1(1 + 2\cos^2\gamma_1) - 3\sin 2\gamma_1}{4\pi(1 - 2\cos\gamma_1)^2}}, \quad (4.43)$$

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{вг}} \left(1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi} \right), \quad (4.44)$$

где γ_1 и γ_2 — первый и второй угол коммутации тиристоров (п. 4.5) (см. рис. 4.20, 4.31).

Решение (3.31) и (3.30) позволяет получить выражения для определения углов коммутации вентиляей:

$$\begin{cases} \cos\gamma_1 = 1 - \frac{I_{\text{вг}}}{I_{\text{к}}}; \\ \cos(\alpha + \gamma_2) = \cos\alpha - \frac{I_{\text{вг}}}{I_{\text{к}}}, \end{cases} \quad (4.45)$$

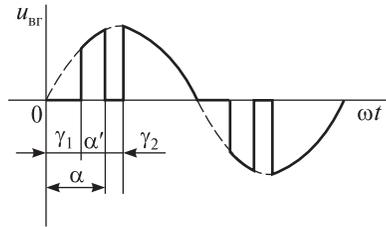


Рис. 4.31. К определению углов коммутации тиристоров управляемого выпрямителя возбуждения

где $I_{\text{к}} = \frac{\pi U_{\text{ср}}}{2 x_S} = \frac{\pi 2\sqrt{2}U}{2 \pi x_S} = \frac{\sqrt{2}U}{x_S} = \frac{(U)_m}{x_S}$ — амплитудное значение тока короткого замыкания схемы.

Приравняв (4.42) и (4.44) получаем выражение для коэффициента проводимости выпрямителя:

$$k_{\text{пр}} = \left(1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi} \right). \quad (4.46)$$

Таким образом, при заданном угле α выпрямленное напряжение на выходе УВВ определяется значением нагрузки и углами коммутации вентиляей

$$U_{\text{вг}} = U_{\text{ср}} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - R_a k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) I_{\text{вг}} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi}. \quad (4.47)$$

Со стороны нагрузки — обмотки возбуждения тягового генератора, выпрямленное напряжение может быть представлено как

$$U_{\text{вг}} = R_{\text{вг}} I_{\text{вг}}. \quad (4.48)$$

Приравнивая (4.47) и (4.48), получаем:

$$U_{\text{ср}} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - R_a k_{\text{пр}} I_{\text{вг}} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi} = R_{\text{вг}} I_{\text{вг}}.$$

После преобразования имеем

$$U_{\text{ср}} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi} = R_{\text{вг}} I_{\text{вг}} + R_a k_{\text{пр}} I_{\text{вг}}. \quad (4.49)$$

Величину

$$U_{\text{н}} = R_{\text{вг}} I_{\text{вг}} + R_a k_{\text{пр}} I_{\text{вг}} = R_{\text{н}} I_{\text{вг}} \quad (4.50)$$

называют напряжением нагрузки, так как ее составляющие зависят от тока нагрузки $I_{\text{вг}}$,

где

$$R_{\text{н}} = R_{\text{вг}} + k_{\text{пр}} R_a. \quad (4.51)$$

С учетом (4.49) и (4.50) имеем:

$$\begin{cases} U_{\text{н}} = U_{\text{ср}} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi}; \\ U_{\text{н}} = R_{\text{н}} I_{\text{вг}}. \end{cases} \quad (4.52)$$

Запишем (4.52) в относительных значениях, приняв в качестве базовой величины $U_{\text{ср}}$:

$$\begin{cases} \bar{U}_H = \frac{U_H}{U_{\text{ср}}} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi U_{\text{ср}}}; \\ \bar{U}_H = \frac{U_H}{U_{\text{ср}}} = R_H \frac{I_{\text{вг}}}{U_{\text{ср}}}. \end{cases} \quad (4.53)$$

Относительное напряжение нагрузки удобно выразить через амплитудное значение тока короткого замыкания системы выпрямления

$$I_K = \frac{\pi U_{\text{ср}}}{2 x_S}, \text{ откуда } U_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} x_S I_K. \quad (4.54)$$

Тогда

$$\begin{cases} \bar{U}_H = \frac{U_H}{U_{\text{ср}}} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi U_{\text{ср}}} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \frac{I_{\text{вг}}}{I_K}; \\ \bar{U}_H = \frac{U_H}{U_{\text{ср}}} = R_H \frac{I_{\text{вг}}}{U_{\text{ср}}} = \frac{\pi R_H}{2 x_S} \frac{I_{\text{вг}}}{I_K} = R_{\text{н.отн}} \frac{I_{\text{вг}}}{I_K}, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \bar{U}_H = \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \bar{I}_H; \\ \bar{U}_H = R_{\text{н.отн}} \bar{I}_H, \end{cases} \quad (4.55)$$

где $\bar{I}_H = \frac{I_{\text{вг}}}{I_K}$ и $R_{\text{н.отн}} = \frac{\pi R_H}{2 x_S}$ — относительные значения тока и сопротивления нагрузки. (4.56)

На основании (4.52) можно построить внешние характеристики управляемого выпрямителя в относительных координатах, а на основании (4.54) — характеристику нагрузки. Их пересечение определяет относительные значения выпрямленного напряжения \bar{U}_H и тока нагрузки \bar{I}_H при различных значениях угла управления α (рис. 4.32).

Среднее значение тока через тиристоры I_T и угол их проводимости φ_T определяются выражениями

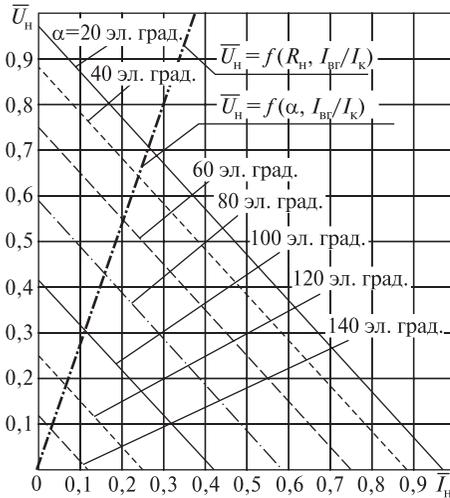


Рис. 4.32. К определению точек совместности работы УВВ и обмотки возбуждения тягового генератора при различных значениях угла управления α

$$I_T = I_{ВГ} \frac{k_{пр}}{2}; \quad (4.57)$$

$$\varphi_T \approx 2\pi \frac{k_{пр}}{2}, \quad (4.58)$$

а среднее значение тока через диоды I_D и угол их проводимости φ_D

$$I_D = I_{ВГ} - I_T; \quad (4.59)$$

$$\varphi_D \approx 2\pi \left(1 - \frac{k_{пр}}{2} \right). \quad (4.60)$$

Активная мощность возбудителя складывается из мощности нагрузки $P_{ВГ}$ и мощности потерь в выпрямителе $\Delta P_{В}$

$$P = P_{ВГ} + \Delta P_{В} = I_{ВГ} (U_{ВГ} + \Delta U_{В}), \quad (4.61)$$

где $\Delta U_{В}$ — среднее за период падение напряжения в вентилях выпрямителя.

Величину $\Delta U_{В}$ можно определить, приняв для упрощения, что ток тиристорного и диодного плеч имеет прямоугольную форму с амплитудой $I_{ВГ}$, а углы проводимости плеч соответствуют значениям по (4.58) и (4.60).

Тогда получаем

$$\Delta U_{В} = k_{пр} \Delta U_{ТП} + (2 - k_{пр}) \Delta U_{ДП}, \quad (4.62)$$

где $\Delta U_{ТП}$ и $\Delta U_{ДП}$ — мгновенные значения падений напряжения тиристорного и диодного плеч при значении тока, равном $I_{ВГ}$. Поскольку тиристорное плечо УВВ содержит тиристор и диод $\Delta U_{ТП} = \Delta U_T + \Delta U_D$, прямые падения напряжения на которых составляют соответственно $\Delta U_T = 2\text{ В}$ и $\Delta U_D = 1\text{ В}$. Диодное плечо УВВ содержит только один диод, поэтому $\Delta U_{ДП} = \Delta U_D$.

Пример расчета силовой системы возбуждения тягового генератора. В качестве примера приведен расчет силовой схемы возбуждения тягового генератора ГС-501А тепловоза 2ТЭ116 в режиме максимального тока возбуждения [4]. Для того чтобы при трогании

нии тепловоза уже на 10—11-й позициях получить максимальный момент тяговых двигателей, возбуждение генератора должно быть номинальным. Поэтому расчет системы возбуждения генератора проводится для $n_{\text{диз}} = 0,75n_{\text{ном}}$.

Исходными данными для расчета должны являться:

– требуемое значение тока возбуждения генератора: $I_{\text{вг}} = 190 \text{ А}$;

– напряжение на обмотке возбуждения генератора, при котором обеспечивается требуемое значение тока возбуждения: $U_{\text{вг}} = 130 \text{ В}$;

– активное сопротивление обмотки возбуждения генератора: $R_{\text{вг}} = 0,685 \text{ Ом}$.

– активное сопротивление обмотки возбудителя: $R_a = 0,043 \text{ Ом}$;

– коммутирующее индуктивное сопротивление возбудителя при $n_{\text{диз}} = 0,75n_{\text{ном}}$: $x_S = 0,42 \text{ Ом}$;

– минимальный угол сдвига управляющих импульсов тиристор-ов УВВ (рис. 4.30) $\alpha'_{\text{min}} = 20 \text{ эл. град}$.

Параметры возбудителя определяются из его предварительного расчета, но могут быть уточнены в процессе настоящего расчета.

В результате расчета необходимо определить:

– напряжение возбудителя (действующее и среднее значения)

$U, U_{\text{ср}}$;

– ток обмотки якоря возбудителя (действующее и среднее значения) $I, I_{\text{ср}}$;

– углы коммутации γ_1, γ_2 ;

– активная мощность возбудителя P ;

– средний ток соответственно тиристорного и диодного плеча выпрямителя \bar{I}_T и \bar{I}_D ;

– углы проводимости соответственно тиристорного и диодного плеча φ_T и φ_D .

Последовательность выполнения расчета параметров системы возбуждения генератора следующая.

1. Определяют функции искомых аргументов: по (4.46)

$$k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) = 1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi};$$

по (4.51)

$$R_{\text{H}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) = k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) R_a + R_{\text{вг}} = \left(1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi} \right) R_a + R_{\text{вг}};$$

по (4.56)

$$R_{\text{H.отн}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) = \frac{\pi}{2x_S} R_{\text{H.отн}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) = \frac{\pi}{2x_S} \left[\left(1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi} \right) R_a + R_{\text{вг}} \right].$$

2. Решают систему уравнений, полученную из (4.45), (4.55) относительно \bar{I} ; α ; $\gamma_1\gamma_2$:

$$\begin{cases} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \bar{I}_{\text{H}} = R_{\text{H.отн}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) \bar{I}_{\text{H}}; \\ \alpha = \alpha'_{\text{min}} + \gamma_1; \\ \cos \gamma_1 = 1 - \bar{I}_{\text{H}}; \\ \cos(\alpha + \gamma_2) = \cos \alpha - \bar{I}_{\text{H}}. \end{cases} \quad (4.63)$$

Для принятых исходных данных решением является: $\bar{I}_{\text{H}} = 0,208$; $\alpha = 1,01$ рад; $\gamma_1 = 0,657$ рад; $\gamma_2 = 0,232$ рад
или $\alpha = 57,6$ эл. град.; $\gamma_1 = 37,6$ эл. град. $\gamma_2 = 13,3$ эл. град.

3. По рис. 4.32 решению системы (4.63) соответствует $\bar{U}_{\text{H}} = 0,55$.

4. По полученным значениям углов коммутации рассчитывают значения сопротивления нагрузки и коэффициента нагрузки:

$$R_{\text{H}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) = \left(1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi} \right) R_a + R_{\text{вг}} =$$

$$= \left(1 - \frac{1,01 + \frac{0,232}{2}}{\pi} + \frac{2 \cdot 0,657}{3\pi} \right) \cdot 0,043 + 0,685 = 0,719 \text{ Ом};$$

$$k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) = 1 - \frac{\alpha + \frac{\gamma_2}{2}}{\pi} + \frac{2\gamma_1}{3\pi} = 1 - \frac{1,01 + \frac{0,232}{2}}{\pi} + \frac{2 \cdot 0,657}{3\pi} = 0,782.$$

5. Определяют параметры режима работы возбудителя:

по (4.50) — напряжение нагрузки

$$U_{\text{H}} = R_{\text{H}} I_{\text{вг}} = 0,719 \cdot 190 = 137 \text{ A};$$

по (4.54) — среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{H}}}{U_{\text{H}}} = \frac{137}{0,55} = 249 \text{ В};$$

по (4.41) — среднее значение напряжения возбудителя

$$\begin{aligned} U_{\text{вг}} &= U_{\text{ср}} - R_a k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) I_{\text{вг}} - \frac{2x_S I_{\text{вг}}}{\pi} = \\ &= 249 - 0,043 \cdot 0,782 \cdot 190 - \frac{2 \cdot 0,42 \cdot 190}{\pi} = 192 \text{ В}; \end{aligned}$$

по (4.43) действующее значение тока возбудителя

$$\begin{aligned} I &= I_{\text{вг}} \sqrt{1 - \frac{\alpha + \frac{2}{3}\gamma_2}{\pi} + \frac{2\gamma_1(1 + 2\cos^2\gamma_1) - 3\sin 2\gamma_1}{4\pi(1 - 2\cos\gamma_1)^2}} = \\ 190 &\sqrt{1 - \frac{1,01 + \frac{2}{3} \cdot 0,232}{\pi} + \frac{2 \cdot 0,657(1 + 2\cos^2 0,657) - 3\sin(2 \cdot 0,657)}{4\pi(1 - 2\cos 0,657)^2}} = 164 \text{ A}; \end{aligned}$$

по (4.44) среднее значение тока возбудителя

$$I_{\text{ср}} = k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) I_{\text{вг}} = 0,782 \cdot 190 = 149 \text{ A}.$$

6. Определяют параметры режима работы выпрямителя:

по (4.57)—(4.60) — значения токов через вентили и углы их проводимости:

$$I_{\text{T}} = I_{\text{вг}} \frac{k_{\text{пр}}(\alpha, \gamma_1, \gamma_2)}{2} = 190 \frac{0,782}{2} = 74,3 \text{ A};$$

$$I_{\text{д}} = I_{\text{вг}} - I_{\text{т}} = 190 - 74,3 = 115,7 \text{ А};$$

$$\varphi_{\text{т}} \approx 2\pi \frac{k_{\text{пр}}}{2} = 2\pi \frac{0,782}{2} = 2,46;$$

$$\varphi_{\text{д}} \approx 2\pi \left(1 - \frac{k_{\text{пр}}}{2} \right) = 2\pi \left(1 - \frac{0,782}{2} \right) = 3,83.$$

7. Падение напряжения в вентилях управляемого выпрямителя в соответствии с (4.62)

$$\Delta U_{\text{в}} = k_{\text{пр}} \Delta U_{\text{т}} + (2 - k_{\text{пр}}) \Delta U_{\text{д}} = 0,782 \cdot (1 + 2) + (1 - 0,782) \cdot 1 = 3,57 \text{ В}.$$

8. Активная мощность возбудителя по (4.61)

$$P = P_{\text{вг}} + \Delta P_{\text{в}} = I_{\text{вг}} (U_{\text{вг}} + \Delta U_{\text{в}}) = 190(130 - 3,57) = 24,0 \text{ кВт}.$$

Расчет на продолжительном режиме возбуждения для $n_{\text{диз}} = n_{\text{ном}}$ производится аналогично; при этом напряжение возбудителя определяется исходя из его пропорциональности частоте вращения дизеля.

Глава 5. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ И ДАТЧИКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВОЗА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Узел коррекции напряжения синхронного возбудителя

Синхронный возбудитель, как и всякий синхронный генератор, имеет круто падающую внешнюю характеристику, что объясняется влиянием реакции якоря и значительным падением напряжения в индуктивном сопротивлении обмотки якоря (см. рис. 4.19). Такая внешняя характеристика возбудителя неприемлема для формирования регулировочной характеристики тягового генератора, так как не позволяет получить требуемые значения $I_{ВГ}$ при большой нагрузке генератора I_d .

Для повышения напряжения возбудителя в зоне больших токов обмотки якоря используют схему двойного питания его обмотки возбуждения от вспомогательного генератора и от источника узла коррекции (см. рис. 4.17 и 5.1).

Узел коррекции напряжения возбудителя состоит из трансформатора коррекции ТК (трансформатор тока) и мостового выпрямителя В. Трансформатор ТК является источником тока в узле коррекции и осуществляет подпитку обмотки возбуждения возбудителя током, пропорциональным току его обмотки якоря (i_{\sim} — мгновенное значение тока обмотки якоря возбудителя).

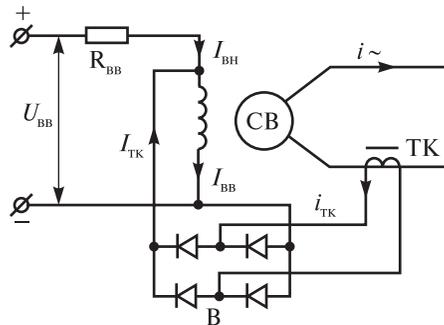


Рис. 5.1. Принципиальная схема узла коррекции напряжения возбудителя

Поскольку ТК измеряет значение i_{α} , то ток на его выходе $i_{\text{ТК}}$ имеет форму примерно прямоугольных импульсов, ширина которых меняется в зависимости от угла коммутации α тиристоров УВВ (см. рис. 4.18, б). Выпрямитель В и индуктивность обмотки возбуждения возбудителя выпрямляют и сглаживают ток ТК. Следовательно ток в обмотке возбуждения возбудителя (см. рис. 5.1):

$$I_{\text{ВВ}} = I_{\text{НВ}} + I_{\text{ТК}},$$

где $I_{\text{НВ}}$ — ток независимого возбуждения возбудителя;
 $I_{\text{ТК}}$ — ток коррекции возбуждения возбудителя.

Можно считать, что

$$I_{\text{ТК}} \approx k_{\text{ТК}} k_{\text{пр}} I_{\text{ВГ}},$$

где $k_{\text{ТК}}$ — коэффициент трансформации ТК;
 $k_{\text{пр}}$ — коэффициент проводимости УВВ, который уменьшается с увеличением значения угла коммутации α (4.46);
 $I_{\text{В}}$ — ток возбуждения генератора.

Таким образом, ток возбуждения возбудителя будет возрастать с увеличением значения тока возбуждения генератора $I_{\text{ВГ}}$. Подбирая нужные значения $k_{\text{ТК}}$, с помощью ТК добиваются удовлетворительной компенсации снижения напряжения на выходе возбудителя

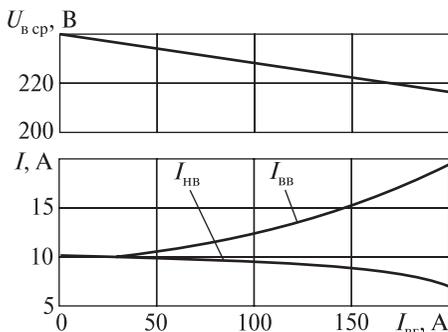


Рис. 5.2. Зависимость среднего значения напряжения возбудителя $U_{\text{в ср}}$, токов возбуждения $I_{\text{НВ}}$ и $I_{\text{ВВ}}$ возбудителя от тока возбуждения генератора тепловоза 2ТЭ116

от реакции якоря и большого значения индуктивности его обмотки. На рис. 5.2 приведены экспериментальные зависимости работы возбудителя с ТК тепловоза 2ТЭ116, из которых следует, что использование узла коррекции позволяет стабилизировать напряжение на выходе возбудителя в пределах 5 %.

При изменении позиции контроллера напряжение возбудителя изменяется пропорционально $n_{\text{диз}}$, но на каждой позиции остается стабилизи-

рованным во всем диапазоне изменения тока возбудителя (или $I_{вг}$).

В узле коррекции используется трансформатор тока возбуждения возбудителя типа ТТ-30М. Он имеет тороидальный ленточный сердечник. Концы обмоток подпаяны к выводам, укрепленным на изоляционной шайбе. Сердечник, обмотки и изоляционная шайба залиты компаундом на основе эпоксидной смолы.

5.2. Электрические датчики системы регулирования напряжения генератора (трансформаторы постоянного тока и постоянного напряжения)

В качестве электрических датчиков системы регулирования напряжения тягового генератора применяются дроссели насыщения с подмагничиванием. Они используются как датчик тока тягового двигателя (трансформатор постоянного тока ТПТ) и датчик напряжения тягового генератора (трансформатор постоянного напряжения ТПН). Одновременно ТПТ и ТПН выполняют функции гальванической электромагнитной развязки высоковольтной и низковольтной измерительной цепи.

По конструктивному и схемному исполнению, по применяемым магнитным материалам ТПТ и ТПН близки к магнитным усилителям (см. п. 1.2.2). В то же время между ними имеются и существенные различия: ТПТ и ТПН имеют мощность цепи управления (измеряемого тока) во много раз превышающую мощность рабочей цепи. В результате ТПТ и ТПН приобретают важные для систем регулирования свойства — безинерционность и прямоугольную форму рабочего тока, которыми не обладают магнитные усилители.

Трансформатор постоянного напряжения типа ТПН-61 состоит из двух кольцевых сердечников, выполненных из железо-никелевого сплава, на каждый из которых намотана рабочая обмотка (рис. 5.3, а). Обмотка управления охватывает оба сердечника. Сердечники с обмотками залиты компаундом на основе эпоксидной смолы, что придает конструкции жесткость. Электрическая схема трансформатора приведена на рис. 5.3, б.

Трансформатор постоянного тока типа ТПТ-20 выполняется аналогично, но без наложенной обмотки управления. На каждый сердечник намотана рабочая обмотка, состоящая из четырех секций,

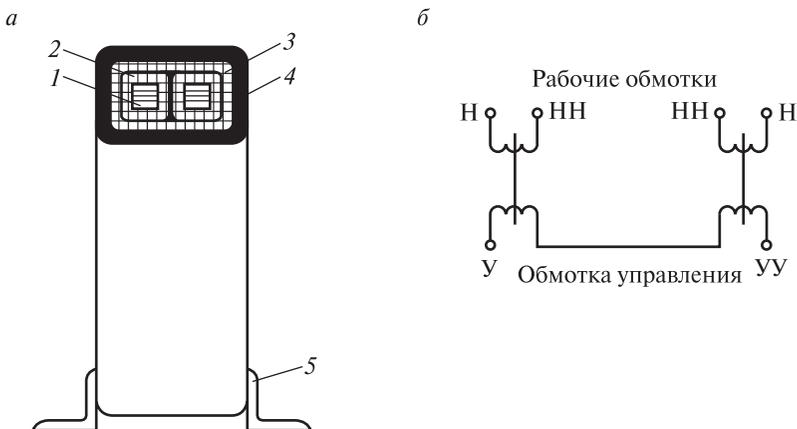


Рис. 5.3. Конструкция (а) и электрическая схема (б) трансформатора постоянного напряжения:

1 — сердечник; 2 — рабочая обмотка; 3 — обмотка управления; 4 — заливка компаундом; 5 — угольники крепления

соединенных параллельно (рис. 5.4, а, б). Управляющей обмоткой служит силовой кабель тягового электродвигателя, пропущенный через центральное отверстие трансформатора (см. рис. 8.26, а). К шпилькам крепятся угольники, с помощью которых трансформатор устанавливается на тепловозе.

Рабочие обмотки ТПТ соединены между собой встречно-последовательно. Нагрузка R_H включена в цепь рабочей обмотки со стороны выпрямленного напряжения.

Ток управления (измеряемый ток) I_y создает магнитодвижущую силу F_y и напряженность H_0 подмагничивающего поля в сердеч-

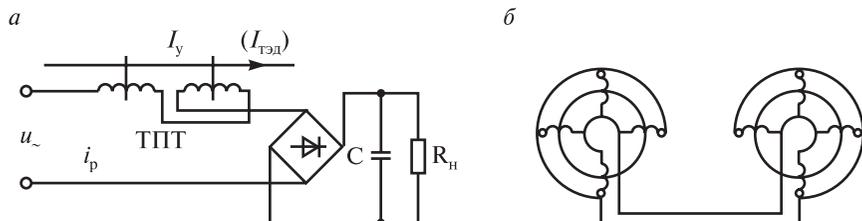


Рис. 5.4. Схемы включения трансформатора постоянного тока (а) и его рабочих обмоток (б)

никах (рис. 5.5). Ток, протекающий по рабочим обмоткам, создает в одной из них магнитодвижущую силу F_p , противоположную F_y , в другой — совпадающую с F_y . Вследствие этого первый сердечник переводится в ненасыщенное состояние, второй будет насыщен. В соответствии с (1.15) к обмотке ненасыщенного дросселя будет приложено напряжение

$$u_{др} = u - i_p R_n,$$

где u — напряжение источника;
 i_p — ток в рабочей обмотке;
 R_n — сопротивление нагрузки.

Под действием напряжения $u_{др}$ происходит размагничивание дросселя из состояния в точке 1 в состояние в точке 2 (см. рис. 5.5). Глубина размагничивания дросселя определяется вольт-секундной площадью напряжения $u_{др}$ (на рис. 5.6 показано штрихом и знаком «плюс»). В момент времени, соответствующий углу Θ' , напряжение, приложенное к дросселю, изменяет полярность и дроссель вновь намагничивается до состояния в точке 1, возвращая энергию в рабочую цепь. Площади размагничивающего и намагничивающего напряжения $u_{др}$ на рис. 5.6 равны, так как соответствуют одному и тому же изменению индукции ΔB .

Пока дроссель находится в ненасыщенном состоянии, в нем $F_y = F_p$ и для мгновенных значений рабочего тока и тока управления можно записать соотношение

$$i_p = i_y \frac{w_y}{w_p}, \quad (5.1)$$

где w_y , w_p — число витков обмотки управления и рабочей обмотки ТПТ.

Таким образом, ненасыщенный дроссель поддерживает постоянное значение тока рабочей обмотки (ограничивает его величину на интервале размагничивания дросселя и не дает ему уменьшаться на интервале, где дроссель намагничивается и возвращает в рабочую цепь запасенную энергию).

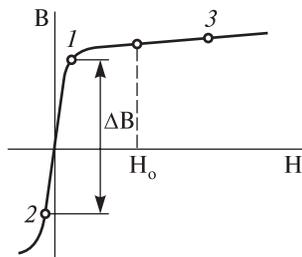


Рис. 5.5. Характеристика намагничивания сердечника ТПТ:

B — индукция в сердечнике; H — напряженность магнитного поля в сердечнике

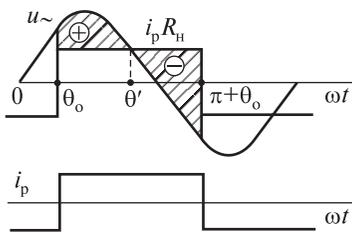


Рис. 5.6. К работе трансформатора постоянного тока:

u_{\sim} — напряжение питания; i_p — рабочий ток; R_n — нагрузка

После перехода первого дросселя в насыщенное состояние в момент времени, соответствующий углу $\pi + \Theta_0$, под действием отрицательного напряжения питания происходит изменение направления рабочего тока и смена состояний дросселей: первый дроссель переходит в состояние, определяемое точкой 3 на рис. 5.5, второй — в состояние, определяемое точкой 1. В дальнейшем процесс повторяется.

В результате рабочий ток будет иметь прямоугольную форму (рис. 5.6), амплитудное и среднее выпрямленное значение которого равно

$$I_p = I_y \frac{w_y}{w_p} = \frac{I_y}{k_{\text{ТТ}}}, \quad (5.2)$$

где I_y — действующее значение тока обмотки управления;

$$k_{\text{ТТ}} = \frac{w_p}{w_y} — \text{коэффициент трансформации ТПТ.}$$

Особенностью работы тепловозных ТПТ является большая величина измеряемых токов (до 3000—8000 А). В сочетании с ограниченными габаритами это приводит к высокой степени насыщения сердечника ТПТ. Поэтому индуктивность рассеяния оказывает существенное влияние на процессы коммутации переменного тока: изменение направления тока в рабочих обмотках реальных ТПТ

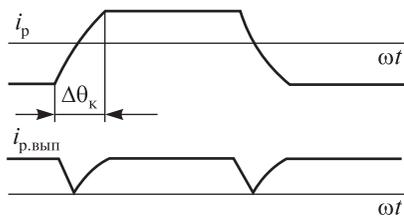


Рис. 5.7. Ток рабочей обмотки i_p и его выпрямленное значение $i_{p,\text{вып}}$ трансформатора постоянного тока

совершается не мгновенно, а в течение некоторого интервала $\Delta\Theta_k$, что приводит к появлению провалов в выпрямленном рабочем токе и к уменьшению его среднего значения (рис. 5.7).

В результате возникает погрешность коэффициента трансформации $k_{\text{ТТ}}$. Эта погрешность увеличивается с ростом тока I_y . Для уменьшения погрешности в тепловозных

ТПТ принимаются специальные меры: применение высококачественного магнитного материала (пермаллоя Э79НМ), выполнение рабочих обмоток с минимальной индуктивностью рассеяния.

Кроме того, на значение $k_{\text{ТТ}}$ оказывает влияние нагрузка.

В «идеальном» ТПТ изменение сопротивления нагрузки от нуля до максимального значения будет приводить лишь к изменению угла нагрузки $\varphi_{\text{Н}}$ и напряжения, приложенного к ненасыщенному дросселю (см. п. 1.2.2); рабочий же ток остается неизменным. Однако в реальном ТПТ величина угла $\varphi_{\text{Н}}$ влияет на значение $k_{\text{ТТ}}$ и рабочий ток будет несколько изменяться. Обычно эта погрешность невелика, если сопротивление нагрузки не превосходит определенного значения. Поэтому ТПТ могут рассматриваться как источники тока в отличие от источников напряжения, где ток существенно зависит от сопротивления нагрузки. Этим, в частности, объясняется то, что для ТПТ не опасны режимы короткого замыкания.

Погрешность в значении $k_{\text{ТТ}}$ возникает также из-за расположения вблизи ТПТ силовых кабелей и стальных масс, которые обуславливают неравномерное намагничивание сердечника. Этот эффект учитывается при установке ТПТ на тепловозе. Для защиты ТПТ от внешних полей можно применять стальные экраны.

Ограничить погрешность применяемых на тепловозе ТПТ удастся в пределах 5–10 %. Значительного снижения влияния силовых кабелей и стальных масс можно достичь, если выполнять рабочую обмотку из нескольких секций (обычно четырех), соединенных между собой параллельно. В таких ТПТ неравномерность намагничивания сердечников в значительной мере устраняется благодаря уравнивающим токам в секциях.

По исполнительной схеме и принципу работы тепловозные ТПН аналогичны ТПТ. Обмотка управления ТПН включается через балластный резистор $R_{\text{б}}$ на выпрямленное напряжение генератора, и величина тока в ней равна (см. рис. 4.4, а):

$$I_y = \frac{U_d}{R_{\text{б}}}.$$

Коэффициент трансформации ТПН определяется из соотношения, полученного с учетом (4.5),

$$k_{\text{ТН}} = \frac{U}{I_{\text{р}}} = \frac{w_{\text{р}}}{w_{\text{у}}} R_{\text{о}}.$$

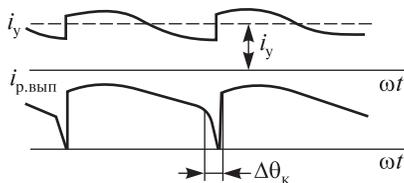


Рис. 5.8. Ток управления i_y и выпрямленное значение тока рабочей обмотки $i_{\text{р.вып}}$ трансформатора постоянного напряжения

статного фильтра (см. п. 1.7), поглощающего переменную составляющую выпрямленного тока.

Выпрямленный ток рабочей обмотки ТПН $i_{\text{р.вып}}$ также имеет пульсации (рис. 5.8). Поэтому особенностью реальных ТПН и ТПТ является то, что в токе управления и токе рабочих обмоток присутствуют высшие гармонические составляющие (см. п. 3.6).

Токи в нагрузках ТПН и ТПТ сглаживаются при помощи емко-

5.3. Индуктивный датчик

В качестве индуктивного датчика на тепловозах применяются датчики переменной индуктивности (см. п. 1.4) типа ИД-32 и ИД-42 (рис. 5.9), технические характеристики которых приведены в табл. 5.1.

В автоматической системе регулирования напряжения тягового генератора индуктивный датчик используется для преобразования

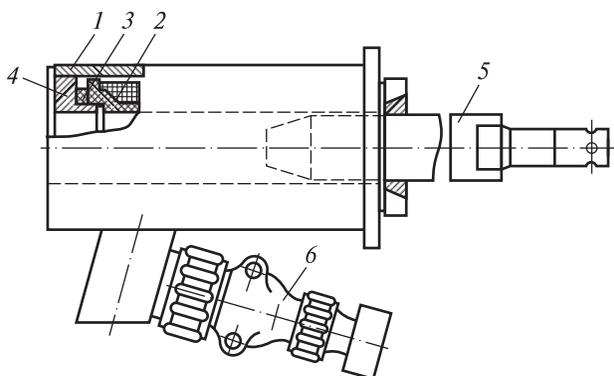


Рис. 5.9. Индуктивный датчик:

1 — корпус; 2 — катушка; 3 — изоляционный каркас; 4 — втулка; 5 — якорь; 6 — разъем

Технические характеристики индуктивных датчиков ИД-32 и ИД-42

Параметр	Значение
Переменное напряжение на катушке, В	220
Полное сопротивление катушки, Ом:	
наибольшее	65
наименьшее	550
Ход якоря, мм	65

перемещения штока сервопривода регулятора частоты вращения дизеля в электрический сигнал и формирования сигнала коррекции установки мощности $U_{\text{кор}}$ селективного узла. Фактически его назначение — поддержание равенства эффективной мощности дизеля и нагрузки, создаваемой тяговым генератором.

Конструктивно датчик выполнен в виде катушки, помещенной в кольцевой корпус и залитой в нем компаундом на основе эпоксидной смолы. Катушка датчика включена в цепь, состоящую из источника питания переменного тока — в данном случае отдельной вторичной обмотки блока БЗВ, выпрямительного моста, сглаживающего конденсатора и резистора нагрузки $R_{\text{ид}}$ (см. рис. 4.6). Наибольший ток в катушке будет протекать при ее минимальной индуктивности, т.е. выдвинутом якоре, а наименьший — при полностью задвинутом якоре. Поскольку индуктивное сопротивление катушки датчика намного больше активного, ток катушки практически не зависит от частоты вращения вала дизеля, а определяется только положением якоря.

Датчик включается в схему при помощи штепсельного разъема. При перемещении якоря изменяется воздушный зазор магнитопровода датчика и, следовательно, его индуктивное сопротивление, что ведет к изменению тока в нагрузке. Характеристики датчика типа ИД-32 на 15-й позиции контроллера машиниста приведены на рис. 5.10.

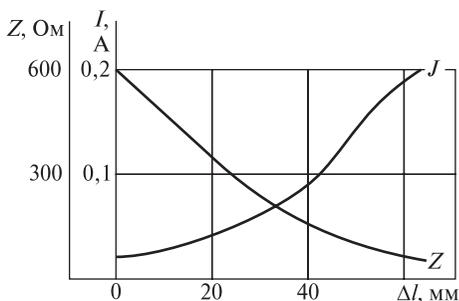


Рис. 5.10. Выходная характеристика индуктивного датчика ИД-32

На промежуточных позициях контроллера характеристика $I = f(\Delta l)$ несколько снижается из-за уменьшения напряжения питания.

5.4. Узел выделения максимального сигнала

Система выделения максимального сигнала по току предназначена для формирования сигнала обратной связи по току якоря тягового электродвигателя колесной пары, движущейся с наименьшим проскальзыванием относительно рельса, т.е. имеющей наименьшую частоту вращения.

Ток якоря ТЭД определяется его частотой вращения:

$$I_a = \frac{U_d - c_e n_{\text{ТЭД}} \Phi_d}{R_{\text{ТЭД}}},$$

где U_d — напряжение на выходе ВУ;

$n_{\text{ТЭД}}$, Φ_d , $R_{\text{ТЭД}}$ — частота вращения якоря, магнитный поток и сопротивление тягового электродвигателя;

c_e — машинная постоянная электродвигателя.

Поэтому чем меньше частота вращения якоря, тем больше ток. Если колесная пара начинает проскальзывать относительно рельса, т.е. развивается буксование, ток якоря, связанного с ней двигателя, снижается.

Для измерения токов тяговых двигателей на тепловозах, как правило, устанавливаются четыре трансформатора тока ТПТ1—ТПТ4 (п. 5.2) (рис. 5.11). На двигатели первой и последней колесных пар, в наибольшей степени склонных к буксованию, устанавливаются индивидуальные трансформаторы тока ТПТ1 и ТПТ4. Двигатели второй и третьей, четвертой и пятой колесных пар объединены соответственно трансформаторами ТПТ2 и ТПТ3. Чтобы при устойчивом сцеплении колесных пар с рельсами токи рабочих обмоток всех трансформаторов тока были одинаковыми, в соответствии с (5.2) обмотки управления ТПТ1, ТПТ4 имеют по два витка, а ТПТ2, ТПТ3 — по одному витку.

Схема из соединенных последовательно четырех диодных мостов позволяет выделить наибольший из подведенных к ней токов. Каждый мост включен в цепь рабочей обмотки соответствующего ТПТ. Нагрузкой схемы является резистор потенциометра обратных связей канала тока R_1 СУ. Рассмотрим работу блока (рис. 5.12).

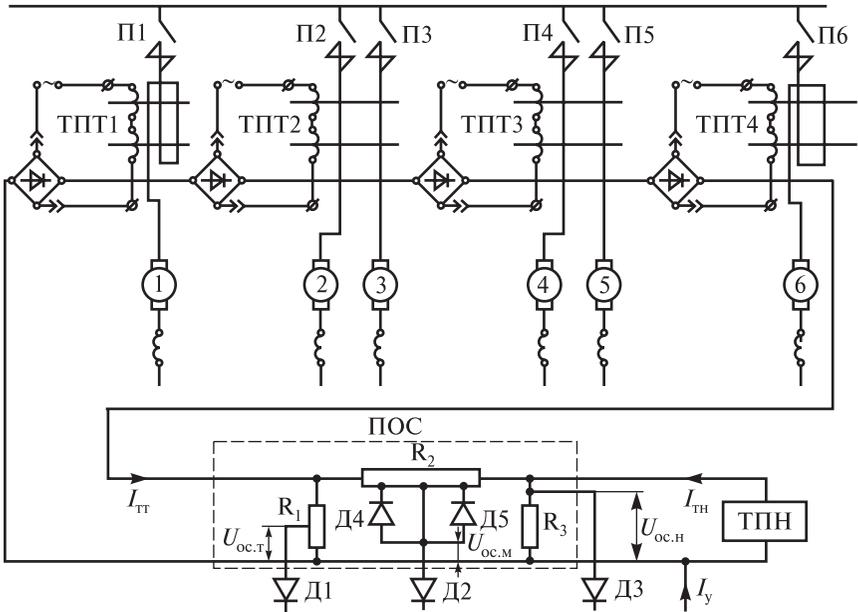


Рис. 5.11. Включение узла выделения максимального сигнала на потенциометр обратных связей селективного узла

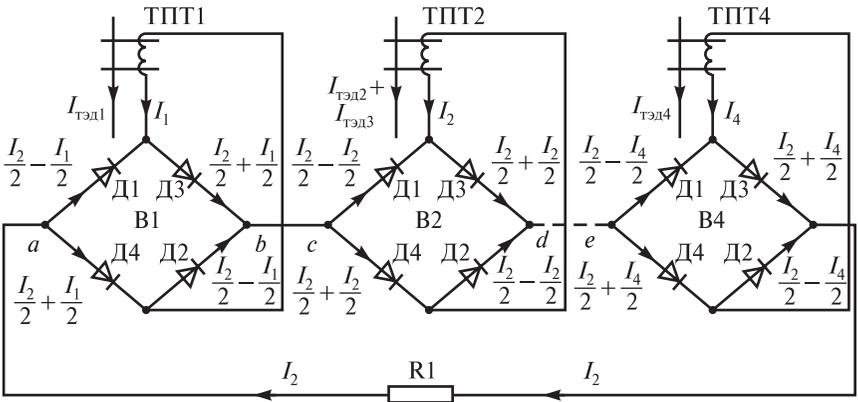


Рис. 5.12. К работе узла выделения максимального сигнала по току тяговых двигателей

Пусть в данный момент ток рабочей обмотки ТПТ2 больше аналогичных токов ТПТ1, ТПТ3 и ТПТ4:

$$I_2 > I_1; I_2 > I_3; I_2 > I_4,$$

где $I_1; I_2; I_3; I_4$ — действующие значения токов рабочих обмоток соответственно ТПТ1—ТПТ4.

Это значит, что вторая колесная пара находится в наиболее устойчивом сцеплении с рельсом.

Каждый из токов $I_1; I_2; I_3; I_4$ поступает на свой диодный мост В1—В4. Ток I_2 через диод Д3 моста В2 проходит в мосты В3, В4 и через нагрузку R_1 в мост В1. Поскольку диоды каждого моста включены для I_2 в прямом направлении в точках e, a и c схемы, он разветвляется на две равные составляющие $\frac{I_2}{2}$.

Одновременно от каждого ТПТ в каждый мост проходит свой ток: в В1 — I_1 ; в В3 — I_3 ; в В4 — I_4 . Диоды Д1 и Д3 каждого моста уже открыты наибольшим из токов $I_2/2$. Поэтому токи I_1, I_3, I_4 , разветвляясь, замыкаются в своем мосту, складываясь или вычитаясь с током $I_2/2$. В результате на выходе каждого моста будет получен ток I_2 , который и пройдет в нагрузку R_1 .

Таким образом, через все мосты в нагрузку пройдет наибольший из токов, поступивших в узел; меньшие токи замыкаются в цепи рабочей обмотки своего ТПТ через связанный с ним диодный мост.

5.5. Система формирования жестких характеристик тягового генератора

5.5.1. Жесткие характеристики генератора в тяговом режиме

Боксование одной или нескольких колесных пар тепловоза характеризуется резким увеличением их частоты вращения, уменьшением тока связанных с ними тяговых электродвигателей:

$$I_a = \frac{U_d - c_e n_{\text{тэд}} \Phi_{\text{тэд}}}{R_{\text{тэд}}}.$$

Соответственно уменьшается ток тягового генератора, так как

$$I_d = 6I_a.$$

Если не применить специальных средств защиты, то система автоматического регулирования напряжения тягового генератора, стремясь поддерживать мощность постоянной, будет увеличивать его напряжение. Повышение напряжения генератора вызовет увеличение тока и момента электродвигателей. Таким образом, интенсивность боксования колес будет возрастать и возникает опасность его распространения на небоксующие колесные пары.

Для снижения вероятности развития боксования колесных пар системой регулирования предусматривается режим формирования жестких динамических характеристик генератора.

Чтобы напряжение генератора не увеличивалось при возникновении боксования, на потенциометр обратной связи селективного узла поступает сигнал не по току генератора, а по максимальному току тяговых двигателей или группы тяговых двигателей, полученный с выхода узла выделения максимального сигнала \max (см. п. 5.4, рис. 4.4, *a*). Поскольку максимальный ток принадлежит двигателю небоксующей колесной пары, ток управления селективного узла также не изменится и напряжение генератора останется прежним. Тяговый генератор будет работать по жесткой динамической характеристике до тех пор, пока останется хотя бы одна небоксующая колесная пара. Например, при боксовании колесной пары, связанной с первым двигателем, частота вращения его якоря будет возрастать, а ток уменьшаться. Значения токов других двигателей не изменятся, поэтому напряжение тягового генератора останется на прежнем уровне. Соответственно прежние значения будут иметь токи и моменты тяговых двигателей небоксующих колесных пар. Такой алгоритм управления тяговым генератором снижает вероятность развития боксования устойчиво работающих колесных пар тепловоза и позволяет восстановить сцепление с рельсом боксующей колесной пары.

Таким образом, при отсутствии боксования колесных пар система регулирования напряжения тягового генератора обеспечивает его работу с полным использованием мощности, а в случае возникновения боксования — по жестким динамическим характеристикам с постоянным или малоизменяющимся напряжением.

Точное измерение токов всех тяговых двигателей с помощью ТПТ практически невозможно из-за влияния на них посторонних магнитных полей (см. п. 5.2). С другой стороны, из-за неравномер-

ности токораспределения между тяговыми двигателями однозначно судить об устойчивости сцепления каждой колесной пары тепловоза с рельсом также невозможно.

Исследованиями было установлено, что наилучшие результаты дает четырехтрансформаторная схема, обеспечивающая следующий порядок измерения токов двигателей: 1, 2—3, 4—5, 6 (см. рис. 5.11). При такой схеме удастся повысить реализуемую тепловозом тягу примерно на 20 % при средних условиях сцепления, а чувствительность системы в режиме трогания обычно лежит в пределах скорости проскальзывания колеса относительно рельса 3—5 км/ч.

При очень плохих условиях сцепления машинист имеет возможность перейти на режим статических жестких характеристик генератора при помощи ручного переключателя, который снижает уставку канала регулирования напряжения генератора. Статические жесткие характеристики ограничивают рост напряжения генератора при токах генератора, меньших некоторого определенного значения данной позиции (рис. 5.13). На 15-й позиции это ограничение начинается со скорости, несколько меньшей расчетной.

Использование статических жестких характеристик целесообразно при низких скоростях движения тепловоза (примерно до 25 км/ч), так как при более высоких скоростях использование этого режима вызывает сильное снижение момента двигателя.

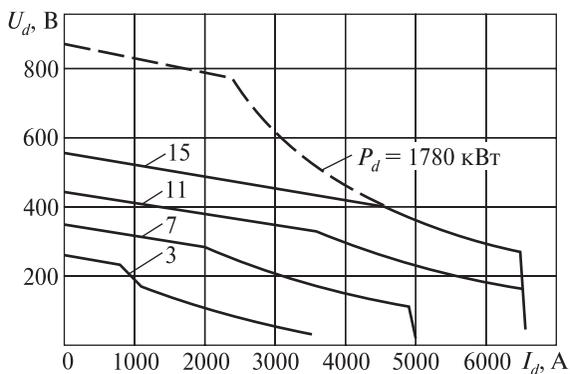


Рис. 5.13. Жесткие статические характеристики тягового генератора тепловоза 2ТЭ116:

3, 7, 11, 15 — позиции контроллера

5.5.2. Жесткие характеристики генератора в тормозном режиме

При работе тепловоза в режиме электрического торможения важное значение имеет повышение его противоюзных свойств.

В режиме торможения тяговый двигатель работает как генератор, а его ток якоря определяется значением ЭДС

$$I_a = \frac{c_e n_{\text{ТЭД}} \Phi_{\text{д}}}{R_a + R_{\text{Т}}},$$

где R_a и $R_{\text{Т}}$ — сопротивления обмотки якоря электродвигателя и тормозного резистора.

При юзе колесной пары значение $n_{\text{ТЭД}}$ будет уменьшаться, и соответственно будет снижаться ток якоря электродвигателя I_a . Это приводит к уменьшению сигнала обратной связи по току селективного узла $U_{\text{ос.т}}$ и тока управления $I_{\text{у}}$. В результате ток возбуждения двигателей и токи якорей двигателей устойчивых в сцеплении колесных пар повысятся и возрастет опасность срыва в юз остальных колесных пар.

Чтобы избежать юза, в тормозном режиме системой регулирования напряжения генератора также используется сигнал по току якоря ТЭД устойчивой колесной пары (см. рис. 4.4). Токи всех ТПТ поступают в узел max, и в СУ проходит наибольший ток ТПТ $I_{a \text{ max}}$. Это позволяет в значительной мере снизить вероятность развития юза колесных пар. До тех пор пока останется хотя бы один ТПТ, связанный с двигателями устойчиво работающих колесных пар, не произойдет существенного изменения сигнала по току I_a , следовательно, на прежнем уровне останется ток возбуждения двигателей $I_{\text{в}}$ и тормозная сила B .

5.6. Регулятор напряжения

Источником стабилизированного напряжения на тепловозе является машина постоянного тока с независимым возбуждением — стартер-генератор СТГ (см. рис. 2.3, 4.17). Он используется для питания цепей управления и вспомогательных систем. Кроме того, от него получает питание обмотка возбуждения синхронного возбудителя (см. рис. 4.17).

На тепловозах приняты два номинала напряжения на выходе стартер-генератора: 110 В и 75 В.

В том случае, если напряжение стартер-генератора поддерживается постоянным, напряжение на выходе синхронного возбуждателя будет пропорционально $n_{\text{диз}}$:

$$U_{\text{В}} \approx E_{\text{В}} = 4,44 k_{\text{об}} w f \Phi_{\text{В}},$$

где $E_{\text{В}}$ — ЭДС возбуждателя;

w , $k_{\text{об}}$ — число витков и обмоточный коэффициент обмотки якоря возбуждателя;

$f \sim n_{\text{диз}}$ — частота перемагничивания обмотки якоря;

$\Phi_{\text{В}}$ — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения.

Поддержание $U_{\text{В}} \sim n_{\text{диз}}$ важно для нормальной работы системы регулирования напряжения тягового генератора.

Однако стартер-генератор имеет привод от дизеля, поэтому без применения специальных мер его напряжение также будет меняться вместе с $n_{\text{диз}}$. Чтобы на всех режимах работы дизеля напряжение на выходе стартер-генератора поддерживалось постоянным, на тепловозе применяют регулятор напряжения РН, который управляет током в обмотке возбуждения СТГ (см. рис. 2.3).

В настоящее время на тепловозах используются электронные регуляторы напряжения типов БРН и РНТ, которые в зависимости от типа аккумуляторной батареи настроены на поддержание выходного напряжения СТГ соответственно 75 ± 1 В или 110 ± 3 В.

На тепловозах серии 2ТЭ116 применяется регулятор напряжения типа РНТ-6, параметры которого приведены в табл. 5.2 [23].

Таблица 5.2

Технические характеристики регулятора напряжения РНТ-6

Параметр	Значение
Напряжение питания, В, не ниже	110
Напряжение, поддерживаемое регулятором, В	110 ± 3
Максимально допустимый ток возбуждения стартер-генератора в кратковременном режиме, А	11
Длительно допустимый ток возбуждения стартер-генератора, А	8
Время восстановления напряжения при резких изменениях нагрузки стартер-генератора, с, не более	3
Частота колебаний тока возбуждения стартер-генератора, Гц	20

Напряжение на выходе стартер-генератора:

$$U_{\text{СТГ}} = c_e n_{\text{диз}} \Phi_{\text{СТГ}} - \Delta U_{\text{СТГ}}, \quad (5.3)$$

где $\Phi_{\text{СТГ}} \sim I_B$ — магнитный поток вспомогательного генератора, создаваемый его током возбуждения I_B ;

$\Delta U_{\text{СТГ}}$ — падение напряжения на обмотке якоря стартер-генератора.

В соответствии с (5.3), для того чтобы значение $U_{\text{ВГ}}$ поддерживать постоянным, необходимо, чтобы с увеличением $n_{\text{диз}}$ величина $\Phi_{\text{СТГ}}$ пропорционально уменьшалась. Изменение среднего значения тока возбуждения I_B осуществляется управлением интервалами отключения обмотки возбуждения СТГ (снижением среднего значения I_B) с помощью тиристорного ключа.

По принципу действия РН можно представить в виде ключа К, включенного в цепь обмотки возбуждения стартер-генератора ОВ (рис. 5.14, а). В течение интервала времени τ ключ К замкнут и напряжение обмотки якоря СТГ приложено к ОВ $u_B = U_{\text{СТГ}}$ (см. рис. 5.14, б). При этом в обмотке ОВ течет ток возбуждения i_B . В течение интервала $(T - \tau)$ ключ К разомкнут и $u_B = 0$, но i_B не снижается до нуля, так как в индуктивности ОВ накапливается значительная электромагнитная энергия. На этом интервале времени ток i_B замыкается через диод Д. Отношение периода импульсов напряжения возбуждения T к времени их пропускания τ называется скважностью импульсов напряжения. Изменяя скважность импуль-

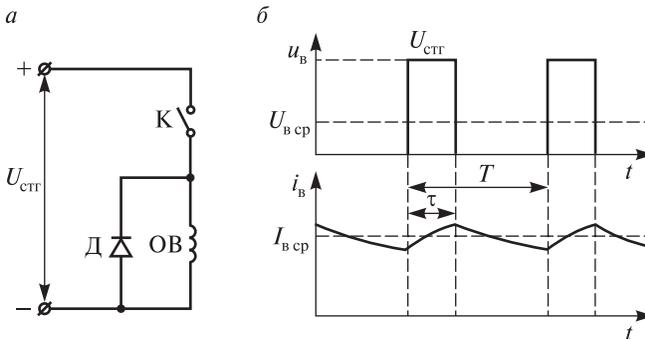


Рис. 5.14. К работе регулятора напряжения:

а — принципиальная схема; б — диаграммы напряжения и тока в обмотке возбуждения вспомогательного генератора

сов можно управлять средними величинами напряжения возбуждения $U_{в\ ср}$ и тока возбуждения $I_{в\ ср}$ СТГ, поддерживая постоянное значение $U_{СТГ}$.

Регулятор типа РНТ-6, состоит из двух частей (рис. 5.15):

- измерительного органа;
- регулирующего органа.

Измерительный орган сравнивает регулируемое напряжение с эталонным; в него входят резисторы R1, R2, R3, диод Д3, стабилитрон СТ1, диод Д1, резистор R4.

Регулирующий орган преобразует сигнал, поступающий с измерительного органа в серию импульсов, длительность которых пропорциональна сигналу измерительного органа.

Элементами регулирующего органа являются:

- основной мультивибратор, собранный на тиристорах Т1–Т3–Т4, выполняет функции модулятора ширины импульсов и одновременно является усилителем;

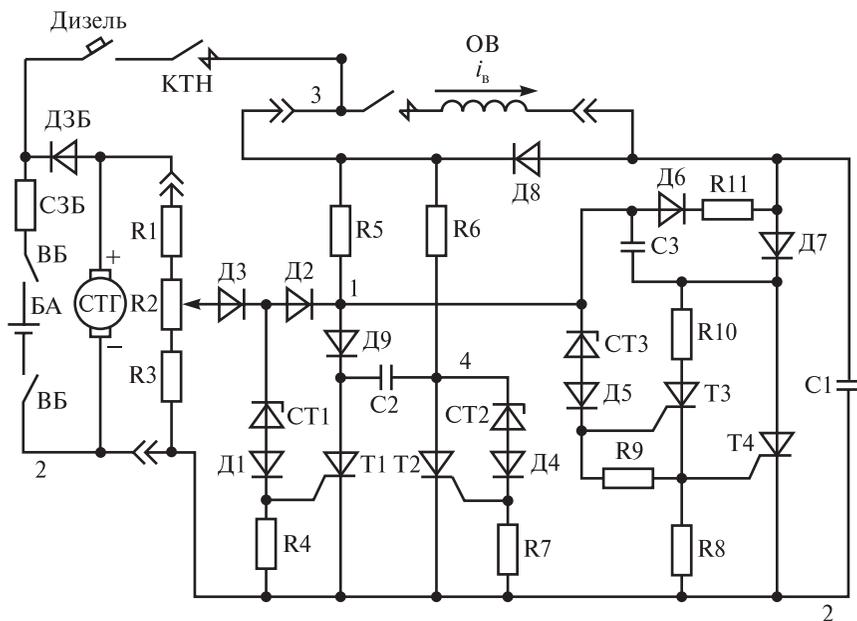


Рис. 5.15. Принципиальная схема регулятора напряжения типа РНТ-6

- вспомогательный мультивибратор, собранный на тиристорах Т1–Т2, формирует автоколебания с некоторой частотой f , определяемой постоянной времени цепи разряда конденсатора С2;
- стабилитроны СТ2, СТ3;
- конденсаторы С2, С3;
- диоды Д2, Д9, Д4, Д5, Д6, Д7;
- резисторы R5, R6, R7, R10, R9, R8, R11.

С выхода усилителя импульсы тока поступают в обмотку возбуждения СТГ.

Работа схемы регулятора происходит следующим образом.

Перед пуском дизеля, при включении тумблера «Топливный насос» (на схеме не показан) «плюс» от аккумуляторной батареи подается на РН по цепи: «плюс» БА, резистор заряда батареи СЗБ, замкнутый вспомогательный контакт контактора топливного насоса КТН (включается тумблером «Топливный насос»), резистор R5, точка 1. Потенциал в точке 1 относительно общего «минуса» цепи (шины 2—2) становится достаточным для пробоя стабилитрона СТ3 и через него начинает протекать ток по цепи: точка 1, стабилитрон СТ3, диод Д5, резисторы R9, R8. В результате этого на управляющих электродах тиристоров Т3 и Т4 усилителя оказывается положительный потенциал. Тиристоры Т3 и Т4 открываются и начинается зарядка конденсатора С3 до напряжения БА.

После пуска дизеля включается контактор регулятора напряжения КРН и обмотка возбуждения стартер-генератора ОВ оказывается подключенной на его напряжение через открытые тиристоры Т3 и Т4 по цепи: «плюс» СТГ, замкнутые контакты КТН и КРН, диод Д7, резистор R10, тиристоры Т3 и Т4, резистор R8, шина 2—2, «–» СТГ.

После этого в системе начинают происходить следующие процессы:

- в цепи обмотки ОВ начинает протекать ток i_B ; вместе с увеличением тока i_B увеличивается магнитный поток $\Phi_{СТГ}$ и значение $U_{СТГ}$ повышается. Когда напряжение СТГ становится несколько больше 110 В пробивается стабилитрон СТ1 по цепи: «плюс» СТГ, резисторы R1, R2, диод Д3, стабилитрон СТ1, диод Д1, резистор R4, «минус» СТГ;

- на управляющем электроде тиристора Т1 оказывается положительный потенциал, он открывается и от СТГ через тиристор Т1 начинает протекать ток;

– тиристор Т1 шунтирует цепь стабилитрона СТ3, сопротивление их цепи уменьшается, потенциал точки 1 снижается и стабилитрон СТ3 закрывается, а конденсатор С3 разряжается через тиристоры Т3, Т4, меняя свою полярность и тем самым закрывает тиристоры Т3, Т4;

– закрытие тиристоров Т3, Т4 приводит к снижению тока i_B , а соответственно и $U_{СТГ}$, и стабилитрон СТ1 закрывается;

– заряжается конденсатор С2 по цепи: точка 3, резистор R6, конденсатор С2, шина 2–2, «минус» СТГ; когда в точке 4 потенциал достигает значения пробоя стабилитрона СТ2, он открывается. На управляющем электроде тиристора Т2 оказывается положительный потенциал и он также открывается;

– конденсатор С2 начинает разряжаться, меняет свою полярность и тем самым закрывает тиристор Т1, потенциал точки 1 вновь увеличивается (см. выше), а тиристор Т2 остается открытым до момента открытия тиристора Т1;

– открывается стабилитрон СТ3, открываются тиристоры Т3, Т4, что приводит к увеличению напряжения вспомогательного генератора, открывается тиристор Т1 и закрывается тиристор Т2.

Далее процессы повторяются. Частота включения тиристоров Т3 и Т4 равна 11–20 Гц, т.е. регулятор работает в импульсном режиме.

Таким образом, мультивибратор Т1–Т2 создает повторяющиеся интервалы проводимости тиристоров Т3 и Т4. Эти интервалы проводимости обеспечивают среднее значение тока $I_{B\text{ ср}}$, при котором $U_{СТГ} = 100 \pm 3$ В.

Если напряжение вспомогательного генератора снижается ниже 110 В, включаются силовые тиристоры Т3 и Т4, а мультивибратор Т1–Т2 затормаживается в положении: тиристор Т1 закрыт, Т2 — открыт. Когда среднее значение напряжения СТГ превысит 110 В, пробивается стабилитрон СТ1 и мультивибратор вновь переходит в автоколебательный режим.

Уровень напряжения СТГ устанавливается с помощью переменного резистора R2. Тиристор Т3 обеспечивает устойчивое включение тиристора Т4 при пониженном напряжении аккумуляторной батареи во время пуска дизеля.

Глава 6. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

6.1. Характеристика аварийных режимов электрооборудования

В процессе эксплуатации тягового электрооборудования возможны случаи возникновения аварийных режимов, вызванных короткими замыканиями, и сопровождающиеся большими токовыми перегрузками [4]. Перенапряжения в силовой цепи могут возникать и при нормально работающем электрооборудовании, например в случае одновременного отключения поездных контакторов.

Основными причинами коротких замыканий являются пробой или механическое повреждение изоляции кабелей и катушек электрических машин, пробой полупроводниковых вентилях, круговой огонь на коллекторе тягового электродвигателя и т.д.

Значение тока короткого замыкания зависит от места расположения аварийной цепи. Если она расположена близко к источнику напряжения, ток короткого замыкания может быть в несколько десятков раз больше номинального тока. При коротком замыкании на участке цепи, наиболее удаленном от источника, ток короткого замыкания будет во много раз больше номинального тока этого участка, но ток источника при этом может почти не измениться. Особенно пожароопасными являются «неглухие» короткие замыкания, при которых переходное сопротивление аварийной цепи достаточно велико и ток не достигает значения срабатывания защитных аппаратов, а появившаяся электрическая дуга вызывает пожар.

При «глухих» коротких замыканиях, когда переходное сопротивление цепи короткого замыкания близко к нулю, ток резко увеличивается и защита, как правило, срабатывает.

Для тягового генератора тепловое действие тока короткого замыкания не представляет опасности, так как этот ток быстро уменьшается. Для него более опасны электродинамические силы, кото-

рые пропорциональны квадрату тока. Эти силы в первые моменты короткого замыкания создают значительную ударную нагрузку на роторе (в виде импульса тормозящего момента) и действуют на обмотку статора, стремясь отогнуть лобовые части обмотки. Циклические деформации лобовых частей приводят к повреждению изоляции обмотки, особенно на выходе из паза, и ее пробую.

Токовые перегрузки, возникающие при коротких замыканиях, особенно опасны для полупроводниковых выпрямителей, так как перегрузочная способность вентиля ограничена малым значением постоянной времени нагревания полупроводникового перехода и его допустимой температурой. Для лавинных диодов, используемых в выпрямительной установке, допустимая температура полупроводникового перехода составляет 175 °С в течение 5—6 мс [35]. Вследствие этого даже кратковременные токовые перегрузки могут привести к тепловому пробую вентиля. Опасно для вентиля и превышение допустимого обратного напряжения, хотя в лавинных вентилях, которые применяются в ВУ, удельные нагрузки при пробое значительно меньше, чем в обычных кремниевых (так как пиковые нагрузки распространяются в них по всей площади *p-n*-перехода).

Кроме того, ток короткого замыкания может вызвать чрезмерный перегрев токопроводящих элементов и «сваривание» контактов коммутационных аппаратов в случае, если последние были выбраны без учета токов короткого замыкания. Электродинамические действия тока короткого замыкания могут привести к разрушениям электрических аппаратов, машин и других устройств, при проектировании которых не были учтены их возможные значения.

Поэтому системы защиты электрооборудования локомотива разрабатываются с учетом условий его работы и возможных значений перегрузок при аварийных режимах.

На электровозе постоянного тока силовая схема заземлена (см. рис. 2.2), поэтому при коротком замыкании на землю в силовой цепи возникает очень большой ток, который может привести к серьезным повреждениям оборудования. Токи короткого замыкания настолько велики, что могут сгореть или разрушиться кабели, шины и другие токоведущие части. Возникающие при этом электромагнитные силы разрушают изоляторы и другие детали электротехнических установок. Простейшие защитные аппараты — плавкие пре-

дохранители — защитить силовую цепь электровоза не могут. При коротком замыкании ток растет очень быстро, а плавкая вставка сгорает не сразу, так как обладает значительной тепловой инерцией. При очень большом токе и высоком напряжении, даже после того как плавкая вставка сгорит, между зажимами, где она была включена, может возникнуть электрическая дуга. Для быстрого отключения силовой цепи от контактной сети при коротком замыкании служат автоматические быстродействующие выключатели (см. п. 2.2.1).

Быстродействующий выключатель регулируют на определенный ток уставки защищаемой цепи, по достижении которого он срабатывает. Этот ток называют уставкой быстродействующего выключателя. После того как ток достигнет значения уставки, через время t_c , которое называют *собственным временем выключателя*, начнут расходиться его контакты (рис. 6.1, а). Параметры быстродействующего выключателя приведены в табл. 10.3.

Если короткое замыкание на электровозе постоянного тока произойдет в цепи за тяговыми двигателями, соединенными последо-

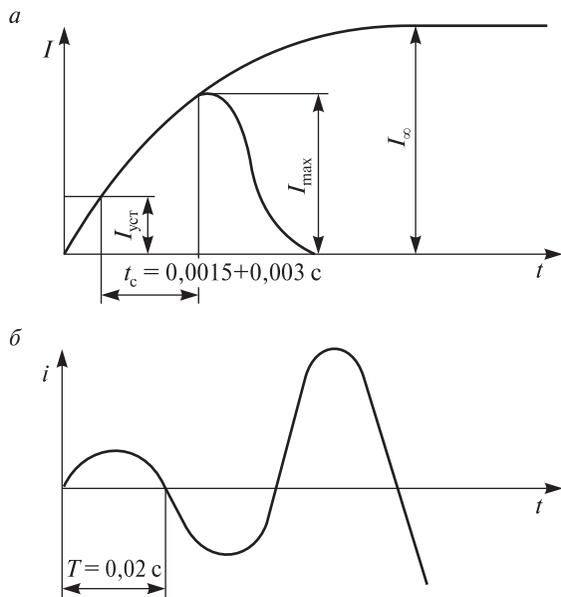


Рис. 6.1. Изменение тока при коротких замыканиях в силовой цепи электровоза

вательно, то быстродействующий выключатель может не сработать, так как ток короткого замыкания будет невелик. Учитывая это, в цепи двигателей дополнительно применяют дифференциальное реле, которое при срабатывании отключит быстродействующий выключатель.

В силовой цепи электровоза переменного тока отключение силовой цепи от контактной сети при перегрузках и коротких замыканиях выполняет главный выключатель (см. п. 2.2.2). Вследствие значительного индуктивного сопротивления силовых цепей электровоза переменный ток при перегрузках и коротких замыканиях не возрастает так резко, как постоянный (см. рис. 6.1, б). Кроме того, переменный ток изменяется синусоидально и поэтому проходит через нулевые значения. Благодаря этому легче разорвать цепь переменного тока и главному выключателю не требуется такого высокого быстродействия, как быстродействующему выключателю. Параметры главного выключателя приведены в табл. 10.2.

На электровозе переменного тока заземлена обмотка высокого напряжения тягового трансформатора, а вторичная обмотка трансформатора, выпрямители и тяговые двигатели не соединены с землей (см. рис. 2.3). Поэтому здесь необходимо защищать силовые цепи от замыканий на корпус электровоза. Нарушение изоляции в одной точке силовой цепи не приведет к повреждению, но замыкание в двух точках уже создает аварийный режим.

Защита от пробоя на корпус осуществляется с помощью реле заземления. Катушка реле заземления соединена с корпусом локомотива и включена в цепь выпрямленного напряжения к точкам силовой цепи, имеющим равные потенциалы. В случае короткого замыкания через катушку реле заземления образуется цепь выпрямленного тока, реле срабатывает и отключает главный выключатель.

На тепловозе силовая схема также не имеет заземления. Для защиты тягового электрооборудования от перегрузок и короткого замыкания здесь используются реле максимального тока и реле заземления. Срабатывание одного из этих аппаратов приводит к отключению возбуждения тягового синхронного генератора.

В общем случае в трехфазных цепях различают однофазное, двухфазное и трехфазное короткое замыкание (рис. 6.2). При трехфазном коротком замыкании все три фазы оказываются в одина-

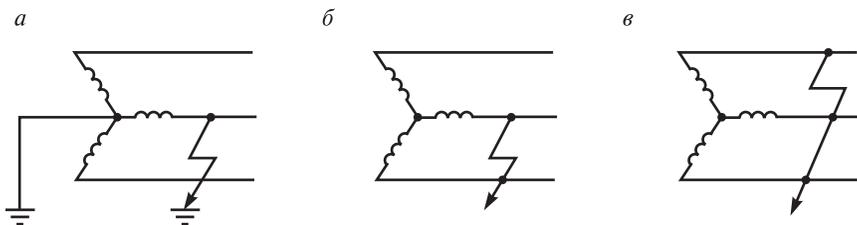


Рис. 6.2. Виды коротких замыканий:
a — однофазное; *б* — двухфазное; *в* — трехфазное

ковых условиях, характеризующихся сохранением симметрии токов и напряжений, поэтому трехфазное короткое замыкание называется *симметричными*. Двухфазное короткое замыкание может возникнуть при одновременном нарушении изоляции двух фаз генератора, сопровождается нарушением симметрии токов и напряжений в различных фазах и поэтому является более сложным видом короткого замыкания. Поскольку силовая схема тепловоза не заземлена, для ее трехфазной цепи наиболее вероятными являются двух- и трехфазное короткое замыкание.

При однофазном коротком замыкании появляется электрическая дуга между токоведущим элементом и заземленным корпусом. Следовательно, возможность возникновения пожара в однопроводной системе значительно больше.

6.2. Внутренние короткие замыкания в силовых цепях

К внутренним коротким замыканиям относят замыкания в цепях «синхронный генератор—выпрямительная установка» на тепловозе или «тяговый трансформатор—преобразователь» — на электровозе.

6.2.1. Короткое замыкание в фазах тягового генератора

Рассмотрим трехфазное короткое замыкание цепи, питающейся от генератора. Режимы замыкания будем рассматривать применительно к тепловозному синхронному генератору ГС-501А с демпферной обмоткой. Демпферная обмотка представляет собой короткозамкнутую «беличью клетку» из медных стержней, вложенных в пазы полюсов генератора. При наличии демпферной обмотки

в первый момент режима короткого замыкания амплитуда тока в обмотке статора больше, чем у генератора без демпферной обмотки. Однако относительное активное сопротивление демпферной обмотки значительно больше сопротивления обмотки возбуждения и ток короткого замыкания быстро затухает. Особую роль демпферная обмотка играет при несимметричных коротких замыканиях синхронного генератора: если генератор не имеет демпферной обмотки, на свободной фазе могут возникать перенапряжения, кратность которых по отношению к напряжению перед коротким замыканием может составлять 5—9 его фазных значений U_{ϕ} [4]. При наличии на роторе демпферной обмотки эти перенапряжения отсутствуют.

Поскольку режимы короткого замыкания очень быстротечны, а система регулирования напряжения генератора инерционна, будем считать, что возбуждение генератора на аварийном режиме не изменится. Симметричность токов и напряжений при «глухом» трехфазном коротком замыкании сохраняется, что позволяет рассмотреть переходный процесс на примере одной фазы (рис. 6.3, а).

Активное и индуктивное сопротивление короткозамкнутой цепи состоит из соответствующих сопротивлений фазы генератора r_1 , x_1 и внешней цепи $r_{вц}$, $x_{вц}$:

$$r_k = r_1 + r_{вц}; \quad x_k = x_1 + x_{вц}.$$

Полное сопротивление короткозамкнутой цепи

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \quad \text{или} \quad Z_k = \sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2},$$

где ω — частота напряжения источника;

L_k — индуктивное сопротивление цепи.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для аварийной цепи можно записать

$$u = i_k r_k + L_k \frac{di_k}{dt}. \quad (6.1)$$

Уравнение (6.1) имеет решение:

$$i_k = (I_{п\ m}) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + A e^{-\frac{t}{T_a}},$$

где $(I_{\Pi})_m = \frac{U_m}{Z_{\kappa}}$ — амплитудное значение периодического тока короткого замыкания;

U_m — амплитудное значение напряжения синхронного генератора;
 α — угол, определяющий значение напряжения в момент возникновения короткого замыкания (при $t = 0$);

A — постоянная, определяемая из начальных условий короткого замыкания;

φ_{κ} — фаза между напряжением и током в аварийной цепи (зависит от соотношения активного r_{κ} и индуктивного x_{κ} сопротивлений).

$T_a = \frac{L_{\kappa}}{r_{\kappa}}$ — постоянная времени аperiodической составляющей тока короткого замыкания.

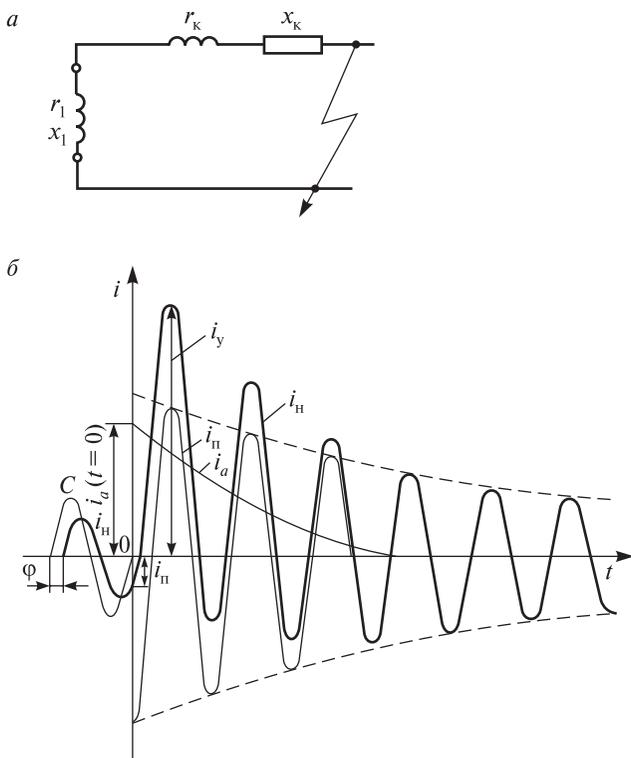


Рис. 6.3. К расчету короткого замыкания в фазе синхронного генератора: *а* — принципиальная схема короткозамкнутой фазы генератора; *б* — характеристика изменения тока короткого замыкания в фазе генератора

При $t = 0$ ток короткого замыкания определяется по зависимости

$$i_{к0} = (I_{\Pi})_m \sin(\alpha - \varphi_{к}) + A.$$

Ток нагрузки цепи в момент до возникновения короткого замыкания равен

$$i_{н0} = (I_{н})_m \sin(\alpha - \varphi),$$

где $(I_{н})_m$ — амплитудное значение тока нагрузки в цепи до возникновения короткого замыкания;

φ — фаза между напряжением и током нагрузки.

Так как при $t = 0$ в силу инерции процесса значение тока короткого замыкания должно быть равно току нагрузки перед коротким замыканием, то можно записать:

$$(I_{\Pi})_m \sin(\alpha - \varphi_{к}) + A = (I_{н})_m \sin(\alpha - \varphi),$$

откуда

$$A = (I_{н})_m \sin(\alpha - \varphi) - (I_{\Pi})_m \sin(\alpha - \varphi_{к}).$$

Учитывая выражение для величины A , можно определить полный ток короткого замыкания:

$$i_{к} = (I_{\Pi})_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{к}) + \left[(I_{н})_m \sin(\alpha - \varphi) - (I_{\Pi})_m \sin(\alpha - \varphi_{к}) \right] e^{-\frac{t}{T_a}}.$$

Для упрощения расчетов и наглядности переходных процессов в короткозамкнутых цепях ток короткого замыкания рассматривают состоящим из периодической составляющей (принужденной), изменяющейся во времени (рис. 6.3, б):

$$i_{\Pi} = (I_{\Pi})_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{к}),$$

и аperiodической составляющей (свободной):

$$i_a = \left[(I_{н})_m \sin(\alpha - \varphi) - (I_{\Pi})_m \sin(\alpha - \varphi_{к}) \right] e^{-\frac{t}{T_a}} = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}},$$

затухающей с постоянной времени T_a и зависящей от соотношения $L_{к}$ и $r_{к}$.

Тогда ток короткого замыкания можно представить в виде суммы двух токов

$$i_{\text{к}} = i_{\text{п}} + i_{\text{а}}. \quad (6.2)$$

Значение периодического тока $i_{\text{п}}$ зависит от ЭДС генератора и сопротивления цепи короткого замыкания. В результате размагничивающего действия тока статора и действий свободных токов в обмотке возбуждения и в демпферной обмотке в первый момент короткого замыкания ЭДС генератора остается неизменной.

Так как обмотка возбуждения и демпферный контур обладают и активным сопротивлением, затухание в них свободных токов приведет к уменьшению магнитного потока генератора, его ЭДС и амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания. Таким образом, переходный процесс короткого замыкания определяется временем затухания свободных токов в обмотке возбуждения и в демпферном контуре.

Когда свободные токи в контурах исчезнут, установится режим короткого замыкания, при котором ЭДС генератора и ток короткозамкнутой цепи имеют постоянные значения.

Начальное значение апериодического тока $i_{\text{а}0}$ зависит от тока нагрузки, протекающего в цепи перед коротким замыканием $i_{\text{н}0}$, и периодического тока короткого замыкания $i_{\text{п}0}$ при $t = 0$ (рис. 6.3, б). В соответствии с (6.2) имеем:

$$i_{\text{к}0} = i_{\text{н}0} = i_{\text{а}0} + i_{\text{п}0} \quad \text{или} \quad i_{\text{а}0} = i_{\text{н}0} - i_{\text{п}0}.$$

Из последнего выражения видно, что при $i_{\text{н}0} = 0$

$$i_{\text{а}0} = -i_{\text{п}0}. \quad (6.3)$$

Таким образом, наибольшее начальное значение $i_{\text{а}0}$ будет тогда, когда ток нагрузки, предшествующей короткому замыканию, будет равен нулю, а периодическая составляющая тока короткого замыкания равна своему амплитудному значению $(I_{\text{а}})_{\text{м}} = (I_{\text{п}})_{\text{м}}$.

Наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания называется *ударным током короткого замыкания*. Определяют ударный ток в первый полупериод после начала короткого замыкания. Так как наибольшее значение тока короткого замыкания получается, когда $(I_{\text{а}})_{\text{м}} = (I_{\text{п}})_{\text{м}}$, то ударный ток

$$i_y = (I_{\Pi})_m + (I_{\Pi})_m e^{-\frac{t}{T_a}}.$$

Введя понятие ударного коэффициента $k_y = 1 + e^{-\frac{t}{T_a}}$, получим:

$$i_y = k_y (I_{\Pi})_m. \quad (6.4)$$

Ударный коэффициент показывает, во сколько раз ударный ток больше значения периодического тока. Определим значения ударного коэффициента в зависимости от соотношения L_k и r_k .

Если в цепи короткого замыкания $L_k = 0$, то $T_a = 0$, $e^{-\infty} = 0$ и $k_y = 1$. Это значит, что в цепи короткого замыкания при $L_k = 0$ апериодический ток короткого замыкания не возникает, а ударный ток будет равен периодическому току.

Если в цепи короткого замыкания $r_k = 0$, то $T_a = \infty$, $e^{-0} = 1$ и $k_y = 2$. Ударный ток в этом случае имеет максимальное значение. Апериодическая составляющая тока короткого замыкания не будет затухать.

Действительные цепи короткого замыкания не могут иметь чисто активного или чисто индуктивного сопротивления, поэтому можно считать, что $1 < k_y < 2$.

Как видно из рис. 6.3, полный ток короткого замыкания, являясь суммой периодического и апериодического токов, из-за апериодической составляющей получается несимметричным относительно оси времени. Осью симметрии для полного тока является кривая затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания.

В общем случае первый момент короткого замыкания, когда в обмотке возбуждения и демпферном контуре навелись свободные токи и ЭДС генератора имеет наибольшее значение, принято называть *сверхпереходным режимом короткого замыкания*. Этот режим характеризуется сверхпереходным индуктивным сопротивлением генератора x_d'' , сверхпереходной ЭДС, E'' и сверхпереходным током I_{Π}'' .

Начальный момент короткого замыкания генератора без демпферного контура характеризуется переходным индуктивным сопротивлением x_d' переходной ЭДС генератора E' и переходным током I_{Π}' .

Сверхпереходным (переходным) током называется действующее значение периодической составляющей тока за первый период короткого замыкания. Так как периодический ток изменяется по синусоидальному закону, его действующее значение можно определить как

$$I''_{\Pi} = \frac{(I''_{\Pi})_m}{\sqrt{2}} = \frac{E''}{Z''_K},$$

где E'' — действующее значение сверхпереходной ЭДС.

Полное сопротивление короткозамкнутой цепи на сверхпереходном режиме

$$Z''_K = \sqrt{r_K^2 + (x''_d)^2}.$$

Теперь можно определить действующее значение ударного тока сверхпереходного режима. Условно принимают, что на первом периоде $i_K = i_y = \text{const}$. Тогда из (6.2) имеем

$$i_y = i_{\Pi} + i_a, \quad (6.5)$$

или в действующих значениях

$$I_y = \sqrt{(I_{\Pi})^2 + I_a^2}. \quad (6.6)$$

С другой стороны, в соответствии с (6.4) значение ударного тока определено как $i_y = k_y (I_{\Pi})_m$.

Приравняв (6.5) и (6.4) и перейдя к действующим значениям, получим

$$I_a = (k_y - 1)I_{\Pi}.$$

Следовательно, действующее значение ударного тока сверхпереходного режима

$$I_y = \sqrt{(I_{\Pi})^2 + [(k_y - 1)\sqrt{2} I_{\Pi}]^2},$$

или

$$I_y = I_{\Pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

При трехфазном коротком замыкании мгновенные значения напряжений в каждой фазе цепи будут различными, и начальные значения периодических и аperiodических токов короткого замыкания в каждой фазе также будут различными. Следовательно, ударные токи короткого замыкания в каждой фазе неодинаковы и не будут совпадать по времени. Если в момент короткого замыкания при $t = 0$ начальное значение аperiodического тока в одной фазе равно амплитудному значению периодического тока, то в двух других фазах значения аperiodических токов будут меньшими. Ударные токи в этих фазах также будут меньшими и не будут совпадать по времени. В этом случае за расчетный принимается ударный ток фазы, который имеет наибольшее значение.

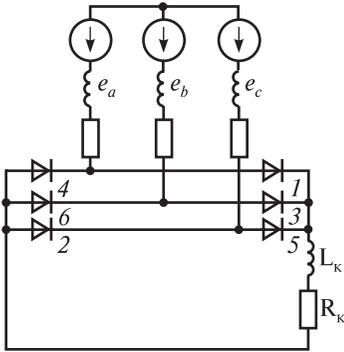
6.2.2. Электрический пробой плеча выпрямительной установки

К внутренним коротким замыканиям относят также замыкания в цепях ВУ, основной причиной которых является сквозной пробой ее плеча. Наиболее вероятным моментом пробоя вентилей является момент окончания коммутации и момент максимума обратного напряжения на них. При анализе этого вида аварийного режима влиянием параметров нагрузки можно пренебречь, так как даже нагрузка с большой индуктивностью практически не изменяет амплитуды тока в вентилях [4].

Рассмотрим процесс протекания короткого замыкания при пробое плеча ВУ. Пусть пробой плеча 5 наступил в момент коммутации тока из плеча 5 в плечо 1 при равенстве ЭДС фаз a и c (рис. 6.4, a). В этом случае через вентили 1 и 5 образуется контур двухфазного короткого замыкания, а токи в плечах равны между собой $i_{п1} = i_{п5}$ (рис. 6.4, b).

В момент времени $t = \frac{\pi}{2\omega}$ (где ω — частота фазного напряжения) ЭДС фазы b становится положительной, открывается вентиль 3 и происходит переход двухфазного короткого замыкания в трехфазное. В результате этого ток появляется в плече 3; в плече 5 ток еще больше возрастает, а в плече 1 снижается. Второй интервал продолжается до тех пор, пока $i_{п1} > 0$. На третьем интервале снова будет наблюдаться двухфазное короткое замыкание, но с новыми начальными условиями; так как $i_{п1} = 0$ $i_{п3} = i_{п5}$.

а



б

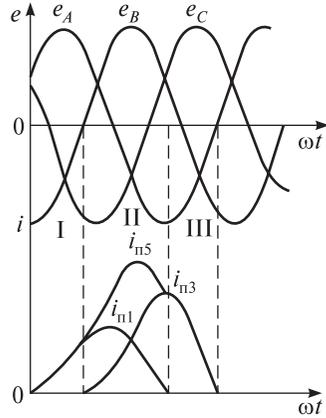


Рис. 6.4. Кривые фазных ЭДС генератора (а) и токи при пробое плеча выпрямительной установки (б)

Анализ процессов внутреннего короткого замыкания при пробое плеча ВУ показывает, что наибольших значений ток короткого замыкания достигает на втором интервале, когда происходит переход двухфазного короткого замыкания в трехфазное.

При пробое плеча ВУ в момент максимума обратного напряжения на вентиле последовательность режимов следующая: трехфазное короткое замыкание, двухфазное короткое замыкание фаз *b* и *c* через плечи 3 и 5, режим нормальной работы; двухфазное замыкание фаз *a* и *c* через плечи 1 и 5, трехфазное короткое замыкание и т.д.

В результате, в системе СГ—ВУ из-за малых значений активных сопротивлений фаз генератора будет наблюдаться режим непрерывного тока через пробитое плечо, т.е. чередование двухфазных и трехфазных замыканий. При этом токи фаз СГ и плеч ВУ будут содержать установившиеся периодические составляющие и затухающие аperiodические. Испытания, проведенные на генераторе ГС-501А, показали, что при пробое одного плеча амплитуда ударного тока короткого замыкания через исправное плечо выпрямителя может достигать 5—5,5 кА.

Пробой вентилей в другие моменты времени, например в момент приложения к нему максимального обратного напряжения, сопро-

вождается меньшим по длительности и амплитуде током короткого замыкания.

6.3. Внешние короткие замыкания в силовых цепях

Короткие замыкания в цепи выпрямленного тока генератора — *внешние короткие замыкания* — чаще всего возникают при появлении кругового огня на коллекторе тягового двигателя или из-за нарушения электрической прочности изоляции в силовой цепи.

Амплитуда и длительность токов короткого замыкания определяются в этом случае режимом работы тягового электрооборудования, значениями фазных напряжений в момент возникновения короткого замыкания и индуктивным сопротивлением обмоток. Однако из-за насыщения магнитных цепей тяговых электродвигателей (в результате протекания больших токов) индуктивность обмоток резко снижается. Поэтому можно считать, что индуктивность цепи короткого замыкания практически не влияет на переходной процесс.

При анализе и расчете внешних коротких замыканий, не внося существенных погрешностей, считают, что выпрямительные установки генератора работают параллельно и независимо друг от друга; ЭДС генератора синусоидальна; обратный ток вентиля пренебрежимо мал. Кроме того, при исследовании режимов короткого замыкания не учитывается изменение возбуждения тягового генератора, так как его система автоматического регулирования инерционна, а процесс короткого замыкания развивается быстро [4].

Трехфазная мостовая выпрямительная установка при внешнем глухом коротком замыкании работает в третьем режиме ($\pi/3 < \gamma < 2\pi/3$, $\alpha' = \pi/6 = \text{const}$) (см. п. 3.10), когда одновременно открыты три (или четыре) диода: два в катодной группе и один в анодной (или два в катодной и два в анодной) или наоборот. Таким образом, в рассматриваемом режиме в любой момент времени все фазы синхронного генератора замкнуты накоротко через вентили, что эквивалентно трехфазному короткому замыканию источника питания (рис. 6.5, а).

Физическая природа образования токов при внешнем коротком замыкании аналогична внутреннему короткому замыканию. Токи фаз СГ и плеч ВУ содержат установившиеся периодические составляющие и затухающие аperiodические.

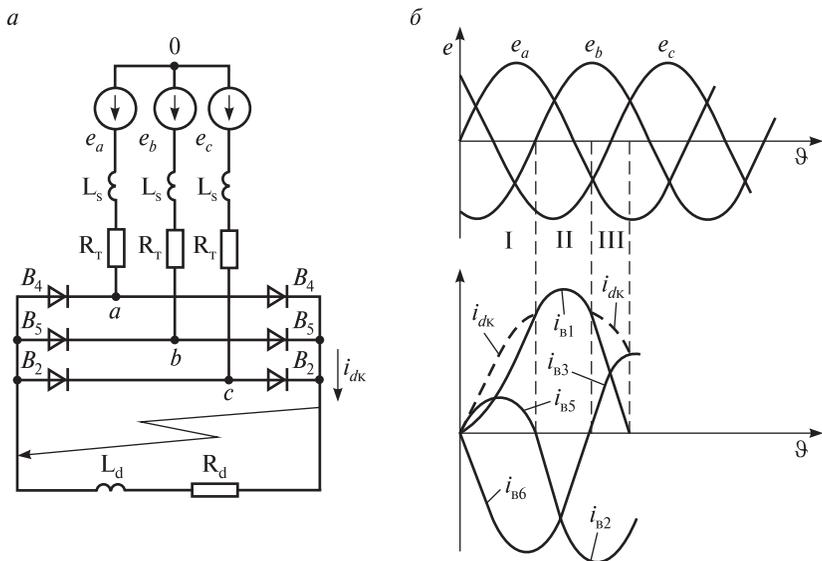


Рис. 6.5. Эквивалентная схема (а) и диаграммы фазных ЭДС и токов вентилей (б) при внешнем коротком замыкании для системы «синхронный генератор—выпрямительная установка»

Пусть короткое замыкание на выходе выпрямителя произошло в момент перехода через нуль ЭДС фазы a , что, как было показано в п. 6.2.1, соответствует максимуму тока этой фазы. Диаграмма фазных ЭДС генератора и токов вентилей для этого случая представлена на рис. 6.5, б. Непосредственно перед коротким замыканием ток проводили вентили B_5 и B_6 ; в момент возникновения короткого замыкания открывается вентиль B_1 . Поскольку фаза a включена на вентиль B_1 , максимальный ток короткого замыкания будет протекать именно через вентиль B_1 .

Ток короткого замыкания в цепи постоянного тока i_{dk} равен (рис. 6.6, б): на интервале I сумме токов через B_1 и B_5 — $i_{B1} + i_{B5}$; на интервале II — току через вентиль B_1 — i_{B1} ; на интервале III — сумме токов через B_1 и B_3 — $i_{B1} + i_{B3}$.

Если в момент возникновения короткого замыкания ЭДС фазы генератора не равна нулю, то аварийный ток будет меньше.

В случае «глухого» внешнего короткого замыкания в соответствии с (6.4) максимальное значение тока короткого замыкания не

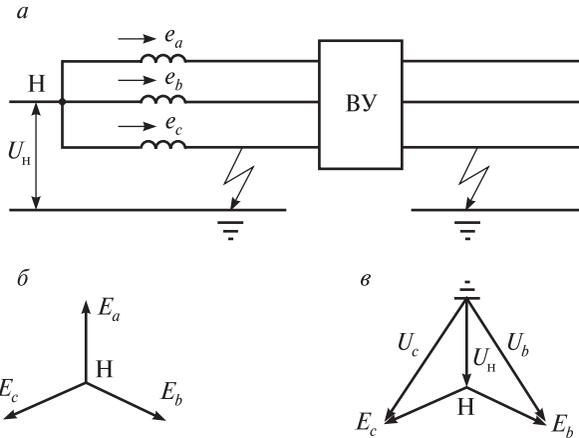


Рис. 6.6. Эквивалентная схема пробоя силовой цепи на землю (*а*) и векторные диаграммы напряжений в силовой цепи тепловоза:
б — нормальный режим; *в* — при замыкании фазы А на землю

превышает двойной амплитуды установившегося значения периодической составляющей тока короткого замыкания.

6.4. Замыкание силовой цепи на «землю»

На тепловозах силовые цепи тягового электрооборудования не имеют заземления, поэтому пробой на «землю» одной фазы синхронного генератора или одной шины выпрямленного тока, не вызывает короткого замыкания (не образуется замкнутой цепи) и не сопровождается снижением междуфазных напряжений и появлением повышенных токов в цепи [4]. Однако замыкание силовой цепи на «землю» создает дополнительные условия для внутренних и внешних коротких замыканий.

Рассмотрим характер явлений при однофазных замыканиях на «землю». В нормальном режиме векторы фазных напряжений каждой обмотки генератора образуют симметричную «звезду» (см. рис. 6.6, *а*). При замыкании на «землю» одной фазы, например *а*, ее напряжение относительно «земли» снижается до нуля. Напряжение нейтрали U_H по отношению к «земле» становится равным по величине и обратным по знаку ЭДС заземлившейся фазы

$$\bar{U}_H = -\bar{E}_a$$

Учитывая это, получим:

$$\begin{aligned}\bar{U}'_b &= -\bar{E}_a + \bar{E}_b = \bar{U}_{ba}; \\ \bar{U}'_c &= -\bar{E}_a + \bar{E}_c = \bar{U}_{ca},\end{aligned}$$

т.е. напряжение неповрежденных фаз b и c относительно «земли» повышается до междуфазного, или в $\sqrt{3}$ раза.

Повышение напряжения неповрежденных фаз относительно «земли» может привести к электрическому пробоем их изоляции, что повысит вероятность возникновения двухфазного или трехфазного короткого замыкания. Для защиты силовой цепи от таких режимов применяют схему с реле заземления, включенным через резистор между «минусом» цепи и корпусом тепловоза. В этом случае не происходит повышение потенциала неповрежденных фаз относительно «земли» и режим работы силовой схемы тепловоза будет подобен режимам работы электрической сети с заземленной через переходное сопротивление нулевой точкой.

6.5. Влияние системы регулирования напряжения тягового генератора тепловоза на процесс короткого замыкания

Автоматическая система регулирования напряжения тягового генератора оказывает определенное влияние на протекание процесса короткого замыкания в силовой цепи. Система регулирования имеет собственное время срабатывания. Поэтому при коротком замыкании она вступает в действие, но с запаздыванием. Полное время запаздывания изменения напряжения генератора зависит от собственного времени запаздывания системы регулирования и от индуктивности обмотки возбуждения генератора [4].

Если инерция системы регулирования достаточно высока, то при коротком замыкании в системе СГ—ВУ система регулирования вступает в действие после затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания. Следовательно, такая система влияет только на периодическую составляющую тока короткого замыкания, которая из-за увеличения напряжения генератора под действием работы автоматического регулятора возрастает.

При коротких замыканиях в цепях, источником энергии в которых является синхронный генератор с самовозбуждением, оборудованных быстродействующими системами регулирования, влияние на переходный процесс происходит раньше, когда еще не исчезнут свободные токи в обмотках ротора. Напряжение генератора будет уменьшаться несколько медленнее по сравнению с напряжением генератора при инерционном регуляторе. Ток короткого замыкания при этом будет плавно уменьшаться до установившегося значения, которое всегда будет больше, чем в цепи с генератором без регулятора напряжения.

Таким образом, любая система регулирования напряжения синхронных генераторов из-за своей инерции не оказывает влияния на значение ударного и сверхпереходного токов.

На рис. 6.7 приведены осциллограммы токов короткого замыкания в фазах СГ [4]. Каждый из фазных токов i_a , i_b и i_c статора

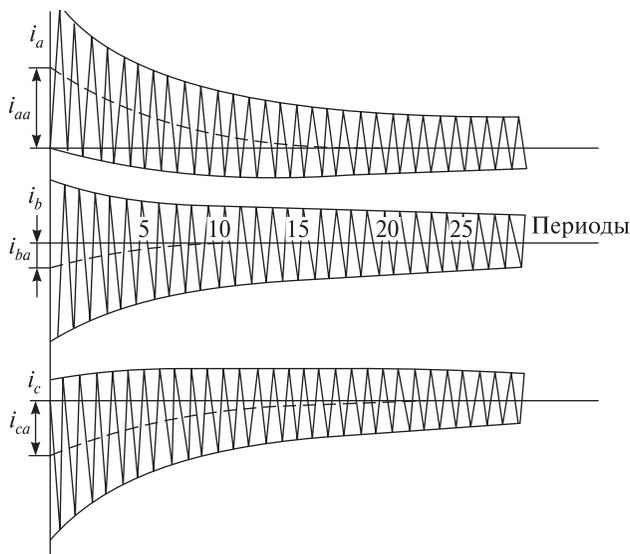


Рис. 6.7. Осциллограммы токов короткого замыкания в фазах обмоток статора синхронного генератора ГС-501А:

i_a , i_b , i_c — мгновенные значения фазных токов в обмотках статора; i_{aa} , i_{ba} , i_{ca} — максимальные значения аperiodических составляющих токов коротких замыканий в фазах

содержит аperiodические составляющие, зависящие по величине от того, при каком значении фазных напряжений произошло короткое замыкание. По осциллограммам можно установить, что короткое замыкание произошло в тот момент, когда напряжение фазы a равнялось нулю. В этом случае аperiodическая составляющая i_a достигает своего максимально возможного значения (см. п. 6.2.1).

При нулевом значении сверхпроводного сопротивления фаз обмоток генератора представленные процессы продолжались бы неопределенно долго. В действительности активные сопротивления обмотки статора и ротора вызывают затухание токов до установившихся значений.

Как было ранее отмечено, при глухом коротком замыкании выпрямительная установка работает в режиме, при котором ток проводят одновременно три или четыре плеча моста. В интервале проводимости плеча фазный ток генератора одновременно является и током плеча. Например, часть кривой тока короткого замыкания фазы a , расположенная выше оси абсцисс, является кривой тока плеча $1 ВУ$ (см. рис. 6.4, a); часть кривой тока, расположенная ниже оси абсцисс, соответствует току плеча $4 ВУ$. Из-за наличия аperiodической составляющей в фазных токах диоды моста окажутся нагруженными неодинаково: диод плеча катодной группы будет испытывать в несколько раз большие перегрузки, чем диоды плеча анодной группы (см. рис. 6.7). Зная мгновенные значения токов фаз, легко определить температурную перегрузку вентилялей каждого плеча $ВУ$.

6.6. Требования к устройствам защиты силовой цепи

Для предотвращения неисправностей тягового электрооборудования, которые могут возникать в аварийных режимах, силовая цепь имеет устройства защиты [4]. Эти устройства должны обеспечивать защиту всех агрегатов и устройств энергетической цепи. Однако учитывая, что наиболее чувствительным агрегатом к коротким замыканиям является выпрямительная установка, обеспечение ее защиты является основной задачей. В п. 6.2 было показано, что ударные токи короткого замыкания достигаются в течение первого полупериода после начала короткого замыкания. Поэтому особое внимание при проектировании систем защиты должно быть обращено к показателям их быстродействия.

Защиту ВУ от внешних коротких замыканий можно осуществить тремя основными способами:

- размыканием силовой цепи;
- коротким замыканием статорных обмоток СГ, при этом его напряжение резко снижается (см. рис. 4.19);
- отключением возбуждения генератора.

Первый способ получил широкое распространение на электроподвижном составе [24]. Он обеспечивает достаточно высокое быстродействие, однако его применение требует использования дополнительного силового оборудования (быстродействующие выключатели, фидерные предохранители), что значительно увеличивает габариты и стоимость электрооборудования, без которого на тепловозах можно обойтись.

Использование в аварийных режимах метода замыкания статорных обмоток СГ также требует установки тяжелого высоковольтного оборудования.

В тепловозной энергетической цепи наиболее просто защита от внешних коротких замыканий осуществляется отключением возбуждения генератора при помощи реле максимального тока. Однако полное время срабатывания такой защиты составляет не менее 100 мс. Исследования показывают, если время срабатывания защиты превышает 5 мс (время возникновения ударного тока), то для вентиля ВУ она не эффективна. В этом случае обеспечить надежную работу выпрямителя можно лишь используя вентили с запасом по току нагрузки, чтобы в эксплуатации их p - n -переходы не нагревались до допустимой температуры, а ток короткого замыкания не вызывал ее превышения.

Не менее важна защита от внутренних коротких замыканий в системе СГ—ВУ. В этом случае также большое значение имеет быстродействие защиты. Высокая кратность токов внутреннего короткого замыкания через исправные вентили повышает вероятность их пробоя (см. п. 6.2.2). Кроме того, прохождение больших токов через пробитый ventиль может привести к его «взрыву» и повреждению выпрямительной установки.

Эффективна защита от внутренних коротких замыканий при помощи быстродействующих плавких предохранителей. Такие предохранители изготавливают с расчетом на ток ветви ВУ и включают в

каждую ветвь. В случае сквозного пробоя плеча весь ток короткого замыкания будет протекать через поврежденную ветвь, что приведет к перегоранию плавкой вставки и отключению поврежденной ветви. При этом цепь короткого замыкания отключится раньше, чем ток достигнет максимального значения. Выпрямитель сохранит работоспособность, но допустимая мощность его уменьшится. Пробитые вентили и предохранители заменяются на стоянке или в депо.

При пробое одного вентиля в ветви возрастает обратное напряжение на втором вентиле этой же ветви. Повышение обратного напряжения на вентиле увеличивает вероятность его пробоя. Однако пробой отдельных вентилях не вызывает нарушения работы ВУ и может остаться незамеченным до сквозного пробоя плеча.

Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения надежной работы энергетической цепи она должна быть оборудована системой защиты, удовлетворяющей следующим требованиям.

1. *Быстродействие.* Цепь короткого замыкания должна отключаться с максимальной быстротой для ограничения степени разрушения тягового электрооборудования. Полное время отключения аварийной цепи складывается из времени срабатывания реагирующего органа (датчика) и времени действия отключателя.

2. *Чувствительность.* Для того чтобы защита реагировала на отклонения от нормального режима работы цепи она должна обладать заданной чувствительностью. Защита должна включаться не только при «глухом» коротком замыкании, но и при замыкании через переходное сопротивление аварийной цепи.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она могла сработать, когда изменение контролируемой величины (ток, напряжение и др.) будет наименьшим. Для тепловозных энергетических систем таким режимом будет работа на первых позициях контроллера.

Чувствительность защиты принято характеризовать коэффициентом чувствительности:

$$k = \frac{I_{\text{к min}}}{I_{\text{сз}}},$$

где $I_{\text{к min}}$ — минимальный ток короткого замыкания;
 $I_{\text{сз}}$ — ток срабатывания защиты.

3. *Надежность*. Требование надежности состоит в том, что защита должна безотказно работать в пределах установленной зоны и не должна включаться на режимах, где ее работа не предусмотрена. Надежность защиты обеспечивается простотой конструкции, уменьшением в ней количества элементов, качеством монтажных материалов, самого монтажа и контактных соединений, а также обслуживанием ее в процессе эксплуатации.

4. *Селективность*. Селективностью, или избирательностью защиты называется ее способность отключать при коротких замыканиях только поврежденный участок схемы. При этом должна сохраняться работоспособность самой энергетической системы, а аварийный режим устраняется автоматически.

Кроме того, устройства защиты должны иметь небольшие габариты, быть устойчивыми к вибрациям, просты в обслуживании и ремонте.

6.7. Применение плавких предохранителей для защиты выпрямительной установки

Выпрямительные установки тепловозов первых выпусков собирались на вентилях ВЛ-200 (рассчитанных на допустимый ток 200 А) и имели невысокую надежность. Наиболее простым способом защиты вентилях ВУ от токов коротких замыканий было использование предохранителей, выполненных на основе плавких вставок. Предохранители на основе плавких вставок отличаются высоким быстродействием, однако предназначены для защиты от токов коротких замыканий, но не перегрузки.

Особенностью использования плавких предохранителей является необходимость согласования тепловых эквивалентов предохранителей и вентилях. *Тепловым эквивалентом прибора* (предохранителя или вентиля) $I^2 t_0$ называется интеграл квадрата протекающего через прибор тока по времени его протекания:

$$I^2 t_0 = \int_0^{t_n} i^2(t) dt,$$

где t_n — время протекания тока через прибор;

$i(t)$ — функция изменения тока аварийного режима во времени.

В процессе отключения предохранителя можно выделить два характерных интервала. Первый интервал соответствует времени расплавления вставки $t_{\text{пл}}$, измеряемому от момента возникновения аварийного тока до появления дуги, а второй — времени горения дуги в предохранителе до полного перегорания плавкой вставки и отключения в цепи тока $t_{\text{д}}$. Соответственно тепловой эквивалент отключения предохранителя $I^2 t_0$ складывается из теплового эквивалента плавления вставки $I^2 t_{\text{пл}}$ и теплового эквивалента дуги $I^2 t_{\text{д}}$, т.е.

$$I^2 t_0 = I^2 t_{\text{пл}} + I^2 t_{\text{д}}.$$

Значение теплового эквивалента плавления вентилей $I^2 t_{\text{в}}$ характеризуется его типом и обычно приводится в паспорте. Для первых мгновений протекания аварийных токов (менее 0,01 с), когда тепловая энергия не успевает передаваться от вентилей к окружающей среде, значение $I^2 t_{\text{в}}$ можно считать постоянным. Для обеспечения надежной защиты вентилей плавкими предохранителями от токов коротких замыканий необходимо выполнять условие

$$I^2 t_0 < I^2 t_{\text{в}}.$$

Современные быстродействующие плавкие предохранители имеют, как правило, больший тепловой эквивалент, чем вентили, при одних и тех же значениях номинального тока. Поэтому для обеспечения эффективной защиты вентили необходимо недогружать по току или применять параллельное соединение нескольких вентилей. В тепловозных ВУ быстродействующие плавкие предохранители включали в каждую параллельную цепь.

На рис. 6.8 приведена принципиальная схема ВУ, каждое плечо которой состоит из двух параллельных ветвей, с включенными в каждой ветви плавкими предохранителями. Если в какой-то момент времени пробьет один вентиль, например вентиль ветви I плеча фазы a , то сопротивление ветви I уменьшится и большая часть фазного тока пройдет именно через аварийную ветвь. Под действием этого тока плавкая вставка предохранителя ветви I разрушается, ветвь короткого замыкания размыкается и исключается из работы

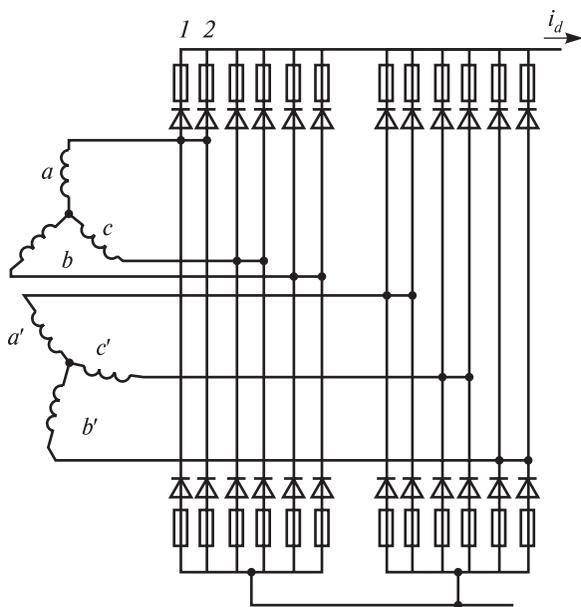


Рис. 6.8. Принципиальная схема включения плавких предохранителей в выпрямительной установке

ВУ. Очевидно, что если не восстановить работоспособность пробитой ветви или не снизить мощность энергетической установки, то ветвь 2 аварийного плеча будет перегружаться и тоже выйдет из строя.

Предохранители, предназначенные для защиты вентилях, обычно снабжены средствами сигнализации, например микропереключателями, контактная система которых срабатывает при перегорании плавкой вставки. Это позволяет обеспечить контроль состояния вентилях при эксплуатации. Пробитые вентилях и предохранители заменяются на стоянке тепловоза или в депо.

В настоящее время допустимые нагрузки вентиляхных элементов и их надежность сильно возросли (см. табл. 1.4). Поэтому в современных тепловозных ВУ предохранители не используются.

6.8. Применение реле максимального тока для защиты от коротких замыканий в силовой цепи

6.8.1. Защита от внутренних коротких замыканий

Для защиты от внутренних коротких замыканий в обмотках синхронного генератора используют реле максимального тока РМ2, катушка которого включена между нулевыми точками фаз тягового генератора (см. рис. 2.1, 6.9).

В нормальных режимах напряжение на катушке РМ2 имеет тройную частоту по отношению к частоте генератора [4] (см. рис. 3.20). Так как катушка реле имеет большое индуктивное сопротивление, то ток через нее на этих режимах меньше тока срабатывания. При внутреннем коротком замыкании между нулевыми точками «звезд» тягового генератора появляется постоянная составляющая напряжения, которая включает реле РМ2.

При срабатывании реле РМ2 его размыкающий контакт сразу разбирает цепь питания катушки контактора возбуждения генератора КВ (рис. 6.10, а). Контакт КВ размыкается и отключает

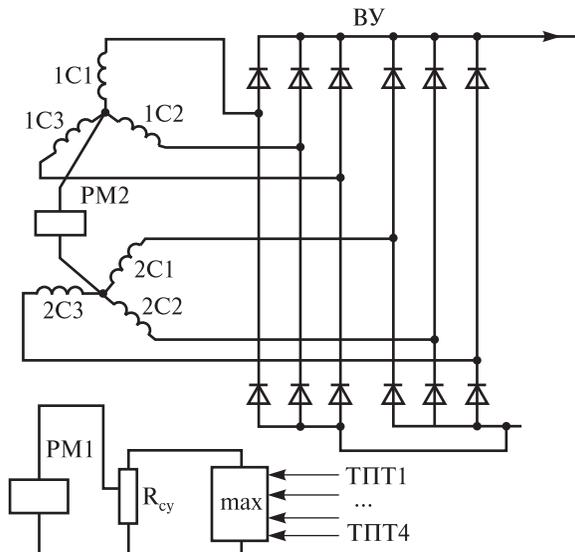


Рис. 6.9. Принципиальная схема включения реле защиты от внутренних и внешних коротких замыканий энергетической цепи тепловоза

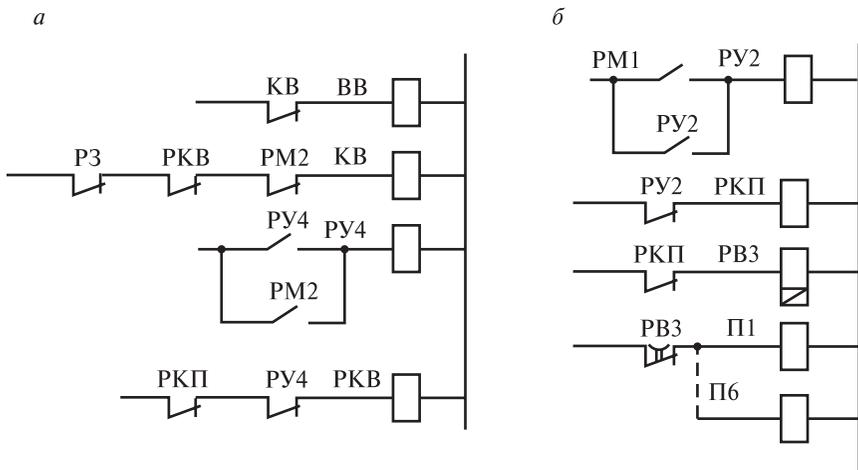


Рис. 6.10. Исполнительная схема защиты от внутренних (а) и внешних (б) коротких замыканий в силовой цепи тепловоза 2ТЭ116 (положение контактов аппаратов на схеме указано при включенном возбуждении генератора и собранной силовой схеме)

катушку контактора возбуждения возбудителя ВВ. Это вызывает выключение возбуждения тягового генератора и возбудителя. При этом вспомогательный размыкающий контакт контактора ВВ включает сигнальную лампу «Сброс нагрузки» на пульте машиниста (на рисунке не показано).

Замыкающий контакт реле РМ2 собирает цепь питания катушки реле РУ4, которое с помощью своего замыкающего контакта становится на самопитание (замыкающий контакт реле РУ4 в цепи катушки РУ4 шунтирует замыкающий контакт реле РМ2). В результате этого, даже если реле РМ2 отключится, реле РУ4 будет оставаться включенным. Размыкающий контакт реле РУ4 отключает катушку промежуточного реле возбуждения РКВ. Контакт РКВ в цепи катушки КВ также размыкается и вместе с контактом РМ2 дублирует ее отключение. Теперь, для того чтобы восстановить возбуждение генератора, нужно отключить реле РМ2 и реле РУ4. А реле РУ4, которое встало на самопитание, отключится только после перевода контроллера на нулевую позицию и выключения автомата «Управление возбуждением». Такой алгоритм защиты от внутренних коротких замыканий позволяет восстанавливать возбуждение тягового генератора только начиная с нулевой позиции.

Еще один замыкающий контакт реле РУ4 замыкает цепь питания сигнальной лампы «Силовая защита» на пульте машиниста (на рис. 6.10 не показано).

Испытания системы защиты тягового генератора с помощью реле РМ2 показали, что, если пробой плеча фазы a СГ наступает на 15-й позиции контроллера при выпрямленном напряжении $U_d = 700$ В, время срабатывания защиты составляет 0,25 с [4]. Перенапряжение на обмотке возбуждения синхронного генератора достигает 440 В. Амплитудные значения фазных токов при этом составили: $(i_a)_m = 14,2$ кА; $(i_b)_m = 18$ кА; $(i_c)_m = 16,5$ кА. Постоянная составляющая тока через катушку реле РМ2 в момент его срабатывания имела значение 0,24 А.

6.8.2. Защита от внешних коротких замыканий

Защиту энергетической цепи от внешнего короткого замыкания и перегрузки осуществляет реле максимального тока РМ1, включенное на измерение максимального тока тяговых двигателей (выпрямленного тока силовой цепи) через узел выделения максимального сигнала \max и сопротивление селективного узла R_{cy} (6.9). Если ток начинает превышать допустимое значение, напряжение на R_{cy} оказывается достаточным для включения реле РМ1. При срабатывании РМ1 его замыкающий контакт включает реле РУ2, которое с помощью своего замыкающего контакта становится на самопитание. Одновременно реле РУ2 размыкает свой контакт в цепи катушки промежуточного реле поездного режима РКП (рис. 6.10, б).

Отключившись, реле РКП выполняет переключения в схеме:

- одним контактом размыкает цепь катушки реле РКВ, что приводит к выключению контакторов КВ и ВВ (см. рис. 6.10, а) (см. п. 6.7.1). Возбуждение генератора отключается и напряжение на выходе ВУ уменьшается до нуля. Вспомогательный размыкающий контакт контактора ВВ включает сигнальную лампу «Сброс нагрузки» на пульте машиниста (на схеме не показано);

- другим контактом размыкает цепь катушки реле времени РВ3.

Реле РВ3 с выдержкой времени 0,8 с размыкает свой контакт в цепи катушек поездных контакторов П1–П6 и силовая схема тепловоза разбирается (тяговые двигатели силовыми контактами контакторов П1–П6 отключаются от ВУ).

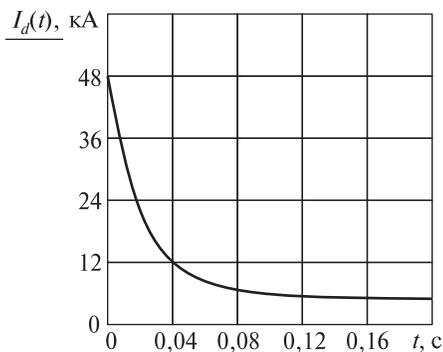


Рис. 6.11. Осциллограмма работы реле РМ1 при коротком замыкании в цепи выпрямленного напряжения. Параметры режима работы тягового генератора в момент возникновения короткого замыкания: 15-я позиция контроллера;

$$U_d = 700 \text{ В}$$

Собрать силовую схему и восстановить возбуждение тягового генератора после срабатывания реле РМ1 можно только при переводе контроллера на нулевую позицию (только в этом случае отключится самопитание реле РУ2).

Из осциллограммы аварийного режима в цепи выпрямленного напряжения, видно, что при коротком замыкании ток генератора может достигать 50 кА, а при включении реле РМ1 в течение 0,12 с снижается до 5 кА [4] (рис. 6.11).

6.9. Применение реле заземления для защиты от замыкания силовой цепи на корпус

Для выключения возбуждения тягового генератора при замыкании силовой цепи на корпус используют двухкатушечное реле заземления РЗ (рис. 6.12).

Удерживающая катушка У реле РЗ постоянно включена на напряжение цепи управления тепловоза 110 В через резистор СРЗ, однако магнитодвижущей силы катушки У недостаточно для включения реле.

Если в силовой цепи тепловоза произошло замыкание на корпус, то через рабочую катушку Р реле РЗ будет протекать ток.

Рабочая катушка Р реле РЗ подключена к выпрямительному мосту БВЗ, который соединен с корпусом тепловоза и через рубильник ВР32 с делителем напряжения СР32—СР31. Резистор СР31 соединен с «минусом» ВУ, а резистор СР32 через рубильник ВР31 — с ее «плюсом». Такое подключение катушки Р обеспечивает срабатывание реле заземления при повреждении изоляции в любой точке силовой цепи.

При нарушении изоляции силовой цепи со стороны «минуса» генератора через катушку Р реле заземления пройдет ток по цепи:

«плюс» ВУ, размыкающий контакт выключателя реле заземления ВР31, резистор цепи реле заземления СР32, размыкающий контакт выключателя реле заземления ВР32, диод Д4, резистор СР33, катушка Р3(Р), диод Д1, корпус К, соединение корпуса К с «минусовым» кабелем.

Если изоляция силовой цепи нарушена со стороны «плюса» генератора, через катушку Р реле заземления также соберется цепь: аварийный «плюсовой» кабель, соединение «плюсового» кабеля с корпусом К, диод Д2, резистор СР33, катушка Р3(Р), диод Д3, размыкающий контакт ВР32, резисторы СР31, СР32, «минус» ВУ.

Независимо от места повреждения изоляции ток по обмотке рабочей катушки Р3(Р) протекает в одном направлении, обеспечивая постоянное направление магнитодвижущей силы.

Так как магнитодвижущие силы катушек Р и У направлены согласно, то реле включится и произведет соответствующее переключение контактов. При снятии напряжения с катушки Р реле РЗ останется включенным под действием магнитодвижущей силы катушки У. Для отключения реле необходимо снять напряжение с удерживающей катушки при помощи кнопки КР3 (см. рис. 6.12). Для повышения быстродействия реле оно не имеет защелки, ее функции выполняет удерживающая катушка.

Следует отметить, что при пробое силовой цепи со стороны «минуса» движение тепловоза можно продолжать, выключив рубильник ВР31; в противном случае при появлении нагрузки на генераторе реле РЗ будет сразу срабатывать. При отключении рубильника ВР32 реле заземления отключается полностью.

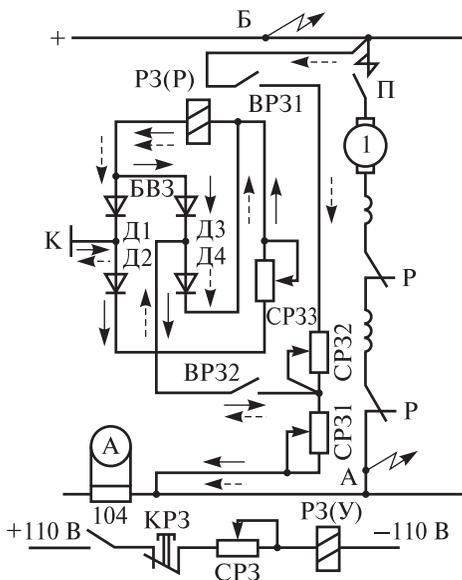


Рис. 6.12. Принципиальная схема включения реле заземления на тепловозе 2ТЭ116

С помощью резисторов СР31—СР33 добиваются одинаковой чувствительности схемы защиты к замыканиям на корпус с «плюсовой» и «минусовой» сторон силовой схемы; при этом реле заземления срабатывает в обоих случаях и фиксирует якорь во включенном состоянии.

При срабатывании реле РЗ его размыкающий контакт отключит контакторы возбуждения генератора КВ и возбuditеля ВВ (см. рис. 6.10, а), а вспомогательный контакт контактора ВВ включит сигнальную лампу «Сброс нагрузки» (на рис. 6.10 не показано).

Вспомогательный контакт реле РЗ включает сигнальную лампу «Силовая защита» (на рис. 6.10 не показано).

Для восстановления исходного состояния реле РЗ необходимо установить нулевую позицию дизеля и выключить автоматический выключатель «Управление возбуждением». Затем нужно вновь включить автоматический выключатель «Управление возбуждением» и можно набирать позиции.

Кроме контактов реле РЗ, РКВ и РМ2 в цепи катушки контактора КВ любого тепловоза установлены контакты блокировки дверей высоковольтных камер тепловоза БД (на рис. 6.10 не показано). При открытии любой из дверей соответствующий блокировочный контакт размыкается и цепь возбуждения генератора разбирается.

6.10. Система защиты от боксования колесных пар тепловоза

В случае возникновения боксования колесной пары тяговый генератор переводится на режим работы по жестким динамическим характеристикам с неизменным или малоизменяющимся напряжением (см. п. 5.5). Это, как правило, позволяет избежать развития боксования на другие колесные пары тепловоза и восстановить сцепление боксующей колесной пары.

Если это не позволяет ликвидировать боксование колесных пар, то сработает *система защиты от боксования*, исполнительными элементами которой являются три реле боксования РБ1, РБ2 и РБ3 с разной чувствительностью. Цепи системы защиты от боксования собираются вспомогательными контактами поездных контакторов П1—П6 через нормально замкнутый вспомогательный контакт контактора тормозного режима П7 (рис. 6.13).

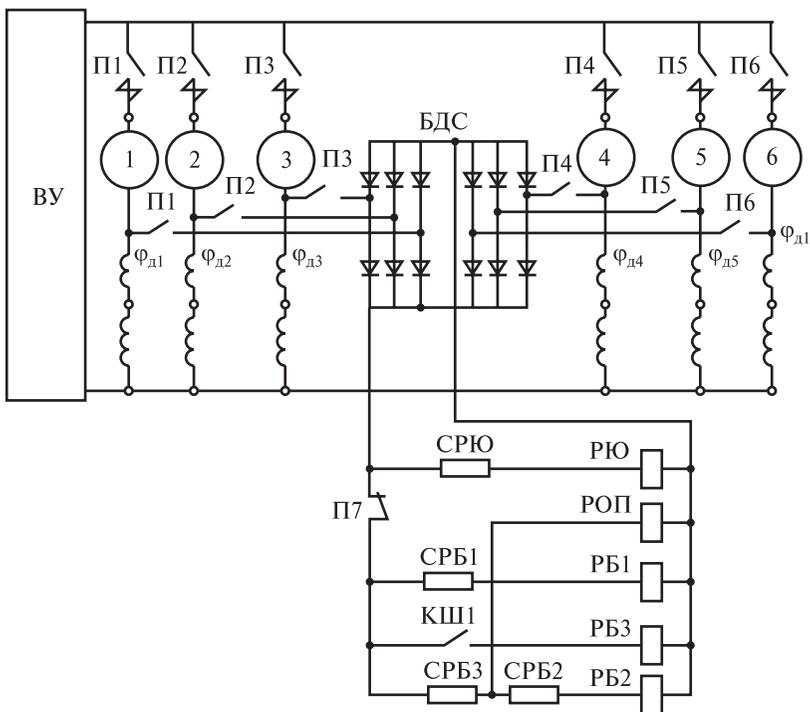


Рис. 6.13. Принципиальная схема систем защиты от боксования, юза и обрыва полюсов тяговых двигателей

Сигнал о развитии боксования колесной пары получается путем сравнения потенциалов на обмотках добавочных полюсов тяговых электродвигателей.

Потенциалы этих точек определяются токами в цепях обмоток тяговых двигателей

$$I_a = \frac{U_d - c_e n_{\text{ТЭД}} \Phi_{\text{ТЭД}}}{R_{\text{ТЭД}}} \quad (6.7)$$

и сопротивлением обмоток их главных R_B и добавочных полюсов R_d . Например, если боксование началось на первой колесной паре, частота вращения якоря двигателя этой колесной пары будет больше, чем у других двигателей

$$n_{\text{тэд1}} > n_{\text{тэд2}}, n_{\text{тэд3}}, \dots, n_{\text{тэд6}},$$

а ток в обмотках якоря первого двигателя в соответствии с (6.7) меньше, чем у остальных двигателей

$$I_{a1} < I_{a2}, I_{a3}, \dots, I_{a6}. \quad (6.8)$$

Потенциал на обмотке добавочных полюсов тягового двигателя

$$\varphi_{\text{д}} = (R_{\text{в}} + R_{\text{д}})I_{\text{а}}. \quad (6.9)$$

С учетом (6.8) и (6.9)

$$\varphi_{\text{д1}} < \varphi_{\text{д2}}, \varphi_{\text{д3}}, \dots, \varphi_{\text{д6}}. \quad (6.10)$$

Обмотки добавочных полюсов тяговых двигателей связаны между собой через *блок диодного сравнения* БДС. Блок БДС состоит из диодов, включенных по мостовой шестифазной схеме. На выход блока БДС включены катушки реле боксования РБ1, РБ2, РБ3. Так как чувствительность реле боксования при полном возбуждении тяговых электродвигателей оказывается излишней, в цепь катушек реле включены резисторы СРБ1—СРБ3.

Наибольшую чувствительность имеет реле РБ1, поэтому при возникновении боксования оно включается первым.

При срабатывании РБ1 его замыкающий контакт собирает цепь питания катушки реле РУ17 (рис. 6.14). Один замыкающий контакт РУ17 вводит в потенциометр уставок селективного узла дополнительный резистор $R_{\text{сy2}}$ (рис. 6.15). Поскольку блок БЗВ не обладает свойствами идеального источника напряжения, то шунтирование сигналов уставок резистором $R_{\text{сy2}}$ приводит к снижению U_{yc} и увеличению $I_{\text{y}} \sim U_{\text{oc}} - U_{\text{yc}}$. Значение I_{y} определяет фазу управляющих импульсов тиристоров блока УВВ: при его возрастании возбуждение тягового генератора уменьшится (см. рис. 4.16, 4.7) и снизится напряжение $U_{\text{д}}$.

Другой замыкающий РУ17 включает электромагнит МР5, который устанавливает якорь индуктивного датчика в положение, при котором корректирующий сигнал по мощности селективного узла $U_{\text{кор}} \rightarrow \min$ (см. п. 4.2). Этим исключается отрицательное воздействие регулятора дизеля на возбуждение генератора при боксовании.

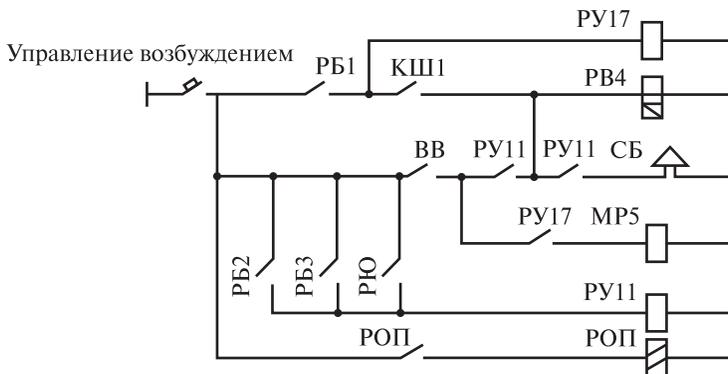


Рис. 6.14. Исполнительная схема систем защиты от боксования, юза и обрыва полюсов тяговых двигателей

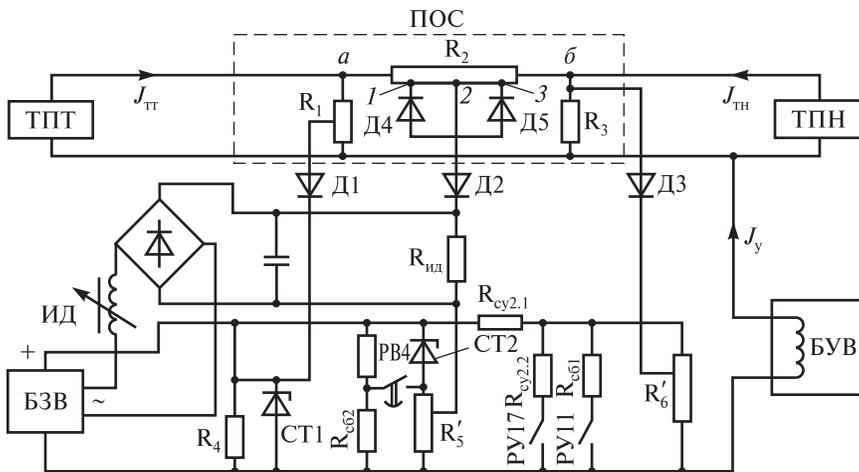


Рис. 6.15. Изменение уставок селективного узла при работе системы защиты от боксования колесных пар тепловоза

В противном случае при снижении мощности генератора объединенный регулятор дизеля восстановит его напряжение путем перемещения якоря индуктивного датчика в положение, когда значение $U_{кор} \rightarrow \max$.

После срабатывания электромагнита МР5 уставка по мощности селективного узла $U_{ус.м} = U'_{ус.м} + U_{кор}$ дополнительно снижается,

ток управления увеличивается, а напряжение тягового генератора уменьшается. В результате момент тягового двигателя понизится и сцепление колес тепловоза с рельсом может восстановиться.

Если этой меры недостаточно, боксование колесных пар продолжает развиваться и будет увеличиваться разность потенциалов на обмотках тяговых электродвигателей. При некотором значении этой разности потенциалов сработает реле боксования РБ2, имеющий меньшую чувствительность по сравнению РБ1 (см. рис. 6.13).

Замыкающий контакт РБ2 собирает цепь питания реле РУ11 (см. рис. 6.14). Замыкающий контакт РУ11 включит звуковой сигнал СБ «Боксование», сигнальную лампу на пульте машиниста (на схеме не показана), реле времени РВ4 и введет в потенциометр уставок СУ дополнительный шунтирующий резистор $R_{с61}$ (см. рис. 6.15).

Кроме того, замыкающий контакт РВ4 (имеет выдержку времени 1,5 с только на размыкание) с помощью резистора $R_{с62}$ дополнительно шунтирует потенциометр уставок в канале мощности СУ.

Эти меры вызывают значительное снижение напряжения тягового генератора и момента тяговых двигателей.

При восстановлении сцепления колеса с рельсом разность потенциалов на обмотках тяговых двигателей снизится и реле РБ2 отключится первым, разбирая цепи питания сигнала СБ, сигнальной лампы, реле РУ11 и РВ4. Замыкающий контакт РУ11 мгновенно отключает резистор $R_{с61}$, увеличивая сигнал уставки СУ и незначительно — напряжение генератора. Через 1,5 с, если сцепление восстановилось, разомкнется контакт РВ4, еще больше увеличивая уставку и напряжение генератора. Таким образом, выдержка времени реле РВ4 при восстановлении напряжения генератора повышает устойчивость процесса восстановления колеса с рельсом.

Только после этого может отключиться реле РБ1, полностью восстанавливая напряжение тягового генератора и момент на колесе тепловоза.

При работе тяговых двигателей на режиме ослабления возбуждения, сопротивления обмоток возбуждения тяговых двигателей $R_{в}$ уменьшаются, соответственно уменьшаются и потенциалы на обмотках их добавочных полюсов. В этих условиях даже при значительном боксовании уровень потенциалов, сравниваемых блоком БДС, будет недостаточным для срабатывания РБ1 и РБ2. Поэтому для защиты от боксования используется реле РБ3, которое может сработать только после включения контактора ослабления возбуж-

дения КШ1 и имеет очень высокую чувствительность (см. рис. 6.13, 6.14). Действие реле РБЗ на схему СУ аналогично реле РБ2.

Система защиты с блоком БДС способна обнаружить одновременное боксование до пяти колесных пар, т.е. пока хотя бы один из сравниваемых потенциалов, подаваемых на вход блока БДС существенно отличается от остальных. Обнаружение и устранения разносного боксования (всех колесных пар тепловоза) на высоких скоростях движения тепловоза осуществляется блоком комплексного устройства автоматики.

На аварийном режиме возбуждения тягового генератора защита от боксования также обеспечивается снижением возбуждения тягового генератора. Включение на этом режиме реле РУ17 приведет к отключению контактора аварийного возбуждения КАВ (рис. 6.16). Главный контакт КАВ вводит в цепь возбуждения возбудителя дополнительный участок резистора $R_{ав}$ (см. рис. 4.17), в результате чего снижается ток возбуждения возбудителя и напряжение тягового генератора. Контактор КАВ может включаться начиная с 4-й позиции контроллера; соответственно и система защиты от боксования в аварийном режиме возбуждения будет шунтировать резистор $R_{ав}$ начиная с 4-й позиции контроллера.



Рис. 6.16. Исполнительная схема включения контактора аварийного возбуждения тягового генератора контактами контроллера КМ

Алгоритм ступенчатого восстановления напряжения генератора после восстановления сцепления колес тепловоза с рельсами совместно с воздействием на регулятор дизеля уменьшает вероятность возникновения незатухающих колебаний в системе «тяговый генератор—тяговые электродвигатели» и развитие боксования колесных пар по этой причине.

6.11. Система защиты от юза колесных пар тепловоза

Система защиты от юза в режиме электрического торможения работы тепловоза работает аналогично системе защиты от боксования, так как для снижения тормозной силы и восстановления

сцепления колеса с рельсом необходимо также уменьшить момент тягового электродвигателя, а следовательно, и напряжение тягового генератора (в тормозном режиме обмотки возбуждения тяговых двигателей включены на напряжение тягового генератора через выпрямительную установку и балластный резистор).

При переходе в тормозной режим вспомогательный контакт контактора тормозного режима П7 размыкается и отключает систему защиты от *боксования* (см. рис. 6.13).

Возникновение юза на отдельных колесных парах тепловоза создаст разность потенциалов на обмотках тяговых двигателей, в результате чего через катушку реле юза РЮ пройдет ток.

Включившись, реле РЮ соберет цепь питания реле РУ11, а вспомогательный контакт РУ11 включит РВ4 (см. рис. 6.14). Замыкающие контакты реле РУ11 и РВ4 снизят сигналы уставок СУ, и соответственно напряжение тягового генератора и тормозной момент тяговых электродвигателей уменьшатся (см. рис. 6.15). Кроме того, другой вспомогательный контакт РУ11 (на схеме не показан) изменит режим работы комплексного устройства автоматики тормозного режима, который дополнительно снизит напряжение тягового генератора.

После сцепления колеса с рельсом возбуждение тягового генератора восстанавливается, как было описано в п. 6.10.

6.12. Защита от обрыва обмоток тяговых электродвигателей тепловоза

Универсальность блока БДС при сравнении потенциалов на обмотках тяговых электродвигателей позволяет его использовать и для контроля состояния цепей самих обмоток. При обрыве цепи обмотки возбуждения двигателя на входе блока БДС образуется разность потенциалов, под действием которой сработает реле обрыва полюсов РОП (см. рис. 6.14). Размыкающий контакт РОП установлен в цепи катушки контактора КВ (на схеме не показано); поэтому при срабатывании реле РОП сразу отключается возбуждение тягового генератора. Замыкающий контакт РОП подает питание на собственную удерживающую катушку (см. рис. 6.14). Поэтому напряжение генератора восстановить невозможно, пока не обесточится удерживающая катушка реле РОП. Отключить удерживающую катушку РОП можно только отключением автомата «Управление возбуждением».

Глава 7. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОВЗОВ

7.1. Общие сведения

Назначение вспомогательных систем локомотива — обеспечить работу энергетического оборудования и нормальные условия его эксплуатации. При работающем дизеле (с нулевой по 15-ю позиции контроллера) электропривод всех вспомогательных систем тепловоза осуществляется от стартер-генератора или синхронного генератора. Источником энергии электроприводов при неработающем дизеле является аккумуляторная батарея.

На тепловозе с электрической передачей переменного тока электропривод имеют следующие агрегаты вспомогательных систем:

- вспомогательные (маслопрокачивающий и топливоподкачивающий) насосы дизеля на режимах пуска;
- компрессор;
- вентиляторы охлаждения теплоносителей дизеля;
- вентиляторы охлаждения тягового электрооборудования;
- вентиляторы тормозных резисторов;
- вентилятор кабины, кузова, отопительного агрегата и др.

В зависимости от режимов работы (кратковременный или продолжительный) для привода вспомогательных систем используются электродвигатели постоянного или переменного тока. Для работы в кратковременных режимах используется преимущественно электропривод постоянного тока. Для привода вентиляторов охлаждения тягового оборудования (дизеля, выпрямительной установки, тяговых электрических машин), длительность работы которых может быть неограниченна — трехфазные асинхронные электродвигатели с питанием от синхронного генератора. На тепловозе 2ТЭ116 все вспомогательные трехфазные асинхронные электродвигатели включены на напряжение статорных обмоток тягового генератора, так

как только мощности тягового генератора достаточно для непрерывной работы вентиляторов охлаждения тягового оборудования. Однако на последующих тепловозах от такой схемы отказались. Объясняется это тем, что в пределах одной позиции контроллера расход воздуха на охлаждение тягового оборудования должен поддерживаться постоянным, т.е. должен поддерживаться постоянным момент двигателя вентилятора. Асинхронный двигатель с питанием от тягового генератора обеспечить требуемую работу вентилятора без специальной системы управления не может. Электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату амплитуды подводимого напряжения и обратно пропорционален частоте напряжения:

$$M_{\text{эм}} \sim U_1^2 / f_1.$$

Частота напряжения тягового генератора в пределах одной позиции контроллера остается постоянной (так как постоянна частота вращения вала дизеля), а коэффициент регулирования амплитуды напряжения составляет приблизительно 1,7. Значит, в пределах одной позиции в зависимости от режима работы тягового генератора момент двигателя вентилятора может меняться почти в 3 раза. Кроме того, с уменьшением напряжения снижается устойчивость асинхронного двигателя к опрокидыванию.

На тепловозе 2ТЭ121 уже был установлен тяговый агрегат, в одном корпусе которого расположены две синхронные машины — тяговый генератор и вспомогательный генератор собственных нужд.

Электродвигатели маслопрокачивающего и топливоподкачивающего насосов дизеля получают питание от аккумуляторной батареи (АБ), так как работают только при пуске дизеля.

Электродвигатели приводов вентилятора кузова и отопительного агрегата получают питание от аккумуляторной батареи — при неработающем дизеле, или от стартер-генератора — при работающем дизеле. Электродвигатель привода компрессора — от стартер-генератора, т.е. работа компрессора возможна только при работающем дизеле. В связи с большим потреблением энергии (например, мощность электродвигателя компрессора тепловоза 2ТЭ116 составляет 37 кВт) работа компрессора от аккумуляторной батареи не предусмотрена.

Следует отметить, что многие тепловозы с электрической передачей переменного-постоянного тока имеют другие типы приводов вспомогательных систем. Так, например, на тепловозах Коломенского тепловозостроительного завода — ТЭП70, ТЭП75, ТЭП80 — традиционно используется гидростатический привод вентиляторов охлаждающего устройства дизеля и механический привод вентилятора тягового электрооборудования (в системе централизованного воздухообеспечения ЦВС). Тепловозы Людиновского тепловозостроительного завода ТЭМ7 и ТЭМ8 также оборудуются механическим приводом вентиляторов тягового электрооборудования в системе ЦВС и гидродинамическим приводом вентилятора охлаждающего устройства дизеля.

Тепловозы 2ТЭ25К и 2ТЭ25А для приводов вентиляторов тягового оборудования используют асинхронные двигатели с питанием от трехфазного вспомогательного генератора тягового агрегата: для приводов вентиляторов охлаждающего устройства дизеля — частотнорегулируемый; для приводов вентиляторов электрооборудования — нерегулируемый.

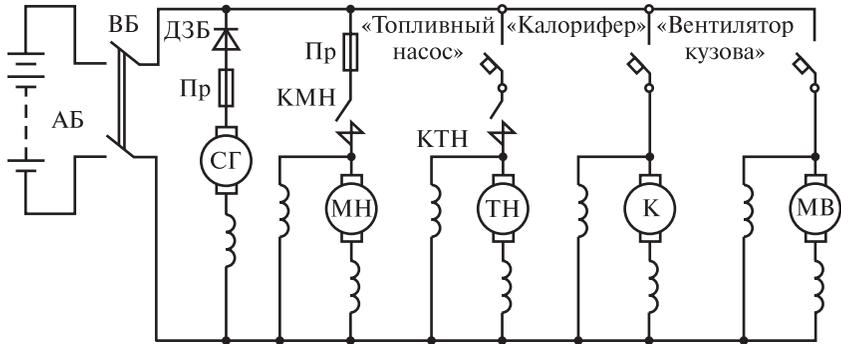
В настоящее время тепловоз серии 2ТЭ116 является наиболее распространенным, поэтому будем рассматривать схемы электроприводов вспомогательных систем применительно к этому тепловозу.

7.2. Управление вспомогательными системами с электроприводами постоянного тока

7.2.1. Включение вспомогательных насосов дизеля

Поскольку для электродвигателей топливоподкачивающего и маслопрокачивающего насосов дизеля источником энергии является аккумуляторная батарея, то для их пуска необходимо прежде всего включить разъединитель аккумуляторной батареи ВБ (рис. 7.1, а). Работа этих двух насосов осуществляется по достаточно сложному алгоритму, включающему контроль времени пуска, давления масла в системах дизеля и др., который обеспечивается релейными аппаратами. Поэтому пуск вспомогательных насосов дизеля требует подведения напряжения к определенным цепям управления. Для того чтобы подвести напряжение от батареи к этим цепям необходимо включить автоматы «Топливный насос» (см. рис. 7.1, а) и

а



б

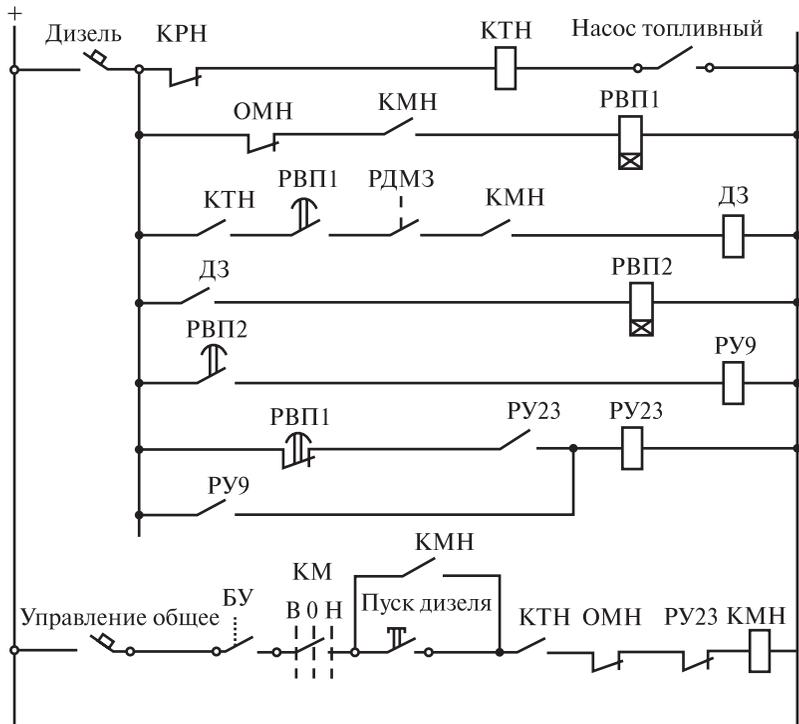


Рис. 7.1. Принципиальная схема включения электродвигателей приводов топливоподкачивающего и маслопрокачивающего насосов дизеля, приводов калорифера и вентилятора кузова тепловоза 2ТЭ116:

а — силовая схема; б — цепи управления

«Дизель» (рис. 7.1, б), которые расположены на высоковольтной камере. Затем на пульте управления нужно повернуть до упора рукоятку блокировки крана машиниста (замкнется его контакт БУ), установить рукоятку реверсивного механизма контроллера машиниста в положение «Вперед» В (или «Назад» Н) и включить автомат «Управление общее».

Топливоподкачивающий насос включается тумблером «*Насос топливный*», расположенный на пульте (см. рис. 7.1, б). После этого получает питание катушка контактора топливоподкачивающего насоса КТН по цепи: «плюс» АБ, контакт автомата «Дизель», нормально замкнутый контакт контактора регулятора напряжения КРН (контактор КРН включается только после пуска дизеля), катушка контактора КТН, контакт тумблера «Топливный насос», сборная «минусовая» шина. Контактор КТН замыкает свой главный контакт с дугогашением в цепи электродвигателя топливного насоса ТН (см. рис. 7.1, а), а вспомогательные контакты — в цепях катушек контактора маслопрокачивающего насоса КМН и пускового контактора ДЗ (см. рис. 7.1, б). Электродвигатель ТН включается, и насос начинает подавать топливо к насосам дизеля.

Маслопрокачивающий насос включается кратковременным нажатием кнопки «Пуск дизеля» на пульте управления (см. рис. 7.1, б). При этом собирается цепь питания катушки контактора маслопрокачивающего насоса КМН : «плюс» АБ, контакты автомата «Управление общее», блокировки БУ, реверсора В (или Н), кнопки «Пуск дизеля», контактора КТН, нормально замкнутые контакты тумблера ОМН (отключателя маслопрокачивающего насоса) и промежуточного реле управления РУ23, катушка контактора КМН, сборная «минусовая» шина.

Главный контакт с дугогашением контактора КМН подключает электродвигатель насоса МН к АБ через предохранитель Пр, защищающий обмотки двигателя от больших пусковых токов, и начинается прокачка дизеля маслом, в результате чего увеличивается давление в его масляной системе (см. рис. 7.1, б).

Вспомогательные контакты контактора КМН выполняют следующие переключения в схеме:

— один замыкающий контакт КМН шунтирует контакт кнопки «Пуск дизеля», ставя контактор КМН на самопитание; теперь при

отпускании кнопки «Пуск дизеля» катушка КМН не обесточится и контактор не отключится;

– другой замыкающий контакт КМН подает питание на пусковое реле времени РВП1.

Реле РВП1 контролирует время прокачки дизеля маслом перед его пуском: на тепловозе 2ТЭ116 — 70 с, на тепловозе ТЭП70 — 60 с. За время прокачки давление масла в системах дизеля должно достичь значения, при котором замыкается контакт реле давления масла РДМ3. Через 70 с (или 60 с) замкнется контакт РВП1 с выдержкой времени на включение и собирает цепь питания катушки пускового контактора ДЗ.

Таким образом, схема пуска дизеля начнет собираться только после того, как включатся вспомогательные насосы, системы дизеля прокачаются маслом и давление масла достигнет пускового значения.

Контактор ДЗ главным контактом начинает собирать цепь пуска дизеля (см. п. 8.2), а блокировочным контактом включает пусковое реле времени РВП2.

После того как соберется схема пуска дизеля включается контактор регулятора напряжения КРН (на схеме не показан). Главный контакт КРН подключает регулятор напряжения РН к обмотке независимого возбуждения стартер-генератора СТГ (см. п. 2.3, 5.6). Вспомогательный контакт КРН отключает контактор КТН, и электродвигатель ТН останавливается (см. рис. 7.1, а, б).

Реле РВП2 ограничивает время раскручивания коленчатого вала дизеля стартером (7—10 с).

Через 10 с в любом случае (запустился дизель или нет) замыкающий контакт РВП2 включит промежуточное реле РУ9, а контакт РУ9 включит реле РУ23 (рис. 7.1, б).

Размыкающий контакт реле РУ23 разберет цепь питания катушки контактора КМН; контактор отключится и главным контактом выключит электродвигатель МН. Прокачка дизеля маслом прекращается. Вспомогательный контакт КМН разберет цепь питания реле РВП1, которое, отключаясь, своим размыкающим контактом без выдержки времени ставит реле РУ23 на самопитание. Это делает невозможным работу маслопрокачивающего насоса при работающем дизеле, так как насосы с механическим приводом от вала дизеля выходят на требуемый режим.

7.2.2. Включение калорифера кабины и вентилятора кузова

Электродвигатели приводов калорифера К и вентилятора кузова тепловоза МВ напрямую подключаются к АБ (или стартер-генератору при работающем дизеле) замыканием контактов автоматических выключателей «Калорифер» и «Вентилятор кузова», расположенных в кабине (рис. 7.1, а).

7.2.3. Включение компрессора

Источником энергии для питания электродвигателя компрессора является вспомогательный генератор (рис. 7.2, а). Для работы компрессора должен быть включен автоматический выключатель «Компрессор», расположенный в высоковольтной камере (автомат служит для защиты цепи от перегрузки, но им можно пользоваться, когда есть необходимость вручную включить или отключить электродвигатель компрессора) (см. рис. 7.2, б). При включении автомата «Компрессор» сразу получает питание катушка разгрузочного вентиля ВР. Клапан вентиля ВР открывается и перепускает часть воздуха из воздухопровода автоматики в разгрузочное устройство компрессора, соединяя его напорную магистраль с атмосферой и облегчая пуск электродвигателя компрессора МК. Когда электродвигатель МК достигает номинального момента, клапан ВР отключается.

Включается и отключается электродвигатель компрессора МК автоматически с помощью реле давления компрессора РДК; при давлении воздуха в воздушной магистрали ниже $7,5 \text{ кгс/см}^2$ он замыкает свой контакт; при давлении воздуха выше 9 кгс/см^2 — размыкает — (соответствует настройке на тепловозе 2ТЭ116).

Поскольку электродвигатель компрессора имеет значительную мощность, его пуск осуществляется через пусковой резистор СПК (см. рис. 7.2, б), который через 1,5—2 с от начала пуска шунтируется с помощью контактора управления двигателем компрессора КУДК.

Для соблюдения требуемого алгоритма пуска компрессора в схеме используются два промежуточных реле РУ24 и РВ1 (см. рис. 7.2, б). Реле РУ24 управляет работой всей схемы управления компрессором и включается вспомогательным контактом контактора регулятора напряжения КРН. Это гарантирует, что электродвигатель МК включится только при запущенном дизеле, когда стартер-генератор

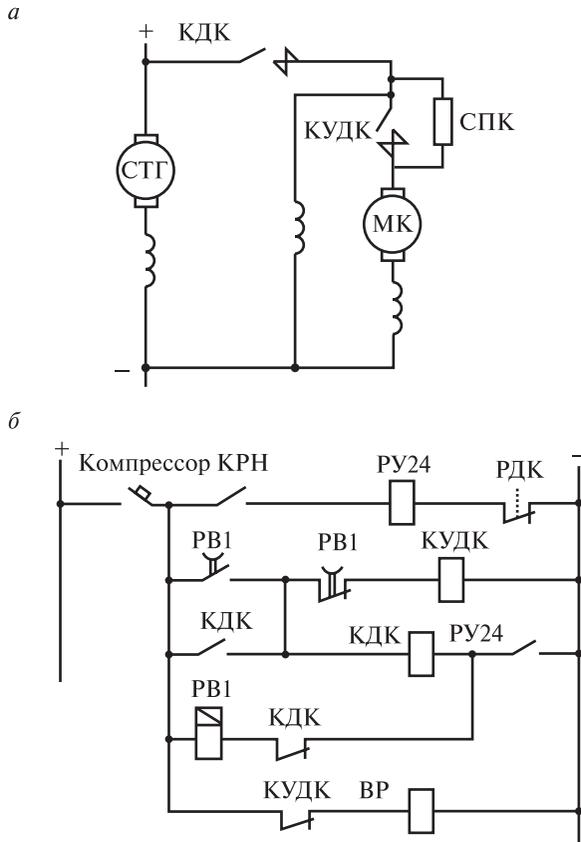


Рис. 7.2. Принципиальная схема включения привода компрессора тепловоза 2ТЭ116:

а — силовая схема; *б* — цепи управления

работает в режиме вспомогательного генератора. Реле РВ1 регулирует пусковой ток электродвигателя МК.

Таким образом, если дизель запущен, регулятор РН включен (замкнут контакт КРН), а давление в воздушной системе тепловоза снизилось до $7,5 \text{ кгс/см}^2$ — замыкается контакт реле давления воздуха РДК (как показано на рис. 7.2, б). При замыкании контакта РДК сначала включаются реле РУ24, а затем реле времени РВ1, которое:

– замыкающим контактом РВ1 (с выдержкой времени на размыкание) сразу собирает цепь питания контактора двигателя компрессора КДК;

– размыкающим контактом РВ1 (с выдержкой времени на замыкание) разорвет цепь питания контактора управления двигателем компрессора КУДК, гарантируя открытие вентиля ВР.

Включившись, контактор КДК выполняет следующие переключения в схеме (см. рис. 7.2, а):

– главным контактом с дугогашением КДК собирает цепь питания обмоток электродвигателя МК через пусковой резистор СПК; двигатель МК начинает работать, а компрессор — накачивать воздух в пневмосистему тепловоза;

– вспомогательным замыкающим контактом КДК ставит свою катушку на самопитание, минуя контакт РВ1;

– вспомогательным размыкающим контактом КДК отключает реле РВ1.

Через 1,8 с после отключения РВ1 переключаются его контакты: замыкающий контакт — размыкается, а размыкающий — замыкается и включает контактор КУДК по цепи: «плюс» СТГ, контакт автомата «Компрессор», замкнутые контакты КДК и РВ1, катушка КУДК, сборная «минусовая» шина.

Главный контакт с дугогашением КУДК шунтирует резистор СПК, в результате чего увеличиваются ток и момент МК, а вспомогательный контакт КУДК отключит вентиль разгрузки ВР, который закрывает напорную магистраль. В результате двигатель МК и компрессор переходит на номинальный режим работы.

При повышении давления в системе выше 9 кгс/м^2 контакты РДК размыкаются и разбирают цепь питания МК.

7.2.4. Включение вентиляторов тормозных резисторов

При оборудовании тепловозов системой электрического торможения возникает необходимость в принудительном охлаждении тормозных резисторов (на которых тяговые двигатели, работающие в генераторном режиме, рассеивают электрическую энергию). Тормозные сопротивления располагаются под крышей кузова тепловоза и оборудуются воздушной системой охлаждения с двумя мотор-вентиляторами МВТ1 и МВТ2 (рис. 7.3). Вентиляторы имеют электрический привод постоянного тока.

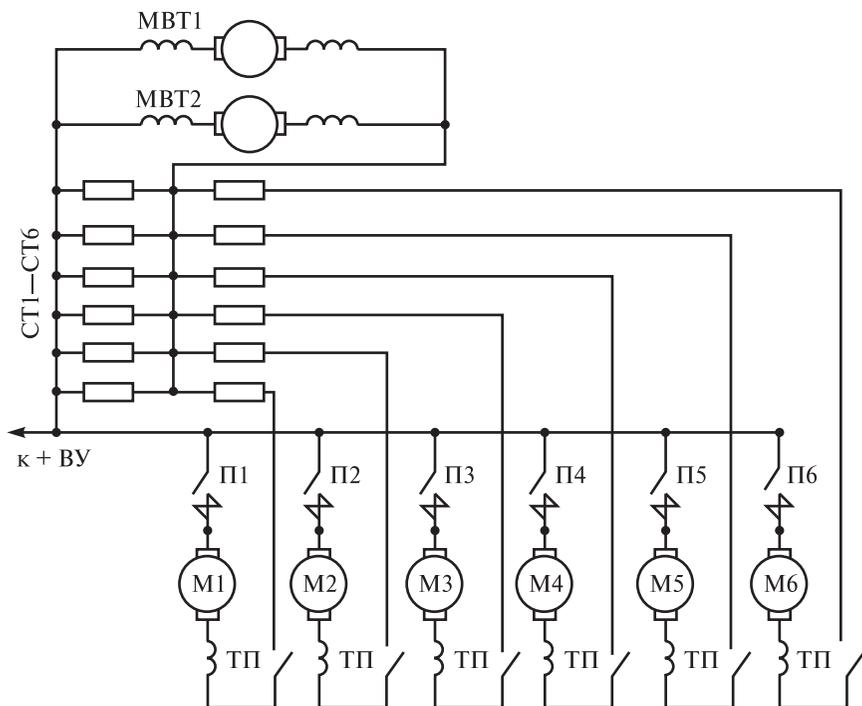


Рис. 7.3. Принципиальная схема включения приводов вентиляторов тормозных резисторов

Включение и отключение электродвигателей привода вентиляторов тормозных резисторов МВТ1, МВТ2 осуществляется автоматически при переходе тепловоза на режим электрического торможения. При включении тормозного переключателя ТП тормозные резисторы СТ1—СТ6 подключаются к обмоткам якорей тяговых электродвигателей (см. п. 4.2.2). В результате протекания тока якорей тяговых электродвигателей по СТ1—СТ6 на них появляется напряжение. На это напряжение включаются электродвигатели мотор-вентиляторов МВТ1, МВТ2. При увеличении тормозного тока электродвигателей I_a увеличивается напряжение на СТ1—СТ6 $U_{ст} = R_{ст} I_a$, а соответственно и момент, развиваемый МВТ1, МВТ2.

Таким образом, чем больше мощность, рассеиваемая тяговыми двигателями М1—М6 на тормозных сопротивлениях СТ1—СТ6, тем

большая мощность подводится к электродвигателям МВТ1 и МВТ2 и тем большую частоту вращения будут иметь вентиляторы. Данный алгоритм управления МВТ1 и МВТ2, хоть и косвенно, позволяет регулировать охлаждение тормозных сопротивлений: чем больше рассеивается на них мощность, тем выше интенсивность их охлаждения.

7.3. Управление вспомогательными системами с электроприводами переменного тока

Для привода вентиляторов охлаждения дизеля и тягового электрооборудования применяется электропривод с трехфазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. На тепловозе 2ТЭ116 установлены четыре мотор-вентилятора для охлаждения дизеля МВ1—МВ4 (на тепловозе 2ТЭ121 — два мотор-вентилятора с поворотными лопастями), два мотор-вентилятора для охлаждения тяговых электродвигателей (один вентилятор на три двигателя одной тележки) МВ5, МВ6 и один мотор-вентилятор для охлаждения выпрямительной установки МВ7 (рис. 7.4 соответствует схеме цепей тепловоза 2ТЭ116). Тяговый генератор имеет механический привод вентилятора.

Источником переменного напряжения для этих двигателей является тяговый синхронный генератор СГ. Статорные обмотки асинхронных двигателей включаются непосредственно на трехфазные статорные обмотки СГ через контакты трехполюсных автоматических выключателей АВ1—АВ7.

Для нормальной работы синхронного генератора необходимо обеспечить равномерную нагрузку его обмоток. Поэтому мотор-вентиляторы включены на статорные обмотки СГ таким образом, чтобы отбор мощности от них был примерно одинаковым.

7.3.1. Включение вентиляторов охлаждающего устройства тепловоза

Поскольку на значения температур теплоносителей дизеля накладываются жесткие ограничения, все тепловозы оборудованы автоматической системой их регулирования. При использовании электропривода переменного тока это релейная система, в которой значения температуры воды и масла поддерживаются на заданном уровне путем периодических включений и выключений вентиля-

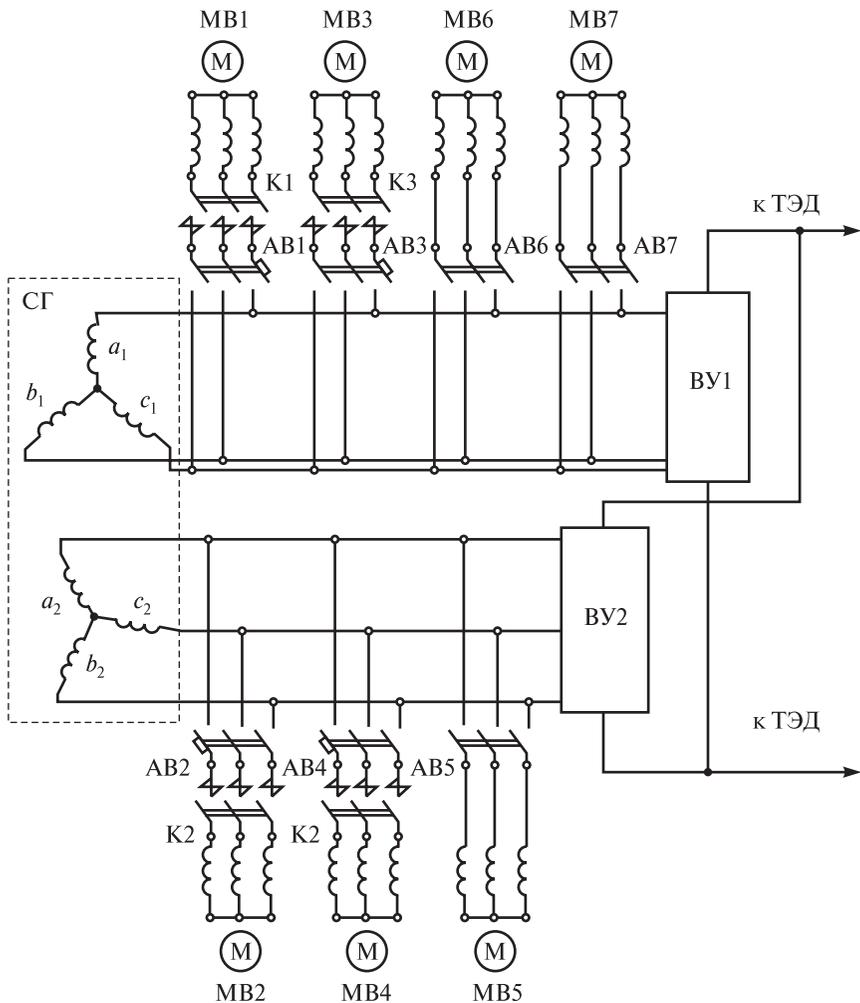


Рис. 7.4. Принципиальная схема включения мотор-вентиляторов систем охлаждения тепловоза 2ТЭ116:

MB1—MB4 — охлаждающего устройства тепловоза; MB5 —тяговых двигателей передней тележки; MB6 — тяговых двигателей задней тележки; MB7 — выпрямительной установки

торов. Однако при необходимости машинист может перейти на ручное управление вентиляторами охлаждающего устройства. Для этого последовательно с выключателями автоматического управле-

ния вентиляторами АВ1—АВ4 включены тумблеры ручного управления ими Т1—Т4 (рис. 7.5).

Для работы агрегатов охлаждающего устройства тепловоза необходимо включить автоматический выключатель «Холодильник», расположенный на высоковольтной камере, а на пульте управления переключить тумблер «Управление холодильником» в одно из положений — «Автоматическое» или «Ручное» (см. рис. 7.5).

В автоматическом режиме управление агрегатами охлаждающего устройства осуществляется термоэлектрическими датчиками тем-

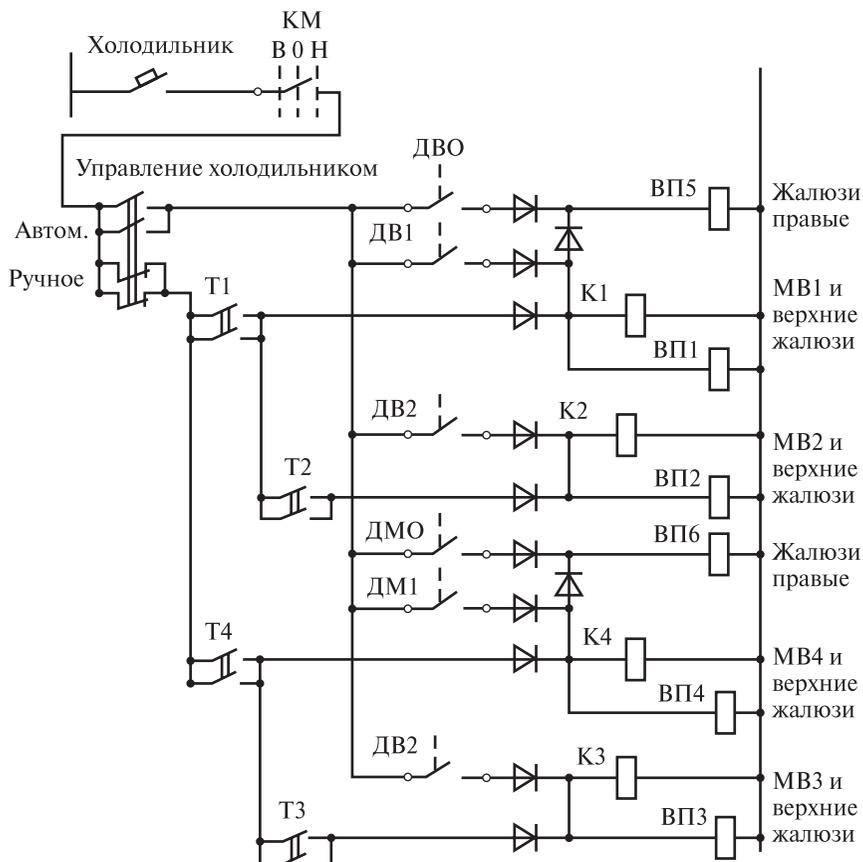


Рис. 7.5. Принципиальная схема управления вентиляторами и жалюзи охлаждающего устройства тепловоза 2ТЭ116

пературы воды — ДВО, ДВ1, ДВ2, и температуры масла — ДМО, ДМ1, ДМ2. Каждый из датчиков настроен на свою температуру срабатывания. При возрастании температуры воды или масла до значения настройки одного из датчиков, он срабатывает и включает соответствующий электропневматический вентиль ВП1—ВП6 и контактор К1—К4. Так, например, при срабатывании датчика ДВО, имеющего самую низкую температуру настройки в контуре воды дизеля, срабатывает только вентиль ВП5, открывая правые жалюзи охлаждающего устройства. Если же работает датчик ДВ1, имеющий настройку на более высокую температуру, то срабатывают электропневматический вентиль ВП5 (открывает правые жалюзи), вентиль ВП1 (открывает верхние жалюзи над вентилятором), а также контактор К1, включающий мотор-вентилятор МВ1 (см. рис. 7.4). Схемой предусмотрено, что мотор-вентилятор может включиться только при открытых жалюзи охлаждающего устройства. Аналогичным образом происходит автоматическое управление другими жалюзи и вентиляторами.

На ручном режиме управление вентиляторами охлаждающего устройства осуществляется тумблерами Т1—Т4, которые, минуя контакты датчиков, непосредственно включают и отключают электропневматические вентили ВП1—ВП6 и контакторы К1—К4. Так, если включить тумблер Т1 — одновременно откроются правые и верхние жалюзи (над мотор-вентилятором) и включится мотор-вентилятор МВ1.

Логикой работы схемы на ручном управлении исключается возможность включения мотор-вентиляторов МВ2 и МВ3, пока не открыты боковые жалюзи и не включены мотор-вентиляторы МВ1 и МВ4 (пока не включены тумблеры Т1 и Т4 невозможно включить тумблеры Т2 и Т3).

7.3.2. Включение вентиляторов охлаждения тяговых электрических машин

Управление мотор-вентиляторами охлаждения тягового электрооборудования на тепловозах не предусмотрено; МВ5—МВ7 работают всегда, когда на СГ имеется напряжение и включены автоматические выключатели АВ5—АВ7 (см. рис. 7.4). При этом расход воздуха на охлаждение тягового электрооборудования изменяется по позициям дизеля.

7.4. Электрические машины приводов вспомогательного оборудования

Электродвигатели привода вспомогательных систем подвижного состава должны нормально работать:

- при отклонении напряжения питания от номинального ($-25...+15\%$) и одновременной асимметрии напряжений (трехфазные двигатели);

- при затяжных и повторных пусках при пониженном напряжении;

- при вибрации и толчках;

- при температуре окружающего воздуха от -50 до $+50$ °С и относительной влажности воздуха до 95 %.

На современных тепловозах для привода насосов, вентиляторов и компрессора используются электродвигатели промышленной серии П11М, П21М и т.д. (П — постоянного тока, 1 или 2 — номер габарита, 1 — номер длины сердечника якоря, М — морское исполнение), особенностью которых является брызгозащищенное исполнение, вибростойкость и высокий класс нагревостойкости изоляции. В основном это двигатели горизонтального исполнения (в редких случаях, для привода вентиляторов охлаждения — вертикального исполнения). Технические характеристики двигателей этой серии приведены в табл. 7.1. Полный перечень технических характеристик двигателей серии П, используемых на тепловозах, приведен в [25].

Электродвигатели серии П — защищенные, с самовентиляцией и цилиндрической станиной, к которой приварены лапы (рис. 7.6). К торцам станины крепятся передний и задний подшипниковые щиты плоского типа. Двигатели этого типа габаритов 1—3 имеют два главных полюса и один добавочный полюс; габаритов 4—7 — четыре главных и четыре добавочных полюса. Сердечники якоря, главных и добавочных полюсов шихтованные, выполненные из тонколистовой электротехнической стали. Обмотка якоря имеет корпусную изоляцию из материала на основе полиамидной пленки.

Траверсы щеткодержателей — литые из алюминиевого сплава, крепятся болтами к переднему подшипниковому щиту. Щеткодержатели стальные. Нажатие щетки на коллектор регулируется затяжкой пружины.

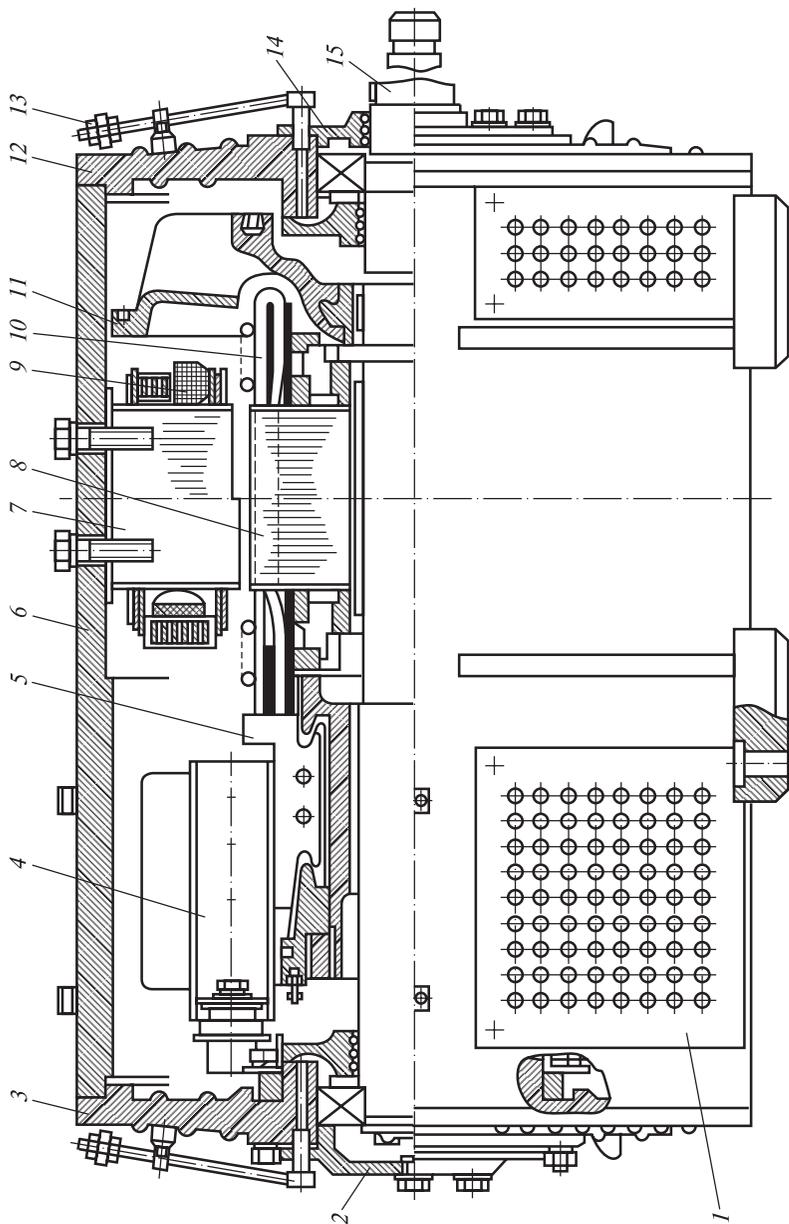


Рис. 7.6. Электродвигатель 2П2К:

1 — вентиляционная решетка; 2, 14 — крышки подшипников; 3, 12 — подшипниковые щиты; 4 — щеткодержатель; 5 — коллектор; 6 — станина; 7 — сердечник главного полюса; 8 — якорь; 9 — обмотка возбуждения; 10 — обмотка якоря; 11 — вентилятор; 13 — трубка для смазки; 15 — вал

Выводная коробка расположена на станине. В случае необходимости изменения направления вращения якоря возможно переключение концов обмоток двигателя с помощью специальных перемычек.

Колесо вентилятора — литое, из алюминиевого сплава.

Для привода компрессора используются электродвигатели серии 2П2К (2 — номер разработки, 2К — для компрессора) или П2К вибростойкой конструкции (см. рис. 7.6). Их особенностью являются усиленная корпусная изоляция обмоток и конструкция якоря, предусматривающая возможность его дополнительной балансировки. Кроме того, в траверсах устанавливаются щетки повышенной высоты с постоянным нажатием.

Таблица 7.1

Технические характеристики двигателей серии П, используемых в приводе на тепловозе 2ТЭ116

Параметр	П21М	П11М	П51М	2П2К	П62М
	топливо-подкачивающего насоса, вентилятора кузова	вентилятора калорифера	масло-прокачивающего насоса	компрессора	вентилятора тормозных резисторов
Мощность, кВт	0,66	0,29	7,4	37	26
Напряжение, В	110	110	110	110	220
Ток, А	8,4	4,05	83,6	400	130
Частота вращения, об/мин	1500	1500	1500	1450	1500
Класс нагревостойкости изоляции	В	В	Н	Ф	Н
Диаметр якоря наружный, мм	106	83	162	245	195
Длина сердечника якоря, мм	58	53	100	175	
Масса, кг	37,8	18,5	132	550	

Вспомогательные электрические машины *переменного тока*, используемые на тепловозе, также имеют специальное исполнение, так как источником напряжения для них является тяговый синхронный генератор, частота и амплитуда фазного напряжения кото-

рого изменяются в широких пределах. С повышением напряжения в асинхронном двигателе увеличиваются магнитный поток и реактивная мощность, из-за чего понижается коэффициент мощности, возрастают потери в сердечниках и обмотках. Одновременно понижаются рабочие токи в фазах. При понижении напряжения и неизменной нагрузке на валу увеличиваются активные составляющие токов статора и ротора. Скольжение двигателя изменяется примерно обратно пропорционально квадрату напряжения.

Значение напряжения питания оказывает значительное влияние и на механическую характеристику двигателя. Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, поэтому с уменьшением напряжения снижаются пусковой и максимальный моменты двигателя, а также его устойчивость к опрокидыванию. Поэтому необходимо, чтобы вращающий момент выбранной машины обеспечивал работоспособность механизма при низшем напряжении генератора.

Для привода вентиляторов охлаждающего устройства используются асинхронные двигатели вертикального исполнения с внешним ротором АМВ-37 (А — асинхронный; М — для мотор-вентилятора; В — встраиваемый; 37 — номинальная мощность, кВт).

Двигатель встраивается в ступицу осевого вентилятора, после чего этот агрегат называется *мотор-вентилятором* (рис. 7.7).

Обмотка ротора мотор-вентилятора выполнена литой из алюминия в виде «беличьей клетки». В днище мотор-вентилятора на болтовых соединениях закрепляется неподвижная втулка 13, где на двух подшипниках устанавливается вращающийся вал 11, жестко соединенный с сердечником ротора 4 и корпусом ротора 5. Корпус ротора одновременно выполняет функции ступицы вентиляторного колеса, так как на нем закрепляются лопасти 17.

Сердечник статора 16 напрессован на втулку 13 и удерживается на нем шпоночным соединением. Сердечники статора и ротора мотор-вентилятора набраны из листов электротехнической стали, зажатой нажимными шайбами 19. Обмотка статора — трехфазная, двухслойная; фазы обмотки соединены по схеме «звезда». Охлаждается двигатель воздухом, нагнетаемым самим вентилятором.

Для привода центробежных вентиляторов охлаждения тягового электрооборудования на базе электродвигателей промышленного исполнения 4А (4 — номер разработки, А — асинхронный) были

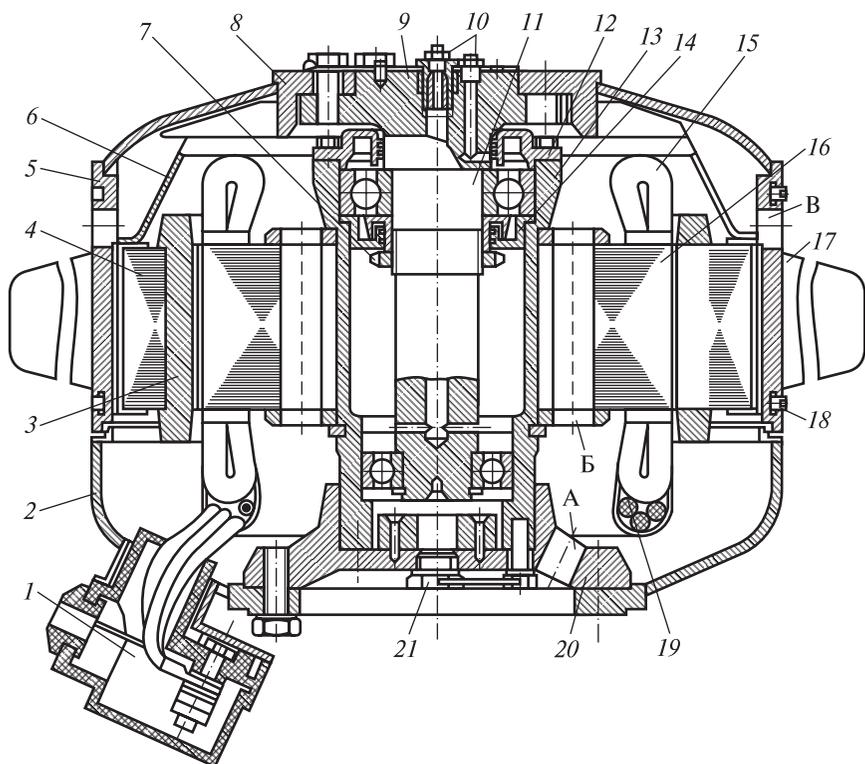


Рис. 7.7. Мотор-вентилятор:

1 — коробка выводов; 2 — днище; 3 — алюминиевая заливка; 4 — сердечник ротора; 5 — корпус ротора; 6 — воздушный коллектор; 7 — гайка; 8, 13 — втулка; 9, 12, 14 — крышки; 10 — масленки; 11 — вал; 15 — обмотка ротора; 16 — сердечник статора; 17 — лопатки вентилятора; 18 — балансировочный груз; 19 — нажимная шайба; 20 — основание; 21 — пробка; А, Б, В — вентиляционные отверстия

разработаны асинхронные двигатели железнодорожного исполнения — 4АЖ, рассчитанные на работу с переменным напряжением в диапазоне 240—560 В (линейное значение) и с переменной частотой в диапазоне 35—100 Гц (рис. 7.8). Двигатель имеет основные узлы: статор с трехфазной обмоткой, ротор с обмоткой «беличья клетка», два подшипниковых щита, вентилятор, расположенный на

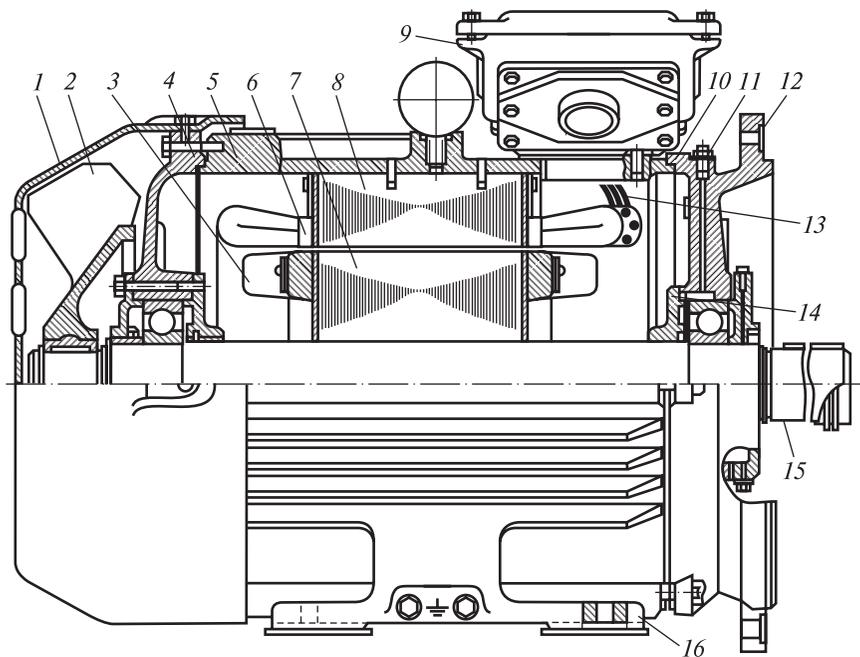


Рис. 7.8. Электродвигатель 4АЖ-225:

1 — защитный кожух; 2 — вентилятор; 3 — обмотка ротора; 4 — подшипниковые щиты; 5, 10 — корпус; 6 — обмотка статора; 7 — сердечник ротора; 8 — сердечник статора; 9 — коробка выводов; 11 — масленка; 12 — фланец; 13 — выводы обмотки статора; 14 — уплотнитель; 15 — вал; 16 — опора

валу (двигатель с самовентилиацией), кожух. Сердечники статора и ротора — шихтованные.

Эти электродвигатели выполнены на базе общепромышленной серии асинхронных двигателей А2-82-6 и АОС2-62-6 на частоту 100 Гц.

Технические характеристики двигателей серии А, используемых на тепловозе 2ТЭ116, приведены в табл. 7.2. Полный перечень технических характеристик двигателей серии А, используемых на тепловозах, приведен в [25].

Таблица 7.2

**Технические характеристики асинхронных двигателей, используемых в приводе
вентиляторов охлаждения тепловоза 2ТЭ116**

Параметр	АМВ-37	4АЖ-225	4АЖ-160
	вентиляторы охлаждающего устройства дизеля	вентиляторы тяговых электродвигателей	вентилятор выпрямительной установки
Мощность, кВт	37	45	7,5
Напряжение линейное, В	228/394	228/394	228/394
Ток, А	125/72	125/72	19,5
Частота питающего напряжения, Гц	35—100	35—100	35—100
Коэффициент мощности максимальный	0,84	0,89	0,7
Частота вращения максимальная, об/мин	2000	2000	2000
Класс нагревостойкости изоляции	Н	Н	F
Скольжение	2,3	2,0	1,5
КПД максимальный	0,88	0,85	0,76
Масса, кг	161	269	173

Глава 8. ОСНОВНЫЕ ЦЕПИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЗОМ

8.1. Общие сведения

Для управления энергетическим и вспомогательным оборудованием на тепловозе используется релейная система (см. п. 1.5). На тепловозах серий 2ТЭ25К(А), ТЭП70БС, а также при модернизации тепловозов серии 2ТЭ116 устанавливается цифровая унифицированная система автоматического регулирования электропередачи УСТА, которая выполняет часть функций релейной системы управления. Система УСТА подробно рассмотрена в [2, 33] и в гл. 12, поэтому здесь приведены алгоритмы работы релейных систем управления на примере одного наиболее распространенного тепловоза 2ТЭ116.

Пуск дизеля современных тепловозов осуществляется стартером. В качестве стартера применяется специальная электрическая машина постоянного тока — стартер-генератор. Принцип работы стартер-генератора использует основное свойство электрической машины — ее обратимость, т.е. одна и та же электрическая машина работает в режиме двигателя — при пуске дизеля, раскручивая его коленчатый вал, и в режиме вспомогательного генератора — при работающем дизеле, являясь источником постоянного напряжения. В продолжительном режиме работы стартер-генератор имеет независимое возбуждение с питанием обмотки возбуждения от регулятора напряжения РН (см. рис. 2.3, 8.1).

В период пуска дизеля, когда СТГ работает в режиме стартера, питание цепей управления осуществляется от аккумуляторной батареи АБ. Питание цепей управления при работающем дизеле осуществляется от СТГ, работающего в режиме вспомогательного генератора, постоянным напряжением 110 В (на ряде тепловозов 75 В, см п. 2.4) (см. рис. 8.1).

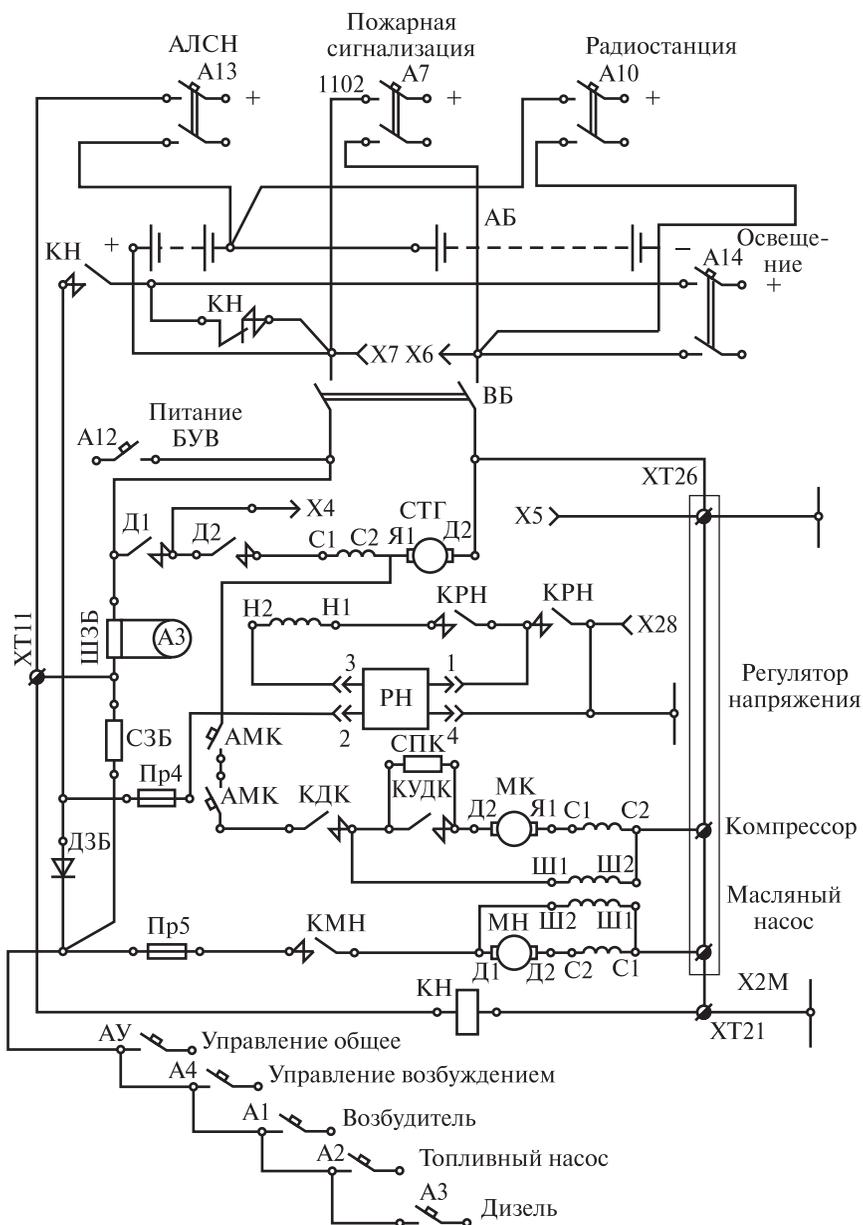


Рис. 8.1. Электрическая схема питания цепей управления и вспомогательных систем тепловоза

Независимо от того, какой агрегат в настоящий момент является источником постоянного напряжения (АБ или СТГ), рубильник аккумуляторной батареи БВ должен быть включен.

Переход питания цепей управления с АБ на СТГ осуществляется автоматически. После завершения пуска дизеля стартер-генератор переходит из стартерного режима в генераторный и включается контактор регулятора напряжения КРН (см. п. 8.3). Главный контакт КРН подключает к обмотке независимого возбуждения Н1—Н2 вспомогательного генератора регулятор напряжения РН (см. п. 5.6). С помощью тиристорных ключей РН регулирует ток в обмотке возбуждения СТГ, обеспечивая на его выходе постоянное напряжение 110 В.

Между источником напряжения (АБ или СТГ) и исполнительными элементами цепей управления (контактами и катушками) установлены контакты автоматических выключателей и тумблеров. Сами автоматы расположены на высоковольтной камере, а тумблеры расположены на пульте управления локомотива; они позволяют машинисту дистанционно управлять включением и отключением систем тепловоза. Кроме того, на пульте управления установлены указатели приборов, контролирующих напряжение и ток тягового генератора, давление воздуха в тормозной магистрали, температуру теплоносителей дизеля. Также на пульт управления вынесены сигнальные лампы аварийных режимов, «Указатель повреждений» и др.

На принципиальных электрических схемах тепловозов изображают все электрические машины, аппараты, приборы, выводы, провода электрических соединений и др. в соответствии с общепринятыми обозначениями по ЕСКД. При этом полагают, что дизель не работает. Положения контактов контакторов и реле показаны при обесточенном состоянии катушек аппаратов. Выключатели изображают в выключенном положении, за исключением тех, для которых нормальным является включенное положение (выключатели реле заземления, реле обрыва полюсов и др.). Все переключатели систем тепловоза изображены в режиме автоматического управления.

При работе тепловозов по системе многих единиц их цепи управления соединяют между собой при помощи розеток межтепловозных

соединений и многожильных кабелей. Цепи электрических аппаратов имеют отводы к розеткам, расположенным на задних торцах секций. При управлении одной секцией тепловоза одноименные аппараты другой секции получают питание через межсекционные кабельные соединения одноименных розеток. Это дает возможность управления двумя и более секциями тепловоза с одного пульта управления. «Минусовые» выводы батарей обеих секций также соединены межсекционными кабелями через розетки.

На принципиальной электрической схеме при работе тепловоза по системе многих единиц главные и вспомогательные контакты реверсора изображают на ведущей секции в положении «Вперед», на ведомой — в положении «Назад».

8.2. Цепи заряда батареи

При пуске дизеля, когда СТГ работает в режиме стартера, его обмотка якоря и обмотка последовательного возбуждения главными контактами пусковых контакторов подключаются к аккумуляторной батарее АБ (см. рис. 8.1). Поскольку пусковой ток в контуре АБ—СТГ достигает 2500 А, батарея за время пуска (7—9 с) сильно разряжается (см. п. 2.5.3). Для поддержания ресурса аккумуляторной батареи ее необходимо после каждого пуска заряжать.

На тепловозах 2ТЭ116 используются батареи с выходным напряжением 96 В. Регулятор напряжения поддерживает напряжение на вспомогательном генераторе 110 В. Поэтому при работающем дизеле, когда стартер перешел в генераторный режим, напряжение на СТГ становится выше напряжения АБ. Разность выходных напряжений в 11—14 В позволяет заряжать аккумуляторную батарею от вспомогательного генератора по цепи: «плюс» СТГ, предохранитель Пр4, диод заряда батареи ДЗБ, резистор заряда батареи СЗБ, шунт амперметра зарядного тока ШЗБ, рубильник ВБ, «плюс» АБ и, далее, от «минус» АБ, через рубильник ВБ, на «минус» СТГ. Если батарея зарядилась и напряжение на ней достигает напряжения СТГ, диод ДЗБ запирается, предотвращая разряд батареи. Для ограничения зарядного тока в его цепи устанавливается резистор СЗБ. Значение зарядного тока контролируется по амперметру АЗ.

8.3. Цепи управления пуском дизеля

Если тепловоз имеет двухсекционное исполнение, то пуск дизеля каждой секции осуществляется отдельно; при этом на время пуска каждого дизеля аккумуляторные батареи АБ обеих секций соединяются параллельно (рис. 8.2, б). В результате увеличивается ток стартер-генератора и создаваемый им момент, что облегчает процесс пуска дизеля и снижает разряд аккумуляторных батарей на пусковых режимах.

Процесс пуска дизеля состоит из нескольких последовательных операций: включение вспомогательных насосов (топливоподкачивающего и маслопрокачивающего); включение силовой схемы пуска; выключение силовой схемы пуска.

1. Включение вспомогательных насосов дизеля. Для подготовки цепей пуска дизеля необходимо:

- включить разъединитель (рубильник) аккумуляторной батареи ВБ (см. рис. 8.1);

- на высоковольтной камере включить автоматические выключатели «Топливный насос» и «Дизель»;

- на пульте повернуть до упора рукоятку блокировки крана машиниста БУ (замкнется контакт БУ) (см. рис. 8.2);

- на пульте установить рукоятку реверсора КМ в одно из рабочих положений («Вперед» или «Назад») и включить автоматический выключатель «Управление общее»;

- на пульте включить тумблер «Насос топливный»; при этом от общего «плюса» (+) через нормально замкнутые контакты регулятора напряжения КРН получает питание контактор топливоподкачивающего насоса КТН (регулятор напряжения выключен, пока дизель не вышел на пусковую частоту вращения).

Контактор КТН:

- главным контактом включает электродвигатель топливного насоса ТН, который начнет подачу топлива к топливным насосам дизеля (см. п. 7.2.1 рис. 7.1);

- вспомогательным контактом подготавливает цепь питания контактора маслопрокачивающего насоса КМН;

- вспомогательным контактом подготавливает цепь питания пускового контактора ДЗ.

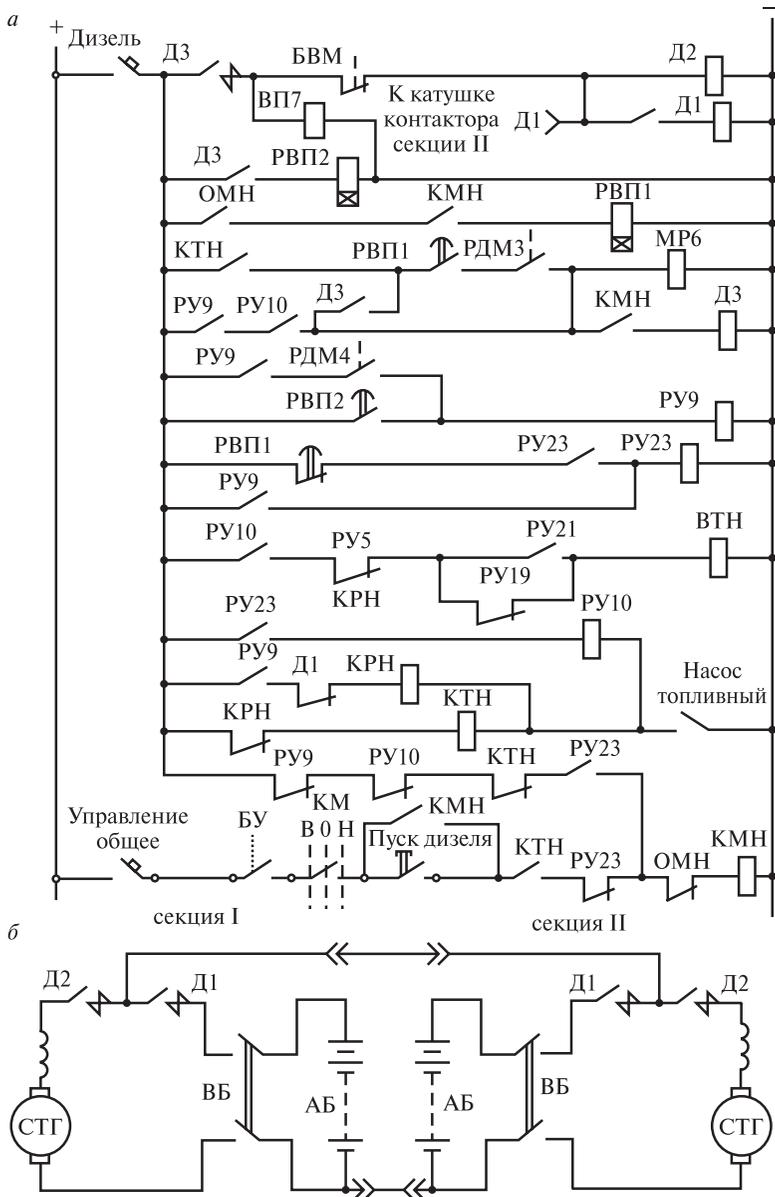


Рис. 8.2. Принципиальная схема пуска дизеля тепловоза 2ТЭ116 стартер-генератором:

а — цепи управления; б — силовая схема

Включение системы пуска дизеля осуществляется кратковременным нажатием кнопки «Пуск дизеля», в результате чего включится контактор маслопрокачивающего насоса КМН. Контактор КМН:

- главным контактом собирает цепь питания электродвигателя маслопрокачивающего насоса МН, который начинает прокачивать маслом системы дизеля (см. п. 7.2.2, рис. 7.1); когда давление масла в системах дизеля достигает требуемого значения, замыкается контакт реле давления масла РДМЗ;

- вспомогательным контактом шунтирует кнопку «Пуск дизеля», обеспечивая работу цепей пуска после размыкания контактов кнопки;

- вспомогательным контактом собирает цепь питания пускового реле времени РВП1, которое контролирует время прокачки дизеля маслом — 70 с;

- вспомогательным контактом подготавливает цепь питания пускового контактора ДЗ.

Через 70 с замыкается контакт реле РВП1, который, если включилось реле РДМЗ, (рис. 8.2, а):

- собирает цепь питания электромагнита МР6; электромагнит МР6 подготавливает регулятор дизеля к режиму наибольшей подачи топлива (пусковой режим);

- собирает цепь питания пускового контактора ДЗ; начинает собираться силовая схема пуска дизеля.

2. *Включение силовой схемы пуска дизеля.* Включившись, контактор ДЗ выполняет переключения в схеме:

- главный контакт ДЗ подает питание на катушку пускового контактора Д2 (через контакт валоповоротного механизма дизеля БВМ, который замкнут, если механизм не находится в зацеплении с валом дизеля); на катушку электропневматического вентиля ускорителя пуска ВП7 (вентиль ВП7 открывает доступ сжатому воздуху к поршню ускорителя пуска, а регулятор дизеля устанавливает рейки в положение максимальной подачи топлива, ускоряя пуск дизеля); на катушку пускового контактора Д1 второй секции (через розетку межтепловозного соединения);

- вспомогательный контакт ДЗ включает пусковое реле времени РВП2, которое начинает отсчет времени процесса пуска дизеля (времени раскручивания коленчатого вала дизеля стартером до пусковых оборотов);

- вспомогательный контакт ДЗ шунтирует контакты РВП1 и РДМ3 в цепи катушек контактора Д3 и электромагнита МР6.

Пусковой контактор Д2 управляет пусковыми коммутационными аппаратами обеих секций тепловоза (см. рис. 8.2, а, б):

- главный контакт Д2 замыкается, подготавливая питание стартера секции, на которой выполняется пуск дизеля;

- вспомогательный контакт Д2 собирает цепи питания пускового контактора Д1 своей секции и контактора Д1 сочлененной секции тепловоза через межтепловозное соединение.

Главные контакты контакторов Д1 соединяют «плюсы» аккумуляторных батарей обеих секций тепловоза и подключают их к одному стартеру; «минусы» батарей соединены через межтепловозное соединение постоянно (рис. 8.2, б). В течение 7 с стартер будет раскручивать коленчатый вал дизеля, получая питание от двух батарей. При этом аккумуляторные батареи создают пусковой ток 1500—2500 А, что приводит к значительному снижению их емкости (см. п. 2.4). Критерием успешного пуска дизеля является увеличение давления в его масляной системе, в результате чего срабатывает реле давления масла РДМ4.

Вспомогательный размыкающий контакт контактора Д1, установленный в цепи контактора регулятора напряжения КРН, исключает его преждевременное включение.

3. Выключение силовой схемы пуска дизеля. Через 7 с от момента включения реле РВП2 (от момента включения силовой схемы пуска дизеля) его замыкающий контакт включает реле РУ9 (см. рис. 8.2, а).

Реле РУ9 выполняет переключения в схеме:

- с помощью своего замыкающего контакта встает на самопитание через замкнувшийся контакт реле РДМ4;

- замыкающий контакт реле РУ9 подготавливает цепь питания контактора регулятора напряжения КРН;

- замыкающий контакт реле РУ9 подготавливает цепь питания электромагнита МР6 при работающем дизеле (при разобранной схеме пуска);

- замыкающий контакт реле РУ9 включает реле РУ23.

Включившись, реле РУ23:

- замыкающим контактом подготавливает цепь самопитания через контакты реле РВП1;

- замыкающим контактом включает реле РУ10;
- замыкающим контактом разбирает цепь питания контактора КМН.

Реле РУ10 собирает цепь питания электромагнита МР6 и вентиля топливных насосов ВТН, который отключает восемь топливных насосов дизеля при его работе на холостом ходу. Кроме того, комбинация замкнутых контактов реле РУ10 и РУ8 на режиме пуска дизеля и первой позиции без нагрузки собирают цепь на «Указатель повреждений» (см. п. 8.17) [12].

Контактор КМН выключается:

- и отключает электродвигатель маслопрокачивающего насоса; дальнейшая работа дизеля происходит при работе насоса с приводом от вала дизеля;

- разбирает силовую схему пуска дизеля: отключает контактор ДЗ, который, в свою очередь, разбирает цепи питания катушек пусковых контакторов Д2, Д1 и реле РВП2; стартер-генератор отключается от АБ;

- разбирает цепь питания реле РВП1 (см. рис. 7.1, а).

Обесточенный контактор Д1 замыкает свой вспомогательный контакт в цепи контактора регулятора напряжения КРН и контактор включается (см. рис. 8.2, а). Главный контакт КРН подключает обмотку независимого возбуждения стартера к регулятору напряжения РН (см. рис. 8.1) и стартер-генератор, получая привод от дизеля, начинает работать в режиме вспомогательного генератора тепловоза. Вспомогательный контакт КРН разбирает цепь контактора КТН; электродвигатель топливоподкачивающего насоса отключается и в дальнейшем подача топлива осуществляется насосом, имеющим привод от дизеля.

Остановка дизеля производится отключением тумблера «Насос топливный», контакты которого размыкают цепи питания катушек контактора КРН и реле РУ10. В результате этого выключается регулятор напряжения РН, стартер-генератор перестает вырабатывать напряжение, а диод ДЗБ, выполняя разделительную функцию, не допускает короткого замыкания аккумуляторной батареи через обмотку якоря стартер-генератора (см. рис. 8.1). Реле РУ10 отключает электромагнит МР6 регулятора дизеля, и рейки топливных насосов дизеля становятся в положение прекращения подачи топлива (см. рис. 8.2, а). Дизель останавливается, давление масла падает, реле РДМ4 размыкает свой контакт и отключает реле РУ9.

При этом замыкается цепь питания катушки контактора КМН от контактов автоматического выключателя «Дизель» через нормально замкнутые контакты реле РУ9, РУ10, контактора КТН, замкнуты контакты реле РУ23 и тумблера ОМН. Главный контакт КМН подключает электродвигатель маслопрокачивающего насоса к батарее АБ, а вспомогательный — включает реле времени РВ1 (см. рис. 7.1, а). Маслопрокачивающий насос начинает прокачивать системы дизеля маслом после его остановки, а реле времени РВ1 контролирует время работы насоса — 70 с. По истечении этого времени реле РВ1 размыкает свой контакт в цепи катушки реле РУ23 и отключает его. Замыкающий контакт РУ23 разбирает цепь питания контактора КМН, электродвигатель МН останавливается, прекращая прокачку дизеля маслом. Электрическая схема возвращается в исходное состояние для пуска дизеля.

При аварийной ситуации экстренная остановка дизеля может быть произведена кратковременным нажатием на кнопку «Останов дизеля» на пульте управления (на схеме не показано). В этом случае рейки топливных насосов дизеля переводятся в положение прекращения подачи топлива, контакторы КРН и КТН отключаются, размыкается цепь питания катушки электропневматического клапана ЭПК тормозной магистрали (производится экстренное торможение поезда, см. п. 8.16).

8.4. Цепи возбуждения тягового генератора

На тепловозе 2ТЭ116 асинхронные электродвигатели привода вентиляторов получают питание от статорных обмоток тягового генератора (см. п. 7.3.1). Поэтому на любой позиции контроллера, в том числе и на нулевой, на фазах генератора должно быть напряжение.

Силовая схема возбуждения тягового генератора тепловоза содержит (см. рис. 4.17):

- обмотку возбуждения тягового генератора Г;
- синхронный возбудитель СВ — однофазный синхронный генератор, обмотка возбуждения которого получает питание от стартер-генератора СТГ;
- управляемый выпрямитель возбуждения УВВ;
- узел коррекции, включающий трансформатор коррекции ТК и выпрямительный мост.

Поскольку дизель уже работает, то стартер-генератор перешел в режим вспомогательного генератора и напряжение на его выходе поддерживается 110 В. Для того чтобы мог включиться контактор возбуждения генератора КВ и собрать цепь питания его обмотки возбуждения, необходимо плотно закрыть двери выпрямительной установки — при этом замкнется контакт конечного выключателя этих дверей БВУ, а также двери высоковольтных камер — замкнутся контакты конечных выключателей дверей БД1, БД2. Кроме того, аппараты защиты — реле заземления РЗ, реле обрыва полюсов РОП и реле максимального тока РМ2 не должны находиться во включенном состоянии (их размыкающие контакты должны быть замкнуты). Переключатель режима возбуждения генератора АП должен быть установлен в положение «Рабочее».

Для включения возбуждения тягового генератора должны быть включены автоматы «Возбудитель» и «Управление возбуждением», расположенные на высоковольтной камере (рис. 8.3, а, б), и «Питание БУВ» (на схеме не показан).

Тогда через контакты выключателя «Управление возбуждением» включатся (рис. 8.3, а):

- промежуточное реле возбуждения РКВ: через размыкающие контакты промежуточного реле тягового режима РКП, реле тормозного режима РТ2, реле РУ5 (участвует в управлении возбуждением генератора в тяговом режиме), токового реле РТ (контролирует ток обмоток тяговых электродвигателей) и замкнувшиеся при пуске дизеля контакты КРН;

- контактор возбуждения генератора КВ через замкнувшийся контакт реле РКВ; главный контакт КВ замкнет цепь обмотки возбуждения тягового генератора Г;

- контактор возбуждения возбудителя ВВ: через замкнувшиеся контакты контактора КВ.

Включение контактора ВВ приводит к включению возбуждения тягового генератора (рис. 8.3, б):

- замыкается главный контакт контактора ВВ в цепи обмотки возбуждения синхронного возбудителя СВ между клеммами 1/11 и 22/13;

- от стартер-генератора СТГ подается напряжение на обмотку возбуждения синхронного возбудителя СВ: «плюс» СТГ, выключатель «Возбудитель», выводы U1—U2 обмотки возбуждения СВ, шунт

Соответственно в обмотке возбуждения генератора Г появляется ток. При положительной полярности напряжения СВ он протекает по цепи: вывод С1 возбудителя СВ, предохранитель ПР1, контакт Р2 и переключка переключателя АП, обмотка Н1—К1 трансформатора ТК, вывод 1 выпрямителя УВВ, тиристор, диод, шунт ШЗ (для измерения тока возбуждения генератора), главный контакт КВ, выводы обмотки возбуждения генератора U1—U2, диод, вывод 2 выпрямителя УВВ, вывод С2 возбудителя СВ.

— на обмотках статора тягового генератора 1С1 — 1С3 и 2С1 — 2С3 появляется переменное напряжение, используемое на нулевой позиции дизеля для питания асинхронных электродвигателей вентиляторов собственных нужд тепловоза.

Для уменьшения подгара контакта КВ и перенапряжений в цепи, возникающих при его размыкании, обмотка Г и контакт КВ шунтируются резистором СГП.

На фиксированной позиции дизеля ток возбуждения генератора регулируется выпрямителем УВВ. Возбудитель СВ изменяет ток возбуждения генератора по позициям контроллера.

8.5. Цепи приведения тепловоза в движение

Для приведения тепловоза в движение тяговые двигатели необходимо соединить с тяговым генератором. Поскольку уже на нулевой позиции дизеля на генераторе имеется напряжение, то для уменьшения коммутационных перенапряжений в силовой цепи на момент подключения двигателей к генератору его напряжение снижается. Это осуществляется кратковременным отключением контактора КВ.

Кроме того, при переходе в тяговый режим работы тепловоза включаются все топливные насосы дизеля (на холостом ходу половина топливных насосов отключается вентилем ВТН, см. п. 8.2).

Для перехода из режима холостого хода в тяговый режим необходимо включить автоматические выключатели «Компрессор», «Пожарная сигнализация», «Локомотивная сигнализация», «Радиостанция», электродвигателя вентилятора выпрямительной установки АВУ, тяговых электродвигателей 1АТ, 2АТ, мотор-вентиляторов охлаждающего устройства 1АВ—4АВ (на схеме не показаны).

После этого необходимо (рис. 8.4):

- включить тумблеры отключателей моторов ОМ1—ОМ6;
- установить реверсивную рукоятку контроллера КМ в соответствии с направлением движения, например в положение «Вперед» (или «Назад»);
- включить тумблер «Управление тепловозом»;
- включить тумблер «Движение»; с этого момента цепь контактора КВ замкнется через контакты тумблеров «Управление тепловозом» и «Движение»;
- перевести штурвал контроллера с нулевой на 1-ю или последующие позиции.

Соединение обмоток тяговых электродвигателей. Изменение направления момента тягового двигателя осуществляется изменением направления тока в его обмотке возбуждения. Для того чтобы можно было менять направление тока в обмотке возбуждения, она соединяется с обмоткой якоря через контакты переключателя реверсора ПР. На локомотивах принято, что направлению движения «Вперед» соответствует согласное соединение обмоток двигателя (на схеме ток обмотки якоря и ток обмотки возбуждения имеют одинаковое направление). При движении «Назад» переключатель реверсора ПР переключает свои контакты таким образом, что обмотки двигателя оказываются включены встречно. Контакты переключателя реверсора ПР переключаются его катушками.

При повороте рукоятки реверсора КМ в положение «Вперед» подготавливается цепь отключения возбуждения тягового генератора и соответствующим образом соединяются обмотки тяговых двигателей:

- получает питание катушка В электропневматического привода реверсора ПР по цепи: выключатель «Управление общее», замкнутый контакт блокировки тормозного крана машиниста БУ (контакт замкнут, когда тормозной кран машиниста находится в положении «Отпуск»), контакт рукоятки реверсора КМ, замкнутый при установке как «Вперед», так и «Назад», контакты 33 и 34 контроллера, замкнутые на 1-й позиции, замкнутые контакты тумблеров «Управление тепловозом» и «Движение», замкнутый контакт В реверсора, катушка В; в результате вспомогательные контакты реверсора ПР устанавливаются в положение «Вперед» (как указано на схеме);

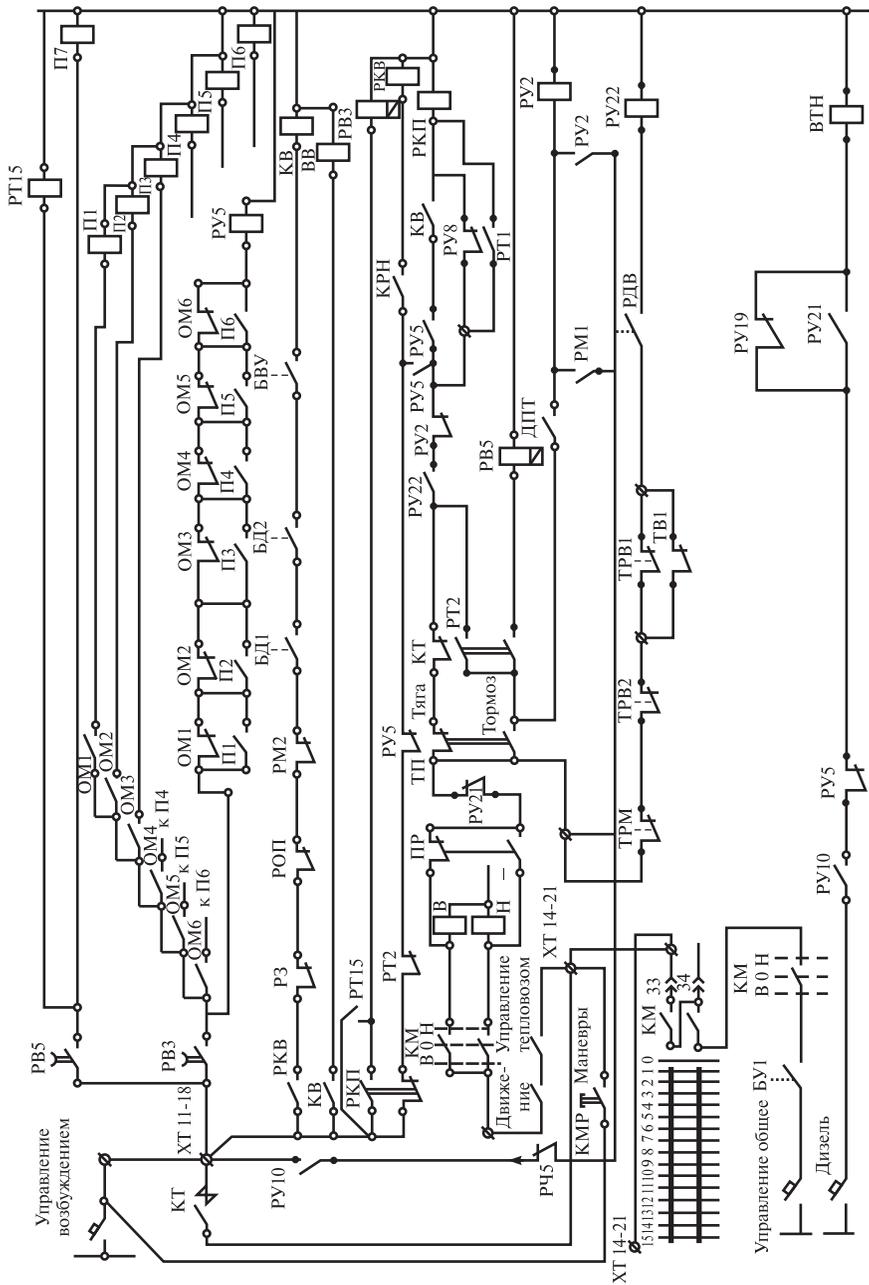


Рис. 8.4. Принципиальная схема цепей управления движением тепловоза

– замыкаются главные контакты переключателя реверсора ПР в положение «Вперед» в цепях обмоток тяговых электродвигателей М1—М6 (как указано на рис. 2.1); при движении «Назад» положения контактов ПР меняется на противоположное (при этом изменяется направление тока в обмотках возбуждения электродвигателей).

После включения вспомогательных контактов ПР замыкается цепь питания катушки реле РУ22: тумблер «Движение», контакт В рукоятки реверсора КМ, вспомогательный контакт переключателя реверсора ПР, размыкающие контакты реле РУ21, температурных реле ТРМ, ТРВ1, ТРВ2 (контролируют температуру масла, воды первого и второго контуров охлаждения дизеля — замкнуты при допустимой температуре теплоносителей), реле РДВ (контролирует давления воздуха в тормозной магистрали — замкнут при нормальном давлении воздуха в тормозной магистрали тепловоза).

Реле РУ22 включает цепь питания катушки реле РКП, переключающего схему управления возбуждением генератора для работы в тяговом режиме: тумблер «Движение», контакт В (или Н) рукоятки реверсора КМ, вспомогательный контакт переключателя реверсора ПР, размыкающий контакт реле РУ21, вспомогательный контакт тормозного переключателя ТП, замкнутый в положении «Тяга», вспомогательный контакт тормозного контактора КТ, контакты реле РУ22, РУ2 (включение РУ2 предотвращает сборку схемы электрического торможения), РУ8 (подключает к цепям управления «Указатель повреждений» на нулевой и 1-й позиции без нагрузки).

Реле РКП контактами на переключение выполняет переключения в схеме:

- размыкает цепь питания катушки реле возбуждения РКВ;
- замыкает цепь питания катушки реле времени РВ3.

Выключившись, реле РКВ разбирает цепь питания контактора КВ, а следовательно, и контактора ВВ (см. рис. 8.4) — ток возбуждения тягового генератора снижается постепенно из-за значительной индуктивности обмотки возбуждения. На пульте машиниста загорается сигнальная лампа «Сброс нагрузки».

Таким образом, включившись, реле РКП отсоединяет цепь контактора КВ от выключателя «Управление возбуждением».

Подключение цепей тяговых электродвигателей к выпрямительной установке. Одновременно с отключением контактора КВ без вы-

держки времени замыкается контакт реле времени РВЗ и питание поступает на катушки электропневматических вентилях привода поездных контакторов П1—П6 по цепи: выключатель «Управление возбуждением», контакт РВЗ с выдержкой времени на размыкание, замкнутые контакты тумблеров ОМ1—ОМ6.

Поездные контакторы П1—П6 выполняют переключения в схемах:

- главными контактами подключают обмотки тяговых электродвигателей М1—М6 к выпрямительной установке ВУ (см. рис. 2.1);

- вспомогательными контактами подключают блок диодного сравнения БДС на напряжение обмоток возбуждения тяговых электродвигателей (выводы О1) (см. п. 6.10);

- вспомогательными контактами включают реле РУ5 (см. рис. 8.4): выключатель «Управление возбуждением», контакт РВЗ, вспомогательные замыкающие контакты П1—П6, катушка РУ5.

При включении реле РУ5 лампа «Сброс нагрузки» гаснет, что свидетельствует о том, что схема тягового режима собралась. Если лампа продолжает гореть, это говорит о том, что цепи управления тяговым режимом не собрались. Поиск отказавшего аппарата осуществляется с помощью указателя повреждений.

Включение возбуждения тягового генератора. Включившись, реле РУ5:

- восстанавливает питание катушки реле РКВ, но уже не от выключателя «Управление возбуждением» (в этой цепи разомкнулись контакты реле РКП), а от выключателя «Управление тепловозом»: контакты тумблеров «Управление тепловозом» и «Движение», контакт В (или Н) рукоятки реверсора КМ, вспомогательный контакт переключателя реверсора ПР, размыкающий контакт РУ21, вспомогательный контакт тормозного переключателя ТП, замкнутый в положении «Тяга», вспомогательный размыкающий контакт тормозного контактора КТ и контакты реле РУ22, РУ2, РУ5, КРН, катушка РКВ; после включения реле РКВ включаются контакторы КВ и ВВ, собирая цепь возбуждения генератора;

- размыкает цепь питания катушки вентиля ВТН, обеспечивая работу всех топливных насосов дизеля (рис. 8.2, а);

- дублирует цепь питания катушки реле РКП через вспомогательный контакт КВ (так как при переходе на 2-ю и последующие позиции дизеля контакт реле РУ8 размыкается);

– отключает резистор R_{cy1} селективного узла, увеличивая сигнал уставки (см. рис. 8.5); при увеличении уставки ток управления на выходе СУ снижается (см. п. 4.3), а, следовательно, возрастет возбуждение тягового генератора (см. рис. 4.7).

Таким образом, возбуждение тягового генератора восстанавливается через цепь контакта 33 контроллера КМ, включенного на всех поездных позициях (1–15). Напряжение тягового генератора через ВУ поступает на обмотки тяговых электродвигателей, которые приводят тепловоз в движение.

Комбинация замкнутых контактов РУ8 и РУ21 подключает «Указатель повреждений» к цепям управления на тяговых позициях (см. п. 8.17)

При перемещении рукоятки контроллера на тяговые позиции система регулирования напряжения тягового генератора формирует его характеристики, приведенные на рис. 4.13, б.

При переводе контроллера на нулевую позицию (или при срабатывании аппаратов защиты) сначала отключаются контакторы КВ и ВВ, а поездные контакторы П1–П6 остаются включенными еще в течение 0,8 с за счет выдержки времени на размыкание контакта реле РВ3. Поэтому к моменту отключения поездных контакторов магнитное поле тягового генератора в значительной мере уменьшается, напряжение тягового генератора снижается и облегчается гашение дуги поездными контакторами.

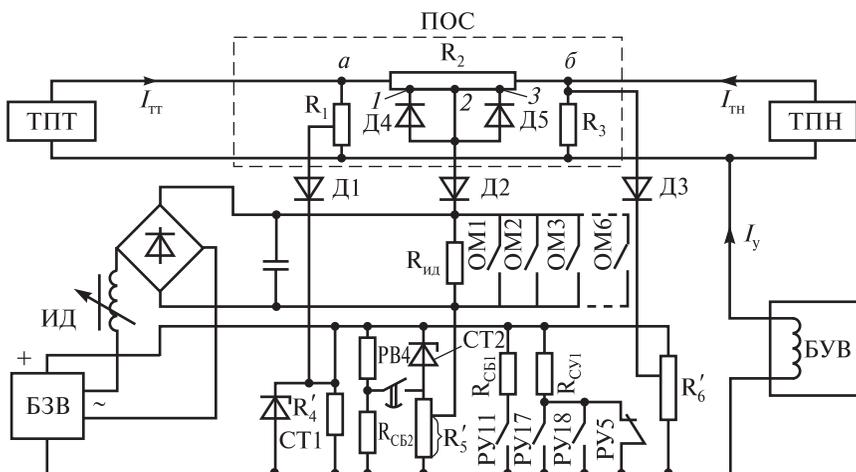


Рис. 8.5. Принципиальная схема селективного узла в тяговом режиме

8.6. Цепи набора позиций контроллера

Режимы работы дизелей магистральных тепловозов делятся на шестнадцать позиций: одну — холостого хода и пятнадцать рабочих позиций. Каждой позиции контроллера соответствует определенная комбинация включения электромагнитов МР1—МР4, которые изменяют затяжку всережимной пружины объединенного регулятора дизеля. Четыре электромагнита могут сформировать шестнадцать различных комбинаций $2^4 = 16$, т.е. обеспечить шестнадцать режимов затяжки пружины регулятора дизеля.

Поэтому изменение позиций контроллера сводится к переключениям электромагнитов МР1—МР4 с помощью контроллера, в результате чего меняется частота вращения вала дизеля. Например, на 2-й позиции будут замкнуты контакты контроллера 20 и 24 и включены электромагниты МР1 и МР4; на 3-й позиции — замкнут контакт 24 контроллера и включен электромагнит МР1 и т.д.

Питание электромагнитов осуществляется от выключателя «Управление общее» через контакты блокировки тормоза БУ1, рукоятки реверсора КМ и соответствующие контакты контроллера КМ (см. рис. 8.6).

Набор позиций при работе дизеля под нагрузкой. После завершения пуска дизеля и выхода на режим холостого хода происходит автоматическое включение возбуждения тягового генератора (для питания мотор-вентиляторов), но выключенное реле РУ5 (оно включается в только режиме тяги) шунтирует потенциометры уставок селективного узла, в результате чего снижается напряжение тягового генератора до безопасного для мотор-вентиляторов значения.

В тяговом режиме, начиная с 1-й позиции получает питание катушка реле РУ5. Один размыкающий контакт РУ5 отключает вентиль ВТН, и все топливные насосы включаются (рис. 8.2). Поэтому в тяговом режиме набор позиций происходит при включенных топливных насосах путем переключения электромагнитов МР1—МР4.

Другой размыкающий контакт РУ5 увеличивает уставку селективного узла, и возбуждение тягового генератора увеличивается соответственно тяговому режиму (рис. 8.5).

Кроме того, начиная с 1-й позиции можно вручную ограничивать боксование колесных пар. Если штатная система защиты от

боксования с блоком БДС (см. п. 6.10) оказывается неэффективной, включением тумблера ТОВ начиная с 1-й позиции собирается цепь питания катушки реле РУ18 (см. рис. 8.6). Его замыкающий контакт шунтирует сопротивление уставки селективного узла, увеличивая ток управления и дополнительно снижая возбуждение тягового генератора (рис. 8.5)

Если локомотив выполнен в двухсекционном исполнении, то при запущенных дизелях набор их позиций происходит синхронно на обеих секциях контроллером ведущей секции. Для этого клеммы цепей управления ведущей и ведомой секции соединены между собой кабелями через розетки межтепловозных соединений. Например, при переводе контроллера ведущей секции на 2-ю позицию и замыкании контактов 20 и 24 клеммы ТХ13—11 и ТХ13—8 этой секции через розетки межтепловозного соединения Х1—2 и Х1—18 соединяются с аналогичными клеммами ведомой секции.

Начиная с 4-й позиции через контакт 36 контроллера и контакт реле РУ17 получает питание катушка контактора аварийного возбуждения тягового генератора КАВ (рис. 8.6). Если на режиме аварийного возбуждения генератора начинается боксование колесных пар и сработает реле РУ17, его контакт разорвет цепь питания контактора КАВ. Размыкающий силовой контакт КАВ в цепи обмотки возбуждения генератора увеличивает сопротивление этой цепи, в результате чего напряжение генератора и момент на колесе двигателя уменьшаются (см. рис. 4.17).

Другой замыкающий контакт РУ17 снижает уставку в селективном узле, тем самым дополнительно уменьшая напряжение генератора (см. рис. 8.5).

Набор позиций при работе дизеля на холостом ходу. Алгоритм работы цепей управления тепловоза предусматривает переход дизеля из режима работы под нагрузкой на режим холостого хода с помощью тумблера «Холостой ход» независимо от положения контроллера.

Например, при включении тумблера «Холостой ход I» от выключателя «Управление общее» получают питание реле РУ21 и РУ20 первой секции.

Реле РУ21:

– размыкает свой контакт в цепи катушки РКП, что исключает работу тепловоза в тяговом режиме (см. рис. 8.4);

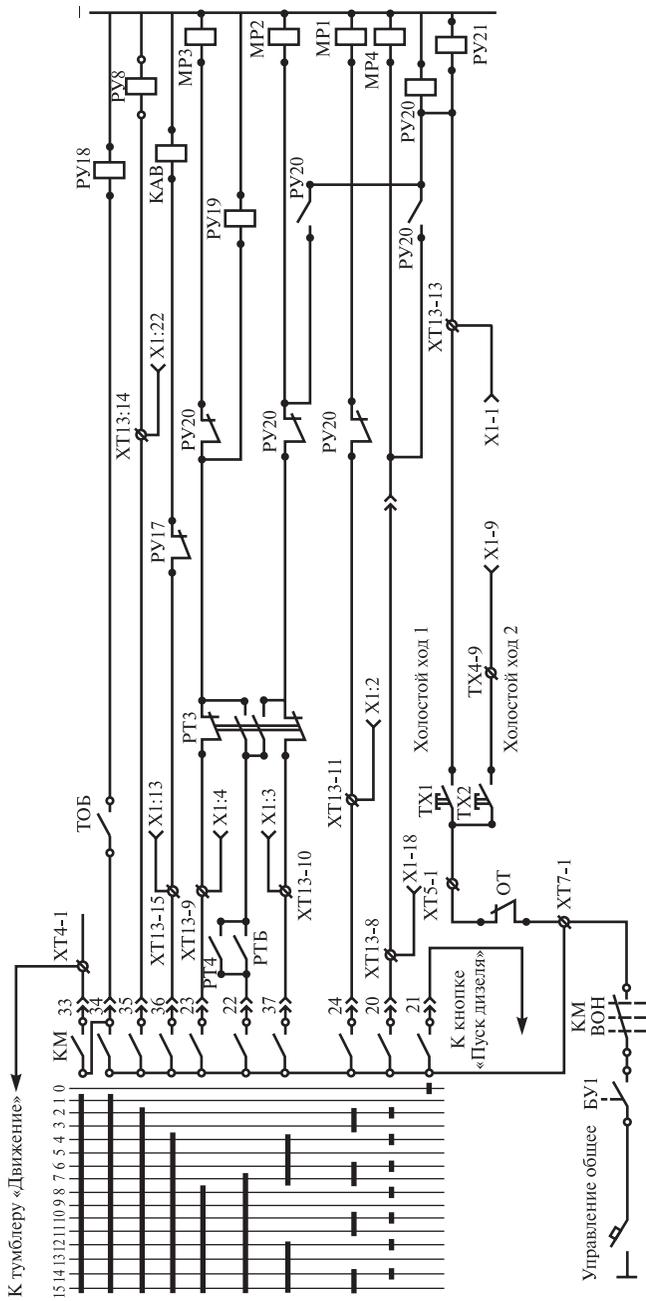


Рис. 8.6. Принципиальная схема цепей управления набором позиций дизеля

– замыкающий контакт независимо от позиции контроллера обеспечивает питание вентиля ВТН, который отключает один ряд топливных насосов дизеля (размыкающий контакт РУ19 в цепи катушки ВТН разомкнут, начиная с 8-й позиции контроллера) (см. рис. 8.2, 8.4).

Реле РУ20:

– замыкает свои контакты в цепи катушек электромагнитов МР2 и МР4, обеспечивая их постоянное включение независимо от позиции контроллера;

– размыкает свои контакты в цепи катушек электромагнитов МР3 и МР1, обеспечивая их постоянное выключение независимо от позиции контроллера; такая комбинация включения электромагнитов регулятора соответствует 4-й позиции.

Цепи управления двухсекционного тепловоза имеют тумблеры автономного холостого хода ведущей и ведомой секции (см. рис. 8.6). Включением тумблеров ТХ1 и ТХ2 каждая из секций тепловоза может быть переведена в режим автономного холостого хода, т.е. независимо от режима работы другой секции.

При включении тумблера ТХ2 напряжение от клеммы ТХ4-9 ведущей секции через кабель и розетку межтепловозного соединения поступает на клемму ТХ13-13 и, далее, на катушки реле РУ20, РУ21 ведомой секции, которые выполняют те же переключения, что и на ведущей секции тепловоза.

Режим автономного холостого хода исключается при размыкании контакта тумблера отключения тормоза ОТ, когда включен электрический тормоз (см. п. 8.10).

Для того чтобы можно было независимо управлять секциями тепловоза в режиме электрического торможения, в цепи электромагнитов МР2 и МР3 установлены контакты тормозного реле РТ3. При включении режима электрического торможения контакты РТ3 переключаются и управление электромагнитами осуществляется уже от тормозного контроллера.

8.7. Цепи отключения напряжения тягового генератора при срабатывании защиты дизеля

Срабатывание защиты или быстрый перевод контроллера с тяговой позиции на нулевую (сброс позиций) приводит вначале к отключению возбуждения тягового генератора, а затем к его автоматическому

восстановлению по цепи режима холостого хода, т.е. с питанием катушки реле РКВ от выключателя «Управление возбуждением». Например, при срабатывании реле ТРМ, ТРВ1 или ТРВ2 отключается реле РУ22 и своим контактом разбирает цепи питания катушек реле РКП и РКВ (см. рис. 8.4). Выключившись, реле РКВ разомкнет цепь питания контактора КВ и схема возбуждения тягового генератора разберется.

Контакт на переключение РКП отключит катушку реле времени РВ3. Размыкающий контакт РВ3 с выдержкой времени 0,8 с отключит цепи питания катушек поездных контакторов П1—П6 и катушки реле РУ5. К концу этой выдержки времени при отключенном возбуждении генератора самоиндукция в цепи «тяговый генератор—тяговые двигатели» существенно снижается. Такой алгоритм управления схемой уменьшает подгар главных контактов поездных контакторов при их размыкании. Контакты П1—П6 размыкаются, отключая тяговые двигатели от тягового генератора

Одновременно с поездными контакторами отключается реле РУ5 и переключаются его контакты в цепи катушки реле возбуждения РКВ.

Теперь цепь питания катушки реле РКВ собирается от выключателя «Управление возбуждением», как предусмотрено для нулевой позиции.

Реле РКВ собирает цепь питания катушки контактора КВ, и возбуждение тягового генератора восстанавливается для питания мотор-вентиляторов.

8.8. Управление схемой при аварийном отключении тягового двигателя

Электрической схемой тепловоза предусматривается возможность отключения любого из тяговых электродвигателей в случае его неисправности одним из тумблеров ОМ1—ОМ6. После этого тепловоз будет продолжать работу на пяти оставшихся исправных двигателях (если характер неисправности допускает вращение колесной пары вышедшего из строя двигателя) до прибытия в депо для ремонта. Например, при отключении первого электродвигателя тумблером ОМ1 выполняются следующие переключения в схеме (см. рис. 8.4):

- размыкается цепь питания катушки контактора П1 (см. рис. 8.4), который своими главными контактами отключает тяговый электродвигатель от выпрямительной установки (см. рис. 2.1);
- шунтируется вспомогательный контакт контактора П1 в цепи реле РУ5, что обеспечивает возможность включения возбуждения генератора;
- в канале мощности селективного узла шунтируется потенциометр СИД индуктивного датчика (см. рис. 8.5); уставка по мощности снижается, ток управления селективного узла увеличивается, возбуждение тягового генератора и его напряжение уменьшаются (генератор с гиперболической характеристики переходит на селективную характеристику).

При выключении соответствующим тумблером какого-либо другого неисправного электродвигателя работа системы управления аналогична.

8.9. Управление тепловозом в маневровом режиме

Для управления тепловозом при маневрах на станционных путях удобно пользоваться кнопкой КМР «Маневры», которая должна включаться только при установке контроллера на нулевую позицию (см. рис. 8.4). При ее нажатии напряжение от выключателя «Управление возбуждением» подается в цепь включения тягового режима непосредственно к тумблерам «Управление тепловозом» и «Движение». Так как регулятор дизеля поддерживает частоту вращения коленчатого вала нулевой позиции, режим работы генератора (ток, напряжение и мощность) будет соответствовать первой тяговой позиции.

8.10. Цепи управления в режиме электрического торможения

На тепловозах более позднего выпуска система регулирования электрического торможения собрана в блоке БА1, что исключает использование селективного узла в режиме электрического торможения (рис. 8.7).

Режим электрического торможения возможен на тепловозе при заблокированной системе пневматического торможения с помощью электропневматического вентиля ВБТ (вентиля блокирования тормоза).

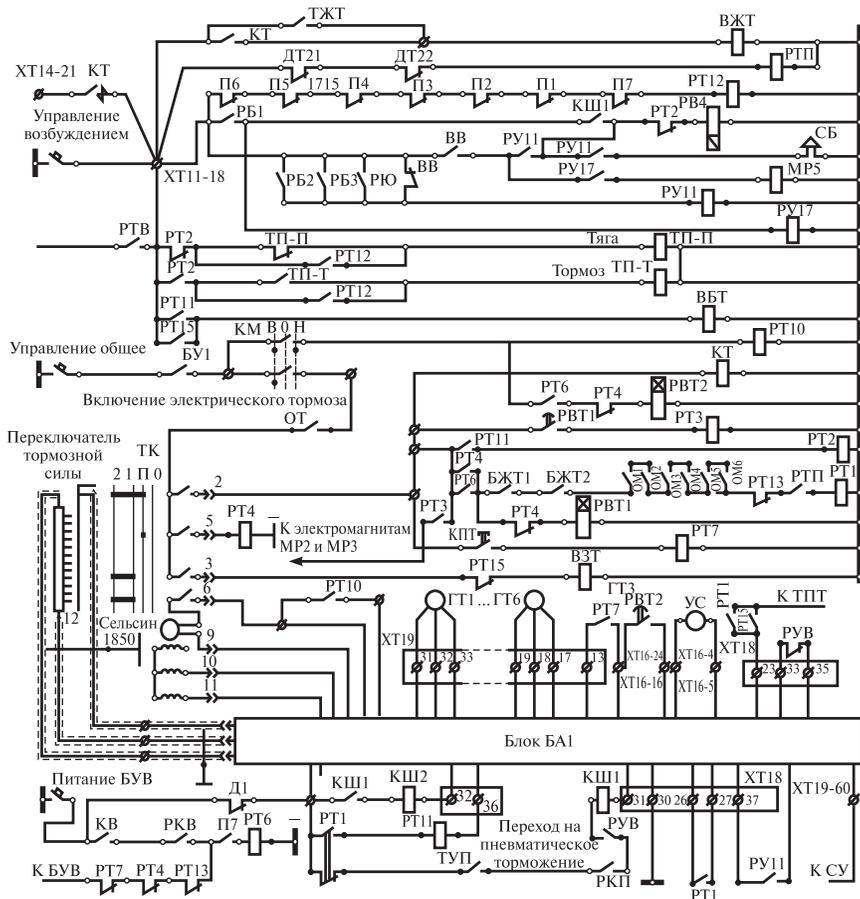


Рис. 8.7. Принципиальная схема цепей управления электрическим тормозом

Для перехода в режим электрического торможения необходимо установить штурвал контроллера машиниста на нулевую позицию (при этом разбирается силовая схема тепловоза), включить тумблер «Включение электрического тормоза» ОТ (см. рис. 8.7) и, нажав на кнопку, встроенную в штурвал, перевести его на тормозную позицию. При этом контакт 33 контроллера размыкается и цепи контакторов КВ и ВВ тягового режима разбираются (см. рис. 8.4). Контакты тумблеров ОМ1—ОМ6 должны быть замкнуты.

Для работы цепи возбуждения генератора необходимо чтобы, как и в режиме тяги, были включены тумблеры «Питание БУВ», «Управление тепловозом» и «Движение».

Скорость тепловоза в режиме электрического торможения контролируется с помощью тахогенераторов ГТ1—ГТ6 (см. рис. 8.7).

Подготовка цепей для перехода в тормозной режим. При установке тормозного контроллера ТК на тормозную позицию П от выключателя «Управление общее» получают питание:

- тормозной контактор КТ: блокировка крана машиниста БУ1, контакт рукоятки реверсора КМ, тумблер ОТ, контакт 2 тормозного контроллера, катушка КТ;

- тормозное реле РТ4 (подготавливает цепи для перехода дизеля на 13-ю позицию): блокировка БУ1, контакт реверсора КМ, тумблер ОТ, контакт 5 тормозного контроллера, катушка РТ4.

Контактор КТ выполняет переключения в схеме для перехода энергетической цепи в режим электрического торможения:

- главный контакт КТ подводит напряжение к тумблерам «Управление тепловозом» и «Движение» (см. рис. 8.4) от выключателя «Управление возбуждением»: клемма ХТ 11-18, контакт КТ, клемма ХТ 14-21 (минуя контакты контроллера тягового режима 33 и 34);

- вспомогательный размыкающий контакт КТ отключает цепь питания реле РКП, а следовательно исключает возможность включения реле времени РВ3 и поездных контакторов П1—П6;

- вспомогательный замыкающий контакт КТ собирает цепь питания катушки электропневматического вентиля ВЖТ привода жалюзи тормозных резисторов (см. рис. 8.7): выключатель «Управление возбуждением», клемма ХТ 11-18, контакт КТ, вентиль ВЖТ.

После открытия жалюзи и замыкания их контактов БЖТ1 и БЖТ2 включается тормозное реле РТ1: выключатель «Управление общее», блокировка БУ1, контакты реверсора КМ, тумблер ОТ, контакт 2 тормозного контроллера, замкнутые контакты реле РТ4, вентилей БЖТ1 и БЖТ2, включенные тумблеры ОМ1—ОМ6, катушка РТ1.

Реле РТ1 собирает цепи питания блоков автоматики в тормозном режиме:

- первый замыкающий контакт РТ1 между клеммами 26 и 27 собирает цепи блока автоматики тормозного режима БА1, обеспечивая его работу;

– второй замыкающий контакт РТ1 через клемму 25 создает цепь обратной связи по току якорей тяговых электродвигателей (тормозному току) с блоком БА1;

– контакт на переключение РТ1 блокирует включение контактора ослабления возбуждения КШ1 и подает напряжение на катушку тормозного реле РТ11 от блока БА1 через клемму 36.

Контакт КШ1 блокирует контактор ослабления возбуждения КШ2; таким образом исключается возможность ослабления возбуждения тяговых электродвигателей при их работе в тормозном режиме.

Если скорость тепловоза, контролируемая с помощью тахогенераторов ГТ1—ГТ6, достаточна для эффективного электродинамического торможения, блок БА1 создает на клемме 36 напряжение, достаточное для включения реле РТ11.

Реле РТ11 выполняет переключения в схеме:

– замыкающий контакт включает электропневматический вентиль блокировки пневматического тормоза ВБТ (блокирует работу пневматического тормоза): выключатель «*Управление возбуждением*», клемма ХТ 11-18, контакт РТ11, катушка ВБТ;

– замыкающий контакт включает реле РТ2: выключатель «*Управление общее*», блокировка БУ1, контакт реверсора КМ, тумблер ОТ, контакт 2 тормозного контроллера, контакт РТ11, катушка РТ2.

Включившись, реле РТ2:

– создает цепь питания катушки электропневматического вентиля привода тормозного переключателя ТП-Т: выключатель «*Управление возбуждением*», клемма ХТ 11-18, контакт РТ2, контакт РТ12 (реле РТ12 включено, так как поездные контакторы обесточены и их контакты в цепи катушки реле РТ12 замкнуты), катушка вентиля ТП-Т;

– разрывает цепь катушки реле РКВ, а следовательно, исключает возможность включения контакторов возбуждения тягового генератора КВ и ВВ (см. рис. 8.4).

После включения реле ТП-Т оно становится на самопитание, шунтируя контакты реле РУ12, и устанавливает тормозной переключатель ТП в тормозное положение.

Цепи включения обмоток тяговых двигателей на выпрямительную установку и тормозные сопротивления. Главные контакты переключо-

чателя ТП устанавливаются в положение, противоположное изображенному на рис. 2.1. Поскольку поездные контакторы П1—П6 выключены и цепи тяговых электродвигателей М1—М6 обесточены, коммутация происходит без образования электрической дуги. В результате переключения обмотки якорей тяговых электродвигателей отсоединяются от обмоток возбуждения и включаются на тормозные резисторы СТ через разомкнутые главные контакты поездных контакторов П1—П6. Например, для первого электродвигателя цепь подключения следующая: вывод Я2 обмотки добавочных полюсов, главный контакт ТП, резистор СТ, измерительный шунт Ш1, главный контакт П1, вывод обмотки якоря Я1.

После установки переключателя ТП в тормозное положение:

- главные контакты ТП соединяют последовательно обмотки возбуждения С1—С2 электродвигателей, подготавливая их к подключению на ВУ через балластные и тормозные резисторы;

- контакт на переключение ТП возобновляет питание реле РКП от выключателя «Управление возбуждением»: клемма ХТ 11-18, контакт КТ, клемма ХТ14-21, тумблеры «Управление тепловозом» и «Движение», контакты переключателя реверсора ПР и реле РУ 21, контакт на переключение ТП, замкнувшийся в положение «Тормоз», контакты реле РТ2, РУ22, РУ2, РУ8, катушка РКП (см. рис. 8.4);

- контакт на переключение ТП от тумблеров «Управление тепловозом» и «Движение» включает реле времени РВ5 (через контакт реле РТ2).

Реле РВ5 замыкающим контактом с выдержкой времени на размыкание собирает цепи питания катушек тормозного контактора П7 и реле РТ15: выключатель «Управление возбуждением», клемма ХТ 11-18, замыкающий контакт РВ5, катушки П7 и РТ15.

После включения тормозного контактора П7 его главный контакт подключает к выпрямительной установке обмотки возбуждения тяговых двигателей: «плюс» ВУ, тормозные резисторы СТ, измерительный шунт Ш2 (измеряет ток возбуждения электродвигателей), главный контакт П7, главный контакт реверсивного переключателя ПР, замкнутый для движения «Вперед» (обратно, представленному на рис. 2.1), обмотка возбуждения С1—С2 тягового электродвигателя М6, главный контакт ПР, главный контакт тормозного переключателя

чателя ТП, далее — аналогично через обмотки возбуждения С1—С2 тяговых двигателей М2—М5, балластный резистор СБТ, контакт ПР, обмотка возбуждения С1—С2 тягового электродвигателя М1, контакты ПР, «минус» ВУ.

Замыкающий контакт реле РТ15 включает реле времени РВ3 по цепи: выключатель «Управление возбуждением», клемма ХТ11-18, замыкающий контакт РТ15, катушка РВ3.

Размыкающий контакт реле РТ15 разбирает цепь питания электропневматического вентиля ВЗТ, предотвращая его включение при установке контроллера в положение электрического торможения (см. рис. 8.7). Если по какой-либо причине произойдет разборка схемы электрического торможения, то наряду с другими аппаратами отключится реле РТ15 и замкнет цепь питания вентиля ВЗТ. Включившись, вентиль ВЗТ обеспечит переход тепловоза на пневматическое торможение.

Реле РВ3 включает поездные контакторы П1—П6 и реле РУ5. Главные контакты поездных контакторов соединяют обмотки якорей тяговых электродвигателей и тормозные резисторы (см. рис. 2.1), а контакт РУ5 собирает цепь питания катушки реле РКВ (см. рис. 8.4).

Включение возбуждения тягового генератора. Реле РКВ своим контактом включает контакторы КВ и ВВ, но тяговый генератор возбуждения не получает, так как на позиции контроллера П тормозное реле РТ4 включено и его контакты размыкают цепь питания БУВ от выключателя «Питание БУВ» (см. рис. 8.7). Тиристоры выпрямителя УВВ закрыты, и ток в обмотку возбуждения генератора не поступает. Следовательно, не получают питание обмотки возбуждения тяговых электродвигателей, а сами двигатели не создают тормозного момента.

После замыкания вспомогательных контактов КВ, РКВ и П7 от выключателя «Питание БУВ» напряжение поступит на катушку реле РТ6. При включении реле РТ6:

— один замыкающий контакт РТ6 шунтирует контакт реле РТ4 в цепи катушки РТ1 и обеспечивает ее питание после перевода штурвала контроллера на тормозные позиции 1, 2;

— второй замыкающий контакт РТ6 подготавливает включение реле РВТ2 от выключателя «Управление общее»;

– третий контакт создает цепь на сигнальную лампу (на схеме не показано), включение которой свидетельствует о завершении сборки электрической схемы торможения.

После установки контроллера на 1-ю тормозную позицию через его контакты 6 на ротор сельсина с блока БА1 поступает стабилизированное напряжение. Напряжение, снимаемое со статора сельсина преобразуется в блоке БА1 в уставку по скорости, которая должна автоматически поддерживаться при электрическом торможении. Это же напряжение поступает к указывателю УС, который показывает скорость, задаваемую машинистом.

Тормозная сила режима задается переключателем тормозной силы.

На 1-й тормозной позиции контакт контроллера отключает цепь питания катушки реле РТ4. При этом в схеме происходят переключения:

– один размыкающий контакт реле РТ4 замыкается и напряжение от выключателя «Питание БУВ» поступает на вход БУВ;

– другой размыкающий контакт РТ4 включает реле времени тормозного режима РТВ1 по цепи: выключатель «Управление общее», контакт реверсора КМ, контакт тормозного контроллера 2, замкнутый контакт РУ6;

– третий размыкающий контакт РТ4 включает реле времени тормозного режима РТВ2 по цепи: выключатель «Управление общее», контакт реверсора КМ и замкнутый контакт РТ6.

Через 3 с после включения реле РВТ1 он замыкает свой контакт в цепи катушки тормозного реле РТ3 и собирает цепь его питания от выключателя «Управление общее» через контакт 2 тормозного контроллера. Контакты реле РТ3 переключают электромагниты МР2 и МР3 на питание через контакты 2 тормозного контроллера. Таким образом, через 3 с после установки штурвала контроллера на 1-ю тормозную позицию дизель переходит на частоту вращения, соответствующую 13-й позиции.

С выдержкой времени 10 с замыкается контакт РТВ2 между клеммами ХТ16-16 и ХТ18-24 и собирает цепи блока БА1; это создает предварительную ступень торможения с пониженным тормозным моментом электродвигателей.

Энергия, генерируемая тяговыми электродвигателями, рассеивается на тормозных резисторах СТ (см. рис. 2.1). На напряжение

этих резисторов включены мотор-вентиляторы МВТ1 и МВТ2, предназначенные для охлаждения самих тормозных резисторов. Таким образом, интенсивность охлаждения тормозных резисторов зависит от значения тормозного тока.

8.11. Цепи взаимодействия электрического и пневматического тормоза

При работе системы пневматического торможения тепловоза включение системы электрического торможения исключается.

Для контроля за состоянием системы пневматического торможения тепловоза используется датчик давления воздуха на входе в тормозные цилиндры ДПП. Замыкающий контакт ДПП установлен в цепи катушки реле РУ2 (см. рис. 8.4). При включении пневматического тормоза датчик ДПП срабатывает и включает реле РУ2. Размыкающий контакт РУ2 разбирает цепь реле РКП. Реле РКП своим контактом на переключение отключает реле времени РВ3 и цепи поездных контакторов П1—П6 разбираются. В результате силовая схема электрического тормоза собраться уже не может.

При электрическом торможении режим пневматического торможения блокируется включением вентиля ВБТ (см п. 8.10).

Если при работе на тормозной позиции ТК система электрического тормоза разбирается устройством защиты или из-за того, что скорость движения тепловоза стала ниже минимально допустимой для эффективной работы системы, отключается реле РТ15 (см. п. 8.10, рис. 8.4). Тогда напряжение от контакта 3 ТК через размыкающий контакт РТ15 поступает на катушку вентиля ВЗТ.

Включение вентиля ВЗТ приводит к автоматическому переходу на режим пневматического торможения, при котором в тормозных цилиндрах устанавливается давление 1,5 кгс/см². Дальнейшее торможение тепловоза осуществляется машинистом с помощью тормозного краном машиниста.

8.12. Цепи защиты от юза колесных пар

Для защиты от юза колесных пар тепловоза в режиме электрического торможения предназначено реле юза РЮ, катушка которого, как и катушки реле боксования РБ1—РБ3 включены на выходное напряжение блока диодного сравнения БДС (см. рис. 2.1). Поскольку при собранной схеме электрического торможения контактор П7

включен (соединяет обмотки возбуждения тяговых электродвигателей с выпрямительной установкой), его вспомогательный размыкающий контакт отключает реле боксования РБ1, РБ2, РБ3 и реле обрыва обмоток возбуждения электродвигателей РОП от блока БДС. В результате на блок БДС остается включенным только реле РЮ.

Если частота вращения одной колесной пары (или нескольких колесных пар) снижается быстрее, чем другие, то, как и в случае боксования, между обмотками добавочных полюсов тяговых электродвигателей возникает разность потенциалов (см. п. 6.10). Под действием этой разности потенциалов через катушку РЮ начинает протекать ток. При определенном значении этого тока РЮ срабатывает и замыкает свой контакт в цепи катушки РУ11 (см. рис. 8.7): выключатель «Управление возбуждением», клемма ХТ11-18, замыкающий контакт РЮ (размыкающий контакт ВВ разомкнут, так как при работе электрического торможения возбуждение генератора включено), катушка РУ11.

При срабатывании реле РУ11:

- включается звуковой сигнал СБ: выключатель «Управление возбуждением», замыкающие контакты ВВ, РУ11, РУ11;

- понижается тормозной момент тяговых электродвигателей, что обеспечивается замыканием контактов реле РУ11 в цепи уставки селективного узла и снижением напряжения тягового генератора; (на тепловозах более позднего выпуска система регулирования электрического торможения собрана в блоке БА1, поэтому снижение напряжения тягового генератора на них осуществляется блоком БА1 при замыкании контакта РУ11, см. рис. 8.7);

- включается сигнальная лампа (на схеме не показано).

8.13. Цепи защиты от превышения допустимого тока торможения

Для защиты тяговых двигателей от недопустимых тормозных токов используется реле максимального тока РМ1, как и в тяговом режиме (см. рис. 2.1). Катушка реле РМ1 включена таким образом, что в тяговом режиме при отключенном контакторе П7 ток в ней пропорционален току тягового генератора. В тормозном режиме, когда контактор П7 включен через катушку РМ1 протекает ток, пропорциональный падению напряжения на тормозных резисторах СТ, а следовательно, ток якорей тяговых двигателей.

При срабатывании реле РМ1 включается реле РУ2 (см. рис. 8.4), контакты которого размыкают цепь катушки реле РКП. Это приводит к последовательному выключению реле РКП, РКВ и РТ6. Цепи возбуждения генератора разбираются и включается сигнальная лампа (на схеме не показано). Силовая схема электрического тормоза разбирается и лампа выключается.

8.14. Цепи вентиляторов тормозных резисторов

Несмотря на то что тормозные резисторы изготавливают из высокотемпературного сплава, они требуют принудительного охлаждения. Поэтому на тепловозе предусмотрена система контроля за работой вентиляторов тормозных резисторов МВТ1, МВТ2 (см. рис. 2.1). Если температура тормозных резисторов СТ резко повышается срабатывают термоизвещатели ДТ21 и ДТ22. Их замыкающие контакты в цепи реле РТП размыкаются, выключая его (см. рис. 8.7). Замыкающий контакт РТП разбирает цепь катушки реле РТ1, что приводит к отключению системы электрического торможения.

8.15. Цепи защиты локомотивной бригады от высокого напряжения

При открытии дверей высоковольтных камер и шкафа выпрямительной установки контакты дверных конечных выключателей БД1, БД2 или БВУ размыкают цепь питания катушки контактора КВ (см. рис. 8.4). В результате отключается возбуждение тягового генератора в режиме тяги, тормоза и в режиме холостого хода, и включается сигнальная лампа.

8.16. Цепи автоматической локомотивной сигнализации

Автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) с системой контроля бдительности машиниста предназначена для повышения безопасности движения поездов на участках дорог, оборудованных путевыми устройствами автоблокировки. С помощью АЛС на светофор, расположенный в кабине машиниста, передаются сигналы путевых светофоров.

В АЛС входят: блок контроля бдительности машиниста УКБМ, скоростемер СК, локомотивный светофор ЛС, приемные катушки ПК1, ПК2, фильтр Ф, дешифратор ДУ, блоки промежуточных реле

ПРД, кнопки и сигнальные лампы (рис. 8.8). Исполнительным элементом системы контроля является электропневматический клапан тормозной магистрали ЭПК, который включает режим экстренного торможения тепловоза.

Дешифратор и блок контроля бдительности машиниста с учетом показаний скоростемера управляет работой электропневматического клапана ЭПК.

Сигнальный ток, протекающий по рельсовым цепям, представляет собой импульсы кода, соответствующие показаниям путевого светофора. Магнитное поле рельсовой цепи наводит в приемных катушках ПК1 и ПК2 импульсы электродвижущей силы. Получаемые сигналы поступают в усилитель, который расположен в блоке ДУ вместе с дешифратором. На участках с электротягой усилитель работает совместно с фильтром Ф, защищающим систему от помех, создаваемых тяговым током частотой 50 Гц. Фильтр включается тумблером ВФ.

Из усилителя кодовые импульсы передаются в дешифратор. Дешифратор расшифровывает код и включает соответствующую лампу локомотивного светофора ЛС, расположенного в кабине машиниста над пультом управления, а также формирует сигнал для управления ЭПК.

Если по какой-либо причине ЭПК теряет питание, то сначала включаются предупредительные сигнальные лампы ЛСП1, ЛСП2, а затем раздастся свисток. В этот момент машинист должен нажать кнопку «Бдительность»; в противном случае сработает ЭПК, выпустит воздуха из тормозной магистрали и тепловоз перейдет в режим экстренного торможения. Своевременное подтверждение машинистом бдительности позволяет восстановить питание клапана ЭПК и продолжать движение до очередного сигнала проверки. Способ подтверждения бдительности может усложняться в зависимости от направления и скорости движения, светофорных огней, а также при замедленной реакции машиниста.

Например, при движении «Вперед» в режиме тяги и включенных лампах светофора ОКЖ (красно-желтый) или ОБ (белый) и ОКЖ выполняется обычное подтверждение бдительности машиниста нажатием на кнопку КБ1 или педаль ПБ до начала свистка ЭПК. Кнопка КБ1 и педаль ПБ расположены рядом с креслом машиниста.

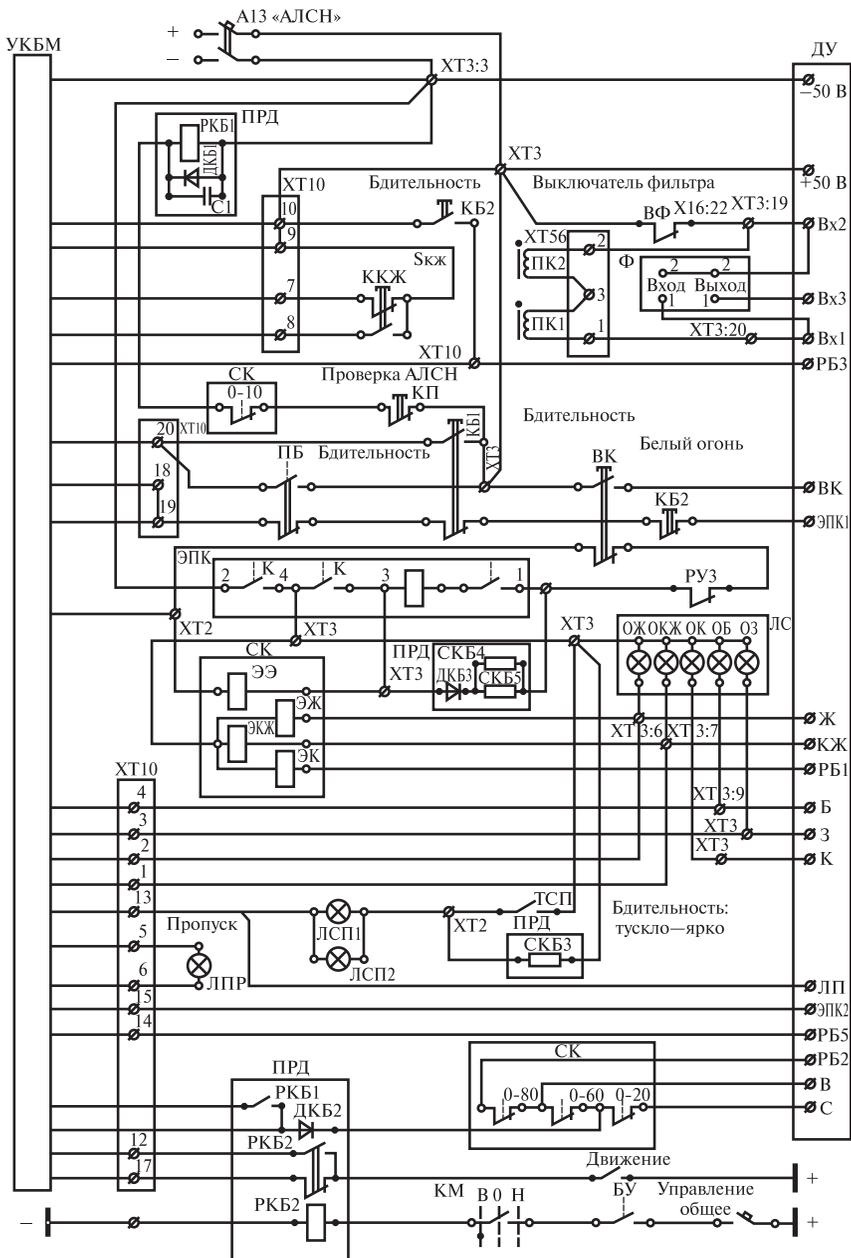


Рис. 8.8. Цепи автоматической локомотивной сигнализации

В случае пропуска светового сигнала для предотвращения срабатывания клапана ЭПК и включения тормозной магистрали необходимо в течение 6 с после начала свистка кратковременно нажать кнопку КБ2, расположенную в верхней части кабины. Нажатие на кнопку КБ1 или педаль ПБ в этом случае не окажет воздействие на работу клапана ЭПК. О происшедшем пропуске светового сигнала сигнализирует лампа ЛПР («Пропуск»).

При движении «Назад» в режиме тяги питание электромагнита клапана ЭПК можно сохранить или восстановить (без включения тормозов) подтверждением бдительности в течение суммарного времени работы светового сигнала (7 с) и звукового сигнала (6 с).

Регистрация огней локомотивного светофора, а также включенного состояния ЭПК фиксируется на ленте скоростемера его электромагнитами ЭЖ, ЭКЖ, ЭК и ЭЭ.

Устройство АЛС контролирует также максимально допустимую скорость движения (если при нейтральном положении реверсивной рукоятки тепловоз начал движение самопроизвольно).

Передача в блок контроля бдительности УКБМ информации о направлении движения тепловоза осуществляется с помощью реле РКБ2, которое включается при замыкании контакта В рукоятки реверсора КМ. Сигнал о скорости движения тепловоза формируется скоростемером СК и через контакты промежуточного реле РКБ1 также поступает в блок УКБМ.

8.17. Указатель повреждений

Для оперативного поиска неисправностей в цепях управления тепловоза служит указатель повреждений. Он состоит из вольтметра и переключателя, соединяющих вольтметр с контролируемыми цепями управления.

Подключение контролируемых цепей к измерителю осуществляется автоматически контактами тех или иных реле в зависимости от режима работы тепловоза: при пуске дизеля — контактами реле РУ10, при включении возбуждения генератора на нулевой позиции — контактами реле РУ10 и РУ8, при включении тяги — контактами реле РУ21 и РУ8 и т.д.

Через отводы от цепей управления контролируемая цепь соединяется с указателем повреждения таким образом, что контакты входящих в цепь аппаратов при включении шунтируют соответствующим образом.

ющие резисторы указателя. В результате эквивалентное сопротивление системы резисторов и, следовательно, ток через измерительный элемент вольтметра однозначно определяются положением каждого из аппаратов контролируемой цепи. Помещенная рядом с прибором таблица указывает, какой должен быть ток после включения того или иного аппарата цепи.

При нормальной работе цепи ток по мере последовательного включения аппаратов, т.е. по мере шунтирования резисторов, увеличивается. Соответственно слева направо перемещается стрелка измерителя. При отказе какого-либо аппарата стрелка останавливается против определенного значения, по которому с помощью переводной таблицы определяют отказавший аппарат.

Глава 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ТЕПЛОВОЗОВ

9.1. Общие сведения

Электрическим аппаратом называют устройство, предназначенное для управления электрическим током. Его основные функции — это коммутация, регулирование и преобразование тока.

По назначению электрические аппараты классифицируются следующим образом:

- коммутационные аппараты, предназначенные для переключения электрических цепей; они могут быть индивидуальными — коммутирующими одну цепь, или групповыми — коммутирующими несколько цепей одновременно. К таким относятся реле управления, контакторы, реверсоры, рубильники, переключатели, кнопки, тумблеры, контроллер машиниста;

- аппараты контроля и защиты; к ним относятся предохранители, автоматические выключатели, датчики;

- регулировочные — резисторы и реостаты, используемые для изменения тока при регулировании различных систем тепловоза;

- прочие — клеммные рейки, штепсельные разъемы, розетки, патроны.

Дополнительно аппараты можно классифицировать:

- по наличию оболочки — на открытые, защищенные и герметизированные;

- роду тока — на аппараты постоянного и переменного тока;

- способу привода подвижного контакта (при его наличии) — с ручным, электромагнитным, электропневматическим, электродвигательным приводом.

В соответствии с ГОСТ 9219 электрические аппараты работают на тепловозе в условиях повышенной вибрации, значительных колебаний температуры (от -50 до $+70$ °С) и напряжения, воздействия влаги, пыли, грязи, масла и др. Напряжение в силовой цепи тепловоза меняется от нуля до 1000 В. Номинальное напряжение

в цепи управления составляет 110 (или 75) В и допускается его снижение до 20 % от номинального значения. Номинальное давление сжатого воздуха для аппаратов управления устанавливается 5 МПа и допускается его колебание в пределах от 70 до 135 % от номинального значения, что важно для электропневматических контакторов и вентилях. Вибрации могут приводить к ослаблению болтовых соединений, обрыву проводов и ложным включениям и отключениям контактов аппаратов. Чтобы этого не произошло, крепежные элементы ставят с пружинными шайбами; на ряде аппаратов устанавливают шплинты, контргайки, шайбы с отгибающимися концами и др.

Для того чтобы исключить ложное срабатывание аппаратов, подвижные части, имеющие пружины невысокой жесткости, балансируют, т.е. регулируют таким образом, чтобы масса подвижных частей относительно оси вращения распределялась равномерно. Часть аппаратов устанавливают на амортизаторах. Наиболее чувствительные и точные аппараты закрывают кожухами (регулятор напряжения, реле давления масла и т.д.). Надежный электрический контакт токоведущих частей аппаратов обеспечивается специальным монтажом проводов, исключающим возможность их перемещения при вибрации.

Детали из меди или медных сплавов покрывают оловом (лудят) или красят эмалью и лаками, за исключением рабочих контактов. Детали, изготовленные из черных металлов, оцинковывают или окрашивают, а иногда хромируют или никелируют. Стальные оси шарнирных соединений выполняют, как правило, без покрытий, но в соединении запрессовывают втулку из латуни или бронзы.

9.2. Контакт электрических соединений

У коммутационных аппаратов различают контакты главные (силовые) и вспомогательные (блокировочные). Главные контакты предназначены для соединения источников электрической энергии с потребителями, а блокировочные обеспечивают заданный логический алгоритм работы схемы управления.

В зависимости от формы соприкасающихся поверхностей контакты разделяют на три типа: точечный, линейный и плоскостной (рис. 9.1).

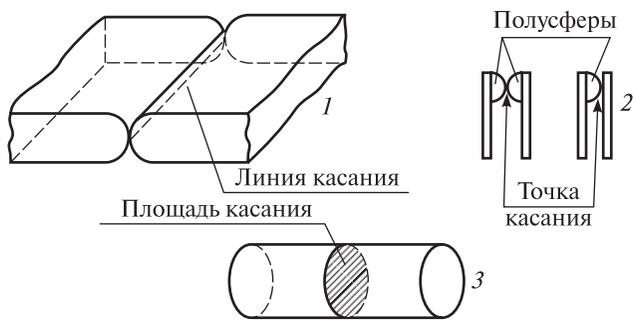


Рис. 9.1. Типы контактов:
 1 — линейный; 2 — точечный; 3 — плоскостной

В зависимости от конструктивного исполнения контакты могут быть перекатывающиеся, пластинчатые, скользящие, мостиковые и клиновые (рис. 9.2).

Перекатывающимися выполняют главные контакты контакторов; их вспомогательные контакты делают *скользящими* или *мостиковыми*. Кроме того, в реверсорах барабанного типа используются скользящие контакты как главные. *Пластинчатые* контакты применяются в маломощных реле, а *клиновые* — в рубильниках.

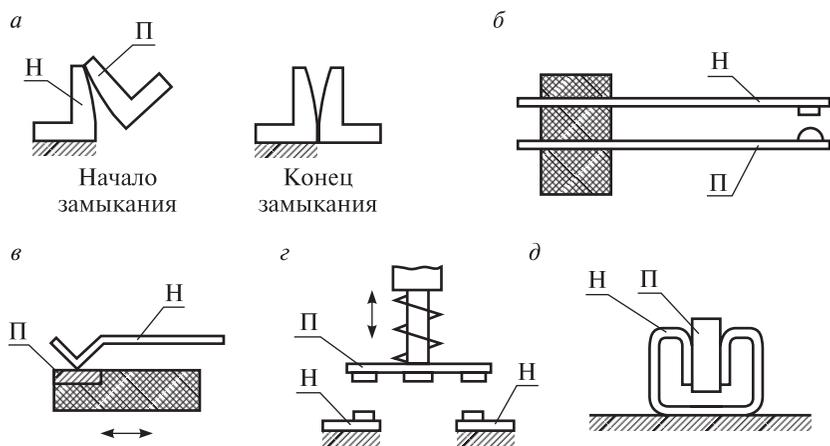


Рис. 9.2. Конструктивное исполнение контактов:
 а — перекатывающиеся; б — пластинчатые; в — скользящие; г — мостиковые;
 д — клиновые; Н — неподвижный контакт; П — подвижный контакт

Основные параметры, характеризующие работу подвижного контактного соединения, следующие: конечное нажатие, начальное нажатие, зазор, провал.

Сила, создаваемая контактной пружиной в точке конечного касания контактов, называется *конечным нажатием*. От конечного нажатия в значительной степени зависит нагрев контактов.

Сила, создаваемая пружиной контакта в точке начального касания контактов, называется *начальным нажатием*. Пониженное значение начального нажатия приводит к вибрации подвижного контакта при замыкании, что может вызвать оплавление контактов; увеличенное его значение — к нечеткому срабатыванию контакта и заклиниванию его в промежуточных положениях.

Расстояние между контактами в их разомкнутом положении называется *зазором* (рис. 9.3, *а*). Большой зазор может не обеспечить нормального нажатия контактов, а малый может вызвать появление электрической дуги между ними.

В процессе замыкания контактов происходит их относительное перемещение — скольжение и перекатывание. Процесс относительного перемещения и взаимодействия контактов от момента соприкосновения до конечного рабочего положения называется *притиранием* контактов.

В замкнутом состоянии между контактами действуют значительные силы нажатия; в противном случае при вибрации или износе контактов невозможно было бы обеспечить их надежный контакт. Если неподвижный контакт убрать, то под действием силы нажатия подвижный контакт переместится на некоторое расстояние — «провалится» относительно плоскости их касания. Соответственно

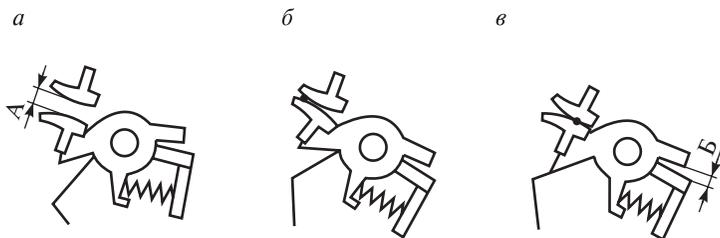


Рис. 9.3. Положение контактов при замыкании:

а — положение перед замыканием; *б* — момент начала замыкания; *в* — рабочее положение; *А* — зазор между контактами; *Б* — провал контактов

провалом контактов называется расстояние, на которое переместится из замкнутого положения один контакт при удалении другого контакта. Чаще провал контактов определяют по повороту якоря, происходящему при перекачивании контактов (рис. 9.3, в).

Материалом контактов, как правило, служит электротехническая медь (марки М1), имеющая низкое сопротивление, достаточную механическую прочность и износостойкость. Медь с присадкой кадмия увеличивает износостойкость контактов. Медные контакты со временем покрываются слоем окислов, что увеличивает их переходное сопротивление.

Альтернативой меди при изготовлении контактов является серебро. Оно имеет сопротивление меньшее, чем медь, но значительно дороже меди и уступает ей по износостойкости. Серебряные контакты в виде тонких пластинок, напаянных на медные держатели, используются в отдельных аппаратах цепей управления тепловозов. Также в тяговой электроаппаратуре находят широкое применение металлокерамические контакты, представляющие композицию серебра с другими металлами (окись кадмия, никеля, вольфрама).

Добавочное сопротивление протеканию тока через коммутационные контакты называется *переходным сопротивлением контактов* R_k . Оно обусловлено [26]:

1) наличием на поверхностях контактов окисных, сульфидных и кислородных пленок, которые создают сопротивление $R_{пл}$; окисные пленки образуются при взаимодействии материала контактов с кислородом, сульфидные — с сероводородом. Пленки имеют толщину до 10^{-5} мм и удельное сопротивление до 10^4 Ом·мм;

2) наличием сопротивления сужения R_c , которое обусловлено тем, что ток будет протекать не по всей поверхности контактов, а только по отдельным площадкам, называемым *контактными пятнами*; эти контактные пятна определяются микрогеометрией поверхностей контактов (рис. 9.4, а).

Таким образом, переходное сопротивление контакта

$$R_k = R_{пл} + R_c.$$

Переходное сопротивление контакта электрических соединений (электрическое сопротивление в контакте) зависит от материала, температуры и качества обработки соприкасающихся поверхностей и обратно пропорционально силе нажатия контактов F_k . Для

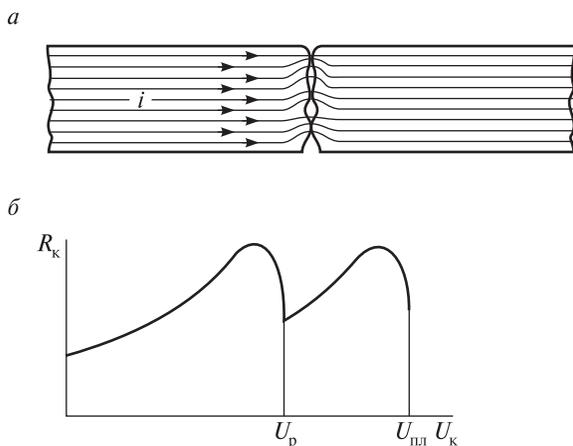


Рис. 9.4. Характер протекания тока через контакт (а) и $R-U$ характеристика контакта (б)

наиболее распространенных материалов контактов их переходное сопротивление может быть определено как:

$$R_k = \frac{\rho_k}{(0,102 F_k)^m} \text{ [мкОм]},$$

где ρ_k — коэффициент контактного сопротивления (табл. 9.1);

F_k — сила нажатия контактов, Н.

Таблица 9.1

Значение коэффициента контактного сопротивления

Материал контактной пары	$\rho_k, 10^{-5} \text{ ОмН}$
Медь—медь	0,8—1,4
Медь—медь луженая	1,0—1,8
Серебро—сплавы серебра	0,3—0,6
Сталь—сталь	73—77
Сталь—медь	3,6—3,8
Латунь—латунь	6,7—7,2
Металлокерамика—металлокерамика	2,6—3,3

Для точечного контакта $m = 0,5$, для линейного — $m = 0,5-0,8$, для плоскостного — $m = 1$.

При протекании тока через контакты они нагреваются, сопротивление R_k увеличивается и падение напряжения на них U_k возрастает.

тает. Зависимость переходного сопротивления контактов от падения напряжения на них называется *R—U-характеристикой контактов* (рис. 9.4, б). В какой-то момент времени под действием высокой температуры материал контактов размягчается, площадь контактных пятен увеличивается и падение напряжения на них уменьшается.

Напряжение на контактах, при котором происходит размягчение металла, называется *напряжением размягчения* U_p .

При дальнейшем увеличении U_k возрастает R_k и температура контактов, которая в некоторый момент может достичь температуры плавления металла контактов. Под действием силы контактного нажатия площадь контактных пятен вновь увеличится, а сопротивление R_k уменьшится. Напряжение, соответствующее этому режиму, называется *напряжением плавления* $U_{пл}$.

Значения напряжений размягчения и плавления контактов зависят от их материалов (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Напряжения размягчения и плавления некоторых металлов

Металл	Напряжение размягчения, В	Напряжение плавления, В	Минимальное напряжение дугообразования на контактах U_0 , В	Минимальный ток дугообразования через контакты I_0 , А
Медь	0,12	0,43	13,0	0,43
Серебро	0,09	0,37	12,0	0,40
Золото	0,08	0,43	15,0	0,38

Значение тока, при котором контактные пятна оплавляются, называется *минимальным плавящим током*. При этом токе происходит выброс расплавленного металла из зоны касания контактов и сваривание их, причем сила отрыва контактов друг от друга после сваривания может достигать тысяч ньютонов.

В процессе работы контактов — замыкания и размыкания — происходит их износ.

При *замыкании* контактов перед их соприкосновением загорается дуга замыкания, под действием которой металл контактов испаряется. Кроме того, износ контактов при замыкании происходит еще и потому, что после соприкосновения имеет место некоторое притирание контактов, необходимое для частичного удаления пленок.

При *размыкании*, уменьшение контактного нажатия сопровождается увеличением переходного сопротивления R_k , температура контактов растет и практически всегда достигает температуры плавления материала контактов. В результате между контактами образуется мостик жидкого металла, который быстро разрывается, а процесс разрыва имеет характер взрыва. Если ток и напряжение на контактах превышают допустимые значения, то загорается дуга отключения. Минимальные значения тока дугообразования через контакты I_0 и падения напряжения дугообразования на контактах U_0 для некоторых металлов приведены в табл. 9.2.

Даже при токах, меньших, чем I_0 , контакты подвергаются мостиковой эрозии. Эрозия контактов возникает из-за того, что жидкий мостик разрывается не посередине, а обычно ближе к аноду (контакту, соединенному с положительным полюсом источника напряжения). Некоторое количество металла разбрызгивается, остальное — возвращается на контакты: большая часть на катод, меньшая — на анод. В результате после многих отключений на катоде образуются наросты, выступы, на аноде — впадины, кратеры. Наиболее эффективный способ борьбы с мостиковой эрозией контактов заключается в подборе разных металлов для анода и катода, чтобы уменьшить тепловую несимметрию жидкого мостика.

К материалу контактов предъявляются требования, определяемые условиями работы конкретного аппарата. Для высокой надежности материал контактов должен обладать:

- 1) высокими электрической проводимостью, теплопроводностью, температурой рекристаллизации, температурой плавления;
- 2) умеренными плотностью, твердостью и упругостью;
- 3) низкими коэффициентом трения, термической и механической прочностью, химической неактивностью с окружающей средой.

Чистые металлы по своим свойствам не удовлетворяют всем указанным требованиям. Поэтому для изготовления контактов иногда используют сплавы металлов и металлокерамические материалы.

Главные контакты тепловозных контакторов изготавливают из меди или из композитного материала (керамики и серебра); вспомогательные контакты контакторов и контакты реле выполняются из меди, меди с серебряными контактными напайками и стали.

Поскольку состояние контактов в аппаратах имеет по существу случайный характер, их необходимо периодически проверять.

Основной показатель качества контактного соединения — падение напряжения на нем $U_{\text{к}} = IR_{\text{к}}$. Удовлетворительному состоянию контактных соединений соответствует допустимое падение напряжения, определяемое при номинальном токе аппарата $I_{\text{ном}}$.

$$U_{\text{кд}} = I_{\text{ном}} R_{\text{к}}$$

Допустимые значения $U_{\text{кд}}(I_{\text{ном}})$ для коммутирующих, разборных и неразборных контактных соединений приведены на рис. 9.5.

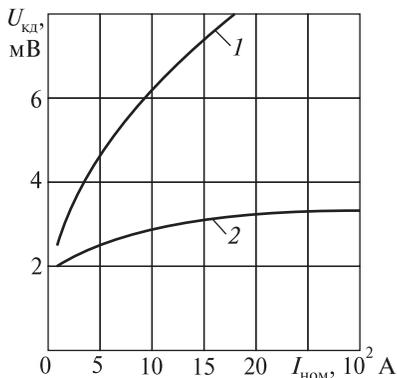


Рис. 9.5. Допустимые падения напряжения на контактных соединениях коммутирующих (1), разборных и неразборных (2)

9.3. Условия возникновения электрической дуги и методы ее гашения

Размыкание электрических цепей коммутирующими устройствами обычно сопровождается возникновением электрической дуги. В тяговых аппаратах дуга появляется при размыкании под током силовых цепей, а также цепей управления, особенно с большими индуктивностями.

Электрическая дуга представляет собой процесс прохождения тока в среде ионизированных газов при термическом характере их ионизации [28]. Ствол дуги — это поток ионов, заряженных в основном отрицательно. Ствол можно рассматривать как своеобразный проводник, обладающий многими свойствами газов и, прежде всего, незначительной связью между отдельными частицами. Поэтому ствол легко деформируется под воздействием различных внешних факторов.

Дуговой разряд в газовой среде характеризуется:

- 1) высокой плотностью тока в дуговом створе (десятки-сотни А/мм²);
- 2) высокой температурой газа внутри дугового столба (у катода 6000—8000 К).

Для возникновения дуги необходима ионизация воздуха между контактами. В момент размыкания контактов воздух ионизируют

электроны, вылетающие из катода вследствие термоэлектронной эмиссии, поскольку металл контактов в зоне жидкого мостика нагрет до высокой температуры. Под действием напряжения, действующего между контактами, электроны устремляются к аноду и выбивают из атомов воздуха электроны, превращая их в ионы. Этот процесс, называемый *ударной ионизацией*, протекает лавинообразно. Образовавшиеся ионы перемещаются к катоду и создают около него электрическое поле, под действием которого из металла катода также вырываются электроны. Это явление называется *автоэлектронной эмиссией*.

При горении дуги одновременно с ионизацией происходит рекомбинация, в результате которой электроны и положительные ионы образуют нейтральные атомы. В установившемся режиме горения дуги между процессами ионизации и рекомбинации существует равновесие. При снижении интенсивности ионизации (например, при охлаждении ствола дуги) начинает преобладать рекомбинация, число ионов и электронов уменьшается — и дуга гаснет.

Канал дуги условно делят на три зоны (рис. 9.6):

1) катодная зона; падение напряжения в этой зоне $U_{кз} = 12—13$ В, напряженность электрического поля $E_{ст}$ до 40 000 В/см;

2) ствол дуги; напряженность электрического поля $E_{ст} = 8—100$ В/см.

3) анодная зона; падение напряжения в этой зоне $U_a = 10—11$ В.

Общее падение напряжения на дуге

$$U_d = U_{кз} + U_{ст} + U_a;$$

$$U_{ст} = E_{ст} L_{ст},$$

где $U_{ст}$ — падение напряжения на стволе дуги;

$L_{ст}$ — длина ствола дуги.

Диаметры ствола d_d зависят от условий горения дуги и поэтому сильно различаются. Так, при неподвижной свободной дуге, мм,

$$d_d \approx 0,27\sqrt{I},$$

где I — ток цепи дуги.

Зависимость напряжения U_d от тока цепи дуги I называется *вольтамперной характеристикой дуги*. Различают статическую и динамическую вольтамперные характеристики дуги.

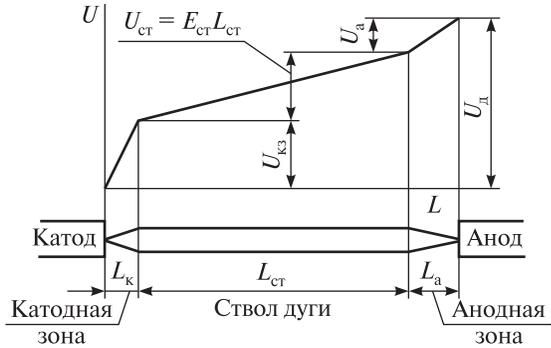


Рис. 9.6. Зоны электрической дуги

Статическая вольтамперная характеристика дуги соответствует ее установившемуся состоянию при постоянной длине дуги $L_{ст}$ и постоянной поперечной скорости дуги (рис. 9.7).

Обычно приходится иметь дело с динамическими характеристиками. *Динамическая* вольт-амперная характеристика дуги соответствует ее неустойчивому состоянию, когда скорость изменения тока (обычно его снижение), не позволяет установить в ней тепловой баланс. Динамическая характеристика дуги зависит прежде всего от параметров цепи, в которой дуга возникает. Так, при отсутствии или пренебрежимо малом значении индуктивности выключаемой цепи подведенное к ней напряжение (рис. 9.7, а)

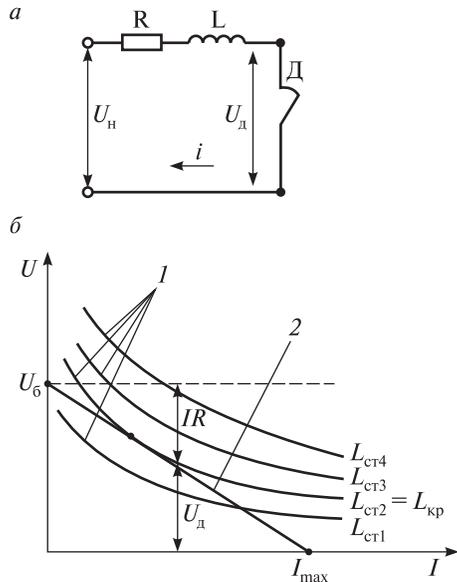


Рис. 9.7. Расчетная схема (а) и вольт-амперные характеристики дуги (б) статические характеристики — при различной длине ствола (I); динамическая характеристика при активном сопротивлении цепи дуги (2)

$$U_n = U_d + IR, \text{ или}$$

$$U_d = U_n - IR, \quad (9.1)$$

где R — активное сопротивление коммутируемой цепи.

Наибольший ток будет перед размыканием цепи $I_{\max} = U_{\text{н}} / R$ (рис. 9.7, б). Падение напряжения в дуге $U_{\text{д}}$ изменяется по линейному закону, что определяется характером падения напряжения на сопротивлении R . Таким образом, при активном сопротивлении цепи динамическая вольтамперная характеристика дуги имеет вид прямой. Она пересекает все статические характеристики, которые расположены ниже нее, т.е. в процессе выключения дуги она может иметь длины, соответствующие любой из пересекаемых статических характеристик.

Предельно возможная — критическая — длина дуги $L_{\text{кр}}$ соответствует точке соприкосновения статической и динамической характеристик. Очевидно, что значение $L_{\text{кр}}$ будет изменяться при изменении $U_{\text{н}}$ и R .

Реальная коммутируемая цепь, как правило, содержит индуктивность, которую не учитывать нельзя. В этом случае напряжение на коммутируемой цепи (рис. 9.7, а)

$$U_{\text{н}} = U_{\text{д}} + iR - e_{\text{к}}, \text{ или } U_{\text{д}} = U_{\text{н}} - iR + e_{\text{к}}, \quad (9.2)$$

где $e_{\text{к}} = -\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt}$ — ЭДС самоиндукции коммутируемой цепи;

Ψ, L — соответственно потокосцепление и индуктивность коммутируемой цепи i — мгновенное значение тока цепи.

Если можно считать, что индуктивность коммутируемой цепи остается постоянной, $e_{\text{к}} = -L \frac{di}{dt}$.

Величина $e_{\text{к}}$ оказывает большое влияние на процесс коммутации цепи, одновременно повышая динамические вольтамперные характеристики дуги (рис. 9.8). За счет ЭДС самоиндукции возможно $U_{\text{д}} > U_{\text{н}}$, что соответствует коммутационному перенапряжению.

На основании вышеизложенного можно сформулировать основные задачи, которые необходимо решать, создавая системы управления дугой в тяговых аппаратах. Цель управления — осуществление коммутации цепей с минимальными перенапряжениями. Для рассеивания дугой большого количества магнитной энергии, накопленной в элементах выключаемого контура, необходимо, чтобы в начале процесса выключения значение $e_{\text{к}}$ было большим, что обеспечивает интенсивное удлинение дуги и повышение гра-

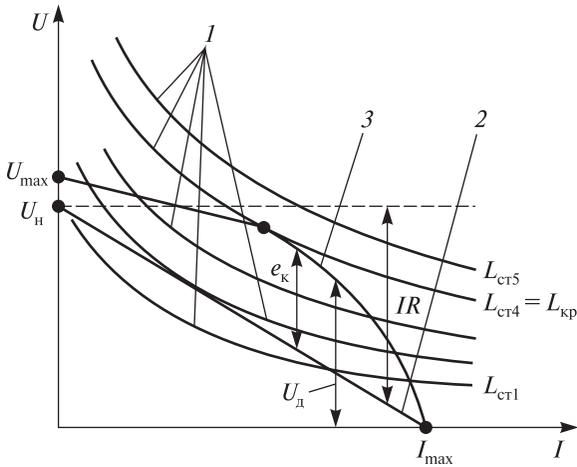


Рис. 9.8. Статические вольт-амперные характеристики дуги при различной длине ствола (1); динамическая вольт-амперная характеристика дуги при активном сопротивлении цепи дуги (2) и при реактивном сопротивлении цепи (3)

диента падения напряжения в ней. В конце процесса выключения следует снижать значение e_k .

Увеличение индуктивности в цепи дуги повышает ее критическую длину $L_{кр}$, что обычно соответствует большему выделению энергии в ней.

Коммутационные свойства аппаратов постоянного и пульсирующего тока (в цепи возбуждения тягового генератора) можно существенно повысить, шунтируя дугу резистором (рис. 9.9). При этом одновременно снижаются коммутационные перенапряжения в цепи. После размыкания контакта контактора 1 падение напряжения на сопротивление $R_{ш}$ такое же, как и в дуге Д, а общий ток цепи i разделяется на ток дуги i_d и ток шунта $i_{ш}$. Возникающая при коммутации ЭДС вытесняет ток в цепь шунта, что существенно ускоряет гашение дуги. Окончательно цепь может быть разомкнута контактом контактора 2 при меньших токах и напряжениях.

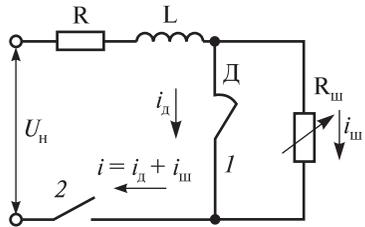


Рис. 9.9. Принципиальная схема шунтирования дуги резистором

При размыкании низковольтных цепей необходимая вольтамперная характеристика дуги получается путем регулирования величины раствора контактов.

Для надежного гашения дуги контактов, размыкающих цепи с большими значениями тока и напряжения, длина дуги настолько велика, что не представляется возможным выполнить необходимый раствор контактов. В этом случае применяют специальные дугогасящие устройства, обеспечивающие удлинение и охлаждение дуги — дугогасительные камеры.

Дугогасящее устройство с целью уменьшения износа контактов должно обеспечивать надежное и быстрое гашение дуги. Однако время гашения дуги должно быть таким, чтобы перенапряжения на контактах не превышали допустимого напряжения по электрической прочности изоляции аппарата и цепи. Обычно время гашения дуги составляет от нескольких сотых секунды до 0,1 с.

Основные методы гашения дуги при коммутации контактов:

- 1) растягивание ствола дуги расходящимися контактами;
- 2) перемещение и удлинение ствола дуги внешним магнитным полем, создаваемым специальными системами магнитного дутья;

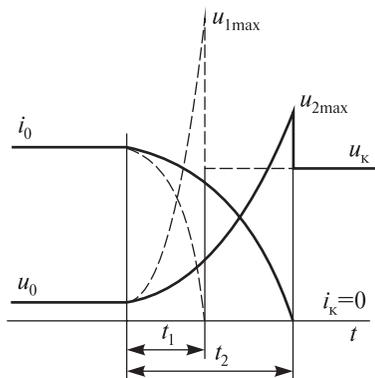


Рис. 9.10. Переходной процесс размыкания цепи постоянного тока контактами:

— — — контакты, расположенные в трансформаторном масле; — — — контакты, оборудованные щелевой охлаждающей камерой

3) охлаждение дуги в щелевых камерах, выполненных из термостойкого изоляционного материала, куда дуга затягивается внешним магнитным полем;

4) разбиение ствола дуги металлическими пластинами на ряд коротких участков, в результате чего растет напряжение на дуге и улучшаются условия теплоотвода от нее;

5) помещение контактов в трансформаторное масло;

6) выдувание дуги с контактов струей сжатого воздуха;

7) помещение контактов в вакуум.

На рис. 9.10 приведены переходные процессы в цепях, отключаемых контактами с разными дугогаситель-

ными устройствами. Из них следует, что использование масляных выключателей в цепях постоянного тока недопустимо из-за больших перенапряжений; масляные выключатели могут применяться в цепях переменного тока, где иные условия гашения дуги.

У тепловозных низковольтных коммутационных аппаратов гашение дуги выполняется растягиванием ее ствола расходящимися контактами; у силовых контакторов — удлинением ствола дуги внешним магнитным полем, создаваемым дугогасительной катушкой и охлаждением дуги в щелевых камерах.

Дугогасительная катушка (катушка магнитного дутья) 2 включается в цепь тока, разрываемого главными контактами 1 контактора (рис. 9.11). Стенки дугогасительной камеры имеют стальные полюсные наконечники 5, замкнутые сердечником катушки 3. Между полюсами возникает магнитное поле, направление которого выбирают таким, чтобы дуга вытеснялась в дугогасительные рога 4. Под действием магнитного дутья и потоков нагретого воздуха внутри камеры электрическая дуга перемещается к концам дугогасительных рогов, удлиняясь и охлаждаясь, что приводит к быстрому ее гашению. Число витков дугогасительной катушки определяется зависимостью:

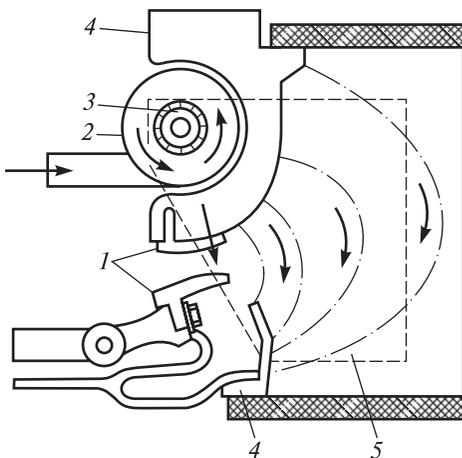


Рис. 9.11. Электромагнитное дугогасительное устройство:

1 — главные контакты; 2 — дугогасительная катушка; 3 — сердечник катушки; 4 — дугогасительные рога; 5 — стальные полюсные наконечники

$$w_{\text{д}} = \frac{B_{\text{к}} l_{\text{к}}}{\mu_0 I},$$

где $B_{\text{к}}$ — магнитная индукция в зоне контактов (при расчете параметров катушки принимается не более 0,01 Тл);

$l_{\text{к}}$ — длина воздушного зазора (ширина дугогасительной камеры), м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — абсолютная магнитная проницаемость воздуха;
 I — номинальный ток контактов, А.

Дугогасительные камеры изготавливают из материалов, обладающих высокой теплостойкостью и хорошими изолирующими свойствами. Они препятствуют распространению электрической дуги на близко расположенные металлические части. Чтобы ускорить гашение дуги, дугогасительную камеру разделяют перегородками.

9.4. Расчет электромагнитных аппаратов

На тепловозах широко применяются электромагнитные контакторы и реле. По существу контактор подобен реле, так как он представляет собой электромагнитный выключатель, приходящий в действие при замыкании или размыкании цепи его оперативного тока (тока управления). Но, в отличие от реле, контакторы рассчитываются на коммутирование больших токов, иногда при относительно высоком напряжении. Они применяются для управления мощными приемниками электроэнергии — крупными электродвигателями и т.д.

Управление контактором осуществляется посредством вспомогательной цепи тока управления, проходящего по катушкам контактора.

На рис. 9.12 показано устройство электромагнитного контактора постоянного тока. Ток управления проходит по катушке контактора и создает электромагнитную силу. Электромагнитная сила катушки притягивает к своему сердечнику стальной якорь; последний, поворачиваясь вокруг оси, замыкает главные контакты в цепи рабочего (силового) тока. Для надежного смыкания контактов применяют пружины, создающие достаточное нажатие подвижного контакта. Катушка магнитного дутья растягивает и гасит дугу, возникающую между главными контактами при их размыкании.

Кроме главных контактов контактор имеет вспомогательные контакты для выполнения вспомогательных операций управления. Вспомогательные контакты располагаются в цепях управления других коммутационных аппаратов или в цепи управления собственного контактора, обеспечивая требуемый алгоритм работы (см. п. 1.6).

Расчет электромагнитных аппаратов включает расчет механической характеристики аппарата и расчет электромагнита и его тяговой характеристики.

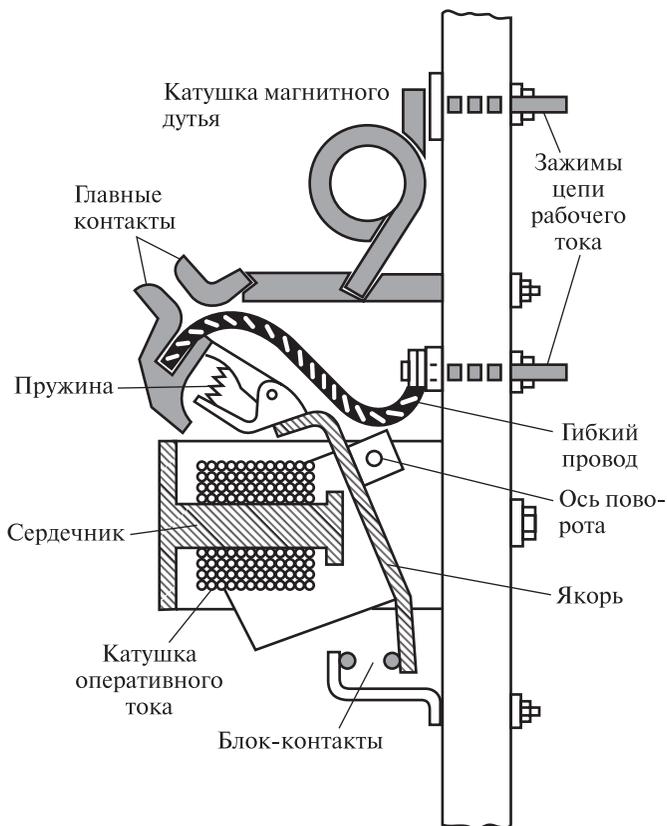


Рис. 9.12. Электромагнитный контактор

Под *механической характеристикой аппарата* понимается зависимость эквивалентной механической силы контактора, приведенной к оси сердечника электромагнита, от величины воздушного зазора δ между сердечником и якорем.

Тяговой характеристикой электромагнита называют зависимость его электромагнитной силы от величины воздушного зазора δ .

При расчете характеристик электромагнитного аппарата используют известные параметры аппарата-прототипа.

По заданным параметрам коммутируемых цепей — число и тип главных и вспомогательных контактов — предварительно устанавливают (по прототипу) материал контактов, значения их начальных

и конечных нажатий, размеры ярма и якоря, параметры сердечника и катушки. Выбирается способ крепления подвижных контактов к ярю, разрабатывается эскиз аппарата и рассчитывается вес его подвижных частей, приведенный к оси действия электромагнитной силы, которой является ось сердечника (см. п. 1.1 и рис. 9.13).

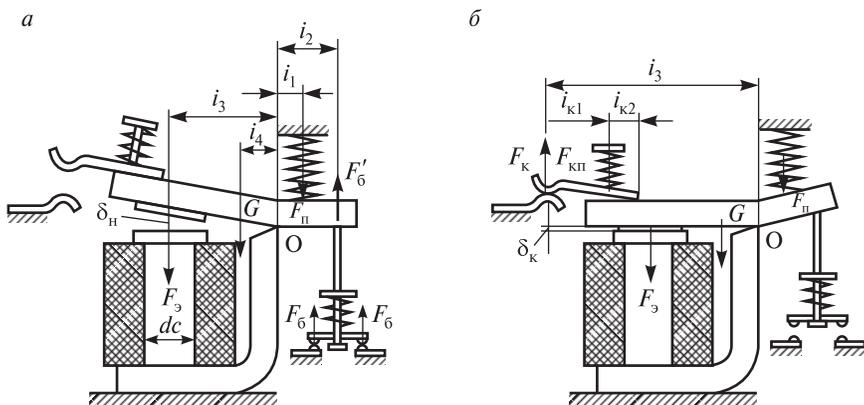


Рис. 9.13. К расчету электромагнитного аппарата:
a — аппарат включен; *б* — аппарат выключен

Задаваемые значения начального и конечного нажатий отключающей пружины должны обеспечивать:

- 1) быстрое отключение аппарата;
- 2) заданные величины нажатий размыкающих контактов при отключенном состоянии аппарата;
- 3) размыкание контактов при их незначительном приваривании;
- 4) предотвращение произвольного включения аппарата при вибрации.

Согласно [26] начальное значение силы упругости $F_{п1}$ отключающей пружины при максимальном воздушном зазоре δ_n между ярмом и сердечником рекомендуется принимать равной (см. рис. 9.13, *a*):

$$F_{п1} = (2,0-3,0) \frac{\sum_{i=1}^n F_{ki} l_{ki} \pm G l_4}{l_1},$$

где F_{ki} — конечное значение силы нажатия i -го размыкающего контакта;
 l_{ki} — плечо силы F_{ki} относительно точки O ;
 n — число размыкающих контактов;
 G — приведенный вес подвижных частей контактора;
 l_4 — плечо силы G относительно точки O ;
 l_1 — плечо силы F_{Π} относительно точки O .

Конечное значение силы упругости отключающей пружины $F_{\Pi 2}$ при включенном положении аппарата $\delta = 0$ рекомендуется принимать $F_{\Pi 2} = (1,5 - 2,0) F_{\Pi 1}$.

В общем случае приведенное значение силы определяется из уравнения моментов приведенной и фактической сил относительно точки приведения:

$$f_j l_3 + F_j l_j = 0,$$

где f_j и F_j — приведенное и фактическое значения j -й силы;

l_3 и l_j — плечи действия эквивалентной и фактической j -й сил относительно точки приведения.

Таким образом, значения приведенных сил, действующих в контакторе, относительно точки O :

упругости отключающей пружины:

$$f_{\Pi}(\delta) = F_{\Pi}(\delta) \frac{l_1}{l_3};$$

тяжести подвижных узлов контактора:

$$g = -G \frac{l_4}{l_3};$$

реакции силовых и вспомогательных контактов:

$$f_k(\delta) = F_k(\delta) \frac{l_3}{l_3} \quad \text{и} \quad f_6(\delta) = -F'_6(\delta) \frac{l_2}{l_3}.$$

При предварительном расчете можно допустить, что все линейные размеры контактора не меняются при перемещении якоря, и сила тяжести подвижных частей остается постоянной. Силами трения в силу их малости при расчете можно пренебречь.

Таким образом, приведенная эквивалентная механическая сила, действующая в контакторе

$$F_c(\delta) = f_{\Pi}(\delta) + f_k(\delta) - f_6(\delta) - g. \quad (9.3)$$

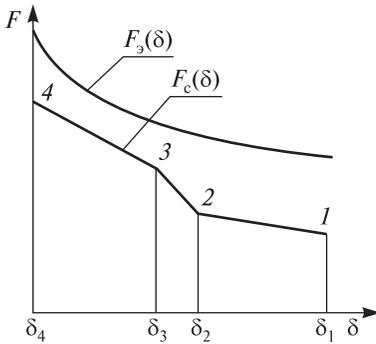


Рис. 9.14. Тяговая $F_3(\delta)$ и механическая $F_c(\delta)$ характеристики контактора

Графическая зависимость $F_c(\delta)$ является *механической характеристикой контактора*. Применительно к контактору, представленному на рис. 9.13, механическая характеристика будет состоять из трех прямых (рис. 9.14). Линия 1—2 соответствует работе только отключающей пружины, которая начинает сжиматься при первых движениях главного подвижного контакта, а зависимость (9.3) на этом участке имеет вид $F_c(\delta) = f_{\Pi}(\delta) - g$. Поскольку пружина имеет предварительную

затяжку, то при максимальном зазоре между контактами $F_c(\delta_1) \neq 0$. В точке 2 замыкаются главные контакты и наклон механической характеристики увеличивается, так как на линии 2—3 эквивалентная сила $F_c(\delta) = f_{\Pi}(\delta) + f_k(\delta - \delta_2) - g$. Пружина вспомогательных контактов начинает работать в точке 3 и теперь эквивалентная сила определится зависимостью (9.3).

Поскольку сила упругости пружины вспомогательных контактов уменьшает значение приведенной эквивалентной силы, ее наклон на участке 3—4 уменьшается.

Для устойчивого замыкания контактов контактора необходимо, чтобы электромагнитная сила $F_3(\delta)$, создаваемая катушкой (электромагнитом), была больше значения эквивалентной силы срабатывания контакта

$$F_3(\delta) > F_c(\delta). \quad (9.4)$$

Расчетное значение электромагнитной силы катушки

$$F_{\text{эп}} = K_p F_{\text{ср}}(\delta_p),$$

где K_p — расчетный коэффициент, принимаемый равным $K_p = 1,5 - 2,0$ для реле, и $K_p = 1,2 - 1,5$ — для контакторов;

δ_p — воздушный зазор в расчетной точке.

В качестве расчетного значения эквивалентной силы предварительно принимают ее значение в момент замыкания силовых контактов, например $F_{\text{ср}}(\delta_p) = F_c(\delta_2)$.

По значению $F_{\text{эп}}$ рассчитывают значение конструктивного фактора контактора

$$K\Phi = \frac{\sqrt{F_{\text{эп}}}}{\delta_p}$$

С помощью кривой, представленной на рис. 9.15, определяют расчетное значение индукции в воздушном зазоре $B_{\delta p}$ контактора.

Электромагнитная сила, создаваемая катушкой,

$$F_{\text{э}} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S_{\delta}}, \quad (9.5)$$

где Φ_{δ} — магнитный поток в воздушном зазоре, Вб;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — абсолютная магнитная проницаемость воздуха;

S_{δ} — площадь поперечного сечения воздушного зазора, равная площади фланца сердечника катушки, м².

Поскольку $\Phi_{\delta} = B_{\delta} S_{\delta}$, то в соответствии с (9.5) $F_{\text{э}} = \frac{B_{\delta}^2 S_{\delta}^2}{2\mu_0 S_{\delta}}$, откуда значение площади фланца сердечника S_{δ}

$$S_{\delta} = \frac{2F_{\text{эп}} \mu_0}{B_{\delta}^2}$$

Диаметр сердечника катушки d_c выбирается таким, чтобы индукция в нем не превышала 1,2—1,4 Тл, т.е. чтобы магнитопровод аппарата не насыщался.

После выбора параметров электромагнита уточняют требуемое значение электромагнитной силы, создаваемой катушкой, с учетом проводимости магнитного потока через воздушный зазор между контактами (в предварительном расчете проводимостью магнитной зазора пренебрегают).

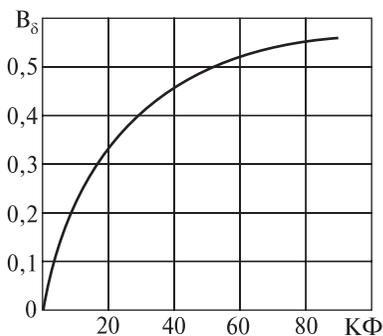


Рис. 9.15. Зависимость индукции в воздушном зазоре контактов контактора от значения конструктивного фактора

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta} = F_{\delta}(\delta)G_{\delta}(\delta),$$

где $F_{\delta}(\delta) = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta$ — намагничивающая сила, необходимая для проведения магнитного потока через воздушный зазор (падение магнитного напряжения в воздушном зазоре) во всем диапазоне его изменения, А;

$G_{\delta}(\delta)$ — магнитная проводимость воздушного зазора между якорем и сердечником во всем диапазоне его изменения, Гн.

Когда воздушный зазор ограничен двумя плоскостями и магнитное поле в нем приблизительно равномерное, магнитная проводимость определяется как

$$G_{\delta}(\delta) = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta} \quad (9.6)$$

и тогда $\Phi_{\delta} = F_{\delta}(\delta) \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta}$.

Электромагнитная сила, которая должна создаваться катушкой во всем диапазоне изменения δ (см. рис. 9.14):

$$F_{\delta}(\delta) = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S_{\delta}} = \frac{\mu_0 S_{\delta} F_{\delta}(\delta)^2}{2\delta^2}. \quad (9.7)$$

Зависимость (9.7) называется *тяговой статической характеристикой*, так как она справедлива только в установившихся режимах, т.е. при фиксированных значениях тока в катушке электромагнита.

Если для какого-либо значения δ_i условие (9.4) не выполняется, то в качестве расчетной принимают другую точку механической характеристики — 3 или 4 — и расчет повторяют.

Таким образом, тяговая статическая характеристика катушки контактора должна быть расположена выше его механической характеристики во всем диапазоне изменения δ (рис. 9.14). В противном случае изменяется конструкция контактора или конструкция его отдельных узлов.

9.5. Понятие о динамической характеристике электромагнита

Поскольку электромагнит представляет собой катушку (индуктивность) с сердечником, то при подключении к источнику ток в ее витках достигает постоянного установившегося значения через некоторое время. На рис. 9.16 показано изменение во времени тока катушки и положение якоря контактора при подключении катушки к источнику напряжения. В зависимости мгновенного тока катушки $i(t)$ можно выделить три характерных интервала [26].

Интервал времени возрастания тока в катушке электромагнита при подключении ее к источнику напряжения до начала трогания подвижного контакта (момент отрыва) $t_{тр}$. Переходный процесс в цепи катушки электромагнита в соответствии с (9.2) будет определяться уравнением:

$$U_H = U_d + iR - e_K. \quad (9.8)$$

Если дуга между контактами отсутствует, то

$$U_H = iR + \frac{d\Psi_K}{dt} = iR + \frac{d(Li)}{dt},$$

где U_H — напряжение источника питания;
 i — мгновенное значение тока цепи;
 R, L — активное и индуктивное сопротивление цепи;
 Ψ_K — мгновенное значение потокосцепления катушки.

Потокосцепление катушки определяется произведением числа ее витков w_K и магнитного потока, который она создает

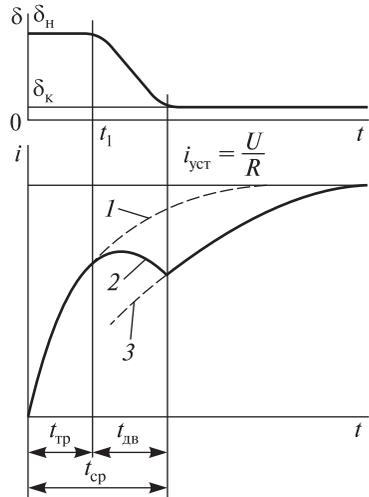


Рис. 9.16. Изменение воздушного зазора и тока катушки электромагнита при включении контактора:

δ_H — начальное значение воздушного зазора (контакт разомкнут);
 δ_K — конечное значение воздушного зазора (контакт замкнут);
 1 — экспонента с постоянной времени T_1 ; 2 — изменение тока при движении якоря; 3 — экспонента с постоянной времени T_2

$$\Psi_{\text{к}} = w_{\text{к}} \Phi_{\text{к}}.$$

Магнитный поток катушки зависит от результирующего магнитного сопротивления цепи ее потока $R_{\text{М}} = \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\mu_{0j} S_j}$:

$$\Phi_{\text{к}} = i w_{\text{к}} \frac{1}{R_{\text{М}}} = i w_{\text{к}} \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\mu_{aj} S_j}},$$

где μ_{aj} — абсолютная магнитная проводимость j -го участка цепи магнитного потока;

S_j — площадь сечения j -го участка цепи магнитного потока;

l_j — длина j -го участка цепи магнитного потока.

Поскольку основное магнитное сопротивление создает воздушный зазор (так как в зависимости от степени насыщения магнитопровода магнитная проницаемость воздуха в 10^5 — 10^7 меньше магнитной проницаемости железа), то можно считать, что

$$R_{\text{М}} \approx \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}}.$$

На интервале $t_{\text{тр}}$ воздушный зазор между контактами не меняется, поэтому с учетом (9.6) $R_{\text{М}} \approx \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}} = \frac{1}{G_{\delta}} = \text{const}$, а уравнение (9.8) принимает вид

$$U_{\text{н}} = iR + \frac{d(w_{\text{к}}^2 G_{\delta} i)}{dt} = iR + w_{\text{к}}^2 G_{\delta} \frac{di}{dt} = iR + L_1 \frac{di}{dt}, \quad (9.9)$$

где $L_1 = w_{\text{к}}^2 G_{\delta} = w_{\text{к}}^2 \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta}$ — индуктивность цепи при максимальном воздушном зазоре.

Решение этого уравнения при начальных условиях при $t = 0$, $i = 0$ имеет вид:

$$i = \frac{U_{\text{н}}}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right),$$

где $T_1 = \frac{L_1}{R}$ — постоянная времени катушки при максимальном воздушном зазоре.

Таким образом, на интервале времени $t_{\text{тр}}$ ток катушки изменяется по экспоненте I с постоянной времени T_1 , (рис. 9.16).

При $t = t_1$ якорь приходит в движение и начинается второй участок переходной характеристики.

2. Интервал времени $t_{\text{дв}}$, в течение которого якорь перемещается от одного крайнего положения до другого. При уменьшении воздушного зазора индуктивность катушки увеличивается и уравнение (9.2) будет иметь вид:

$$U_{\text{н}} = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (9.10)$$

Поскольку $U_{\text{н}} = \text{const}$, появление слагаемого $i \frac{dL}{dt}$ в уравнении (9.10) требует уменьшения значения $iR + L \frac{di}{dt}$. По этой причине ток на интервале $t_{\text{дв}}$ уменьшается (кривая 2, рис. 9.16). В результате наблюдается некоторое снижение рабочего магнитного потока в воздушном зазоре и соответственно электромагнитной силы F_3 .

Время срабатывания контактора $t_{\text{ср}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}$.

Второй интервал заканчивается в момент замыкания контактов и остановки якоря.

3. Интервал времени $t > t_{\text{ср}}$, на котором происходит увеличение тока катушки электромагнита до установившегося значения. На этом участке воздушный зазор будет минимальным, переходный процесс в цепи катушки опишется уравнением (9.9), а ток в катушке определится как

$$i = \frac{U_{\text{н}}}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) = i_{\text{ус.т}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right),$$

где $T_2 = \frac{L_2}{R}$ — постоянная времени катушки при минимальном воздушном зазоре;

L_2 — индуктивность катушки при минимальном воздушном зазоре.

Зависимость $F_3 = f(\delta)$, полученная в процессе движения якоря, называется *динамической характеристикой электромагнита*. Она

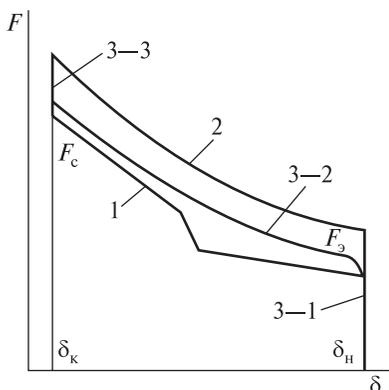


Рис. 9.17. Характеристики привода контактора:

1 — механическая характеристика; 2 — статическая тяговая характеристика; 3 — динамическая тяговая характеристика; 3—1 — время увеличения тока в катушке электромагнита; 3—2 — время движения якоря; 3—3 — время выхода тока электромагнита на установившийся режим; δ_n — начальное значение воздушного зазора (контакт разомкнут); δ_k — конечное значение воздушного зазора (контакт замкнут)

всегда лежит ниже статической характеристики, построенной при постоянной намагничивающей силе катушки.

На рис. 9.17 показано взаимное расположение механической, статической и динамической тяговых характеристик коммутационного аппарата. Форма динамической характеристики определяется характером движения подвижных частей, изменением противодействующих сил, величиной напряжения источника питания. При уменьшении напряжения источника питания время срабатывания электромагнита увеличивается и динамическая характеристика приближается к статической.

9.6. Классификация коммутационных аппаратов тепловозов

Аппараты, включенные в силовую цепь тепловоза с напряжением до 1000 В, непосредственно или через добавочные резисторы, условно называют *высоковольтными*. Аппараты, работающие в цепях управления, освещения и вспомогательных систем с напряжением до 110 В называют *низковольтными*.

Высокое напряжение может вызвать пробой высоковольтного аппарата на корпус тепловоза и привести к неисправности электрооборудования. Чтобы избежать этого, в высоковольтных аппаратах предусмотрены значительные расстояния между токоведущими частями и корпусом, а в некоторых случаях токоведущие части надежно изолируют. Так, например, болты контакторов, крепящие аппараты к каркасу высоковольтной (аппаратной) камеры, закрывают изоляционным материалом или заливают изоляционным компаундом.

Изоляция катушек контакторов и реле, включенных в высоковольтную цепь, усилена по сравнению с низковольтными аппаратами.

В зависимости от привода аппараты подразделяются на аппараты с непосредственным (ручным) приводом (выключатели, рубильник аккумуляторной батареи) и аппараты дистанционного управления.

К аппаратам дистанционного управления относятся контакторы, которые включаются и выключаются аппаратами управления — контроллером машиниста, тумблерами и кнопками, выполняющими соответствующие переключения в цепях управления. На тепловозах применяют контакторы с электропневматическим и электромагнитным приводами.

На современных тепловозах применяется система дистанционного управления, исключая непосредственную работу машиниста с высоковольтным оборудованием, позволяющая автоматизировать управление силовыми и вспомогательными агрегатами (дизелем, тяговым генератором, тяговыми электродвигателями, вспомогательными машинами и т.д.) и вести контроль их работы.

9.7. Электропневматические контакторы и переключатели

Электропневматические контакторы применяются на тепловозах в качестве:

поездных контакторов — для подключения тяговых электродвигателей к выпрямительной установке в тяговом режиме (ПК-1146А) и подключения обмоток возбуждения тяговых электродвигателей к выпрямительной установке в режиме электрического торможения (ПК-1148А);

контакторов ослабления возбуждения тяговых двигателей — для подключения резисторов ослабления возбуждения тяговых электродвигателей (ПК-1619А);

Управление контакторами — дистанционное, при помощи электропневматических вентилях типа ВВ-1000.

Контакторы ПК-1146А и ПК-1148А имеют одну главную цепь и отличаются только размерами главных контактов и выводами (табл. 9.3).

Главная контактная система контактора ПК-1146А содержит главные и дугогасительные контакты (рис. 9.18).

Технические характеристики контакторов

Параметр	Контактор		Переключатель
	ПК 1146А, ПК 1148А	ПК-1619А	ППК-10000
Ток номинальный, А	800/6,3*	450/2	1000/2
Напряжение номинальное, В	1000/110*	20/110	1000/110
Число контактных пар главной цепи	1	6	6

* В числителе — для главных контактов, в знаменателе — для вспомогательных контактов.

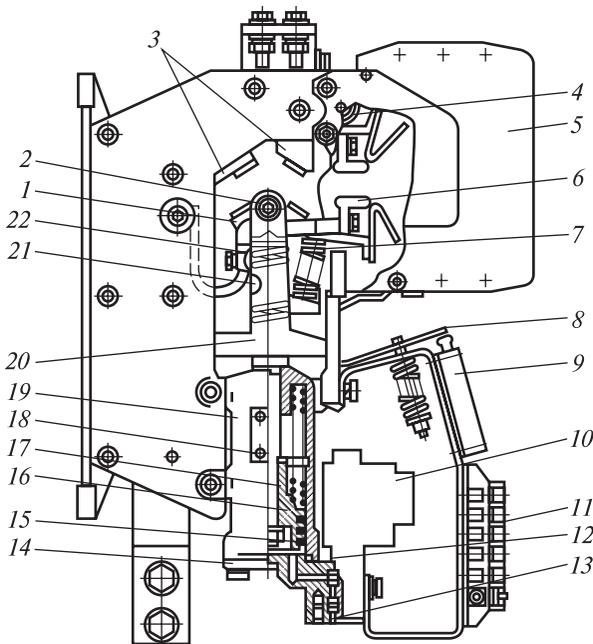


Рис. 9.18. Контактор типа ПК-1146А:

1 — подвижные главные контакты; 2 — ось; 3 — неподвижные контакты с выводами; 4 — катушка; 5 — дугогасительная камера; 6 — дугогасительный контакт; 7, 17, 21 — пружины; 8, 22 — рычаги; 9 — блок вспомогательных контактов; 10 — электропневматический вентиль; 11 — панель зажимов; 12 — уплотнительное кольцо; 13 — прокладка; 14 — крышка; 15 — манжета; 16 — поршень; 18 — прокладка; 19 — цилиндр; 20 — шток

Подвижные главные контакты 1 мостикового типа установлены на штоке 20, на котором также закреплены дугогасительные контакты 6. Контактное нажатие главных и дугогасительных контактов создается соответственно пружинами 21 и 7. Гашение дуги в дугогасительной камере закрытого типа 5 осуществляется при помощи магнитного дутья, создаваемого одновитковой катушкой 4.

Главные контакты имеют профиль перекатывающихся контактов, что обеспечивает относительное скольжение контактных поверхностей под усилием, создаваемым пружиной. Во время размыкания происходит обратное перекатывание подвижного контакта относительно неподвижного и размыкание их по линии. Последовательность положения контактов при замыкании показана на рис. 9.3. При такой работе контактов уменьшается их износ и снижается вероятность сваривания.

Главные контакты контакторов изготавливают из твердотянутой меди, из меди с накладкой из серебра или металлокерамического сплава и в случае износа могут быть легко заменены.

Пневматический привод поршневого типа контакторов является унифицированным и состоит из цилиндра 19, поршня 16, закрепленного на штоке 20, отключающих пружин и уплотнителей.

Блок вспомогательных контактов 9 также является унифицированным.

Выводы вспомогательных контактов размещены на двух панелях 11.

Контактор ПК-1619А (рис. 9.19) применяется для подключения резисторов ослабления возбуждения к обмоткам тяговых электродвигателей (см. табл. 9.3). В отличие от контактора ПК-1146А он является шестиполюсным, т.е. состоит из шести однополюсных секций.

Сварной металлический кронштейн 9 контактора жестко соединен с направляющей штангой 7. На штанге закреплена траверса 8 с неподвижными контактами. На нижней траверсе расположены подвижные контакты.

Дугогасительные камеры укреплены на общей траверсе 11, которая может поворачиваться вместе с камерами вокруг оси 10 и фиксироваться в верхнем положении, открывая доступ к контактам.

Электропневматические переключатели на тепловозах используются в качестве:

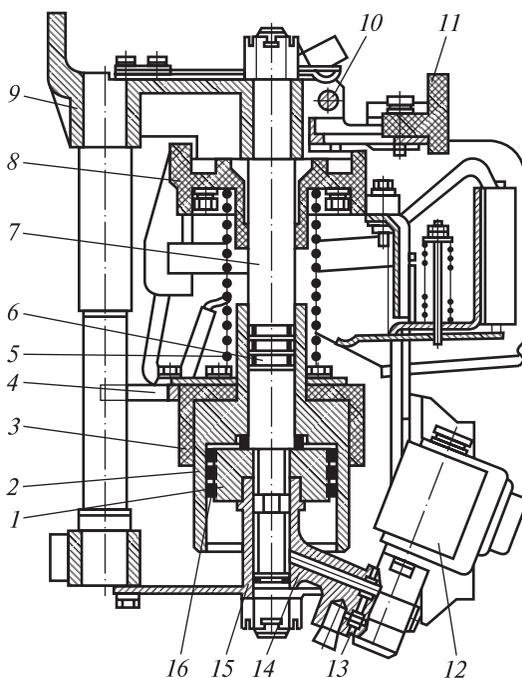


Рис. 9.19. Контактор типа ПК-1619А:

1 — поршень; 2, 8, 11 — траверсы; 3 — цилиндр; 4 — вилка; 5 — пружина; 6, 16 — манжеты; 7 — штанга; 9 — кронштейн; 10 — ось; 12 — электропневматический вентиль; 13 — прокладка; 14 — воздухопровод; 15 — кольцо

реверсора, который служит для изменения направления тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей;

тормозного переключателя, который в тормозном режиме изменяет схему соединения выпрямительной установки с обмотками тяговых двигателей.

Преимущественно это переключатели типа ППК-10000: переключатель ППК-12602 используются в качестве реверсивного, а переключатель ППК-12062 — в качестве тормозного (см. табл. 9.3).

Они представляют собой многополюсные электропневматические кулачковые аппараты с пневматическим приводом. Основными узлами переключателя являются остов, привод, контактные группы силовой цепи и блока вспомогательных контактов.

Остов переключателя (рис. 9.20) состоит из двух пластмассовых оснований *1* и *8*; передней *7* и двух задних *6* металлических стоек кулачкового механизма, установленного в подшипниках качения. Кулачковый механизм имеет вал, на котором размещены кулачки, управляющие контактами силовой и вспомогательной цепей.

Пневматический привод поршневого типа управляется дистанционно двумя электропневматическими вентилями.

Каждая контактная группа представляет собой блок, состоящий из изоляционной панели *11*, подвижных *15* и неподвижных *16* контактов. Неподвижные контакты установлены непосредственно на изоляционной панели; подвижные располагаются на коромысле *9*, которое закреплено в кронштейнах *10*, также установленных на изоляционной панели. Заданное контактное нажатие обеспечивается пружиной *14*. Конструкция переключателя обеспечивает фиксацию контактов в конечных положениях привода.

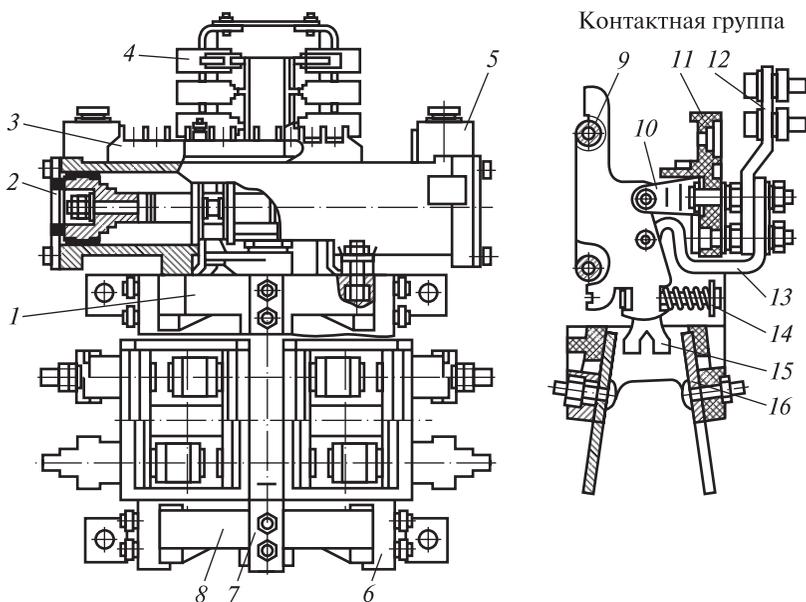


Рис. 9.20. Переключатель типа ППК-10000:

1, 8 — основания; *2* — пневматический привод; *3* — колодка зажимов; *4* — блок вспомогательных контактов; *5* — электропневматический вентиль; *6, 7* — стойки; *9* — коромысло; *10* — кронштейн; *11* — панель; *12* — вывод; *13* — гибкое соединение; *14* — пружина; *15, 16* — подвижный и неподвижный контакты

Схема работы кулачковых элементов переключателя при его использовании в качестве реверсора приведена на рис. 9.21.

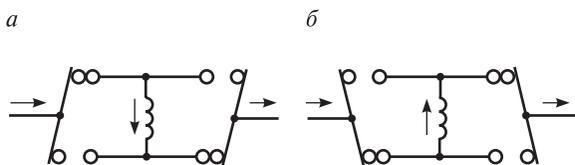


Рис. 9.21. Схема работы кулачкового элемента реверсора: положение «Вперед» (а); положение «Назад» (б) (стрелки показывают направление тока в обмотке возбуждения двигателя)

Контакты реверсора включены в цепь обмоток возбуждения, а не в цепь якорей электродвигателей, так как в этом случае напряжение между контактами реверсора меньше и размеры аппарата получаются также меньшими.

Переключения в схеме обмоток тяговых двигателей могут осуществляться только при их обесточенном состоянии, так как электропневматические переключатели не имеют устройств дугогашения. Управление реверсором производится реверсивной рукояткой контроллера машиниста.

9.8. Электромагнитные контакторы и выключатели

Электромагнитные контакторы на тепловозе используются для коммутации силовых цепей и управления приводом вспомогательных систем тепловоза.

Привод контакторов выполнен в виде электромагнита с подвижным якорем. При протекании тока по катушке электромагнита якорь под действием электромагнитной силы, создаваемой катушкой, притягивается к сердечнику и контакты замыкаются (см. п. 9.4).

Контакторы электромагнитные типа МК предназначены для коммутации цепей постоянного тока.

Контакторы МК1 и МК3 в значительной мере унифицированы. Все конструктивные элементы каждого из контакторов собраны в скобе 1 (рис. 9.22). Якорь вращается на призмах, поджимаемых пружинами 8. Главная контактная система состоит из контактной колодки 9 с неподвижными контактами и дугогасительными катуш-

ками и траверсы 10 с контактами мостикового типа и дугогасительной камерой 11. В колодке 9 установлены подпружиненные колодки 12, предназначенные для фиксации дугогасительной камеры. Вспомогательная контактная система состоит из контактных колодок 6, неподвижных контактов, закрепленных скобами на колодках и траверсы 7 с подвижными мостиковыми контактами. Магнитная система выполнена на двух катушках с двумя якорями.

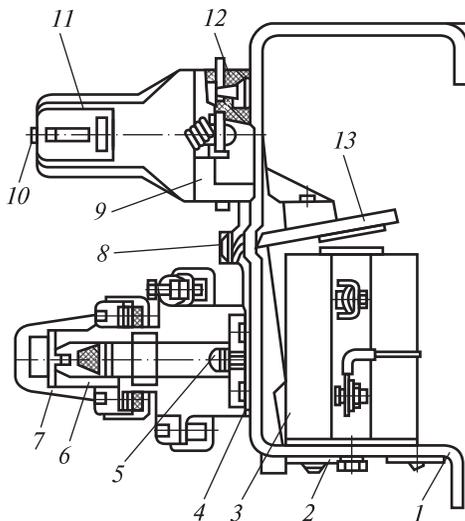


Рис 9.22. Контактторы типа МК1, МК3: 1 — скоба; 2, 6, 9, 12 — колодки; 3 — катушка; 4 — пластина; 5 — винт; 7, 10 — траверсы; 8 — пружина; 11 — дугогасительная камера; 13 — якорь

Контактторы типа МК1 используются в качестве пускового (Д1, Д2, Д3), аварийного возбуждения тягового генератора (КАВ), включения топливоподкачивающего насоса (КТН), включения регулятора напряжения (КРН) и ряда других; контактор типа МК3 — включения маслопрокачивающего насоса (КМН).

Контактор типа МК6 имеет моноблочную конструкцию, все элементы которой собраны на скобе 1 (рис. 9.23). Контактор полярен, так как в его дугогасительной камере расположены постоянные магниты. Поэтому при монтаже контактора в схеме необходимо соблюдать полярность подключения выводов главных контактов по отношению к расположению дугогасительной камеры (чтобы электрическая дуга при размыкании главных контактов перемещалась в дугогасительную камеру). Магнитная система контактора — двухкатушечная с двумя якорями. Якоря 10 и 16 вращаются на осях 14, 15, зафиксированных в колодках 8, 11 с помощью пружин. Система главных контактов состоит из контактных колодок 8, 11 и расположенных на них неподвижных башмаков 7. Дугогасительная камера 4 фиксируется относительно главных контактов скобами 3,

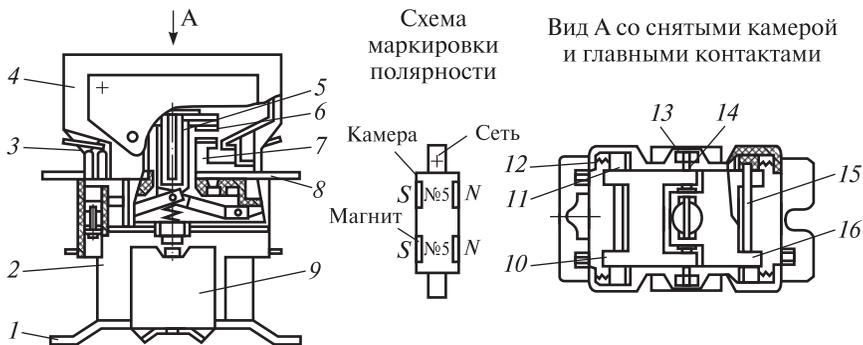


Рис. 9.23. Контактор типа МК6

1 — скоба; 2 — катушка; 3 — защелкивающаяся скоба; 4 — дугогасительная камера; 5 — траверса; 6 — главный контакт мостикового типа; 7 — башмак неподвижного контакта; 8, 11 — колодки; 9 — блок вспомогательных контактов; 10, 16 — якоря; 12 — пружина; 13 — толкатель; 14, 15 — оси

которые также расположены на колодках. Система вспомогательных контактов состоит из двух блоков контактов 9, которые неподвижно закреплены на скобе 1.

Трехполюсный контактор переменного тока типа КМ-2334 (рис. 9.24) предназначен для включения мотор-вентиляторов охлаждающего устройства тепловоза: он состоит из контактной и дугогасительной систем, электромагнитной системы, вспомогательных контактов и основания. Все узлы контактора крепятся на металлическом основании 1.

Электромагнитная система контактора состоит из сердечника 14, Т-образного якоря и втягивающей катушки постоянного тока 12.

Контактная система — мостикового типа. Неподвижный главный контакт 4 расположен в дугогасительной камере. Подвижная система контактора состоит из скобы и планки 15 и связана шарнирно с якорем. На планке 15 крепятся подвижные элементы главных и вспомогательных контактов. Подвижная система контактора уравновешена противовесом 7. Контактное нажатие, создаваемое пружиной, регулируется шайбами. Дугогасительная камера 3 изготовлена из дугостойких пресс-материалов.

Контроллер машиниста (рис. 9.25) предназначен для коммутации электрических цепей управления тепловозом в тяговом режиме и

режиме электрического торможения.

Контроллер типа КМ-2200 состоит из корпуса, где помещены главный и реверсивный барабаны. На барабанах закреплены шайбы с определенным профилем, а также подвижные и неподвижные контакты. Для фиксации контроллера на позициях главного барабана служит храповик с роликом, а положение реверсивного вала фиксирует фиксатор. Главный и реверсивный барабаны механически соединены таким образом, что переключение главного барабана возможно только при крайних положениях реверсивного барабана, а переключение реверсивного барабана возможно только на начальной (нулевой) позиции главного барабана. Реверсивный барабан переключается съемной рукояткой 11 (рукоятку можно снять только в нейтральном положении реверсивного барабана), а главный — штурвалом 13.

Контактный элемент состоит из изолятора (корпуса), в котором помещен рычаг с контактом и роликом. Контактные напайки выполнены из металлокерамической композиции на основе серебра, имеют стабильное переходное сопротивление и не склонны к возникновению дуги. Обслуживание таких контактов заключается в удалении грязи и копоти салфеткой, смоченной в бензине. Зачищать контакты напильником необходимо только в случае образова-

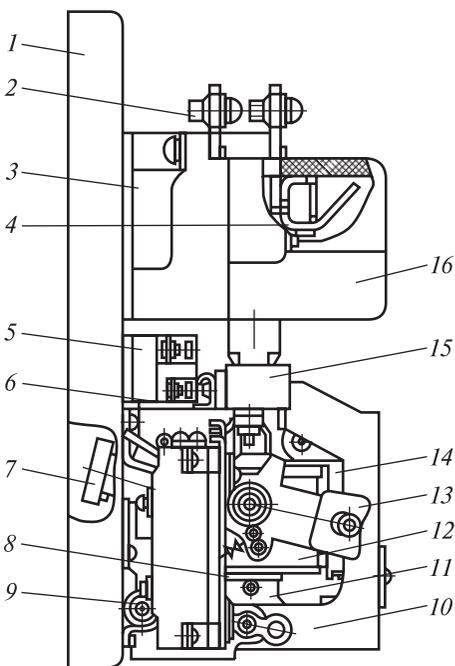


Рис. 9.24. Трехполюсный переключатель типа КМ-2334:

- 1 — основание; 2 — выводы; 3 — дугогасительная камера; 4 — неподвижный главный контакт; 5 — перекидной вспомогательный контакт; 6, 8 — скобы; 7 — противовес; 9 — клиновидный вспомогательный контакт; 10 — скоба подвижной системы; 11 — якорь; 12 — втягивающая катушка; 13 — рычаг; 14 — сердечник; 15 — планка; 16 — крышка

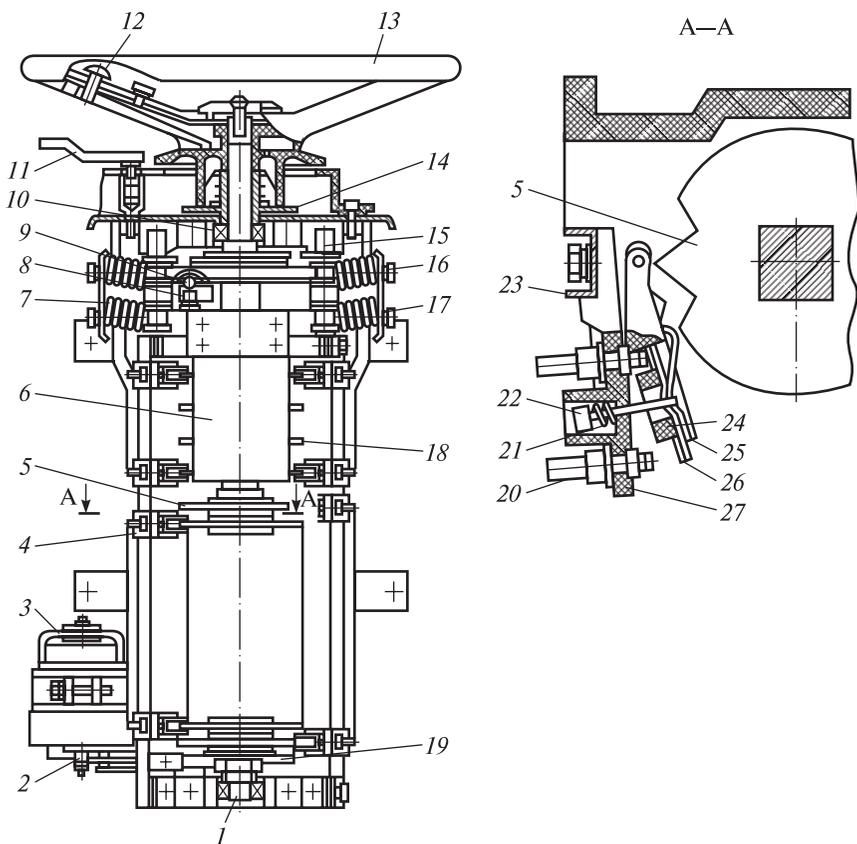


Рис. 9.25. Контроллер типа КМ-2200:

1 — вал; 2, 24 — рычаги; 3 — селсин; 4 — контакт; 5 — кулачок; 6 — корпус реверсивного барабана; 7 — толкатель; 8 — обойма; 9 — шарик; 10 — подшипник; 11 — рукоятка; 12 — кнопка; 13 — штурвал; 14 — упор; 15 — фиксатор; 16 — храповик главного барабана; 17, 21 — пружины; 18 — сухарь; 19 — кулачок привода селсина; 20 — контактный болт; 22 — держатель; 23 — планка; 25 — плоская пружина; 26 — контактный мостик; 27 — изолятор

ния на контактах наростов металла, препятствующих нормальному контакту. С целью повышения износостойкости контроллеров в узлы барабанов и контактного рычага введены подшипники качения.

Корпус контроллера представляет собой изоляционную панель, на которой размещены сельсин 3 (электрическая машина переменного тока), рычаг передачи движения, контакты 4, фиксатор 15, обойма 8 и планки для крепления контроллера на пульте управления.

Коммутационная система контроллера представляет собой контакты мостикового типа, которые закреплены на рычаге 24. Пружина 21 обеспечивает требуемое нажатие между контактами и контактными болтами 20, а пружина 25 предотвращает их самопроизвольное размыкание при вибрациях. На конце рычага 24 установлен подшипник качения, который перемещается по поверхности кулачков и сухарей кулачкового механизма.

Кулачковый механизм включает вал 1, главный и реверсивный барабан, кулачки 5 и храповик 16 главного барабана, а также кулачок 19, служащий для управления сельсином. Кулачки 5 и храповик 16 главного барабана насажены непосредственно на вал 1, который поворачивается в шариковых подшипниках 10. Корпус 6 реверсивного барабана выполнен из двух стянутых болтами половин, между которыми установлены шариковые подшипники, толкатель 7 и сухари 18. Кулачки главного и сухари реверсивного барабанов имеют профиль, обеспечивающий замыкание и размыкание контактов в необходимой последовательности.

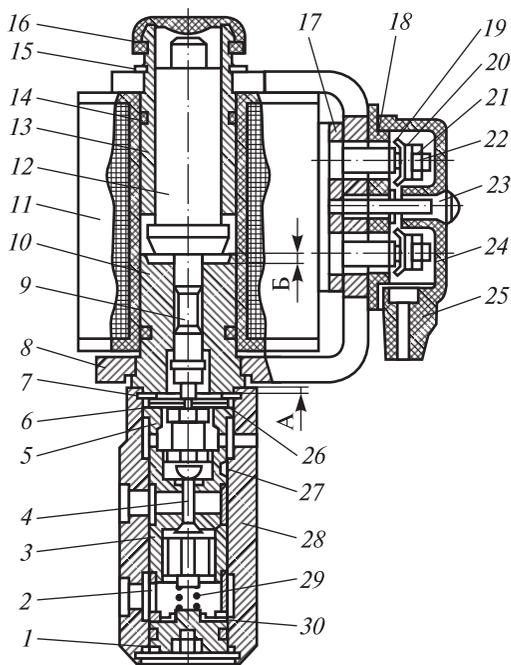
Выходное напряжение сельсина изменяется в зависимости от угла поворота его статора. Регулировка выходного напряжения, соответствующего определенному положению главного барабана, осуществляется поворотом статора сельсина вокруг оси и изменением длины плеча рычага 2.

Реверсивный барабан контроллера имеет три положения («Вперед», «Назад» и «Нейтральное»). Главный барабан имеет пятнадцать позиций, помимо нулевой, в тяговом режиме и три позиции, помимо нулевой, в тормозном режиме (П — переключение на схему тормозного режима, 1 — поддержание максимальной скорости движения, 2 — остановочное торможение). Между позициями 1 и 2 в тормозном режиме расположена зона бесступенчатого управления скоростью. Перевод контроллера с тягового на тормозной режим и обратно возможен при нажатии кнопки 12.

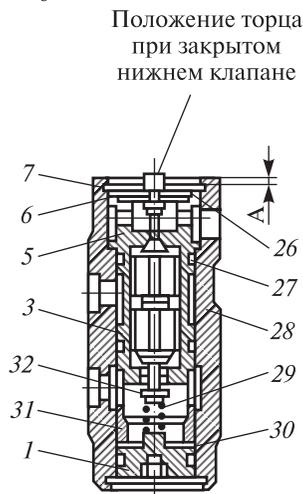
Положения реверсивного барабана фиксируются специальным профилем его корпуса, а позиции главного барабана — храповиком 16. В контроллере предусмотрена взаимная механическая блокировка главного и реверсивного барабанов двумя шариками 9, расположенными в обойме 8.

Электропневматический клапан типа ВВ-1000 предназначен для дистанционного управления пневматическими приводами систем тепловоза и представляет собой двухпозиционные пневмораспределители с электромагнитным приводом и пружинным возвратом (рис. 9.26, табл. 9.4). Пневмораспределитель и электромагнит вентиля являются автономными узлами вентиля.

а



б



Положение торца при закрытом нижнем клапане

Рис. 9.26. Электропневматический клапан типа ВВ-1000:

а — общий вид вентиля; б — клапанный механизм вентиля; 1 — заглушка; 2, 13, 31 — втулки; 3, 5 — нижний и верхний затворы; 4, 9, 32 — штоки; 6, 18, 26, 30 — прокладки; 7, 14, 27 — кольца; 8 — ярмо; 10 — сердечник; 11 — катушка; 12 — якорь; 15 — планка; 16 — колпачок; 17, 19, 20, 21 — шайбы; 22 — гайка; 23 — винт; 24 — крышка; 25 — трубка; 28 — корпус; 29 — пружина

Технические характеристики вентилях типа ВВ-1000

Параметр	Тип вентиля	
	ВВ-1315	ВВ-1415
Номинальное давление воздуха, кПа	630	1000
Ход клапанов, мм	$2,0 \pm 0,05$	$2,0 \pm 0,05$
Площадь прохода, мм ² , не менее:		
впускного	10	10
выпускного	16	16
Сопrotивление катушки при 20 °С, Ом	597	505
Масса, кг	1,35	1,47

Вентиль типа ВВ-1000 является вентилем включающего типа, т.е. при подаче напряжения на катушку он открывает подачу воздуха в управляемую систему, а при отсутствии напряжения на катушке он закрывает подачу воздуха.

Клапанный механизм вентиля состоит из корпуса 28, верхнего 5 и нижнего 3 затворов и заглушки 1, уплотненных резиновыми кольцами 27. Затворы и заглушка фиксируются в корпусе пружинными кольцами 7 и дистанционной втулкой 31. Клапан удерживается в исходном положении пружиной 29 и штоком 32.

Магнитная система вентиля состоит из ярма 8 с катушкой 11, втулки 13 с якорем 12 и сердечника 10 со штоком 9. Втулка 13 фиксируется в ярме планкой 15. Для защиты полости электромагнита от загрязнения служат резиновый колпачок 16 и кольца 14.

Для ручного включения вентиля в аварийной ситуации или при наладочных работах имеется кнопка, выполненная заодно с якорем 12 и закрытая резиновым колпачком 16.

Тяговый электромагнит ЭТ-52Б (рис. 9.27, табл. 9.5) используется в системе объединенного регулятора дизеля. Он представляет

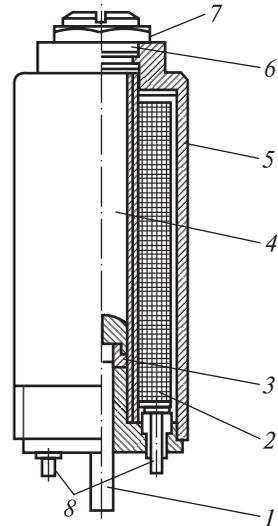


Рис. 9.27. Тяговый электромагнит типа ЭТ-52Б:

1 — шток; 2 — втягивающая катушка; 3 — противозалипающая шайба; 4 — якорь; 5 — корпус; 6 — регулировочный винт; 7 — контргайка; 8 — выводы катушки

Технические характеристики тяговых электромагнитов

Параметр	Значение
Тяговое усилие (при напряжении 0,7 от номинального и температуре окружающей среды 70 °С), Н, не менее	
при зазоре	4,5
втянутом якоре	30
Максимальный ход якоря, мм	2,5
Номинальное напряжение, В	110
Ток срабатывания, А	0,12
Сопротивление при 20 °С, Ом	860
Масса, кг	0,75

собой прямоходовой электромагнит. *Прямоходовые (соленоидные) электромагниты* — это электромагниты с поступательным движением якоря; они имеют большой ход якоря и обладают высоким быстродействием.

В корпусе 5 электромагнита размещены катушка 2 и якорь 4. Возвратной пружины электромагнит не имеет. Устанавливают электромагнит с помощью резьбовой части корпуса. Ход якоря электромагнита настраивают регулировочными винтами.

Кнопочные выключатели, тумблеры, разъединители

В качестве выключателей аккумуляторной батареи на тепловозах используются *разъединители типа Р, РП* (табл. 9.6). Разъединитель типа РП-24М (Р — рубильник, П — аппарат с дугогасительными камерами, 2 — число полюсов, 4 — уровень допустимого тока, М — характеристика исполнения) состоит из изоляционной панели, на которой установлены контактные стойки и два контактных ножа, соединенных изоляционной планкой. Необходимое нажатие на контактных стойках обеспечивают пружины. Для обеспечения высокой разрывной способности аппараты имеют дугогасительные камеры, устанавливаемые на контактных стойках и представляющие собой *деионную решетку*, состоящую из стальных ламелей, укрепленных между изоляционными пластинами.

Разъединитель имеет заземление.

Для управления тепловозом (пуск и остановка дизеля, управление вспомогательными механизмами) используют кнопочные выключатели типа КЕ.

Таблица 9.6

Технические характеристики разъединителей типов Р и РП

Параметр	Значение	
Номинальное напряжение, В:	переменного тока	380
	постоянного тока	220
Номинальный ток, А:	Р-24	400
	РП-24	400

Кнопки типа КЕ предназначены для коммутации цепей управления переменного тока напряжением не более 500 В, частотой 50 и 60 Гц и постоянного тока напряжением не более 200 В; они изготавливаются с толкателями цилиндрической и грибовидной формы; с самовозвратом и с фиксацией во включенном положении. Кнопки имеют унифицированные контактные элементы и отличаются приводами. Классификация кнопок по виду управляющего устройства приведена в табл. 9.7.

Таблица 9.7

Исполнение кнопок типа КЕ

Кнопка	Управляющее устройство	Исполнение	Количество контактов	
			замыкающих	размыкающих
КЕ-011*	Толкатель цилиндрический прямоходовой с самовозвратом	1	2	—
		2	1	1
		3	—	2
КЕ-022	Толкатель грибовидный прямоходовой с самовозвратом	1	4	—
		2	3	1
		3	2	2
		4	1	3
		5	—	4

*01(или 02) — исполнение толкателя; 1(или 2) — количество контактных элементов.

Кнопки имеют замыкающие и размыкающие контакты, которые электрически не связаны между собой, с двойным разрывом цепи. Кнопки должны устанавливаться в местах, защищенных от попа-

дания пыли, брызг воды и масла, а также вдали от механизмов, вызывающих вибрацию и удары.

Тумблеры (переключатели) типов ТВ1-1, ТП1-2 и П2Т применяются в качестве переключателя режимов управления тепловозом (отключения режимов ослабления возбуждения, управление жалюзи охлаждающего устройства, отключения тяговых электродвигателей), в цепях освещения и др. (табл. 9.8).

Таблица 9.8

Технические характеристики тумблеров

Параметр	ТВ1-1, ТВ1-2, ТВ1-4	П2Т	ТП1-2
Максимальный коммутируемый постоянный ток, А	5	0,2	2
Максимальное напряжение, В	220	300	220

Тумблеры выпускаются с различным числом контактов и неразборного исполнения. Принципиальные схемы тумблеров типа ТВ1 в зависимости от числа контактов показаны на рис. 9.28.

Переключение тумблера осуществляется поворотом сектора 4 под действием ручки 2 в одно из крайних положений (рис. 9.29); при этом один из мостиковых контактов 5 сходит с пары неподвижных серебряных контактов, размыкая их, тогда второй — замыкает другую пару контактов — 1.

Переключатели типа П2Т изготавливаются в двух и трехпозиционном исполнении.

Выключатель кнопочный ножной типа КН используется на всех тепловозах в качестве педали песочницы или тифона. Он рассчитан на напряжение 110 В и ток 10 А. При нажатии на ножную педаль происходит перемещение контактного ползуна. Контактной пластиной, закрепленной на ползуне, замыкаются два токоведу-

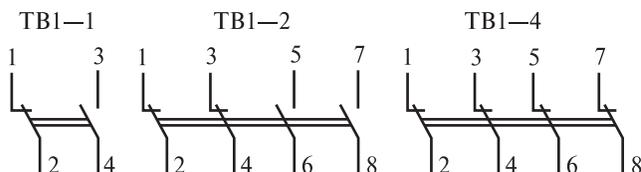


Рис 9.28. Принципиальные схемы тумблеров типа ТВ1

щих контакта. Усилие нажатия контактов 10—20 Н. Все детали выключателя помещены в литой корпус.

Для токовой защиты электрических установок при перегрузках и коротких замыканиях, а также для нечастых оперативных коммутаций электрических цепей на тепловозах применяются различные типы автоматических выключателей.

Выключатели серии АЕ-2500, одно- и двухполюсные, предназначены для защиты и коммутации цепей постоянного тока напряжением 110 В (рис. 9.30); выключатели серии А370 предназначены для защиты и коммутации цепей переменного

(асинхронные двигатели вентиляторов тяговых электродвигателей, выпрямительной установки и холодильной камеры) и постоянного (двигатель компрессора) тока. Операция включения или отключения выключателя осуществляется переводом рукоятки соответственно в верхнее или нижнее положение.

Автомат смонтирован на основании 1 и закрыт крышкой 3. Коммутирующее устройство состоит из подвижного 4 и неподвижного 10 контактов. Гашение дуги при размыкании контактов происходит в деионной решетке 11 дугогасительной камеры. При коротком замыкании отключение автомата происходит практически мгновенно электромагнитным расцепителем максимального тока 9. Тепловой расцепитель 8 служит для защиты цепей от токовой перегрузки.

При отключении автомата в результате токовой перегрузки незакрепленный конец биметаллической пластинки теплового расцепителя 8 нажимает на рейку 7 и освобождает защелку механизма управления 5. При этом под действием пружины подвижный контакт займет разомкнутое положение, а рукоятка 6 — нейтральное.

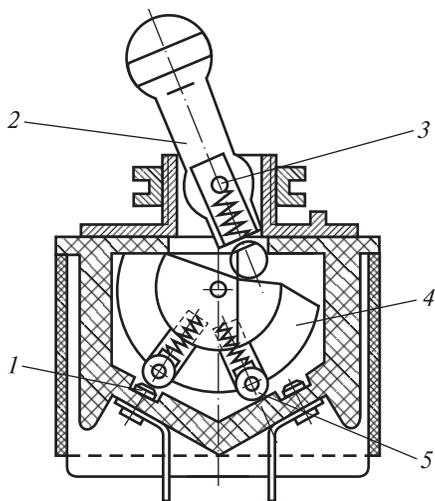


Рис. 9.29. Тумблер типа ТВ1—1:
1 — неподвижные контакты; 2 — ручка;
3 — ось; 4 — сектор; 5 — мостиковые
контакты

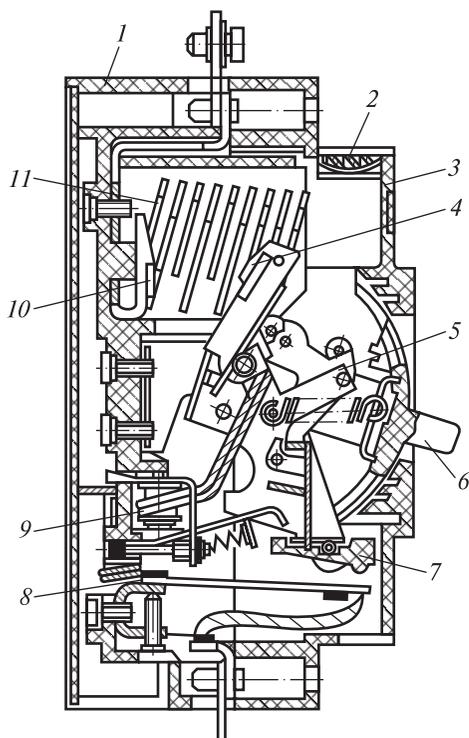


Рис. 9.30. Автоматический выключатель типа АЕ-2500:
 1 — основание; 2 — пламегасительное устройство; 3 — крышка; 4, 10 — соответственно подвижный и неподвижный контакты; 5 — защелка; 6 — рукоятка; 7 — рейка; 8 — расцепитель тепловой; 9 — расцепитель максимального тока; 11 — деионная решетка

Для включения автомата после его срабатывания необходимо предварительно опустить рукоятку вниз; в результате чего рычаг взвода войдет в зацепление с рейкой 7. Только после этого рукоятку перевести вверх до отказа, включая его. При автоматическом срабатывании выключателя повторно его включают не ранее чем через 1 мин после срабатывания. Выключатель снабжен пламегасительным устройством 2.

9.9. Электромагнитные реле

Промежуточное электромагнитное реле типа ТРПУ-1 используется в цепях управления тепловоза для формирования заданного алгоритма работы силового и вспомогательного оборудования (реле управления РУ) (рис. 9.31, табл. 9.9).

Электромагнитная система реле состоит из скобы 11, сердечника 10 с катушкой 9 и плоского якоря 8. Ход якоря ограничивается

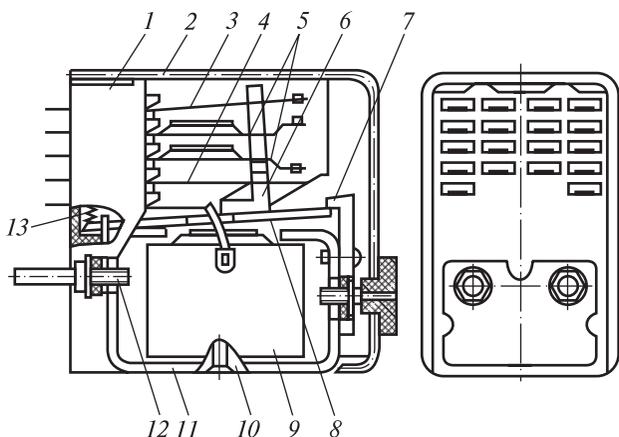


Рис. 9.31. Реле типа ТРПУ-1:

1 — пластмассовый корпус; 2 — кожух; 3, 4 — подвижные контакты; 5 — неподвижные контакты; 6 — траверса; 7 — угольник; 8 — якорь; 9 — катушка; 10 — сердечник; 11 — скоба; 12 — болт; 13 — пружина

Таблица 9.9

Технические характеристики реле типов ТРПУ-1 и РПУ-3

Параметр	ТРПУ-1	РПУ-3
Напряжение контактов, В	110	24—600
Номинальный ток контактов, А	6	10
Номинальное напряжение катушки, В	24, 75, 110	110
Сопротивление катушки при 20 °С, Ом	107, 540, 2160	340, 440
Масса, кг	0,45	2,2

угольником 7; возврат якоря происходит под действием пружины 13. На якоре установлена пластмассовая траверса 6, воздействующая на подвижные пластины замыкающих 3 и размыкающих 4 контактов. На траверсе имеются три перегородки, разделяющие вертикальные ряды контактов, что препятствует развитию дуги при коммутации цепей, в которых протекают большие токи. Контактные пластины, выводы катушки и электромагнит зафиксированы на пластмассовом корпусе 1 и закрыты кожухом 2.

При подаче напряжения на катушку якорь реле притягивается к скобе, воздействуя на траверсу, что приводит к замыканию за-

мыкающих и размыканию размыкающих контактов. При снятии напряжения с катушки возвратная пружина возвращает якорь и контакты в исходное положение.

Реле типа РПУ-3 используются в качестве промежуточных реле цепи возбуждения тягового генератора (РКВ) и цепи поездных контакторов (РКП) (рис. 9.32, табл. 9.9). Электромагнитная система реле включает катушку 5, скобу магнитопровода 6, сердечник 4, якорь 3 с немагнитной пластиной 2 и толкающей колодкой 7. Контактная система мостикового типа состоит из двух колодок 9 с неподвижными контактами 10 и траверсы 8 с контактными мостиками 11 (подвижными контактами). Регулировочная пластина 12 служит для согласования положения контактов 10 относительно колодки.

Реле времени предназначены для создания временных интервалов в работе схемы согласно алгоритму управления. Они обеспечивают выдержку времени в срабатывании контактной системы по отношению к включению цепи катушки. Выдержка времени размыкания (или замыкания) их контактов обеспечивается за счет медленного спадания (или нарастания) магнитного поля в сердечнике. Реле времени используются в цепях управления пуском дизеля, поездными контакторами, защиты от боксования и других.

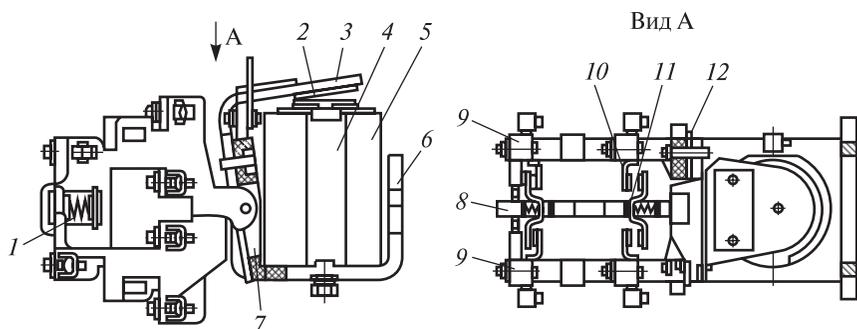


Рис. 9.32. Реле типа РПУ-3:

1 — возвратная пружина; 2 — немагнитная прокладка; 3 — якорь; 4 — сердечник; 5 — катушка; 6 — скоба магнитопровода; 7 — толкающая колодка; 8 — траверса; 9 — колодки; 10 — неподвижные контакты; 11 — контактный мостик; 12 — регулировочная пластина

Электромагнитные реле времени типа РЭВ-812 используются в цепях управления поездными контакторами, привода компрессора и защиты от боксования (РВ1, РВ3, РВ4, см. п. 7.2, 8.5, 6.10) (рис. 9.33, табл. 9.10). В них выдержка времени обеспечивается большой индуктивностью демпферов: демпфера из медной втулки 3 и алюминиевого демпфера 10. Демпферы 3 и 10 закреплены соответственно на сердечнике 6 и угольнике 11, которые вместе с якорем 8 и основанием 1 образуют магнитную цепь аппарата. При отключении цепи катушки реле и уменьшении магнитного потока в демпферах наводятся токи самоиндукции. Они препятствуют уменьшению основного магнитного потока и тем самым увеличивают время отпадания якоря 8. Выдержка времени регулируется подбором толщины немагнитных прокладок 7 (грубая регулировка) и изменением затяжки пружины 9 (точная регулировка).

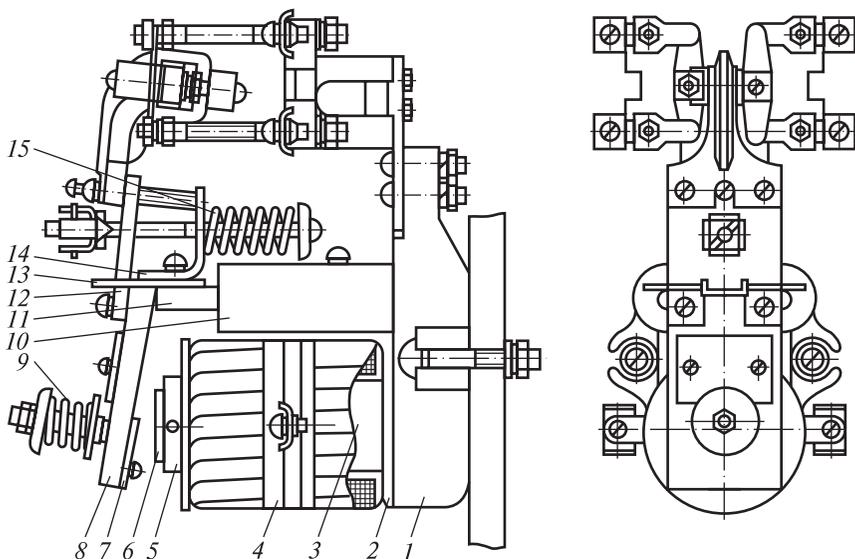


Рис. 9.33. Реле времени типа РЭВ-812:

1 — основание; 2 — шайба; 3 — съемный демпфер; 4 — бандаж; 5 — каркас; 6 — сердечник; 7 — немагнитная прокладка; 8 — якорь; 9 — отжимная пружина; 10 — алюминиевый демпфер; 11, 14 — угольники; 12 — планка; 13 — пластина; 15 — возвратная пружина; 16, 17 — соответственно неподвижные и подвижные контакты

Технические характеристики реле типа РЭВ-812

Параметр	Значение
Напряжение контактов, В	110
Номинальный ток контактов, А	10
Выдержка времени, с	0,8—2,5
Масса, кг	2,2

Более совершенные *электронные реле времени ВЛ-50 и ВЛ-52* используются в цепях пуска дизеля (РВП1, РВП2, см. п. 8.3). Они представляют собой малогабаритные полупроводниковые блоки со встроенными выходными электромагнитными реле (рис. 9.34, табл. 9.11).

В схему реле ВЛ-50 входят блок питания со стабилизацией выходного напряжения (выпрямитель ВП, резисторы R1, R3, стабилитрон Д1), генератор импульсов и их счетчик (микросхема У), каскад

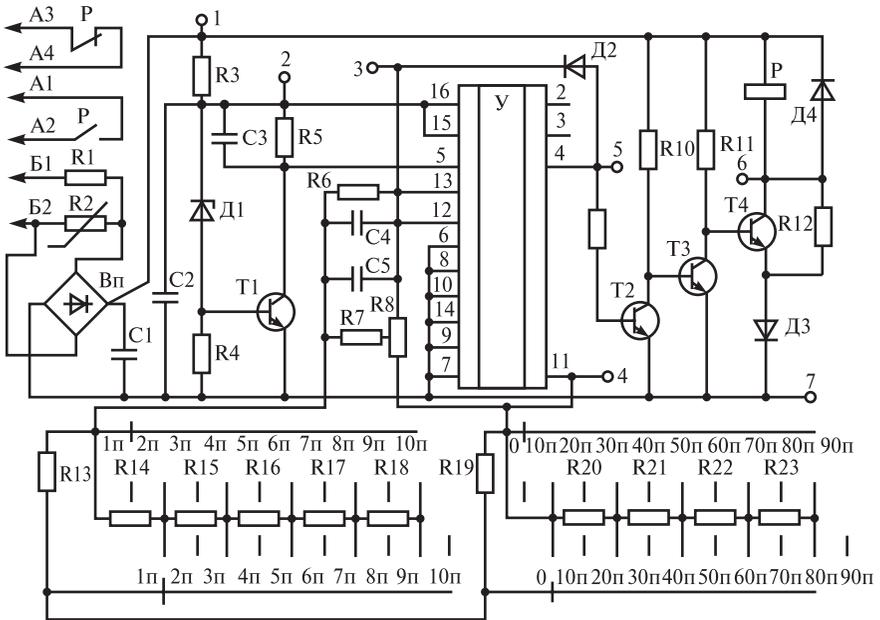


Рис. 9.34. Принципиальная схема реле времени типа ВЛ-50

Технические характеристики реле типов ВЛ-50 и ВЛ-52

Параметр	ВЛ-50	ВЛ-52
Напряжение контактов, В	24—110	24—110
Номинальный ток контактов, А	4	4
Номинальное напряжение питания, В	75, 110	110
Выдержка времени, с	2—200	60—6000
Масса, кг	0,45	2,2

установки нуля (транзистор Т1), выходной усилитель (транзисторы Т2—Т4) и реле Р. При подаче напряжения каскад установки нуля переводит счетчик в нулевое состояние: потенциал на его выходе низок, транзисторы Т2—Т4 закрыты, реле Р обесточено. Генератор импульсов, состоящий из порогового усилителя (собран на микро-схеме У), конденсаторов С4, С5 и резисторов R13—R23, вырабатывает импульсы, подаваемые на вход счетчика. Когда количество импульсов становится равным коэффициенту пересчета счетчика, на его выходе появляется сигнал, поступающий в усилитель (транзисторы Т2—Т4), и реле Р включается. Через открывшийся диод Д2 на генератор подается высокий потенциал — генерация импульсов и выдержка времени заканчиваются. При снятии напряжения питания схема возвращается в исходное состояние.

Реле типа ВЛ-52 отличается тем, что обеспечивает выдержки времени до 100 мин; для этого в нем применен счетчик с большим коэффициентом пересчета.

Выдержка времени электронных реле задается зарядными резисторами R13—R23, сопротивление которых регулируется переключателями. Оси переключателей выведены на переднюю панель реле и имеют шлицы под отвертку для регулирования и настройки реле.

Электромагнитные реле типов РМ-1000 и РМ-2000 предназначены для защиты силовой цепи тепловоза. Реле РМ-1000 используются в качестве реле заземления РЗ (см. п. 6.9), а реле РМ-2000 — в качестве реле максимального тока РМ2 (см. п. 6.8).

Основными элементами реле типа РМ-1000 являются электромагнит и блок контактов, установленные на основании 8 (рис. 9.35, табл. 9.12). Магнитная цепь аппарата состоит из ярма 22, плоского якоря 11, сердечника 16, удерживающей 17 и рабочей 18 катушек.

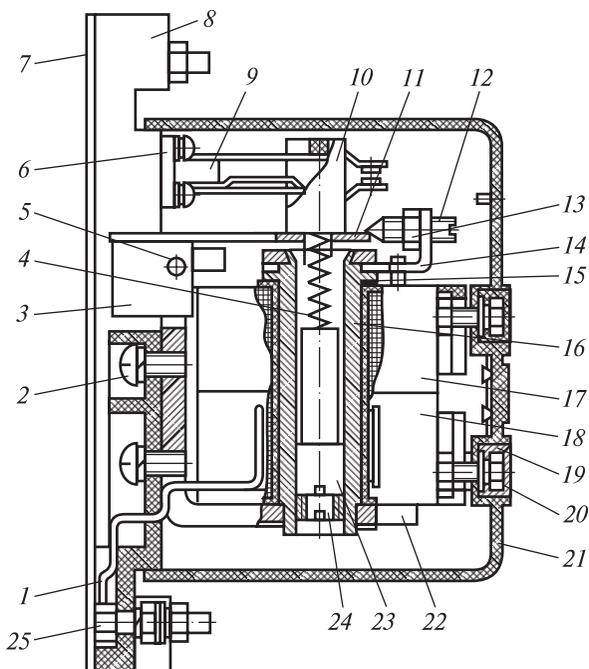


Рис. 9.35. Реле типа РМ-1000:

1 — вывод катушки; 2, 6, 12 — винты; 3 — противовес; 4 — пружина; 5 — ось; 7 — пластина; 8 — основание; 9 — колодка; 10 — траверса; 11 — якорь; 13, 20 — гайки; 14 — скоба; 15 — кольцо; 16 — сердечник; 17 — удерживающая катушка; 18 — рабочая катушка; 19 — пломба; 21 — кожух; 22 — ярмо; 23 — упор; 24 — стопор; 25 — контактный болт

Таблица 9.12

Технические характеристики реле РМ-1000

Параметр	Значение
Номинальное напряжение контактов, В	110
Номинальный ток контактов, А	2
Номинальный ток рабочей катушки, А	0,04
Сопротивление рабочей катушки при 20 °С	300
Номинальный ток удерживающей катушки, А	0,16
Сопротивление рабочей катушки при 20 °С	22
Раствор контактов, мм	1—1,5
Конечное нажатие контактов, Н	0,25—1

Удерживающая катушка 17 постоянно включена на напряжение цепи управления тепловоза 110 В через резистор, но ее магнитодвижущей силы недостаточно для включения реле. Блок контактов представляет собой изоляционную колодку 9, на которой укреплены размыкающие и замыкающие контакты, каждый из которых состоит из двух пар контактов, соединенных последовательно.

При коротком замыкании в защищаемой цепи ток протекает через рабочую катушку 18, и под действием магнитодвижущих сил удерживающей 17 и рабочей 18 катушек реле включается. Траверса 10, укрепленная на якоре 11, перемещается, что вызывает переключение контактов. При снятии напряжения с рабочей катушки якорь остается притянутым к сердечнику под действием удерживающей катушки. Чтобы вернуть якорь в исходное положение, нужно снять напряжение с удерживающей катушки.

Ход якоря аппарата регулируют винтом 12, после чего винт закрепляют гайкой 13.

Настройка реле производится следующим образом: в удерживающей катушке устанавливают ток значением 0,16 А. Регулируя стопором 23 нажатие возвратной пружины 4, добиваются, чтобы реле сработало при токе в рабочей катушке 0,04 А. Отключение реле должно произойти при токе в цепи удерживающей катушки в пределах 0,112—0,008 А и обесточенной рабочей катушке.

Реле типа РМ-2000 аналогично по конструкции реле типа РМ-1000, однако обе его катушки соединены последовательно и по ним протекает ток защищаемой цепи. Когда ток, протекающий через катушки, достигает величины уставки, реле срабатывает. Оно имеет коэффициент возврата не менее 0,7 (отношение тока возврата к току срабатывания), благодаря чему реле используются для защиты от превышения максимально допустимого тока.

Дифференциальное реле (реле перехода) предназначено для автоматического включения и выключения контакторов ослабления возбуждения тяговых двигателей в зависимости от соотношения тока и напряжения выпрямительной установки (скорости движения тепловоза). В качестве реле перехода на тепловозах применяется *дифференциальное реле типа РД-3010* (рис. 9.36, табл. 9.13).

На магнитопроводе (ярме) П-образной формы 1 укреплены катушки с сердечниками: токовая 6 и напряжения 2. Сердечник 5 токовой катушки с помощью винта может перемещаться для из-

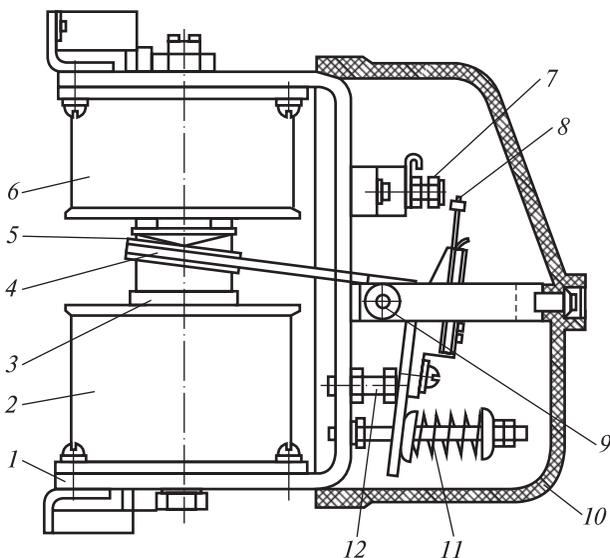


Рис. 9.36. Дифференциальное реле типа РД3010:

1 — магнитопровод; 2 — катушка напряжения; 6 — токовая катушка; 3, 5 — сердечники катушек; 4 — якорь; 7 — контакты неподвижные; 8 — контакты подвижные; 9 — ось; 10 — кожух; 11 — пружина; 12 — упорный винт

Таблица 9.13

Параметры настройки реле типа РД-3010

Положение контактов	Ток катушки, А	
	токовой	напряжения
Замыкаются	0	0,075
Размыкаются	0	0,022
Замыкаются	1	0,155
Размыкаются	1,3	0,052

менения воздушного зазора между якорем и сердечником 3. Якорь 4 Г-образной формы поворачивается на оси 9. При обесточенных катушках якорь прижимается пружиной 11 к упорному винту 12. Неподвижные контакты 7 реле установлены на изоляционной колодке, а подвижные 8 — на якоре.

Раствор контактов регулируют перемещением неподвижных контактов, а совпадение центров их замыкающих поверхностей — пе-

ремещением подвижных контактов на контактодержателе. Раствор контактов должен обеспечиваться не менее 2 мм, а нажатие — не менее 4 Н. Контактная система аппарата закрыта прозрачным кожухом 10.

Катушка напряжения через добавочный резистор включается на напряжение выпрямительной установки, поэтому ток в ней пропорционален напряжению тягового генератора. Токовая катушка последовательно с добавочным резистором подключается таким образом, что ток в ней пропорционален току тягового генератора.

Реле срабатывает под действием электромагнитной силы, создаваемой катушкой напряжения 2, которой противодействуют усилия, создаваемые токовой катушкой 6 и пружиной 11; отключается реле под действием усилия токовой катушки и пружины. Благодаря этому срабатывание и отключение реле происходят в зависимости от определенного соотношения напряжения и тока генератора.

Реле боксования типов РК-221 и РК-231 обеспечивают защиту тепловоза от развития боксования колесных пар (см. п. 6.10). Система защиты содержит два реле типа РК-221 и одно — типа РК-231. Отличие этих реле заключается только в значениях сопротивлений их катушек: катушка реле РК-231 имеет сопротивление 1,1 Ом (высокая чувствительность), а катушка реле РК-221 — 4,95 Ом (пониженная чувствительность). Три реле (два реле типа РК-221 и одно — типа РК-231) образуют блок боксования типа ББ-320.

Реле РК-221 (рис. 9.37) имеет незамкнутую магнитную систему. На кронштейне 3 смонтирована катушка 2 с коротким сердечником 12. Якорь 7 устанавливается на оси 8, проходящей через кронштейн. В нижней части к якорю винтом прикреплен плунжер 9, входящий внутрь катушки. Для предотвращения прилипания плунжера к сердечнику на торец плунжера припаивают латунный диск толщиной 0,33 мм. В верхней части к якорю на плоской пружине прикреплен двусторонний перекидной контакт 5. Контактная система имеет один замыкающий и один размыкающий контакты.

При обесточенной катушке якорь оттянут пружиной 11, и подвижный перекидной контакт 5 замкнут с неподвижным контактом 4. Когда ток проходит по катушке 2, создается магнитный поток, замыкающийся через сердечник 12, кронштейн 3 и плунжер 9. Если поток достаточен для преодоления силы упругости пружи-

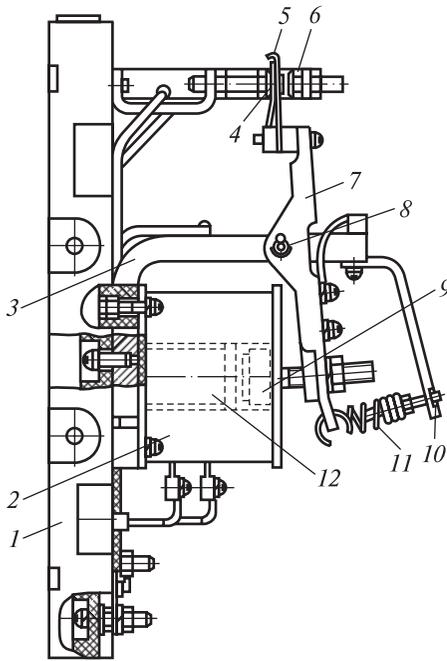


Рис. 9.37. Реле боксования типа РК-221: 1 — основание; 2 — катушка; 3 — кронштейн; 4, 6 — неподвижные контакты; 5 — подвижный перекидной контакт; 7 — якорь; 8 — ось; 9 — плунжер, 10 — регулировочный винт; 11 — пружина; 12 — сердечник

ны, якорь притягивается к катушке и подвижный контакт 5 переключается и замыкается с неподвижным контактом 6.

Снижение тока в катушке вызывает уменьшение намагничивающей силы, и пружина возвращает якорь в первоначальное положение. Для отпадания якоря необходимо очень небольшое уменьшение тока, вследствие чего реле имеет высокий коэффициент возврата — не менее 0,85, что весьма важно для правильной работы реле.

Настройка реле регулируется винтом 10, изменяющим натяжение пружины. Можно также регулировать реле винтом плунжера 9. После регулировки необходимо снова проверить ток включения. Требуемый зазор между контактами устанавливают изменением положения неподвижных контактов.

9.10. Аппараты контроля и защиты

Датчики-реле давления и температуры. Датчик-реле типа Д250Б используется для контроля давления масла в системе дизеля в режиме пуска (РДМЗ, см. п. 8.3); датчик-реле типа РД-1-ОМ5-02 осуществляет контроль давления воздуха в тормозной и питательной магистралях воздушной системы тепловоза (РДК, см. п. 7.2); датчик-реле типа Т-35-01-03 используется для контроля температуры в водяной и масляной системах дизеля (ДВО, ДВ1, ДВ2, ДМО, ДМ1, ДМ2, см. п. 7.3).

нечувствительности можно определить по положению индекса 8 на шкале 9.

Для повышения устойчивости работы прибора при механических нагрузках используется демпфер, включающий рычаг 15 с грузом 13 на конце, шарнирно связанным с рычагом 18 передаточного механизма.

Датчик (реле температуры типа Т-35) имеет аналогичную конструкцию, а его чувствительная система представляет собой сильфон с термобаллоном и капиллярной трубкой. При изменении температуры контролируемой среды объем жидкости в термосистеме изменяется и воздействует на сильфон, что приводит к перемещению рычагов, осуществляющих переключение контактов прибора.

Трубчатые предохранители различных типов на тепловозах защищают низковольтные цепи от перегрузок и коротких замыканий. Применяются два вида предохранителей — разборные и неразборные. Неразборные предохранители на ток от 5 до 20 А применяются в цепях управления, освещения, вспомогательных электродвигателей. Они имеют плавкие вставки из медной проволоки или цинка.

В цепях аккумуляторных батарей и других сильноточных цепях применяют разборные предохранители на ток до 160 А (рис. 9.39).

Разборный предохранитель состоит из изоляционного (керамического, фибрового и т.п.) корпуса 2, в который помещена плавкая вставка 3 из листового цинка. Вставка болтами прикреплена к контактным ножам 1, которые соединены с защищаемой электрической цепью. Вставка перегорает, когда по ней проходит ток, превышающий номинальное значение для данного предохранителя.

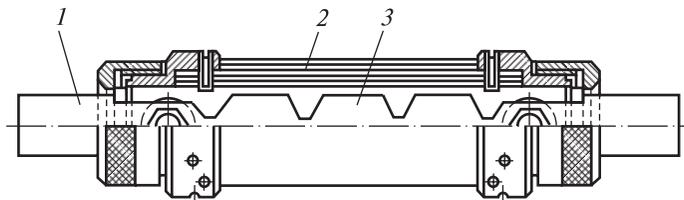


Рис. 9.39. Предохранитель разборный:

1 — контактный нож; 2 — изоляционный корпус; 3 — плавкая вставка

Трубку заполняют асбестовой бумагой, толченым мелом, кварцевым песком или мраморной крошкой, которые способствуют гашению дуги, чем ускоряют перегорание вставки, а также защищают трубку от выгорания.

Конечный выключатель нажимной (или рычажный) типов ВПК-2110, ВПК-2112 и ВК-220. Конечные выключатели служат для блокирования открытых дверей аппаратных камер, шкафов выпрямительной установки и валоповоротного механизма. Они переключают контакты при нажатии на их шток или рычаг. В исходное положение контакты возвращаются пружиной.

Межтепловозное соединение обеспечивает возможность управления несколькими секциями локомотива с одного пульта машиниста по системе многих единиц. Межтепловозное соединение состоит из розеток и переносных штепселей, при помощи которых соединяются провода управления тепловозов (рис. 9.40).

Розетка имеет контактные штыри 12, а штепсель — соответствующие им контактные гнезда 10. Контактные штыри сделаны разрезными, что позволяет обеспечивать надежный контакт в соединениях. Контакты рассчитаны на ток 25 А и напряжение 110 В.

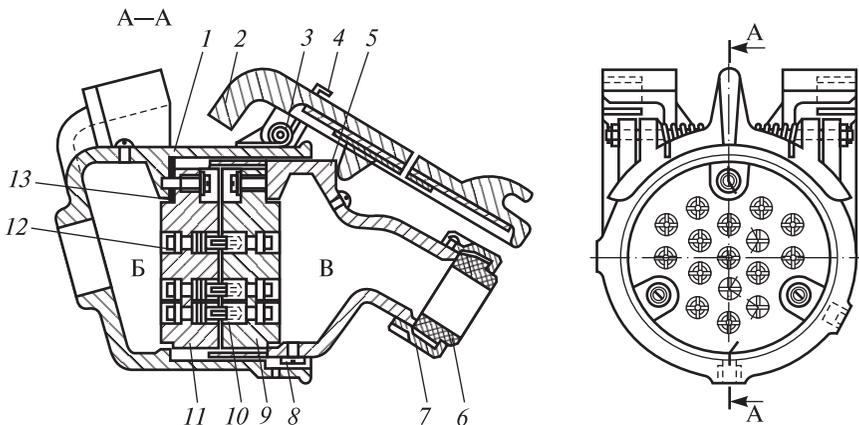


Рис. 9.40. Межтепловозное соединение:

1 — корпус розетки; 2 — крышка с запирающим выступом; 3 — ось; 4 — пружина; 5 — корпус штепселя; 6 — уплотнение; 7 — гайка; 8 — винт; 9 — изоляционная шайба штепселя; 10 — контактное гнездо; 11 — изоляционная шайба розетки; 12 — контактный штырь; 13 — резиновая прокладка

Для предохранения штепселя от попадания влаги кабель имеет резиновое уплотнение *б*, а полости Б и В залиты изоляционной компаундной массой. Запирающее устройство *2* межтепловозного соединения предохраняет штепсель и розетку от размыкания.

Резисторы. В цепях регулирования и управления на тепловозах применяются три типа резисторов: ленточные типов ЛС, ЛСО, проволочные типа СР и проволочные эмалированные типов ПЭВ, ПЭВР.

Ленточные резисторы типа ЛС (рис. 9.41) используются для ослабления возбуждения тяговых электродвигателей. Они выполнены из фехральной ленты *3*, уложенной зигзагообразно. В местах перегиба лента крепится держателями *4*, компенсирующими изменение длины ленты при нагреве и технологические отклонения. Держатели *4* закреплены между изоляторами *2*. Изоляторы стянуты шпильками *1*, образующими с боковыми стальными держателями каркас *5* резистора. Прямолинейные участки ленты для жесткости имеют гофры. Резисторы ЛС выполняются из элементов, рассчитанных на токи свыше 20 А и напряжение изоляции 1000 В.

Резисторы типа ЛСО отличаются тем, что предназначены для работы с принудительным охлаждением. Они используются в качестве тормозных резисторов тепловоза.

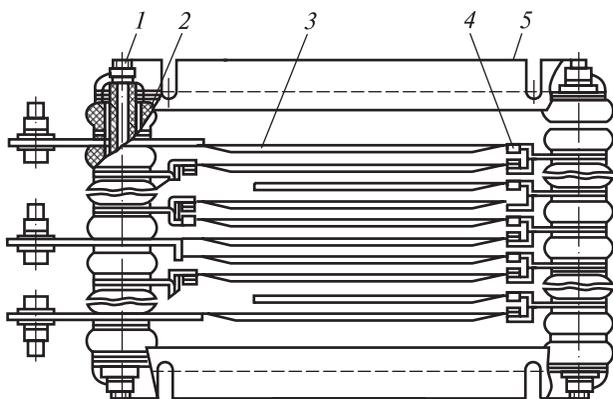


Рис. 9.41. Ленточный резистор типа ЛС:

1 — стяжные шпильки; *2* — изоляторы; *3* — лента; *4* — держатели ленты; *5* — каркас

Резисторы типа СР (рис. 9.42) выполнены в виде полых фарфоровых цилиндров 2, на которые намотана проволока высокого омического сопротивления. Требуемое сопротивление секции резистора устанавливается с помощью регулировочных хомутов.

Цилиндры крепятся держателями 4 к основанию 1, выполненному из пластмассовых унифицированных панелей, стянутых шпильками в единый блок. Монтажные провода 3 присоединяют к болтам, закрепленным на панели, к которым, в свою очередь, подходят провода от регулировочных хомутов

Мощность резисторов типа СР составляет до 350 Вт. Продолжительный ток элементов СР-304—СР-326 изменяется соответственно в пределах от 1,1 до 9,1 А, а сопротивление — от 299 до 3,75 Ом.

Аналогично выполнены панели с резисторами типов ПЭВ и ПЭВР мощностью 50 и 100 Вт. Резисторы представляют собой полые керамические трубки, на которые намотана проволока из нихрома или константана, покрытых высокопрочной эмалью. На тепловозах применяют нерегулируемые резисторы типа ПЭВ и регулируемые типа ПЭВР. На поверхности последних имеется свободная от эмали дорожка проводника для закрепления регулировочного хомута. С помощью хомута устанавливают требуемое значение сопротивления резистора.

Измерительные приборы. На тепловозах для контроля за работой электрических цепей устанавливают *амперметры и вольтметры*. Амперметры включены в силовую цепь для контроля за током тягового генератора, в цепь аккумуляторных батарей для контроля зарядного и разрядного токов и т.п. В качестве амперметров и вольтметров

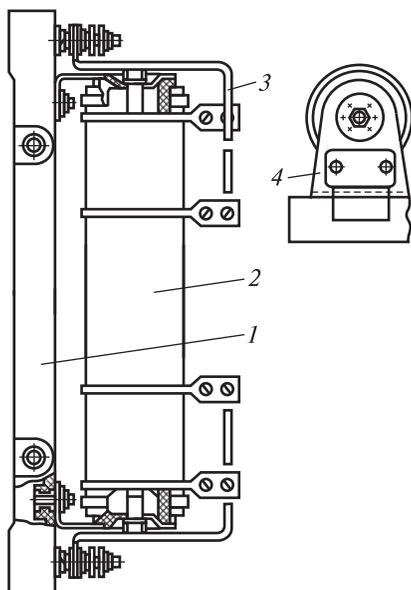


Рис. 9.42. Унифицированная панель с элементом резистора типа СР:
1 — основание; 2 — фарфоровый цилиндр; 3 — провод; 4 — держатель

используются приборы магнитоэлектрической системы, которые имеют подвижные рамки, поворачивающиеся в магнитном поле постоянного магнита. Такие приборы не рассчитаны на большие токи; для расширения пределов измерения амперметры подключаются к шунтам.

Вольтметр, измеряющий напряжение тягового генератора, имеет шкалу на 1000 В и включается через добавочный резистор на напряжение генератора. Вольтметры на напряжение до 150 В включаются в схему тепловоза непосредственно.

Электрические термометры и электрические манометры предназначены для дистанционного измерения температуры воды и масла дизеля, а также давления в масляной системе дизеля. В комплект электроманометра и электротермометра входят указатель и датчик (приемник), связанные между собой проводниками. На тепловозах указатель располагается на пульте управления, а датчики — в соответствующих трубопроводах. Приборы питаются напряжением 27 В, получаемым от цепей управления через добавочные резисторы.

Глава 10. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

10.1. Токоприемник

Токоприемник — устройство для электрического соединения контактной сети с электрическими цепями электровоза как при его движении, так и в неподвижном состоянии (в последнем случае со значительным ограничением токовой нагрузки вследствие локального нагрева контактного провода). К конструкции токоприемников предъявляются жесткие требования в части обеспечения надежного контакта и динамических качеств.

Основными параметрами токоприемника, определяющими допустимую скорость движения электровоза, является его приведенная масса (см. п. 1.1.2) и статическое нажатие на контактный провод. В зависимости от приведенной массы токоприемники могут быть тяжелой (Т) или легкой (Л) серий [28]. Приведенная к точке контакта масса токоприемников при конструкционной скорости электровоза до 160 км/ч для серии Т составляет 55 кг, серии Л — 33 кг. Токоприемники серии Т должны обеспечивать статическое нажатие на контактный провод при его подъеме не менее 100 Н и быть рассчитаны на токи до 2000 А; такие токоприемники применяются на электровозах постоянного тока с напряжением в контактном проводе 3000 В. Токоприемники серии Л применяются на электровозах переменного тока с напряжением в контактном проводе 25 000 В. Они должны обеспечивать статическое нажатие на контактный провод при его подъеме не менее 60 Н и рассчитаны на токи до 1000 А.

Аэродинамическая сила, действующая на токоприемник при движении электровоза, должна быть минимальной. Опускающий механизм токоприемника должен исключать возможность его самопроизвольного подъема воздушным потоком.

Повышение мощности электровоза, особенно постоянного тока, вызывает увеличение тока, потребляемого электровозом, и приводит

к росту габарита и приведенной массы токоприемников. Увеличение массы токоприемника снижает допустимую скорость движения электровоза.

Токосъем с контактного провода осуществляется через сменные накладки или вставки полоза токоприемника (рис. 10.1). Эти детали непосредственно влияют на качество токосъема, поэтому их изготавливают из материала с малым удельным сопротивлением, стойкого к образованию дуги, обладающего достаточной износостойкостью и одновременно обеспечивающего минимальный износ контактного провода. Широкое распространение на токоприемниках электровозов получили накладки из твердотянутой медной полосы специального профиля, по техническим показателям близкие к материалу контактного провода. Однако применение в узле трения однородного материала неблагоприятно по антифрикционным свойствам.

С целью снижения износа контактного провода применяют накладки из металлокерамики на основе меди с высоким содержанием графита или угольные вставки. Износ провода при металлокерамических накладках выше, чем при угольных вставках, однако угольные вставки имеют относительно высокое удельное сопротивление ($15\text{—}30 \text{ (Ом}\cdot\text{мм}^2)/\text{м}$). Это обуславливает значительную мощность

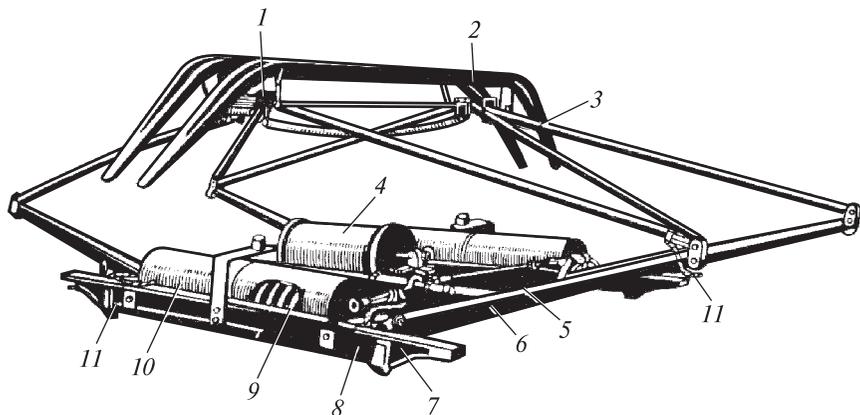


Рис. 10.1. Токоприемник типа Т-5М1:

1 — каретка; 2 — полоз (двойной); 3 — верхняя подвижная рама; 4 — пневматический привод; 5 — синхронизирующая тяга; 6 — нижняя подвижная рама; 7 — основание; 8 — редукционное устройство; 9 — подъемные пружины; 10 — защитный кожух; 11 — шунт

потерь в месте контакта и высокие температуры, что может привести к пережогу провода.

Перемещение полоза по проводу улучшает условия теплорассеяния в месте контакта токоприемника с контактным проводом. Однако при значительных токовых нагрузках температура в месте контакта может превышать 250—270 °С, т.е. температуру отжига твердотянутой меди провода. При этом повышается пластичность меди контактного провода и снижается его прочность.

На отечественных электровозах постоянного тока в условиях тяжелых грузовых поездов применяются токоприемники типа Т-5М1: Т — тяжелая серия, 5 — номер модели, М — с медными накладками, 1 — номер категории размещения (табл. 10.1, см. рис. 10.1).

Таблица 10.1

Технические характеристики симметричных токоприемников

Параметр	Л-1У1-01	Л-13У1-01	Т-5М1
Род тока	Переменный	Переменный	Постоянный
Напряжение номинальное, В	25 000	25 000	3000
Ток длительный, А: при движении на стоянке	900 80	500 80	2200 300
Наибольшая скорость движения, км/ч	140	160	120
Давление сжатого воздуха, кПа (кгс/см ²): номинальное минимальное	500 (5,0) 350 (3,5)	500 (5,0) 350 (3,5)	500 (5,0) 350 (3,5)
Масса токоприемника (без изолятора), кг	290	290	320

Токоприемник серии Т оборудован редукционным устройством, обеспечивающим автоматическое изменение скорости подъема и опускания подвижных рам токоприемника с замедлением в конце движения при соприкосновении с контактным проводом и при опускании на амортизаторы [29].

Подъем токоприемника осуществляется при помощи подъемных пружин 9, срабатывающих при подаче воздуха в цилиндр пневматического привода. При этом сжимаются опускающие пружины, расположенные внутри цилиндра привода, после чего сила подь-

емных пружин становится достаточной для подъема полоза токоприемника. Под действием подъемных пружин валы нижних рам 6 поворачиваются и обеспечивают подъем верхних рам 3 совместно с кареткой 1 и полозом 2. Каретки служат для компенсации малых (с амплитудой до 50 мм) колебаний токоприемника по высоте.

Полоз токоприемника может свободно поворачиваться на 5—7° относительно продольной оси. Электрически связь полоза с подвижными верхними рамами осуществляется с помощью шунта 11. Все шарнирные соединения токоприемников электрически зашунтированы; подвод тока от основания 7 осуществляется монтажной шиной.

В рабочем диапазоне высоты подъема токоприемника опускающие пружины полностью сжаты и давление полоза на контактный провод определяется только усилием подъемных пружин. Синхронизация поворота валов нижних рам осуществляется при помощи тяги 5, шарнирно закрепленной в вилках валов.

При снижении давления воздуха в цилиндре привода опускающие пружины разжимаются, компенсируя действие подъемных пружин, и опускают подвижную систему токоприемника до упора на амортизаторы. Конструктивное выполнение подъемных пружин выбрано из условия безопасности обслуживания: при изломе пружины растяжения токоприемник не может самопроизвольно подняться и включить оборудование электровоза под напряжение, а излом опускающих пружин не повлияет на опускающее усилие пружины.

У токоприемников серии Л функцию редуцирующего устройства выполняет вентиль токоприемника ЭВТ-54. Токоприемники типа Л-13У1-01 (Л — легкая серия, 13 — номер модели, У — с угольными накладками вставками, 1 — номер категории размещения, 01 — номер конструктивного исполнения) используются на 12-осных электровозах переменного тока (см. табл. 10.1, рис. 10.2).

Рассмотренные токоприемники имеют симметричную конструкцию. Кинематическая схема и принцип действия всех симметричных токоприемников электровозов идентичны.

В последние годы все большее распространение получает асимметричная конструкция токоприемников. Асимметричными токоприемниками оборудованы грузовые электровозы серий 2ЭС4К, 2ЭС5К, 2ЭС6 и пассажирский электровоз серии ЭП2К.

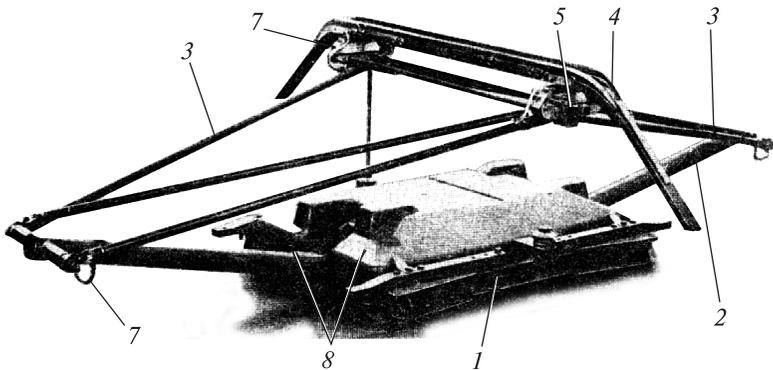


Рис. 10.2. Токоприемник типа Л-13У:

1 — основание; 2 — нижняя подвижная рама; 3 — верхняя подвижная рама; 4 — полоз (одинарный); 5 — каретка; 6 — защитный кожух; 7 — токоведущие шунты

Первоначально токоприемники этого типа были разработаны специально для высокоскоростного электроподвижного состава, достигающего скорости до 250 км/ч, однако в дальнейшем вследствие хороших массо-габаритных показателей и ряда других положительных качеств они получили широкое распространение на электровозах с меньшими скоростями движения.

Кинематические схемы асимметричного и симметричного токоприемников имеют принципиальные отличия (рис. 10.3). Каретки полоза 1 токоприемника упруго укреплены на стержнях 2, шарнирно соединенных с верхней рамой 3. Рама в нижней части заканчивается поперечным кронштейном 4, шарнирно-сочлененным с рычагами 5 и 6. Нижний конец рычага 6 шарнирно прикреплен к основанию, рычаг 5 жестко скреплен с поворотным валом 10. Кронштейн 7 соединен с пружиной 8, поворачивающей трубчатый рычаг 5 по часовой стрелке, в результате чего создается нажатие полоза 1 на контактный провод.

Для придания полозу горизонтального положения, а стержням 2 вертикального положения, их нижние точки тягой 9 шарнирно соединяют с рычагом 6. Тяга 9 не несет больших нагрузок и лишь поворачивает стержни 2, в некоторых вариантах конструкции тяги вообще отсутствуют и необходимый поворот полозов осуществляют каретки.

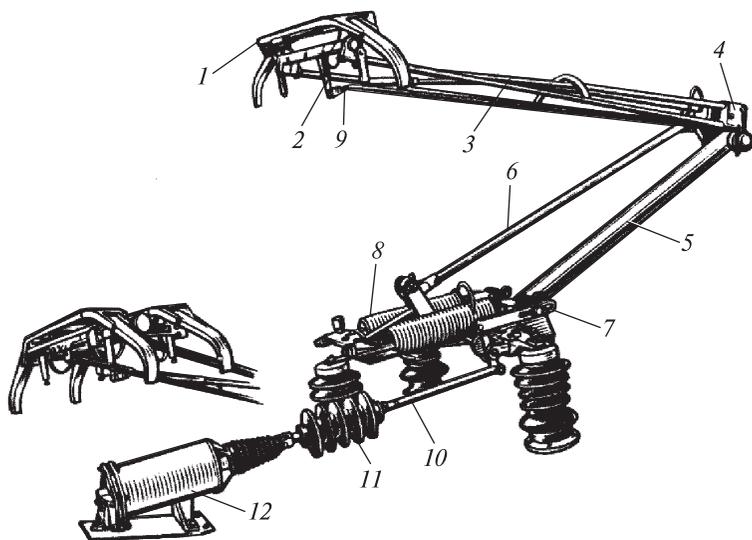


Рис. 10.3. Асимметричный токоприемник универсального назначения:
 1 — каретка полоза; 2 — стержень; 3 — верхняя рама; 4 — поперечный кронштейн; 5, 6 — рычаги; 7 — кронштейн; 8 — пружина; 9 — тяга; 10 — поворотный вал; 11 — изолятор; 12 — пневмоцилиндр

Пневматический привод токоприемника состоит из цилиндра 12, шток которого через изолятор 11 и тягу 10 создает необходимое натяжение пружин 8.

Рассмотренный токоприемник имеет универсальное назначение. Он может использоваться на электровозах как переменного тока (при максимальном токе 800 А), так и постоянного тока (при максимальном токе 4000 А). Различие исполнения асимметричных токоприемников заключается в конструкции их верхних узлов: одинарный полоз токоприемника электровоза переменного тока (рис. 10.3, а); полоз токоприемника электровозов постоянного тока (рис. 10.3, б).

В сравнении с аналогичными симметричными токоприемниками число трубчато-рычажных элементов асимметричного токоприемника меньше в 2 раза, число шарнирных соединений меньше в 1,7 раза, что значительно снижает внутренние силы трения. Масса подвижных частей, приведенная к точке контакта, для асимметричного токоприемника меньше примерно в 1,5 раза.

10.2. Главные и быстродействующие выключатели

Главные (на электроподвижном составе переменного тока) и *быстродействующие* (на электроподвижном составе постоянного тока) выключатели используют как основные аппараты прямой защиты от коротких замыканий силовых цепей и, одновременно, в качестве исполнительных аппаратов защиты других систем электровоза.

10.2.1. Главные выключатели

Главный выключатель состоит из ножевого разъединителя 5 с пневмоприводом; вала разъединителя 7 с изоляторами; вывода разъединителя 6; корпуса 10, в котором расположен блок управления; воздушной дугогасительной камеры 2; выхлопной камеры с фланцем 1; изолятора 8 с каналом, по которому сжатый воздух поступает в дугогасительную камеру; воздушного резервуара 9 (рис. 10.4). Основным элементом дугогасительной камеры является подвижный контакт, управляемый давлением воздуха (рис. 10.5). В блоке

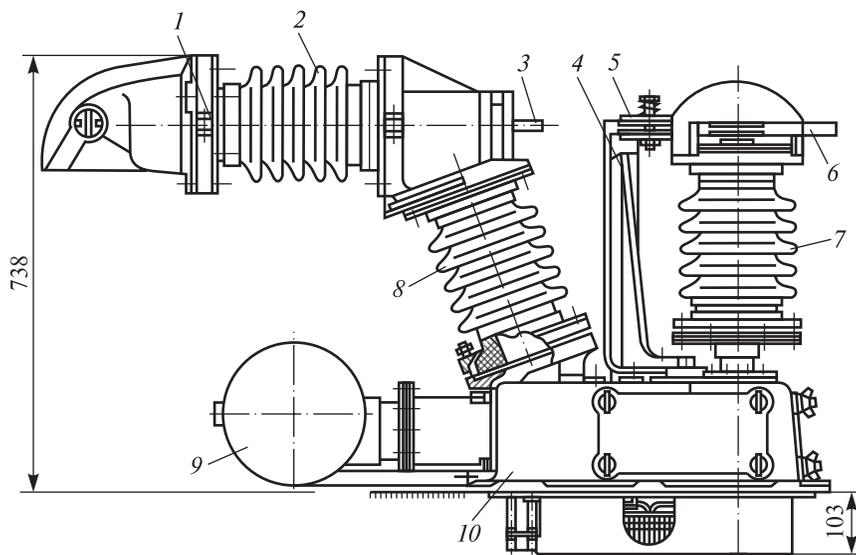


Рис. 10.4. Быстродействующий выключатель типа ВОВ-25-4М:

1 — фланец выхлопной камеры; 2 — дугогасительная камера; 3 — неподвижный контакт; 4 — заземляющий кронштейн; 5 — разъединитель; 6 — вывод разъединителя; 7 — вал разъединителя; 8 — изолятор; 9 — воздушный резервуар; 10 — корпус

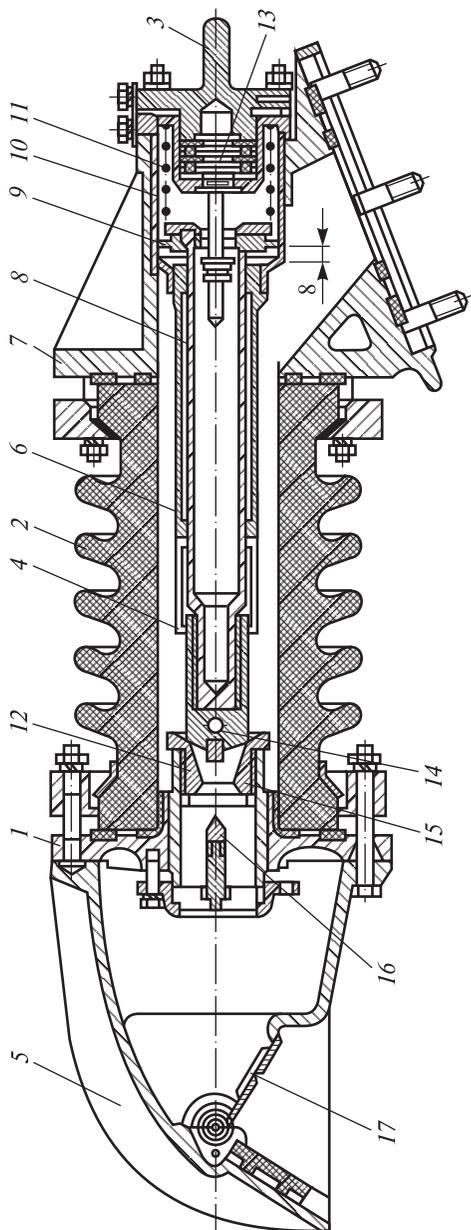


Рис. 10.5. Дугогасительная камера главного выключателя типа ВОВ-25-4М:

1 — фланец; 2 — изолятор; 3 — контакт; 4 — контактные лепестки; 5 — выхлопная камера; 6 — направляющая трубка; 7 — угольник; 8 — угольник; 9 — поршень; 10 — блок цилиндра; 11 — пружина; 12 — неподвижный контакт дугогасительной камеры; 13 — амортизатор; 14 — подвижный контакт; 15 — патрубок; 16 — ограничитель; 17 — крышка выхлопной камеры

системы управления расположены электромагниты (включающий и отключающие), управляющие пневмоприводом разъединителя 5 и контактом в дугогасительной камере. Аппарат включается в силовую цепь электровоза с помощью кабелей, которые закрепляются на фланце 1 выхлопной камеры и выводе 6 разъединителя.

В выключенном состоянии аппарата контактные ножи разъединителя 5 соединены с заземляющим кронштейном 4, а резервуар 9 должен быть наполнен воздухом. Минимальное давление сжатого воздуха в резервуаре составляет 0,6 МПа (приблизительно 6 атмосфер).

При включении аппарата включающий электромагнит воздействует на клапаны его пневматической системы управления. В результате пневмопривод разъединителя заполняется воздухом и начинает поворачивать вал 7 на 60°. Контактные ножи размыкаются с заземляющим кронштейном 4 и соединяются с неподвижным контактом 3. Разъединитель замыкает высоковольтную цепь электровоза.

При выключении главного выключателя сначала с помощью системы управления размыкаются его контакты в дугогасительной камере, а затем с выдержкой времени, достаточной для гашения дуги, разъединитель 5 размыкает силовую цепь электровоза.

В качестве примера ниже рассмотрена дугогасительная камера главного выключателя типа ВОВ-25-4М (см. рис. 10.5, табл. 10.2), используемого на электровозах переменного тока ВЛ80Р, ВЛ80С и ВЛ85, 2ЭС5К.

Таблица 10.2

Технические характеристики быстродействующего выключателя ВОВ-25-4М

Параметр	Значение
Напряжение номинальное, В	25 000
Диапазон регулирования тока уставки номинальный, А	200—500
Предельный ток отключения, А	10 000
Сквозной ток короткого замыкания, А	25 000
Номинальная мощность отключения, МВт·А	250
Номинальное давление сжатого воздуха в баке, МПа (кгс/см ²)	0,9 (9)
Собственное время автоматического отключения от промежуточного реле при двукратном токе уставки, с, не более	0,04
Масса выключателя, кг	200

Воздушная дугогасительная камера главного выключателя расположена внутри фарфорового изолятора 2 и укреплена на металлическом угольнике 7. Блок цилиндра 10 вместе с пружиной поршня 9 и амортизатором 13, состоящим из набора резиновых шайб, соединены болтами с неподвижным контактом 3 разъединителя.

Нормально контакты в дугогасительной камере замкнуты и подвижной контакт 14, связанный контактодержателем 8 с поршнем 9, закрывает отверстие в неподвижном контакте 12. При выключении аппарата выключающие электромагниты открывают клапаны пневматической системы управления, обеспечивая поступление сжатого воздуха в цилиндр 10. Поршень 9, преодолевая сопротивление пружины 11, перемещается в цилиндре, а контактодержатель 8 — в направляющей трубке 6, припаянной к цилиндру 10. Конец трубки 6 выполнен в виде контактных лепестков 4, подводящих ток к подвижному контакту. Перемещение контакта 14 на 25 мм вызывает образование дуги между его наконечником и ограничителем 16, наконечник которого изготавливается из тугоплавкой металлокерамики. Одновременно в образовавшемся сопле возникает воздушный поток, гасящий эту дугу.

Неподвижный контакт 12 аппарата закреплен резьбовым соединением в патрубке 15, укрепленным во фланце 1. Там же закреплена выхлопная камера 5, отверстие которой закрыто крышкой 17.

Статическое нажатие контактов в дугогасительной камере составляет 450 Н, а энергия их удара гасится амортизатором 13.

Возникшие при коммутации контактов перенапряжения уменьшаются с помощью нелинейного резистора, шунтирующего контакты выключателя.

В комплект главного выключателя ВОВ-25-4М входит проходной трансформатор тока ТПОФ-25, предназначенный для автоматического отключения питания электровоза от контактной сети при коротких замыканиях и перегрузках; одновременно он служит высоковольтным вводом цепи электрического тока напряжением 25 кВ в кузов электровоза (рис. 10.6) [28]. Коэффициент трансформации проходного трансформатора ТПОФ-25 $k_{\text{ТТ}} = 16$. Через него подается высокое напряжение на тяговый трансформатор. Его первичная обмотка 1, выполненная в виде медного стержня, располагается в фарфоровом изоляторе 8, закрепленном цементом во фланце 2. Вторичная обмотка трансформатора 5, намотана на сердечнике 4 и

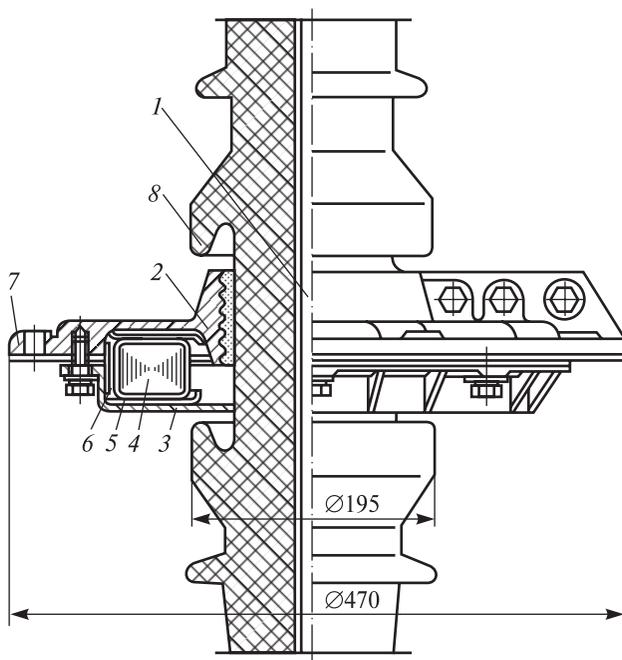


Рис. 10.6. Проходной трансформатор тока ТПОФ-25:

1 — первичная обмотка; 2, 3 — фланцы корпуса; 4 — сердечник магнитопровода; 5 — вторичная обмотка трансформатора; 6, 7 — изолирующая и уплотнительная прокладки; 8 — фарфоровый изолятор

изолирована от корпуса прокладками 6. Трансформатор устанавливают на крыше электровоза, через уплотняющую прокладку 7.

На электровозах переменного тока перспективными являются главные выключатели с вакуумной дугогасительной камерой [28]. В глубоком вакууме ствол дуги формируется только в парах материала электродов, которые быстро охлаждаются и дуга гаснет. Эти выключатели при сравнительно невысоких массо-габаритных показателях обладают достаточным быстродействием и значительной долговечностью. Конструктивно они практически повторяют выключатели с воздушным гашением дуги, за исключением собственно узла дугогашения.

Основным узлом дугогашения такого выключателя является вакуумная камера (рис. 10.7). Она образована двухсекционным изо-

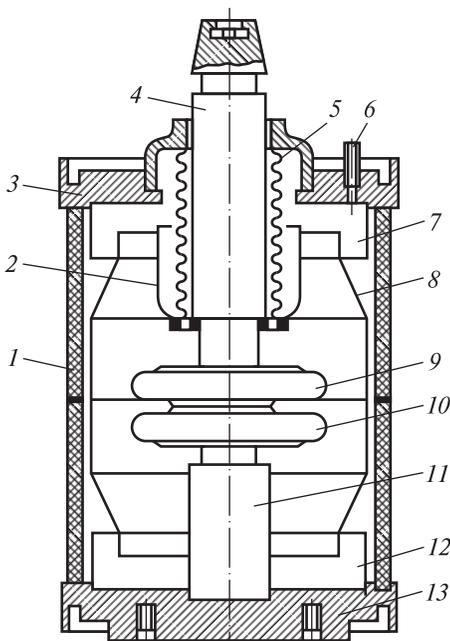


Рис. 10.7. Вакуумная дугогасительная камера:

1 — изоляционный стакан; 2, 7, 8, 12 — защитные экраны; 3, 13 — фланцы; 4, 11 — контактодержатели; 5 — сиффон; 6 — воздушный патрубок; 9, 10 — подвижный и неподвижный контакты

12; экраны 2 и 7 имеют потенциалы подвижного контакта, экран 8 — потенциал нейтрали, а экран 12 — потенциал неподвижного контакта. В нормальном состоянии контакты замкнуты за счет натяжения сиффона.

При отключении выключателя контакты с помощью приводов разводятся на расстояние, зависящее от коммутируемого напряжения. Для напряжений 12—84 кВ раствор контактов составляет 10—60 мм соответственно [29]. Столь малый ход подвижного контакта для гашения дуги возможен благодаря весьма низкой электрической проводимости вакуума.

ляционным стаканом 1, приваренным к металлическим фланцам 3 и 13. Из камеры через патрубок 6 откачивают воздух до разряжения 10^{-2} Па и запаивают этот патрубок. Внутри камеры находятся неподвижный 10 и подвижный 9 контакты, выполненные из специальных сплавов повышенной твердости (медь, хром, висмут, бор). Таким материалам свойственен высокий градиент падения напряжения в дуге, что позволяет исключить сваривание контактов при их работе. Контактдержатель 4 подвижного контакта выведен из камеры через стальной сиффон 5, а контактодержатель 11 неподвижного контакта закреплен на фланце 13. Для защиты внутренних изоляционных поверхностей камеры от частиц распыленного металла контакты окружены защитными экранами 2, 7, 8 и

Возникающая дуга быстро вытесняется на боковые поверхности контактов. Специальная форма контактов позволяет избежать повреждения контактных поверхностей и ускоряет гашение дуги.

Вакуумные выключатели имеют весьма высокую износостойкость: без обслуживания число размыканий контактов при номинальном токе достигает 10—20 тыс. (у выключателей с воздушным гашением дуги этот показатель составляет 1000—2500).

Для *оперативных отключений* цепей тяговых электродвигателей электровозов переменного тока в режимах тяги и электрического торможения используется выключатель *быстродействующий* ВБ-021. Принцип его действия аналогичен примененному в быстродействующем выключателе БВП-5 (см. п. 10.2.2), что обеспечивает быстродействие и высокую степень защиты от токов короткого замыкания.

10.2.2. Быстродействующие выключатели

По принципу действия быстродействующие выключатели, применяемые на электровозах постоянного тока, являются контакторами [28]. Для повышения скорости размыкания контактов магнитодвижущая сила удерживающей катушки создается минимально возможной, обеспечивающей только удержание якоря. Поэтому удерживающая катушка самостоятельно не может притянуть якорь, и включение быстродействующего выключателя осуществляется с помощью пневматического привода, управляемого электромагнитным вентилем. Замыкание контактов выключателя осуществляется после выключения пневмопривода, когда его толкатель отойдет от контактодержателя.

Такой способ включения позволяет снизить массу подвижных частей и обеспечивает возможность выключения быстродействующего выключателя при повторных коротких замыканиях без помех со стороны включающего привода.

На электровозах постоянного тока ВЛ10, ВЛ10М, ВЛ11 и ВЛ15 применяется быстродействующий выключатель типа БВП-5-02 (табл. 10.3, рис. 10.8).

В силовую цепь выключателя входят: дугогасительная катушка 1, главные линейные контакты 2 (неподвижный) и 3 (подвижный). Контакт 3 укреплен на контактодержателе 4, который для облегчения выполняют из дюралюминиевых пластин. После гибкого шун-

Таблица 10.3

Технические характеристики быстродействующего выключателя типа БВП-5-02

Параметр	Значение
Ток номинальный, А	1850
Напряжение номинальное, В	3000
Предельный отключаемый ток, А	20 000
Ток уставки на отключение, А	2500^{+100}_{-200}
Номинальное давление в цилиндре пневмопривода, кПа (кгс/см)	500 (5,0)
Собственное время отключения, с	0,0015—0,003
Раствор главных контактов, мм	35—40
Нажатие главных контактов, Н, не менее	220
Масса, кг	228

та электрическая цепь разветвляется на включенные параллельно размагничивающую катушку 15 и индуктивный шунт 12 и, далее, на силовую цепь электровоза. Индуктивный шунт увеличивает быстродействие выключателя по мере увеличения скорости нарастания тока за счет снижения динамической уставки, т.е. делает его работу селективной, зависящей от скорости нарастания тока силовой цепи.

Магнитная система быстродействующего выключателя состоит из якоря 14, закрепленного на рычаге 13 и сердечника электромагнита 16. Электромагнитный вентиль 6 управления пневматическим приводом 8 и удерживающая катушка 17 получают питание от цепей управления электровоза.

В выключенном состоянии (положение I) пружина 5 оттягивает контактодержатель с контактом 3 от неподвижного контакта 2. При этом контактодержатель и рычаг 13 смещают якорь 14 на предельное расстояние от сердечника электромагнита 16.

При включении быстродействующего выключателя происходит импульсное включение вентиля 6, в результате чего привод 8, преодолевая сопротивление возвратной пружины 9, поворачивает рычаг 10 с роликом 7 относительно шарнира О₃. Ролик перемещает всю подвижную часть аппарата до тех пор, пока при включенной удерживающей катушке 17 якорь не притянется к сердечнику электромагнита 16 (положение II). Однако контакты 2 и 3 не замкнутся,

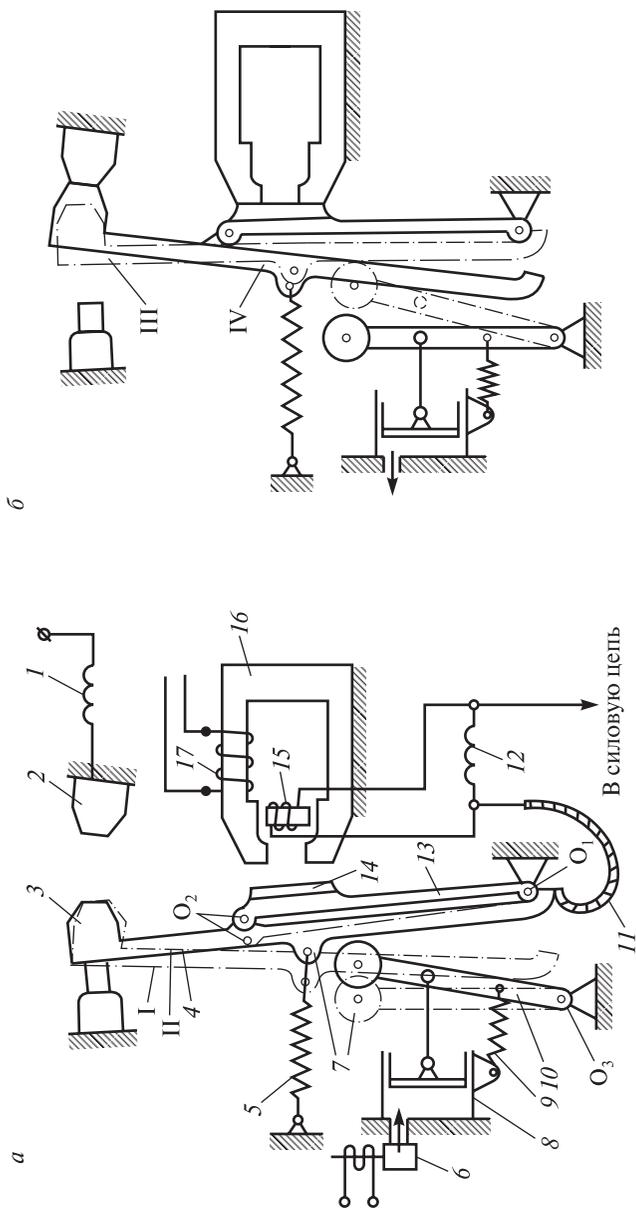


Рис. 10.8. Принципиальные схемы быстродействующего выключателя БВП-5А в выключенном (а) и включенном (б) состояниях:

1 — дугогасительная катушка; 2, 3 — неподвижный и подвижный главные контакты; 4 — контактодержатель; 5 — контактная пружина; 6 — электромагнитный вентиль; 7, 9, 10 — ролик, возвратная пружина и рычаг пневмопривода; 8 — цилиндр с поршнем пневмопривода; 11 — гибкий шунт; 12 — индуктивный шунт; 13 — рычаг; 14 — якорь; 15 — размагничивающая катушка; 16 — сердечник электромагнита; 17 — удерживающая катушка

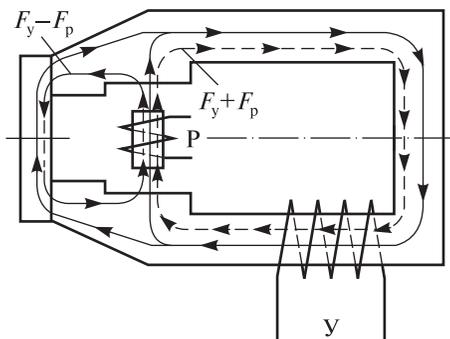


Рис. 10.9. Разветвленная электромагнитная цепь быстродействующего выключателя

аппарата (для его отключения при меньших значениях тока к.з.) магнитную систему делают разветвленной с двумя катушками: удерживающей У и размагничивающей Р, обтекаемой током силовой цепи (а, значит, в аварийных режимах — током к.з.) (рис. 10.9). Катушку Р располагают на перемычке магнитопровода. В той части магнитопровода, где расположена катушка У, магнитодвижущие силы двух катушек совпадают $F_y + F_p$, увеличивая магнитный поток. В части магнитопровода, обращенной к якору магнитодвижущие силы двух катушек направлены встречно $F_y - F_p$. При нормальном режиме работы магнитодвижущей силы катушки Р недостаточно, чтобы преодолеть магнитодвижущую силу катушки У и якорь 14 во включенном положении аппарата притягивается к сердечнику электромагнита 16. При к.з. в силовой цепи ток в катушке Р резко возрастает, а ее намагничивающая сила со стороны якоря быстро компенсирует намагничивающую силу катушки У, якорь оттягивается пружиной 5 и размыкает главные контакты аппарата.

На электровах постоянного тока ВЛ10, ВЛ11 и ВЛ15 применяется быстродействующий выключатель типа БВП-5. Работа быстродействующего выключателя и характеристики отключения к.з. в значительной мере определяются дугогасительной системой. Дугогасительная камера выключателя БВП-5 выполнена по лабиринтному типу (рис. 10.10). Камера имеет асбестоцементные стенки с клееными в них перегородками. В ней же установлена

пока не выключится пневмопривод. Когда клапан 6 обесточится, поршень пневмопривода вернет рычаг 10 в исходное состояние, а пружина 5 повернет контактодержатель 4 относительно точки O_2 .

Такой способ включения позволяет снизить массу подвижных частей аппарата, что важно для повышения его быстродействия. Однако для повышения чувствительности

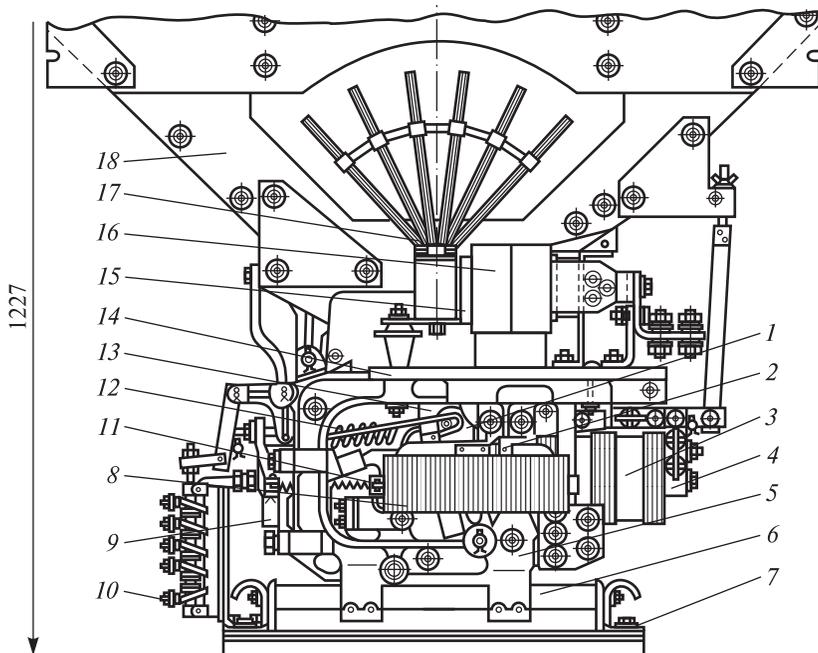


Рис. 10.10. Быстродействующий выключатель типа БВП-5-02:

1 — якорь; 2 — размагничивающий виток; 3 — удерживающая катушка; 4 — электромагнит; 5 — рама; 6 — изолированные стержни; 7 — угольники основания; 8 — индуктивный шунт; 9 — пневмопривод; 10 — вспомогательные контакты; 11 — пружина привода; 12 — контактная пружина; 13 — контактодержатель; 14 — основание дугогасительной системы; 15 — П-образный магнитопровод; 16 — катушка дугогашения; 17 — веерообразные полюса, создающие магнитное поле в зоне горения; 18 — дугогасительная камера

дугогасительная решетка. Дугогасительная решетка представляет собой набор металлических пластин, расположенных радиально в зоне дугогашения, и изолированных одна от другой. Достигнув этих пластин, дуга разбивается между ними на отдельные, включенные последовательно дуги. При этом резко возрастает общее падение напряжения на дуге и создает условия к ее гашению.

Дуга растягивается за счет действия магнитного поля и конструкции дугогасительной камеры, а при растяжении и соприкосновении с холодными стенками камеры гаснет.

10.3. Разрядники и ограничители перенапряжения

Перенапряжения представляют большую опасность для электрооборудования электровоза, так как могут вызвать пробой изоляции.

Различают перенапряжения коммутационные и атмосферные. Коммутационные перенапряжения возникают при замыкании и размыкании цепей под нагрузкой. Особенно большие перенапряжения возникают при грозовых разрядах вблизи контактного провода или при прямых ударах молнии в контактную сеть, когда в ней образуются волны перенапряжений. Релейная защита при столь быстро изменяющихся процессах не успевает сработать. Поэтому на электровозах, контактной сети и тяговых подстанциях устанавливают разрядники. Они первыми воспринимают перенапряжения и отводят их на землю.

Для защиты электрооборудования электровозов переменного тока от перенапряжений применяются разрядники РВМЭ-25, РВЭ-25М и ограничители перенапряжений ОПН-1,28 и ОПН-0,4.

Разрядник РВЭ-25М (см. рис. 10.11, табл. 10.4) состоит из нелинейного вилитового резистора 6 и многократных искровых промежутков 5, помещенных в герметизированный фарфоровый кожух 3. Многократный искровой промежуток разрядника составлен из последователь-

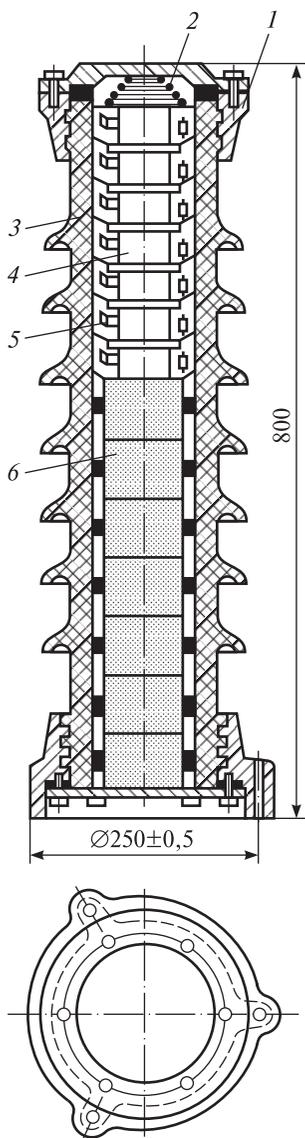


Рис. 10.11. Разрядник типа РВЭ-25М:
1 — верхний фланец; 2 — пружина; 3 — фарфоровый кожух; 4 — шунтирующий высокоомный резистор; 5 — комплект искровых промежутков; 6 — вилитовый резистор

Таблица 10.4.

Технические характеристики разрядников и ограничителя перенапряжений

Параметр	РВЭ-25М	РВЭ-25	РВ- МУ-3,3;	РВКУ-3,3	ОПН-1,28
Напряжение номинальное, В	25 000	25 000	3300	3300	1280
Наибольшее допустимое напряжение, В (действующее)	29 000	29 000	4200	4000	1560
Пробивное напряжение при частоте 50 Гц, В (действующее):					
не менее	58 000	48 000	9500	6000	—
не более	66 000	55 000	12 500	7100	—
Импульсное пробивное напряжение, В, не более	100 000	80 000	—	10 000	—
Остающееся напряжение при импульсном токе с длиной фронта волны 8 мкс и амплитуде:					
1,5/1 кА, В, не менее	—	70 000	—	—	3600*
15 кА, В, не более	—	—	—	8500	—
3 кА, В, не менее	88 000	—	12 000	10 000	—
5 кА, кВ, не более	94 000	—	—	—	—
Масса, кг	45	90	30	30	50

* При длине фронта волны 125 мкс.

но соединенных комплектов, каждый из которых содержит четыре единичных искровых промежутка. Единичный искровой промежуток образуется двумя тарельчатыми электродами, изолированными друг от друга миканитовыми прокладками в виде шайб. Для равномерного распределения напряжения между искровыми промежутками каждый комплект их шунтирован двумя высокоомными резисторами.

При повышении напряжения до заданного значения искровые промежутки пробиваются и вилитовый резистор подключается к защищаемой цепи. При этом через разрядник протекает импульсный ток. При увеличении приложенного к разряднику напряжения и протекающего через него тока сопротивление вилитового резистора резко уменьшается из-за нелинейности его характеристики. В результате перенапряжение не превышает допустимого для защищаемой цепи значения. После снижения напряжения до рабо-

чего уровня остаточный ток через разрядник составляет не более 80—100 А, что обеспечивает гашение дуги.

Разрядник РВМЭ-25 снабжен предохранительным устройством, предотвращающим взрыв фарфорового кожуха при повреждении искровых промежутков, и отличается от разрядника РВЭ-25М более совершенной конструкцией искровых промежутков и применением тервитовых нелинейных резисторов. Тервит состоит из электротехнического карборунда и связующего материала и обжигается при высоких температурах. Он имеет более высокую пропускную спо-

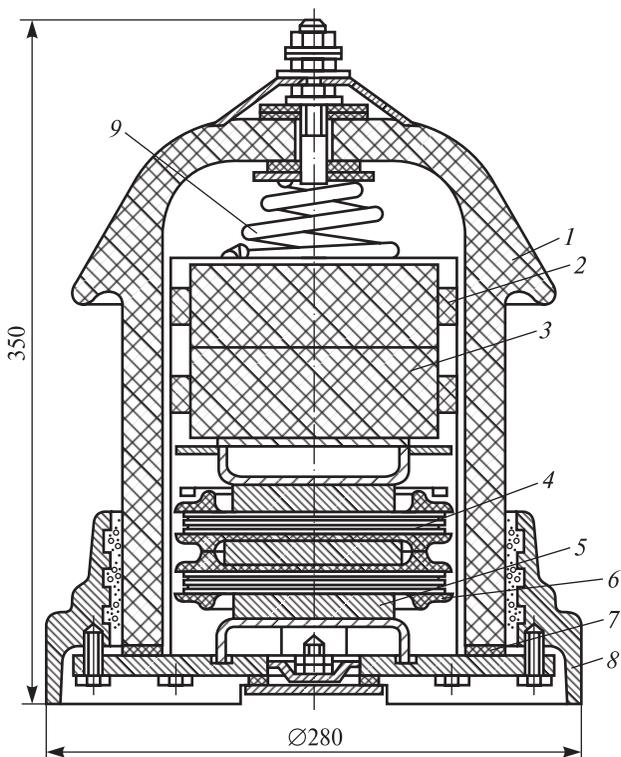


Рис. 10.12. Разрядник типа РВМУ-3,3:

1 — фарфоровый корпус; 2 — прокладки; 3 — резистор с нелинейным сопротивлением; 4 — комплект искровых промежутков; 5 — постоянный магнит системы дугогашения; 6 — высокоомный резистор; 7 — резиновая прокладка; 8 — основание; 9 — пружина

способность, чем вилит, но вентильные свойства тервита хуже, чем у вилита.

Ограничитель перенапряжений ОПН-1,28 подключается к вторичной обмотке тягового трансформатора (см. табл. 10.4). Он содержит нелинейные резисторы с высокой степенью нелинейности характеристики. Токи, протекающие по резисторам при рабочем напряжении, не превышают 1—2 мА, что исключает необходимость искровых промежутков. Резисторы изготовлены из керамики на основе окиси цинка, собраны между собой по последовательно-параллельной схеме и помещены в фарфоровый герметизированный корпус. Ограничитель снабжен предохранительным клапаном, предотвращающим разрушение корпуса в аварийных режимах.

На электровозах постоянного тока используется магнитный вентильный униполярный разрядник РВМУ-3,3 и разрядник РВКУ-3,3 (см. рис. 10.12, табл. 10.4).

10.4. Тяговый трансформатор

Тяговый трансформатор на электровозе выполняет следующие функции [29]:

- 1) снижает напряжение контактной сети до уровня питания ТЭД и другого электрооборудования;
- 2) регулирует выходное напряжение в заданных пределах;
- 3) осуществляет питание системы энергоснабжения пассажирских вагонов.

Режим работы тяговых трансформаторов зависит от условий работы электровоза и может осуществляться при напряжении на токоприемнике в пределах $(+0,15... - 0,25)U_{\text{ном}}$, что составляет 19—29 кВ (ГОСТ 6962—75). К ним предъявляются требования максимального использования активных материалов и высокой надежности работы, что исключает дополнительные профилактические ремонты между периодическими ремонтами. Тяговые трансформаторы электровозов отличаются от обычных трансформаторов очень широким диапазоном регулирования выходного напряжения.

Основными параметрами, характеризующими тяговые трансформаторы, являются коэффициент трансформации, типовая мощность и КПД. Коэффициент трансформации определяется как отношение напряжений первичной U_1 и вторичной U_2 обмоток (или чисел витков первичной w_1 и вторичной обмоток w_2)

$$k_T = U_1 / U_2 = w_1 / w_2.$$

Подводимая к трансформатору энергия $P_1 dt$ преобразуется в энергию $P_2 dt$, где P_1 — мощность, потребляемая первичной обмоткой; P_2 — мощность на вторичной обмотке. Разница этих энергий $(P_1 - P_2) dt$ рассеивается в трансформаторе в виде тепла. Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = P_2 / P_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 / U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

где I_1, I_2 — токи первичной и вторичной обмоток;
 $\cos \varphi_1, \cos \varphi_2$ — коэффициенты мощностей цепей обмоток.

Типовая или расчетная мощность трансформатора определяется как полусумма произведений напряжений холостого хода всех его обмоток на номинальные значения токов этих обмоток.

Конструкция тягового трансформатора зависит от способа регулирования напряжения на электровозе. Наибольшее распространение получил метод низковольтного регулирования напряжения путем изменения числа витков вторичной обмотки w_2 . В таких системах тяговый трансформатор имеет двухстержневую конструкцию. При высоковольтном регулировании напряжения применяется трехстержневой тяговый трансформатор, на одном из стержней которого расположен автотрансформатор, получающий питание от контактного провода. В таких системах обмотка высокого напряжения питается от автотрансформатора.

Разные типы трансформаторов имеют разные электрические схемы: во многом схема соединения обмоток низкого напряжения определяется системой его выпрямления. Однако общие принципы построения электрических схем тяговых трансформаторов при низковольтном регулировании сохраняются.

Так у тягового трансформатора ОДЦЭ-5000/25 (О — однофазный; ДЦ — принудительная система охлаждения; Э — исполнение для электроподвижного состава; 5000 — типовая мощность, кВ·А; 25 — номинальное напряжение, кВ; обмотка низкого напряжения НН (тяговая) разделяется на две части: нерегулируемая (основная обмотка) НН_о и регулировочная (регулируемая обмотка) НН_р [30]. Со стороны низкого напряжения находится и обмотка собственных нужд СН. Контактными главного контроллера тяговые обмот-

ки соединяются в две группы (первая и вторая сеть) (рис. 10.13, табл. 10.5) [31]. Каждая группа через выпрямительную установку подключается к двум тяговым двигателям.

Таблица 10.5

Параметры тяговых трансформаторов

Параметр	ОЦР-5600/25	ОДЦЭ-5600/25Б	ОДЦЭ-5000/25АМ	ОНД-ЦЭ-10000/25-82
Серия электроваза	ВЛ60К	ВЛ80К(Т,С)	ВЛ80Р	ВЛ85
Номинальная мощность обмоток, кВ·А:				
сетевой	5862	4485	4777	7040
тяговой	5562	4260	4305	6426
возбуждения	—	—	259	351
собственных нужд	300	225	213	263
Номинальное напряжение (холостого хода) обмоток, В:				
сетевой	25 000	2500	2500	2500
тяговой	2060×2	1218×2	1230×2	1260×3
возбуждения	—	—	180×2	270×2
собственных нужд	210, 399, 630	232, 406, 638	231, 410, 641	225, 405, 630
Номинальная частота, Гц	50	50	50	50
Номинальный ток (продолжительный) обмоток, А:				
сетевой	235	179,4	191	281,6
тяговой	2700	2×1750	2×1750	3×1700
возбуждения	—	—	720	650
собственных нужд	752	550	520	650
Выпрямленное напряжение, В	1650	950	950	980
Часовой выпрямленный ток, А	2800	2×1840	2×1950	—
Коэффициент трансформации обмоток:				
сетевая-тяговая	12,136	20,525	20,325	19,841
сетевая-собственных нужд	39, 683	39,185	39,002	39,683
сетевая-возбуждения	—	—	69,444	46,296

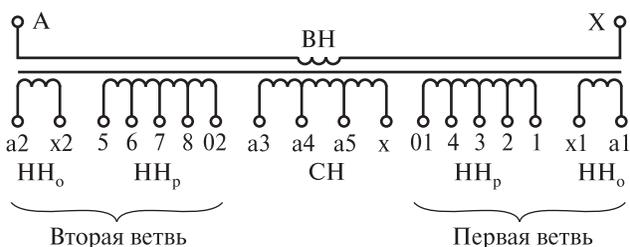


Рис. 10.13. Принципиальная схема обмоток тягового трансформатора ОДЦЭ-5000/25Б

Обмотки выполняют в виде трех концентрических катушек с каналами в осевом и радиальном направлениях для обеспечения требуемых изоляционных расстояний между витками и циркуляции охлаждающего масла. Ближней к сердечнику располагают обмотку низкого напряжения $НН_0$. Затем располагают обмотку высокого напряжения $ВН$ (сетевую) и снаружи — регулируемую обмотку низкого напряжения $НН_r$. Обмотка $СН$ состоит из нескольких катушек, размещенных во внешнем блоке катушек каждого стержня.

Регулируемая обмотка $НН_r$ разделяется на несколько ступеней с равным числом витков и может соединяться последовательно согласо или встречно с обмоткой $НН_0$. Наибольшее напряжение на обмотке $НН$ получается при согласном включении обмоток $НН_0$ и $НН_r$ (соединяются выводы $x1-1$). По мере выключения секций обмотки $НН_r$ напряжение на обмотке $НН$ снижается, а при полном ее выключении напряжение остается только на зажимах $a1-x1$. Дальнейшее снижение напряжения достигают встречным включением обмотки $НН_0$ и ступеней обмотки $НН_r$. Обычно число витков обмотки $НН_0$ несколько больше, чем у обмотки $НН_r$. Поэтому при их встречном включении напряжение на обмотке $НН$ составляет 40—70 В, что соответствует первой ступени регулирования напряжения.

Конструктивно трансформатор состоит из двухстержневого магнитопровода, обмоток, бака и системы охлаждения (рис. 10.14). Стержни магнитопровода выполнены из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм. Они соединяются верхним ярмом и нижним ярмом, образуя замкнутый магнитопровод. Оба ярма имеют балочную конструкцию; нижняя балка используется как камера для циркуляции масла.

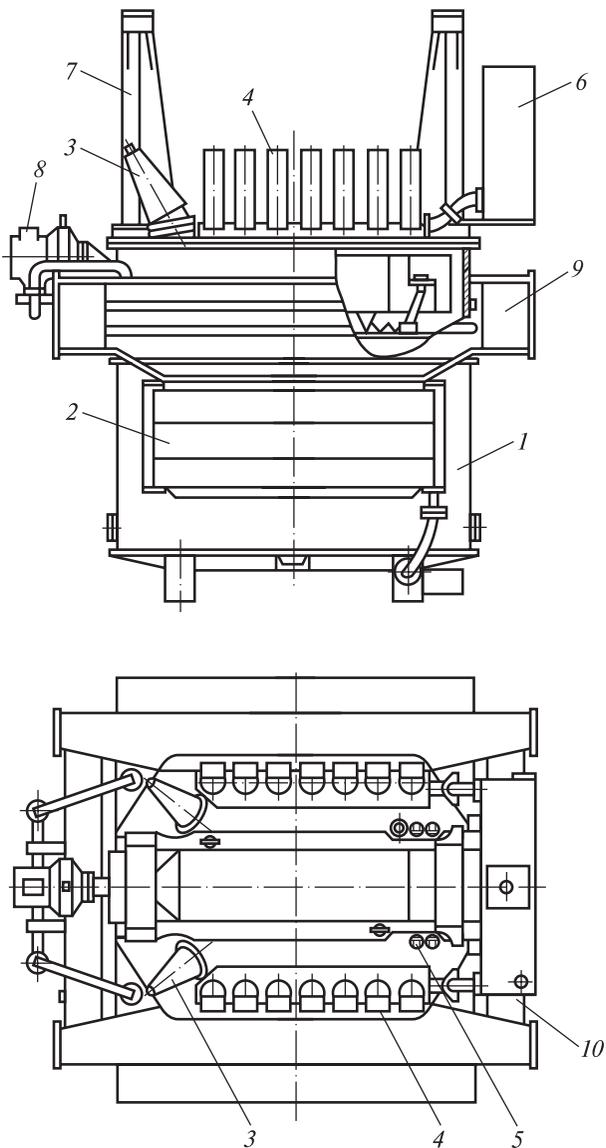


Рис. 10.14. Тяговый трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б:

1 — бак трансформатора; 2 — радиатор; 3 — вывод обмотки высокого напряжения; 4 — вывод обмотки низкого напряжения; 5 — вывод обмотки собственных нужд; 6 — расширитель; 7 — стойка для установки группового переключателя ступеней; 8 — насос; 9 — воздуховод; 10 — опорная балка

Обмотки каждого стержня закреплены на трех изоляционных цилиндрах. Обмотки, расположенные на одном сердечнике, аналогичны обмоткам другого сердечника и отличаются только обозначением выводов и направлением намотки (например, a_1-x_1 на одном сердечнике, а a_2-x_2 — на другом (см. рис. 10.13)).

Для защиты от механических повреждений активная часть трансформатора располагается в стальном восьмигранном баке *1* с трансформаторным маслом, которое обеспечивает изоляцию и охлаждение обмоток. Закрепляется активная часть с помощью шпилек в нижней части бака. На крыше бака установлены два вывода *3* сетевой обмотки, четырнадцать выводов *4* тяговой обмотки и четыре вывода *5* обмотки собственных нужд. Две балки-камеры *9* приварены к стенкам бака и используются как воздухопроводы системы охлаждения и одновременно с опорными балками *10* используются как элементы рамной подвески трансформатора. На опорной балке находится клемма для его заземления.

Охлаждение трансформатора принудительное масляно-воздушное. С помощью центробежного насоса *8* горячее масло прокачивается через радиатор *2*. В качестве привода насоса используется асинхронный двигатель. На крыше бака размещен расширитель *б* для компенсации температурных колебаний уровня масла в баке.

Трансформатор совместно с установленным на нем дополнительным электрооборудованием (переходной реактор, групповой переключатель и др.) является блоком электровоза, расположенным в высоковольтной камере на резиновых амортизаторах.

На электровозах постоянного тока для регулирования напряжения на ТЭД в заданных пределах применяются пусковые резисторы, включаемые в их силовую цепь. Эти резисторы выполняются на круглых фехралевых элементах типа КФ с естественным охлаждением.

10.5. Главный контроллер

Главный контроллер на электровозах переменного тока используется для переключения под нагрузкой секций вторичной регулируемой обмотки тягового трансформатора и изменения напряжения в цепи тяговых двигателей.

Контроллер ЭКГ-8Ж применяется на электровозах серии ВЛ80С и состоит из двух механически связанных между собой групповых

переключателей — переключателя секций и переключателя обмоток, выполняющего их встречное или согласное включение (рис. 10.15, табл. 10.6) [30].

Он имеет четыре кулачковых контактора с дугогашением 3, тридцать кулачковых контакторов без дугогашения 2, кулачковые валы, электропривод 4, электромагнитные вентили и блокировочные устройства 5. Все узлы контроллера монтируются на каркасе 1, состоящем из трех рам и четырех изолированных реек.

Кулачковый контактор с дугогашением представляет собой отдельно собранный аппарат. Все детали контактора расположены между

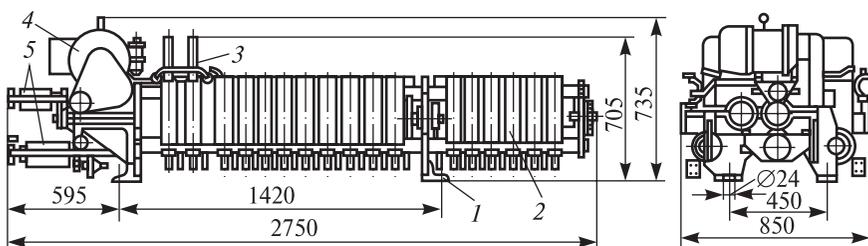


Рис. 10.15. Главный контроллер ЭКГ-8Ж:

1 — каркас; 2 — кулачковые контакторы без дугогашения; 3 — кулачковые контакторы с дугогашением; 4 — электродвигатель; 5 — контакторные элементы блокировочного устройства

Таблица 10.6

Технические характеристики контроллера ЭКГ-8Ж

Параметр	Значение
Номинальное напряжение кулачковых контакторов, В	3100
Номинальное напряжение для цепи контактов: с дугогашением	260
без дугогашения	1100
Номинальный ток кулачковых контакторов, А	1300
Число фиксированных позиций	33
Собственное время переключения с нулевой позиции до 33-й и с 33-й до нулевой при напряжении на двигателе 50 В, с, не более	25
Номинальное напряжение блок-контакторов, В	50
Номинальный ток блок-контакторов, А	10

изоляционными пластинами. На контактодержателе расположены напайка главного контакта, разрывной контакт и дугогасительная катушка. Разрывной контакт соединен с главным контактом гибким шунтом и вращается на оси независимо от главного контакта.

Кинематическая схема контактора обеспечивает состояние, при котором в замкнутом положении главные и разрывные контакты включены параллельно, а основной силовой ток проходит по главным контактам. При отключении контактора сначала разрываются главные контакты и ток вытесняется в разрывные контакты. Затем цепь тока размыкается разрывными контактами, расположенными в зоне магнитного поля дугогасительной катушки. При включении контактора сначала замыкаются разрывные контакты, а затем главные; таким образом, замыкание и размыкание главных контактов происходит без тока.

Дугогасительная камера снабжена деионной решеткой из медных и стальных пластин. Дуга, возникающая на разрывных контактах, выдувается в камеру полем дугогасительной катушки и сжатым воздухом. Управление подачей сжатого воздуха осуществляется электромагнитными вентилями.

Для повышения устойчивости контакта контактор имеет электромагнитный компенсатор. Якорь компенсатора укреплен на держателе неподвижного контакта; ярмо — на рычаге разрывного контакта. При протекании тока по контактному рычагу в якоре и ярме компенсатора образуется магнитный поток и создается дополнительное нажатие на главных и разрывных контактах.

Кулачковый контактор без дугогашения имеет только главные контакты и предназначен для разрыва электрической цепи без тока. От контактора с дугогашением он отличается тем, что не имеет разрывных контактов и дугогасительной камеры.

Контактные напайки выполнены из металлокерамических композиций.

Кинематическая схема главного контроллера приведена на рис. 10.16. Вращение от электродвигателя *15* через муфту *1* передается червяку *13*. При этом двигатель, установленный на редукторе, вращает шестерню муфты через промежуточное зубчатое колесо, которое расположено на валу ручного привода. От червячного колеса вращение передается по двум направлениям:

ное колесо должно повернуться на 540° . При повороте червячного колеса на первые 180° вал 9 поворачивается на 30° и размыкает соответствующий главный контакт контактора с дугогашением, разрывая силовую цепь электровоза. При повороте червячного колеса на вторые 180° поворачиваются валы 8 и 6, переключая ступень или обмотки трансформатора. При повороте червячного колеса на третьи 180° происходит включение ранее выключенного контактора с дугогашением, расположенного на валу 9.

От вала червячного колеса через наружную зубчатую передачу приводится во вращение вал вспомогательных контактов 2.

Блокировочный вал 11 приводится во вращение валом контакторов 8, с которым связан сельсин-датчик 12 указателя позиций, предназначенный для передачи информации о позиции главного контроллера в кабину машиниста. Остановка контроллера на выбранной позиции осуществляется приводным двигателем 15, который из двигательного режима переходит в тормозной режим.

Блокировочные устройства контроллера представляют собой групповые многопозиционные переключатели с кулачковыми контакторами цепей управления.

10.6. Реакторы и индуктивные шунты

Электрическим реактором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для использования в качестве индуктивности в электрической цепи. На электровозах применяются переходные и сглаживающие реакторы.

Переходные реакторы применяют на электровозах переменного тока для ограничения тока в секции тягового трансформатора в процессе ее шунтирования при регулировании напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Реакторы выполняют как с магнитопроводами, так и без них. В переходном реакторе с магнитопроводом из-за нелинейности характеристики намагничивания амплитуда суммарного тока, обусловленная насыщением магнитной цепи, достигает больших значений. По этой причине, а также с целью снижения массы реакторов, на электровозах в основном применяют переходные реакторы без магнитопроводов, имеющие линейную характеристику намагничивания. Индуктивность такого реактора зависит только от геометрических размеров и конструкции обмотки.

Широко используемые реакторы типа ПРА собираются из двух самостоятельных реакторов с четырьмя катушками (см. рис. 10.17, табл. 10.7). Каждый реактор включается в одно из плеч трансформатора и работает независимо от другого. Реакторы размещены один над другим, чем достигается оптимальное использование габаритов и их взаимной индуктивности.

Таблица 10.7

Технические характеристики переходных реакторов

Параметр	ПРА-1М, ПРА2	ПРА-3А	ПРА-48
Напряжение номинальное, В: относительно корпуса между выводами	1500 252	1500 146	1500 146
Ток ветви, А часовой длительный	1100 1000	1350 1270	1350 1270
Число витков обмотки	44	32	27
Сечение обмоточного провода, мм	6×60	8×60	8×60
Индуктивное сопротивление обмотки, Ом	0,26	0,12	0,12
Испытательное напряжение частоты 50 Гц в течение 1 мин, В	15 000	15 000	15 000
Масса, кг	580	572	450
Серия электровоза	ВЛ60К	ВЛ80К	ВЛ80Т, ВЛ80Р

Каждая катушка 2 реактора намотана плашмя в один слой двумя параллельными алюминиевыми шинами и имеет 11 витков у реакторов ПРА-1М, ПРА2, 8 витков — у ПРА-3А, 6,75 витка — у ПРА-48. Между параллельными шинами предусмотрены зазоры 3 мм, а между витками — 8 мм. Каждая катушка в радиальном направлении скреплена восемью бандажами из стеклоленты, а в осевом — шпильками 3. Катушки реактора между собой соединены последовательно и находятся друг от друга на расстоянии 24 мм.

Для уменьшения нагрева от вихревых токов находящиеся вблизи от реактора стальные детали экранируются от магнитных полей рассеяния шихтованными магнитными шунтами 5, расположенными сверху и снизу реактора.

Расстояния от поверхности основания до шины нижней катушки реактора выдерживаются с помощью гетинаксовых прокладок. Рас-

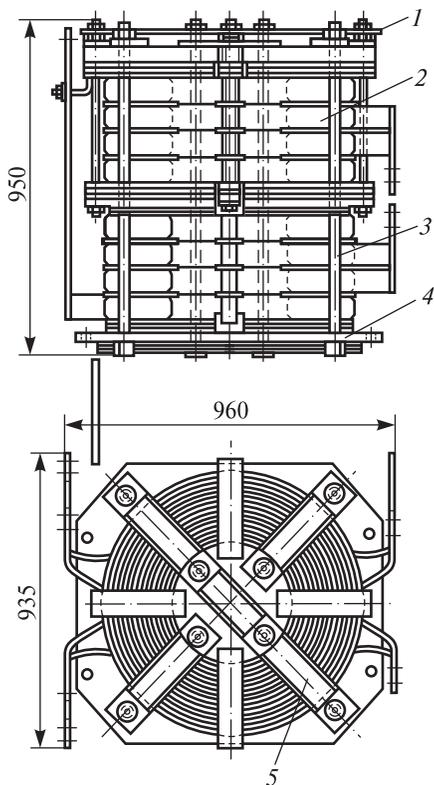


Рис. 10.17. Переходной реактор типа ПРА-48:

1 — лист защитный; 2 — катушка;
3 — шпильки; 4 — основание; 5 — экранирующий пакет

стояния между реакторами, реактором и крышкой трансформатора выбираются из условий необходимой теплоотдачи и электрической изоляции.

Сглаживающие реакторы используются на электровозах переменного тока для уменьшения пульсации тока в цепи якоря тягового электродвигателя. Они включаются в цепь выпрямленного тока.

Для улучшения коммутации на коллекторе тягового электродвигателя при его работе желательно во всем диапазоне изменения нагрузок поддерживать постоянным относительный уровень пульсаций тока

$$k_{\text{пИ}} = \frac{\Delta i_{\text{в}}}{I_{\text{тэд}}} = \text{const.} \quad (10.1)$$

В общем случае изменение во времени пульсирующего выпрямленного тока определяется как:

$$\Delta i_{\text{в}} = \frac{k_{\text{пИ}} U_{\text{ср}}}{\omega L_{\text{в}}},$$

где $k_{\text{пИ}}$ — коэффициент пульсации, зависящий от формы выпрямленного напряжения; для однофазного синусоидального напряжения $k_{\text{пИ}} = 0,66$;

$U_{\text{ср}}$ — постоянная составляющая пульсирующего напряжения;

ω — угловая частота напряжения питающей сети;

$L_{\text{в}}$ — суммарная индуктивность обмоток тягового электродвигателя и сглаживающих реакторов.

Из формулы следует, что с увеличением индуктивности пульсация выпрямленного тока уменьшается. Однако собственная индук-

тивность тягового электродвигателя недостаточна для сглаживания тока в необходимых пределах. Поэтому для уменьшения пульсации последовательно в цепь электродвигателя включают добавочное индуктивное сопротивление в виде сглаживающего реактора.

Для получения необходимого значения k_{Π} индуктивность реактора на один тяговый двигатель должна составлять [28]

$$L_{\text{р}} \cong \frac{k_{\Pi} I \omega_{\text{п}}}{k_{\Pi U} U_{\text{д0}}} - L_{\text{тэд}},$$

где $k_{\Pi U}$ — коэффициент пульсаций напряжения;

$U_{\text{д0}}$ — выпрямленное напряжение в режиме холостого хода;

$\omega_{\text{п}}$ — угловая частота основной гармоники тока;

$L_{\text{тэд}}$ — индуктивность тягового двигателя.

Если для каждой ступени регулирования напряжения $k_{\Pi I} \cong \text{const}$, то зависимость $L_{\text{р}} = f(I)$ имеет характер гиперболы; как известно, динамическая индуктивность определяется как $L = w(d\Phi / dI)$.

Одновременно с этим для выполнения (10.1) сглаживающий реактор должен обеспечивать изменение индуктивности цепи выпрямленного тока в зависимости от нагрузки. С некоторым приближением такую характеристику имеют реакторы со стальным сердечником, так как их индуктивность зависит от тока обмоток: индуктивность обмоток изменяется прямо пропорционально магнитной проницаемости, которая снижается с возрастанием тока обмоток. Поэтому при уменьшении тока в обмотке реактора его индуктивность будет увеличиваться, что и используется для сглаживания пульсации выпрямленного тока.

Сглаживающие реакторы могут иметь как замкнутую, так и разомкнутую магнитные системы (рис. 10.18).

Обмотка I реакторов РС-53, РС-78 изготавливается из медной шины 4×65 мм, намотанной на ребро с зазором между витками 4 мм (см. табл. 10.8). Магнитопровод 4 шихтуется из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм и изолируется стеклопластиком толщиной 7 мм. Обмотка вместе с магнитопроводом опрессовывается в осевом направлении и подвергается вакуум — нагнетательной пропиткой в лаке ПЭ-933Л с последующим запеканием. Сглаживающие реакторы имеют принудительное воздушное охлаждение.

К одному реактору подключаются, как правило, цепи двух тяговых электродвигателей.

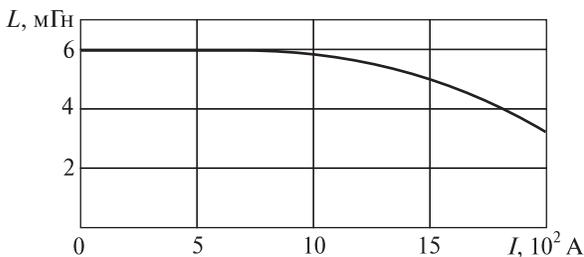
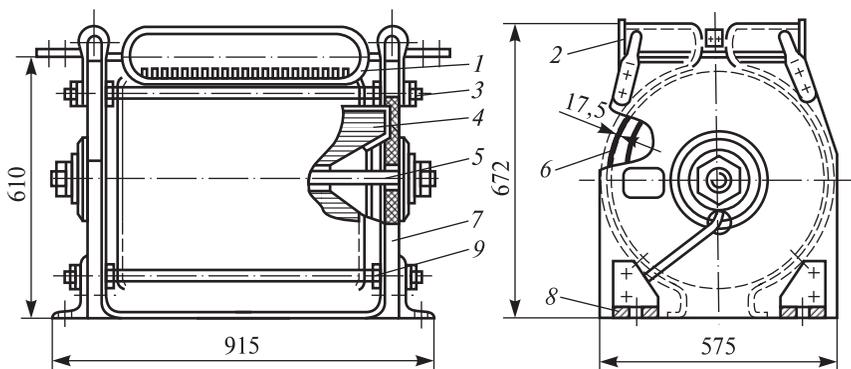


Рис. 10.18. Сглаживающий реактор типа РС-53 (а) и его характеристика (б):
 1 — обмотка; 2, 6 — кожухи; 3, 5, 9 — стяжные шпильки; 4 — магнитопровод;
 7 — боковины; 8 — установочные угольники

Таблица 10.8

Технические характеристики сглаживающих реакторов электровозов

Параметр	РС-53	РС-78
Серия электровоза	ВЛ80С	ВЛ85
Напряжение между выводами номинальное, В	1500	1500
Пульсирующий ток обмотки, А:		
номинальный	1700	1700
часовой	1850	1850
Коэффициент пульсации при токе 1850 А, %	26	26
Индуктивность:		
начальная, мГн	6,0	6,0
при токе 1850 А, мГн	4,0	4,0
Расход воздуха, м ³ /мин	65	45
Сопротивление обмоток постоянному току, Ом	0,00626	0,00626
Масса, кг	800	800

Сглаживающий реактор СР-800 устанавливается на моторных вагонах электропоездов ЭР9М. Реактор представляет собой катушку из 168 витков, намотанную медной шиной 3,05×10 мм, которая заключена в сердечник броневое типа. Сердечник набирается из пластин трансформаторной стали толщиной 0,35 мм. Реактор рассчитан на номинальное напряжение 2200 В, постоянный ток продолжительного режима 400 А. Индуктивность реактора при подмагничивании постоянным током 250 А составляет 20 мГн, а постоянным током 530 А — 10 мГн. Вес реактора — 966 кг.

Индуктивные шунты. На переходных режимах ослабления возбуждения тяговых двигателей в момент включения контакторов возникает бросок тока, который должен быть ограничен значением [28]

$$I_{\max} \leq (1,1 \div 1,2) k_{\text{пер}} I_{\text{тэд}}^{\text{НОМ}}, \quad (10.2)$$

где $I_{\text{тэд}}^{\text{НОМ}}$ — номинальный ток двигателя;

$k_{\text{пер}} \geq 2$ — коэффициент его конструктивной перегрузки.

Для ограничения чрезмерного вытеснения тока в цепь резистора, шунтирующую обмотку возбуждения ТЭД, последовательно с резистором включают индуктивный шунт, индуктивное сопротивление которого соизмеримо с индуктивным сопротивлением обмотки возбуждения двигателя (см. рис. 2.2).

Условие (10.2) выполняется при значении индуктивности шунта

$$L_{\text{ш}} = knL_{\text{в}},$$

где $L_{\text{в}}$ — индуктивность обмотки возбуждения двигателя;

n — число последовательно включенных шунтируемых обмоток возбуждения;

$k = 0,6-0,7$ — для электровозов и $k = 0,6-0,8$ — для электропоездов.

На электровозах переменного тока условия работы электродвигателя осложняются протеканием переменной составляющей постоянного пульсирующего тока про его цепи. Переменная составляющая тока распределяется обратно пропорционально индуктивностям параллельных цепей, а постоянная составляющая — обратно про-

порционально активному сопротивлению. При включении ослабления возбуждения почти вся переменная составляющая тока тяговых электродвигателей проходит через резистор, уменьшая возбуждение, а постоянная составляющая распределяется в соответствии с отношением сопротивлений резистора и обмотки возбуждения. Таким образом, при отсутствии индуктивности, включенной последовательно с резистором ослабления возбуждения, нарастающий ток пойдет преимущественно через шунтирующий резистор, что вызовет дополнительное ослабление магнитного потока тяговых электродвигателей, возрастание тока якоря, а в отдельных случаях — круговой огонь на коллекторе.

Обычно для индуктивных шунтов, включаемых в цепь шунтирующих резисторов, на электровозах переменного тока принимается

$$L_{\text{ш}} / L_{\text{в}} \geq 0,6.$$

Кроме того, индуктивные шунты необходимы для сохранения расчетного соотношения между магнитодвижущими силами обмоток возбуждения и якоря двигателя при переходных процессах. Кратковременно контактная сеть может быть отключена от тяговой подстанции; возможны также кратковременные отрывы токоприемника от контактного провода, после чего тяговые двигатели вновь включаются на полное напряжение. Ток в якорях двигателей при этом резко нарастает. Однако обмотки возбуждения двигателей обладают большим индуктивным сопротивлением, и поэтому большая часть тока идет через резистор, а меньшая — через обмотки возбуждения. Вследствие этого увеличение магнитного потока и ЭДС в обмотке якоря происходит со значительным запаздыванием относительно увеличения тока, поэтому под действием реакции якоря значительно искажается магнитное поле возбуждения двигателя. В результате возникнет искрение под щетками, которое может перейти в круговой огонь.

На электровозах постоянного тока ВЛ11 и ВЛ15 применяется индуктивный шунт ИШ-063. На электровозах переменного тока серий ВЛ80 и ВЛ85 установлен индуктивный шунт типа ИШ-95, позднее замененный шунтом ИШ-009 (рис. 10.19, табл. 10.9).

Технические характеристики индуктивных шунтов

Параметр	ИШ-95	ИШ-009	ИШ-063
Напряжение номинальное, В	2000	2000	3000
Ток номинальный, А	520	520	310
Номинальная индуктивность, мГн (на частоте 50 Гц): при токе 100 А при токе 300 А	2 —	2 —	— 16
Индуктивность насыщения, мГн (при токе 520 А)	1,5	1,5	4,5
Активное сопротивление, Ом	0,0051	0,0066	0,0236
Масса, кг	110	97	560

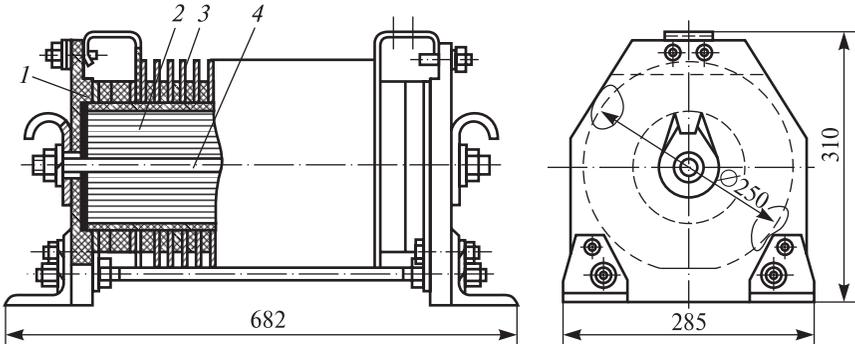


Рис. 10.19. Индуктивный шунт типа ИШ-95:

1 — боковина из гетинакса; 2 — шихтованный магнитопровод; 3 — катушка из медной ленты, намотанной на ребро; 4 — стяжная шпилька

10.7. Электропневматические контакторы

В электрических цепях электровоза используются контакторы с пневматическим или электромагнитным приводом. Электромагнитные контакторы используются в основном в цепях управления с напряжением 50 В и во вспомогательных цепях напряжением 380 В.

Электропневматические контакторы собираются из унифицированных узлов: на изоляционном стержне из профильного стеклопластика крепят кронштейны с неподвижными и подвижными

контактами. Контактторы имеют пневматический привод с электромагнитным вентилем. Ряд контакторов оборудованы системой дугогашения.

В зависимости от назначения электропневматические контакторы бывают различных исполнений:

линейные — для оперативных переключений в силовых цепях электровоза;

реостатные — для переключения ступеней пусковых или тормозных резисторов;

ослабления возбуждения — для переключения ступеней ослабления возбуждения тяговых двигателей.

Линейные контакторы, коммутирующие токи 1000 А и более, имеют главные и разрывные контакты. Главные контакты выполняют из композиции «серебро—окись кадмия», что дает возможность значительно увеличить их коммутационную износостойкость; разрывные контакты имеют напайки из композиции «медь—вольфрам».

На электровозах постоянного тока линейный контактор используется для сборки схемы соединений тяговых двигателей, а на электровозах переменного тока — для подключения цепей тяговых двигателей к выпрямителю.

Линейный контактор ПК-356 имеет главные контакты 12, 13, разрывные контакты 7, 8, пневматический привод 2, дугогасительную камеру 11 и вспомогательные контакты 1 (рис. 10.20, табл. 10.10). Все узлы аппарата смонтированы на изоляционном стержне 3.

Узел неподвижных контактов состоит из кронштейна 9, дугогасительной катушки 10, главного контакта 12 и разрывного кон-

Таблица 10.10

Технические характеристики электропневматических контакторов

Параметр	ПК-356	ПК-358	ПК-360
Напряжение номинальное, В	1500	3000	2000
Ток номинальный, А	1300	630	630
Номинальное напряжение управления, В	50	50	50
Номинальное давление сжатого воздуха в приводе, МПа	0,5	0,5	0,5
Масса, кг	26	12	24

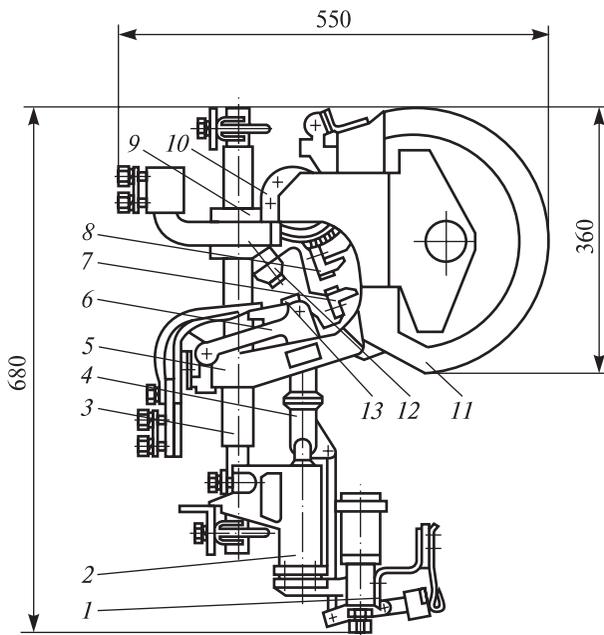


Рис. 10.20. Линейный электропневматический контактор типа ПК-356:
 1 — блок-контакты; 2 — пневмопривод с электромагнитным вентилем; 3 — стержень изоляционный (стеклопластик); 4 — тяга изоляционная; 5, 9 — кронштейны соответственно подвижного и неподвижного контактов (литье латунное); 6 — рычаг подвижного контакта (литье латунное); 7, 8 — разрывные контакты, соответственно подвижный и неподвижный; 10 — дугогасительная катушка; 11 — дугогасительная камера; 12, 13 — подвижный и неподвижный главные контакты

такта 8. На кронштейне 5 установлен рычаг 6, где расположены подвижные главный 13 и разрывной 7 контакты. Главные контакты рассчитаны на длительное протекание больших токов без коммутации (контакты размыкаются в обесточенном состоянии); разрывные коммутирующие контакты размыкаются при протекании по ним тока.

Рычаг 6 связан с пневмоприводом изоляционной тягой 4. Пневмопривод управляется электромагнитным вентилем. При подаче напряжения на катушку вентилia сжатый воздух поступает в цилиндр привода, поршень перемещает подвижную систему контактора.

Первым замыкается разрывной контакт, а затем главный. Отключение контактора происходит при снятии напряжения с катушки вентиля под действием пружины привода; при этом сначала размыкается главный контакт, а затем разрывной контакт.

Возникающая на разрывных контактах дуга под действием поля дугогасительной катушки перемещается в дугогасительную камеру и гаснет.

Реостатные контакторы ПК-360, предназначенные для переключения ступеней пусковых или тормозных резисторов, имеют дугогасительную камеру и одну пару главных контактов из профильной меди марки М1.

Контакторы ослабления возбуждения электродвигателей ПК-358 выполняются без дугогашения и имеют одну пару главных контактов из профильной меди.

Для дугогашения в контакторах типов ПК-356 и ПК-360 применяются одношелевые дугогасительные камеры из дугостойкого материала марки ПКО-1-3-11 (см. табл. 10.10).

10.8. Групповые коммутационные аппараты

10.8.1. Реверсивные и тормозные переключатели

Реверсивные и тормозные переключатели служат для дистанционного переключения обмоток возбуждения тяговых электродвигателей при изменении направления движения электровоза или переходе в тормозной режим. Реверсивные и тормозные переключатели выполняются из унифицированных узлов и различаются габаритами, числом кулачковых элементов и схемой включения. Все переключатели выполняются двухпозиционными с пневматическим приводом. Поскольку переключения в силовой схеме производятся при обесточенной цепи, дугогасительные устройства реверсивным и тормозным переключателям не требуются.

На электровозах серий ВЛ80 и ВЛ85 в качестве реверсивного и тормозного переключателей устанавливается групповой двухпозиционный кулачковый переключатель типа ПКД-142 (см. рис. 10.21, табл. 10.11) [30]. Он состоит из кулачковых элементов, кулачкового вала, пневматического привода, узла электрических блокировок и боковин. Включение и выключение кулачковых элементов производится кулачковыми шайбами.

Технические характеристики реверсивных и тормозных переключателей

Параметр	ПКД-142, ПКД-143, ПКД-001	ПКД-043	ПКД-047	ТК-042
Напряжение номинальное, В	850	500	500	500
Ток номинальный, А	50	50	50	50
Номинальное давление сжатого воздуха, кПа	500	500	500	500
Число кулачковых элементов*	4/4	4/4	2/2	10/10
Масса, кг	80	92	50	145

*В числителе количество размыкающих контактов, в знаменателе — замыкающих.

Кулачковый элемент *б* выполнен единым блоком с контактным механизмом *з* и имеет два положения. Он смонтирован между изоляционными стенками *1* переключателя. Контактный механизм *з* состоит из одной пары скользящих неразмыкаемых контактов, расположенных в шарнире (обеспечивают электрическую цепь при повороте вала) и двух пар размыкающих контактов. Скользящие контакты выполнены из композиции «серебро—графит», размыкающие — из композиции «серебро—окись кадмия».

Пневматический привод представляет собой цилиндр с двусторонним поршнем и двумя электромагнитными вентилями, управляющими приводом.

Узел электрической блокировки состоит из кулачковых контакторов закрытого исполнения, корпуса с кулачковой шайбой и валика. Контактор имеет два неподвижных контакта и подвижный контакт мостикового типа (см. п. 9.2). Контакты в исходном положении замкнуты. Валик узла блокировки связан с кулачковым валом переключателя зубчатой передачей. Для лучшей коммутационной способности в контакторе установлены постоянные магниты.

При подаче напряжения на обмотку одного из электромагнитных вентилях последний открывает доступ сжатого воздуха в левую или правую часть цилиндра пневмопривода *2*. Поступательное движение поршня пневмопривода через кривошипно-шатунный механизм преобразуется во вращательное движение кулачкового вала *з*. Вра-

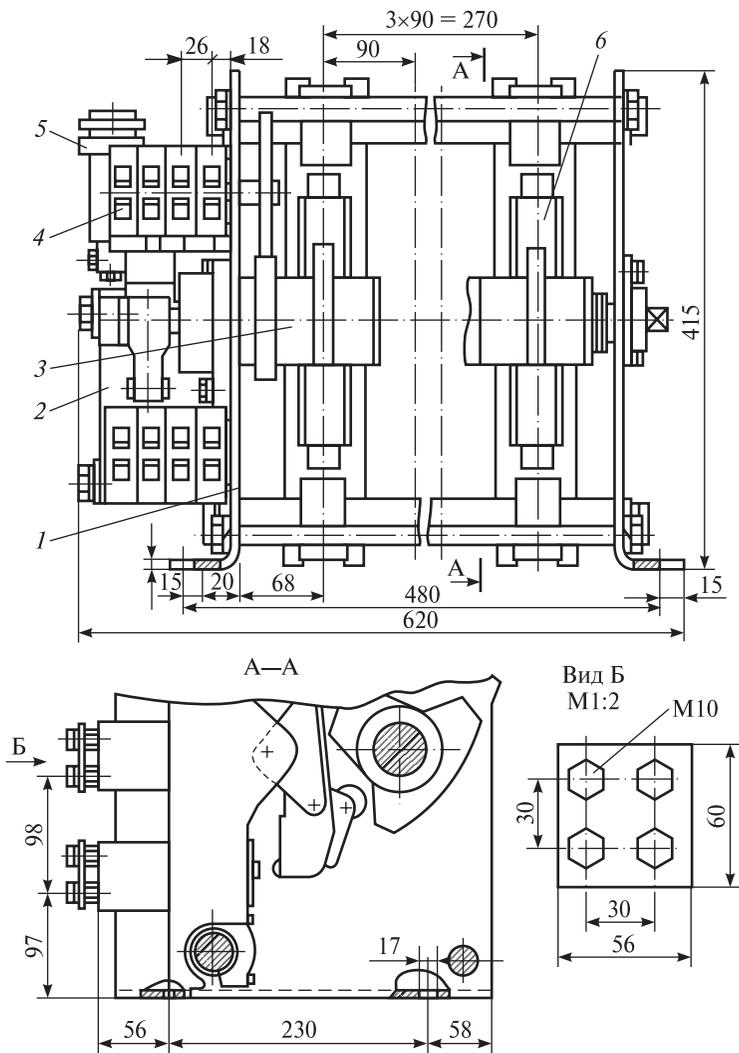


Рис. 10.21. Переключатель типа ПКД-142:

1 — боковина каркаса; 2 — пневматический привод; 3 — кулачковый вал; 4 — низковольтная блокировка; 5 — электромагнитный вентиль; 6 — кулачковый элемент

щательное движение кулачкового вала через зубчатую передачу передается на валик узла электрической блокировки, который своими кулачковыми шайбами переключает контакторы блокировки.

При подаче напряжения на обмотку одного из электромагнитных вентилях последний открывает доступ сжатого воздуха в левую или правую часть цилиндра пневмопривода 2. Поступательное движение поршня пневмопривода через кривошипно-шатунный механизм преобразуется во вращательное движение кулачкового вала 3. Вал, вращаясь в подшипниках, кулачковыми шайбами переключает кулачковые элементы б: вращательное движение кулачкового вала через зубчатую передачу передается на валик электрической блокировки, который своими кулачковыми шайбами переключает контакторы блокировки.

На электровозах серий ВЛ10, ВЛ11 установлены реверсивные переключатели типа ПКД-043.

Переключатели ПКД-047, ПКД-047-01 применяются для дистанционного отключения поврежденных ТЭД и переключения исправных по схеме аварийного режима (табл. 10.11).

Тормозной переключатель типа ТК-042 предназначен для переключения цепей ТЭД в режим рекуперативного торможения.

10.8.2. Переключатель кулачковый групповой

Переключатель кулачковый групповой предназначен для переключения тяговых электродвигателей постоянного тока с последовательно-параллельного на параллельное соединение на электровозах постоянного тока (ВЛ10 и др.).

Переключатель типа ПКГ-040 (рис. 10.22, табл. 10.12) состоит из закрепленных на сварном каркасе 3 контакторных элементов 1, кулачкового вала 4 с изоляционными шайбами, пневматического двухпозиционного привода 5 и барабана блока вспомогательных контактов 7.

Контакторные элементы имеют лабиринтно-щелевую дугогасительную камеру. Для предотвращения дуги между контакторными элементами установлены асбоцементные перегородки 2. Контакторные элементы переключаются кулачковыми шайбами вала 4. В цилиндре пневматического привода помещены два поршня, скрепленные между собой зубчатой рейкой, которая входит в зацепление с шестерней 6, насаженной на кулачковый вал. От воз-

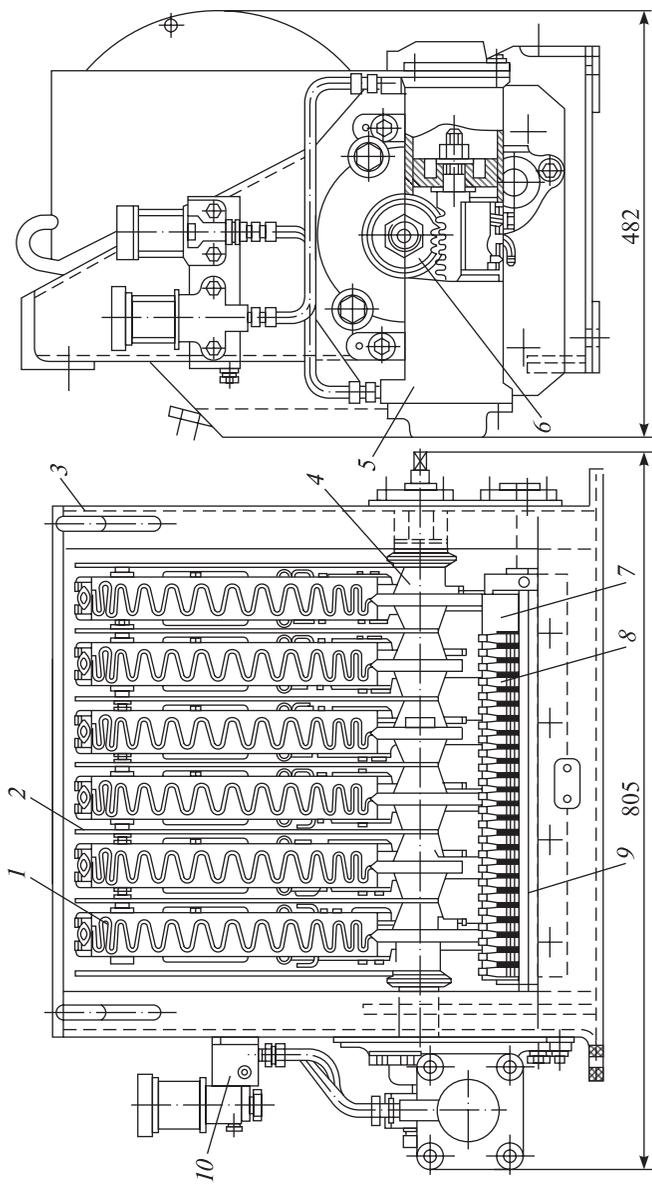


Рис. 10.22. Переключатель ПКГ-040:

1 — контакторный элемент; 2 — перегородка; 3 — каркас; 4 — кулачковый вал; 5 — пневматический привод; 6 — шестерня кулачкового вала; 7 — барабан блока блокировочных контактов; 8 — контактные пальцы; 9 — держатель пальцев; 10 — воздухораспределитель с электромагнитными вентилями

Технические характеристики переключателя ПКГ0-40

Параметр	Значение
Напряжение номинальное, В	3000
Ток контакторного элемента номинальный, А	500
Напряжение номинальное цепи управления, В	50
Ток вспомогательных контактов номинальный, А	5
Время поворота вала, с	1—2,5
Номинальное давление сжатого воздуха в пневматическом приводе, кПа (кгс/см ²)	500 (5,0)
Масса переключателя, кг	231

духораспределителя 10, состоящего из включающего и выключающего электромагнитных вентиляей, воздух поступает в правую или левую полость цилиндра, приводя в движение поршни и связанную с ними зубчатую рейку. Перемещение зубчатой рейки приводит во вращение кулачковый вал. Вращение кулачкового вала через зубчатую передачу передается барабану блока вспомогательных контактов. Последний замыкает соответствующие контактные пальцы 8, закрепленные на держателе 9.

10.9. Электромагнитные контакторы и реле

Электромагнитные контакторы на электровозе предназначены для коммутации вспомогательных цепей. На электровозах постоянного тока напряжение вспомогательных систем составляет 3 кВ; на электровозах переменного тока — 380 В. Поэтому электромагнитные контакторы рассчитаны на номинальное напряжение 3 кВ для электровозов постоянного тока, и 380 В — для электровозов переменного тока. Все контакторы имеют электромагнитный привод.

Привод контакторов рассчитан на напряжение 50 В, так как во время приведения электровоза в рабочее состояние цепи управления электровоза получают питание от аккумуляторной батареи; впоследствии источником для цепей управления является генератор управления, который включен параллельно аккумуляторной батарее.

Контакторы типов МК-310А и МК-310В используются для включения и отключения вспомогательного электрооборудования элек-

тровозов постоянного тока и имеют приблизительно одинаковое конструктивное исполнение (табл. 10.13).

Таблица 10.13

Технические характеристики электромагнитных контакторов электроводов постоянного тока

Параметр	МК-310А	МК-310В	МК-15-01	МКП-23Д	МКП-23Е
Напряжение номинальное, В	3000	3000	3000	3000	3000
Ток номинальный, А	25	10	14	25*	20*
Номинальное напряжение управления, В	50	50	50	50	50
Номинальный ток блокировочных контактов, А	5	5	5	—	—
Номинальный ток включающей катушки, А	0,65	0,65	—	—	—
Ток отпадания, А	—	—	—	2,5	1,0
Масса, кг	23,5	23	16,5	6,7	6,85

* Ток уставки на включение.

Основанием контактора служит ярмо, на котором закреплены все узлы контактора. Между полосами ярма включающей катушки на опоре зафиксирован якорь с изоляционным рычагом, где расположен подвижный главный контакт. Для выключения контактора используется выключающая пружина. Контактور оборудован дугогасительной камерой с системой электромагнитного дугогашения.

При подаче напряжения на катушку управления под действием электромагнитных сил якорь поворачивается относительно опоры и замыкает (или размыкает) свои контакты.

Контактор типа МК-15-01 используется для включения и отключения электрических печей отопления; он отличается от контактора МК310 отсутствием дугогасительного устройства (табл. 10.13). В зоне коммутирующих контактов, которые обеспечивают двукратный разрыв силовой цепи, у него установлены дугоограничивающие асбоцементные перегородки.

Контакторы типов МКП-23Д и МКП-23Е предназначены для автоматического шунтирования пусковых резисторов в цепях тяговых электродвигателей, мотор-генератора и электродвигателей вен-

тиляторов на электровозах постоянного тока (табл. 10.13). Кроме включающей катушки они имеют удерживающую и различаются параметрами удерживающих катушек и значениями тока отключения.

Электромагнитные контакторы электровозов переменного тока конструктивно могут быть разделены на две группы:

контакторы МК-63, МК-64, МК-66, МК-68, МК-69, МК-116;

контакторы МК-82, МК-85 и МК-96 (табл. 10.14).

Таблица 10.14

Технические характеристики электромагнитных контакторов электровозов переменного тока

Параметр	МК-63, МК-72	МК-68, МК-69	МК-73	МК-116	МК-82	МК-96
Номинальный ток главной цепи, А	50	50	50	10/60*	150	150
Номинальное напряжение главной цепи, В: постоянного тока переменного тока	50 380	50 380	50 380	59 —	150 —	— 380
Номинальное напряжение цепей управления и вспомогательной, В	50	50	50	50	50	50
Число силовых контактов	2/1**	2/1**	1	2	2	2/1**
Число вспомогательных контактов: закрывающих размыкающих	2 2	— —	3 —	— 2	2 2	2 —
Масса, кг	6,3/7**	6,5/5,3**	6,9	6,4	13,2	13,2/10,2**

* В числителе — для главного контакта, в знаменателе — для вспомогательного.

** В числителе — значение массы для контакторов МК-63, МК-68, МК-86, в знаменателе — для контакторов МК-72, МК-69, МК-96.

Аппараты обеих групп могут исполняться однополюсными или двухполюсными, иметь вспомогательные контакты или нет.

Контакторы идентичны по конструкции: основные узлы смонтированы на скобе электромагнита; неподвижные контакты уста-

новлены на изоляционной колодке и образуют самостоятельный узел; подвижные мостиковые контакты расположены на изоляционной тяге, связанной с якорем. Все главные контакты аппаратов снабжены металлокерамическими накладками из композиции «серебро—окись кадмия». Подвижный вспомогательный контакт также приводится в движение якорем. Для выключения контактора используется выключающая пружина.

При размыкании силовой цепи на главных контактах возникает электрическая дуга, которая в контакторах первой группы гасится за счет интенсивного нарастания сопротивления в двух дуговых промежутках. Контактры этого типа не имеют электромагнитного дугогашения; их дугогасительная камера предназначена только для ограничения пламени дуги.

Контакты второй группы имеют электромагнитную систему дугогашения. Их главные контакты выполнены из профильной кадмиевой меди, что обеспечивает их высокую износостойкость. Блокировочные контакты выполнены мостикового типа с накладками из серебра.

Контактры типов МК-82-86, МК-82-87, МК-96 предназначены для включения и отключения вспомогательных электродвигателей электровозов переменного тока. Эти контактры различаются схемой соединения блокировочных контактов и количеством силовых контактов.

Электромагнитные реле на электровозах используются для защиты силового электрооборудования от перегрузок, токов короткого замыкания и перенапряжений; для контроля параметров электрооборудования; коммутации и размножения электрических сигналов; включения и выключения потребителей с необходимой выдержкой времени. Конструкции многих типов реле электровозов переменного и постоянного тока однотипны.

10.10. Аппараты управления и защиты

К аппаратам управления электровоза относятся устанавливаемый в кабине контроллер машиниста, а также различные реле. Для защиты цепей управления от токовых перегрузок на электровозах, также как на тепловозах используются автоматические выключатели различных типов, совмещающие функции управления и защиты, а также и плавкие предохранители.

Контроллер машиниста предназначен для дистанционного управления электровозом.

На электровозах с электрическим тормозом (ВЛ80Т, ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ11 и ВЛ15) контроллер КМ-87 имеет главный, реверсивный и тормозной валы, снабженные соответствующими рукоятками.

Реверсивная рукоятка имеет положения: 0 — нулевое; ПП — полное возбуждение при движении вперед; ПП — полное возбуждение при движении назад; ОП1, ОП2, ОП3 — первая, вторая и третья ступени ослабления возбуждения при движении вперед.

Реверсивная рукоятка контроллера выполняется съемной; ее можно снять только при нулевом положении реверсивного вала КМ.

Главная рукоятка имеет положения: 0 — нулевое положение; БВ — быстрое включение; АВ — автоматическое выключение; РВ — ручное выключение; ФП — фиксация пуска; РП — ручной пуск; АП — автоматический пуск.

Тормозная рукоятка имеет положения: 0 — нулевое положение; П — подготовительная позиция; ПТ — позиция предварительного торможения; Торможение — регулирование скорости торможения.

Например, на электровозе ВЛ80С переключатель тормозной силы имеет 12 фиксированных положений и обеспечивает изменение тормозной силы от 196 до 490 кН с равными интервалами.

Конструкцией контроллера КМ предусмотрено взаимное блокирование рукояток, что исключает ошибочные действия при управлении электровозом. Реверсивная и главная рукоятки могут быть установлены в любое рабочее положение только тогда, когда тормозная рукоятка будет находиться в нулевом положении. Тормозная рукоятка может быть поставлена в рабочее положение только при условии, что главная рукоятка находится в нулевом положении, а реверсивная — в положении ПП.

При отсутствии на электровозах электрического тормоза контроллер имеет два вала: главный и реверсивный, выполненный совместно с валом переключателя шунтировки поля.

Наиболее характерна конструкция контроллера типа КМ-87, применяемого на электровозах ВЛ85 (рис. 10.23, табл. 10.15).

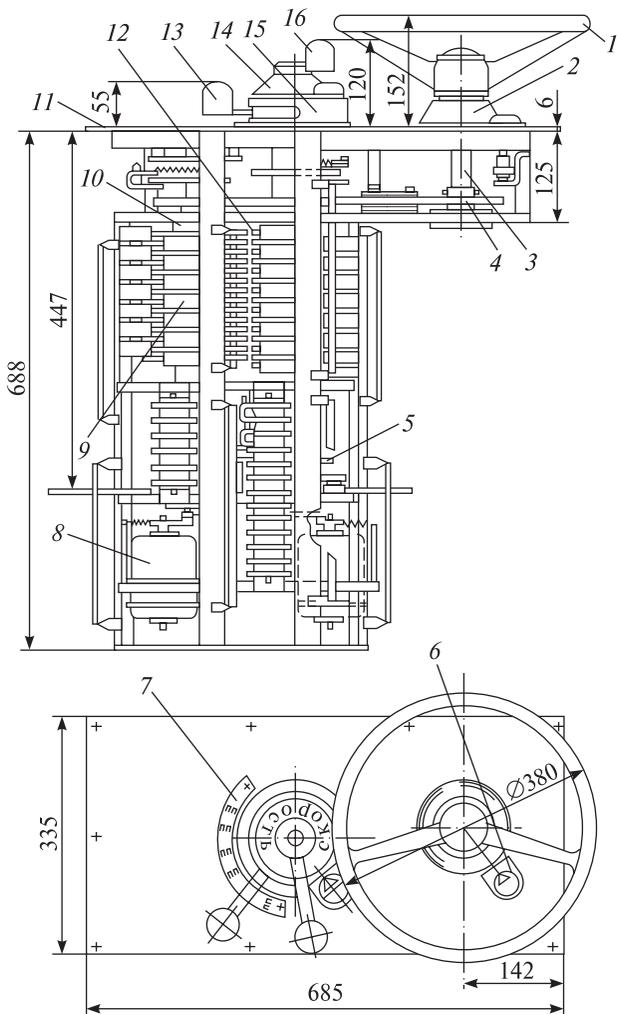


Рис. 10.23. Контроллер машиниста КМ-87:

1 — штурвал; 2, 14 — диски со шкалами-указателями; 3 — вал дополнительный; 4 — цепная передача; 5 — вал скорости; 6 — колпачок подсветки; 7 — указатель положений реверсивно-режимного вала; 8 — сельсин; 9 — контактор кулачковый; 10 — вал главный; 11 — верхняя крышка контроллера; 12 — реверсивно-режимный вал; 13 — рукоятка реверсивно-режимного вала; 15 — фланец; 16 — рукоятка вала скорости

Технические характеристики контроллера КМ-87

Параметр	Значение
Напряжение постоянного тока номинальное, В	50
Напряжение переменного тока номинальное, В	110
Ток номинальный, А	16
Отключаемый ток А:	
постоянный	9
переменный	4
Масса, кг	76

Контроллер содержит три переключателя кулачкового типа, установленные в общем каркасе: штурвал *1* установлен на дополнительном валу *3* и посредством цепной передачи *4* приводит в действие главный вал *10*; реверсивно-режимная рукоятка *13* — съемная и соединяется со своим валом через фланец *15*, который является опорой для подшипника вала скорости; вал скорости установлен соосно с реверсивно-режимной рукояткой и соединен с рукояткой скорости *16*. Штурвал, рукоятки и указатели их положения установлены на верхней крышке *11* контроллера.

В контроллере имеется панель с резисторами, диодами и конденсатором, которые служат для регулирования напряжения на выходе датчиков-сельсинов.

Глава 11. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

11.1. Асинхронный двигатель как объект управления

Асинхронный двигатель имеет жесткую механическую характеристику, которая не удовлетворяет условиям тяги (см. п. 2.3). Поэтому основное назначение системы управления асинхронным тяговым двигателем (АТД) — сформировать мягкую механическую характеристику $M_2 = f(n_p)$, где M_2 и n_p — механический момент (на валу) и частота вращения ротора АТД. Кроме того, система управления должна обеспечивать работу двигателя в режиме электрического торможения локомотива и ограничения нагрузок энергетического оборудования.

Как известно, частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_p = \frac{f_1}{p}(1-s), \quad (11.1)$$

где f_1 — частота питающего напряжения, подведенного к обмоткам статора;
 p — число пар полюсов статора;
 s — относительное скольжение.

Номинальное значение s мало (например, для асинхронных тяговых двигателей тепловозов $s_{\text{ном}} = 0,03-0,04$). Поэтому для управления скоростью локомотива с электрической передачей переменного тока в широких пределах достаточно соответствующим образом изменять значение f_1 .

Гораздо сложнее управлять силой тяги локомотива, которая определяется моментом на валу двигателя. Высокая скорость обработки информации современными процессорами обосновала целесообразность разработки цифровых систем управления асинхронным приводом с использованием преобразователей, которые на сегодня являются своего рода техническим стандартом. Цифро-

вые системы управления электроприводом базируются на векторных представлениях электромагнитных процессов, происходящих в асинхронном трехфазном двигателе.

Важным свойством трехфазных систем переменного тока является простота получения вращающегося магнитного поля. На рис. 11.1 схематически показан поперечный разрез трехфазной асинхронной машины (без обмотки ротора). Обмотка статора имеет три фазы a , b и c , соединенные по схеме «звезда»; каждая фаза представлена только одной катушкой. Оси катушек образуют между собой углы $2\pi/3$. Стороны каждой катушки уложены в два диаметрально противоположных пазу. Начала и концы обмоток катушек, образующих фазы, обозначены соответственно как a , b , c и x , y , z .

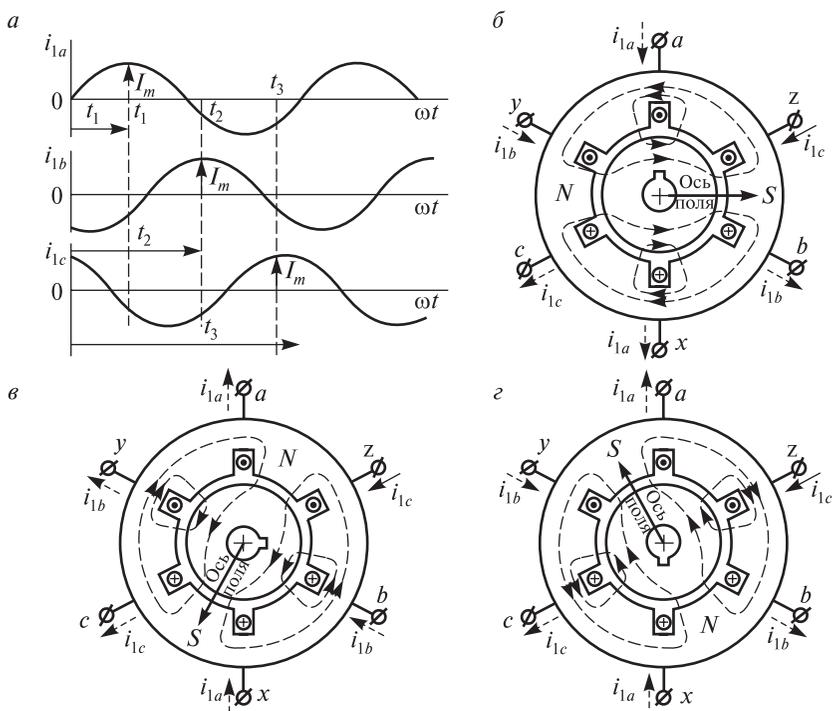


Рис. 11.1. Зависимости трехфазной системы токов (а); представление картины основного поля системы при максимальном положительном токе фазы a (б), фазы b (в) и фазы c (г)

При подаче на обмотку статора трехфазного напряжения в ней будут протекать синусоидальные токи, мгновенные значения которых (рис. 11.1, *a*):

$$\begin{aligned}i_{1a} &= I_m \sin(\omega_1 t); \\i_{1b} &= I_m \sin(\omega_1 t - 2\pi/3); \\i_{1c} &= I_m \sin(\omega_1 t - 4\pi/3),\end{aligned}$$

где I_m и $\omega_1 = 2\pi f_1$ амплитудное значение тока фазы и его круговая частота; t — текущее время.

Ток фазы создает синусоидальную магнитодвижущую силу (МДС) с амплитудным значением $F_m = k_{\text{мдс}} w_1 I_b$, где $k_{\text{мдс}}$ и w_1 — конструктивный коэффициент и число витков одной фазы.

В соответствии с законом Ома для магнитной цепи МДС фазы создает ее магнитный поток с амплитудой $\Phi_m = F_m / R_m$, где R_m — сопротивление магнитной цепи, т.е.

$$\begin{aligned}\Phi_{1a} &= \Phi_m \sin(\omega_1 t); \\ \Phi_{1b} &= \Phi_m \sin(\omega_1 t - 2\pi/3); \\ \Phi_{1c} &= \Phi_m \sin(\omega_1 t - 4\pi/3).\end{aligned}$$

Магнитный поток каждой фазы направлен по оси своей катушки; складываясь, они образуют результирующее магнитное поле, картина которого непрерывно изменяется.

На рис. 11.1, *б*, представлена картина результирующего поля в момент t_1 , когда ток i_{1a} положителен (направлен в катушке от клеммы *a* к клемме *x*) и максимален. Из графика рис. 11.1, *a*, следует, что в этот момент токи в фазах *b* и *c* отрицательны (направлены от *y* к *b* и от *z* к *c*). По направлению токов, руководствуясь правилом правоходового винта, можно построить картину результирующего поля. В рассматриваемый момент ось поля займет горизонтальное направление (совпадая с осью катушки фазы *a*), образуя справа южный полюс, а слева — северный полюс.

В момент t_2 , когда положительное максимальное значение будет иметь ток i_{1b} , токи фаз *a* и *c* будут отрицательными (рис. 11.1, *в*). Рассуждая аналогичным образом, можно увидеть, что результирующее поле займет новое положение, повернувшись на угол $2\pi/3^\circ$

по часовой стрелке и совпадая с осью катушки фазы b . В момент t_3 , когда положительное максимальное значение будет иметь ток i_{1c} , магнитное поле опять займет новое положение, повернувшись по часовой стрелке еще на угол $2\pi/3^\circ$ (рис. 11.1, ε). Такое поле называют *вращающимся*.

Для момента $\omega_1 t = \pi/2$ мгновенные значения потоков численно равны:

$$\begin{aligned}\Phi_{1a} &= \Phi_m \sin(\pi/2) = \Phi_m; \\ \Phi_{1b} &= \Phi_m \sin(\pi/2 - 2\pi/3) = \Phi_m \sin(-\pi/6) = -\Phi_m/2; \\ \Phi_{1c} &= \Phi_m \sin(\pi/2 - 4\pi/3) = \Phi_m \sin(-5\pi/6) = -\Phi_m/2\end{aligned}$$

и расположены вдоль осей фаз (рис. 11.2).

Результирующий вектор потока $\bar{\Phi}_\Sigma$ получится сложением мгновенных значений потоков фаз с учетом их расположения на плоскости:

$$\begin{aligned}|\bar{\Phi}_{1\Sigma}| &= \Phi_{1a} \cos(0) + \Phi_{1b} \cos(-2\pi/3) + \Phi_{1c} \cos(-4\pi/3) = \\ &= \Phi_m + (-\Phi_m/2)(-1/2) + (-\Phi_m/2)(-1/2) = 1,5\Phi_m.\end{aligned}\quad (11.2)$$

Таким образом, при $\omega_1 t = \pi/2$ результирующий вектор потока обмотки статора совпадает с осью фазы a и имеет амплитуду $1,5\Phi_m$. Очевидно, что проекции вектора $\bar{\Phi}_{1\Sigma}$ на оси фаз a , b и c будут также в 1,5 раза больше, чем значения Φ_{1a} , Φ_{1b} и Φ_{1c} .

Под *обобщенным вектором магнитного потока обмотки статора* $\bar{\Phi}_1$ понимают вектор, проекции которого на оси фазных обмоток

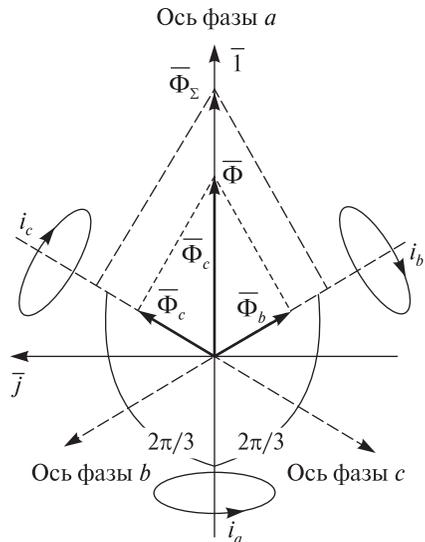


Рис. 11.2. К понятию обобщенного вектора магнитного потока трехфазной системы токов

в любой момент времени равны мгновенным значениям потоков фаз Φ_{1a} , Φ_{1b} и Φ_{1c} , т.е.

$$\bar{\Phi}_1 = \frac{2}{3} \bar{\Phi}_{1\Sigma} \quad (11.3)$$

Поместив оси фаз на комплексную плоскость, можно показать, что вектор $\bar{\Phi}_1$ можно выразить через мгновенные значения Φ_{1a} , Φ_{1b} , Φ_{1c} и единичные векторы (см. рис. 11.2):

$$\bar{a} = \bar{1} \cdot \left(\frac{-1}{2} \right) + \bar{j} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \quad \bar{a}' = \bar{1} \cdot \left(\frac{-1}{2} \right) + \bar{j} \left(\frac{-\sqrt{3}}{2} \right), \quad (11.4)$$

где $\bar{1}$, \bar{j} — единичные векторы действительной и мнимой оси.

Векторы, $\bar{1}$, \bar{a} и \bar{a}' совпадают с осями фаз a , b и c , а обобщенный вектор потока обмотки статора определится как

$$\bar{\Phi}_1 = \frac{2}{3} (\bar{1} \Phi_{1a} + \bar{a} \Phi_{1b} + \bar{a}' \Phi_{1c}). \quad (11.5)$$

По аналогии с (11.5) обобщенные векторы напряжения и тока обмотки статора:

$$\bar{u}_1 = \frac{2}{3} (\bar{1} u_{1a} + \bar{a} u_{1b} + \bar{a}' u_{1c}); \quad (11.6)$$

$$\bar{i}_1 = \frac{2}{3} (\bar{1} i_{1a} + \bar{a} i_{1b} + \bar{a}' i_{1c}), \quad (11.7)$$

где u_{1a} , u_{1b} , u_{1c} , i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} — мгновенные значения напряжений и токов фаз обмотки статора.

Магнитный поток катушки с числом витков w создает потоко-сцепление $\Psi = w\Phi$. В то же время из электротехники известно, что потоко-сцепление катушки с индуктивностью L определяется протекающим по ней током:

$$\Psi = Li. \quad (11.8)$$

В трехфазной системе магнитный поток каждой фазы сцепляется со всеми тремя фазами, создавая основной магнитный поток Φ_m , а частично рассеивается, образуя поток рассеяния Φ_σ . Поток рассеяния фазы определяется наличием у нее *индуктивности рассеяния* L_σ , а основной магнитный поток — наличием *взаимных индуктивностей между обмотками фаз* l_m (рис. 11.3). С учетом рас-

положения осей катушек на плоскости можно показать, что индуктивность основного потока фазы $L_m = \frac{3}{2}l_m$. Поскольку все фазы обмотки статора симметричны, значит, их полные индуктивности имеют одинаковые значения $L_{1a} = L_{1b} = L_{1c} = L_{1\sigma} + L_m = L_1$.

Тогда, используя зависимости (11.8), (11.7) и (11.3) получаем выражение для обобщенного вектора потокосцепления обмотки статора при отсутствии тока в обмотке ротора

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{11} &= \left[(L_{1\sigma} + L_m)\bar{i}_a + (L_{1\sigma} + L_m)\bar{i}_b + (L_{1\sigma} + L_m)\bar{i}_c \right] = \\ &= (L_{1\sigma} + L_m)(\bar{i}_a + \bar{i}_b + \bar{i}_c) = (L_{1\sigma} + L_m)\bar{i}_1 = L_1\bar{i}_1. \end{aligned} \quad (11.9)$$

Наведение тока в обмотке ротора приведет к появлению дополнительных составляющих потокосцеплений, образуемых индуктивностями l_m (рис. 11.4). *Магнитные поля обмоток статора и ротора взаимно неподвижны*; они вращаются с одинаковой синхронной скоростью и в одном направлении. Поэтому полный вектор потокосцепления обмотки статора $\bar{\Psi}_1$ можно представить в виде суммы векторов потокосцеплений, обусловленных током самой обмотки статора $\bar{\Psi}_{11}$ и током обмотки ротора $\bar{\Psi}_{12} = L_m\bar{i}_2$, где \bar{i}_2 — обобщенный вектор тока ротора, определяемый по аналогии с (11.7).

С учетом токов всех обмоток двигателя и угла смещения γ между обмотками *обобщенные векторы потокосцеплений статора и ротора* можно представить в виде:

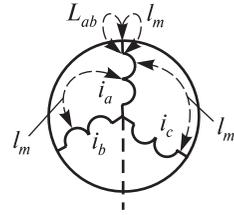


Рис. 11.3. Электромагнитное взаимодействие обмотки фазы a с обмотками фаз b и c трехфазной системы

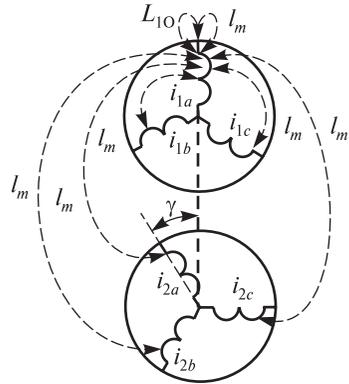


Рис. 11.4. Электромагнитное взаимодействие фазы a обмотки статора с обмотками статора и ротора в асинхронном двигателе:

a_1, b_1, c_1 — трехфазная обмотка статора; a_2, b_2, c_2 — обмотка ротора, приведенная к параметрам обмотки статора

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_1 &= \bar{\Psi}_{11} + \bar{\Psi}_{12} = L_1 \bar{i}_1 + L_m \bar{i}_2; \\ \bar{\Psi}_2 &= \bar{\Psi}_{22} + \bar{\Psi}_{21} = L_2 \bar{i}_2 + L_m \bar{i}_1,\end{aligned}\tag{11.10}$$

или

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_1 &= (L_{1\sigma} + L_m) \bar{i}_1 + L_m \bar{i}_2 = L_{1\sigma} \bar{i}_1 + L_m (\bar{i}_1 + \bar{i}_2) = \bar{\Psi}_{1\sigma} + \bar{\Psi}_m; \\ \bar{\Psi}_2 &= (L_{2\sigma} + L_m) \bar{i}_2 + L_m \bar{i}_1 = L_{2\sigma} \bar{i}_2 + L_m (\bar{i}_2 + \bar{i}_1) = \bar{\Psi}_{2\sigma} + \bar{\Psi}_m,\end{aligned}$$

где $\bar{\Psi}_{22}$ — вектор потокосцепления обмотки ротора, обусловленный током обмотки ротора;

$\bar{\Psi}_{21} = L_m \bar{i}_1$ — вектор потокосцепления обмотки ротора, обусловленный током обмотки статора;

$\bar{\Psi}_{1\sigma}$, $\bar{\Psi}_{2\sigma}$ — векторы потокосцеплений рассеяния обмоток статора и ротора;

$\bar{\Psi}_m$ — вектор потокосцепления основного потока.

Таким образом, обобщенные векторы потокосцеплений $\bar{\Psi}_1$ и $\bar{\Psi}_2$ определяются обобщенными векторами токов \bar{i}_1 и \bar{i}_2 и связаны между собой обобщенным вектором потокосцепления основного потока $\bar{\Psi}_m$. Поскольку создание электромагнитного момента асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора основано на взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами обмоток, то его можно представить комбинацией векторов $\bar{\Psi}_1$, $\bar{\Psi}_2$ и \bar{i}_1 , \bar{i}_2 в виде

$$\bar{m}_{\text{эм}} = \frac{m_1}{2} p C (\bar{a} \bar{b}),\tag{11.11}$$

где m_1 , p — соответственно число фаз и пар полюсов обмотки статора;

C — коэффициент, зависящий от выбора векторов \bar{a} и \bar{b} (см. табл. 11.1); делитель $2 = \sqrt{2} \sqrt{2}$ соответствует преобразованию амплитуд векторов сомножителей в действующие значения [31].

При управлении асинхронным тяговым двигателем в электрических передачах локомотивов физический смысл имеет только модуль вектора $\bar{m}_{\text{эм}}$. Например, если момент выразить в соответствии с выражением (11.11) и табл. 11.1 обобщенными векторами потокосцепления и тока обмотки ротора:

$$\bar{m}_{\text{эм}} = -\frac{3}{2} p \bar{\Psi}_2 \bar{i}_2,$$

Представление коэффициента C в уравнении электромагнитного момента $\bar{m}_{эм}$

		\bar{b}			
		$\bar{\Psi}_1$	\bar{i}_1	$\bar{\Psi}_2$	\bar{i}_2
\bar{a}	$\bar{\Psi}_1$	*	1	$\frac{-L_m}{L_1 L_2 - L_m^2}$	$-L_m/L_1$
	\bar{i}_1	-1	*	$-L_m/L_2$	$-L_m$
	$\bar{\Psi}_2$	$\frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2}$	L_m/L_2	*	-1
	\bar{i}_2	L_m/L_1	L_m	1	*

* Означает, что электромагнитный момент не может быть выражен произведением данных векторов.

то его модуль может быть представлен как

$$m_{эм} = -\frac{3}{2} p |\bar{\Psi}_2| \cdot |\bar{i}_2| \sin(\bar{\Psi}_2, \bar{i}_2),$$

где $\sin(\bar{\Psi}_2, \bar{i}_2)$ — синус угла между векторами $\bar{\Psi}_2$ и \bar{i}_2 .

Используя векторы $\bar{\Psi}_1$ и \bar{i}_1 , по второму закону Кирхгофа можно определить обобщенный вектор напряжения на обмотке статора (рис. 11.5):

$$\bar{u}_1 = \bar{i}_1 r_1 + L \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt}. \tag{11.12}$$

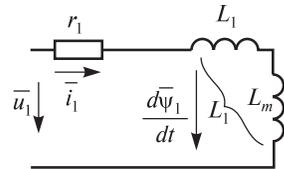


Рис. 11.5. К определению обобщенного вектора напряжения на обмотке статора асинхронного двигателя

11.2. Преобразователи частоты для тягового привода с асинхронными двигателями

В п. 11.1 отмечалось, что для управления скоростью движения локомотива с передачей переменного тока необходимо управлять частотой питающего напряжения АТД. Из (11.1) следует, что требуемое значение частоты питающего напряжения на входе в двигатель

однозначно определяются частотой вращения его ротора и значением относительного скольжения:

$$f_1 = \frac{pn_p}{1-s}. \quad (11.13)$$

Значение s очень мало, поэтому частота f_1 должна изменяться в соответствии со скоростью движения локомотива.

Напряжение контактной сети, которая является источником энергии электровоза, либо постоянное 3000 В, либо переменное 25 000 В с частотой 50 Гц; частота напряжения синхронного генератора тепловоза также остается постоянной в пределах одной позиции контроллера. Поэтому для управления частотой f_1 , обеспечивающей изменение скорости локомотива в диапазоне $0 < V_{\text{лок}} \leq V_{\text{констр}}$, используются преобразователи частоты, назначение которых — преобразовать напряжение постоянной частоты источника энергии локомотива в напряжение управляемой переменной частоты на входе в АТД.

11.2.1. Основные типы преобразователей

Преобразователи классифицируются:

- непосредственные преобразователи частоты НПЧ;
- двухзвенные преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока ПЧ.

В настоящее время более распространены двухзвенные ПЧ со звеном постоянного тока. Первое звено такого преобразователя представляет собой выпрямитель (управляемый или неуправляемый) с фильтром на выходе, а второе — автономный инвертор. Второе звено ПЧ может быть выполнено как на основе автономного инвертора напряжения (АИН), так и на основе автономного инвертора тока (АИТ). Двухзвенные ПЧ позволяют получить на выходе напряжение с частотой как меньше, так и больше входной. Их недостаток — двойное преобразование энергии и увеличение за счет этого потерь.

Между выпрямителем и инвертором в ПЧ обязательно устанавливают накопитель энергии. В зависимости от вида этого накопителя — конденсатор C_{ϕ} или дроссель L_{ϕ} — инвертор работает либо в режиме источника напряжения, либо источника тока. Накопитель энергии необходим, потому что энергия постоянного тока чисто

активная, а для формирования магнитных полей в двигателе нужен обмен реактивной энергией с источником питания, что и обеспечивает накопитель.

Двухзвенный ПЧ на основе инвертора тока содержит управляемый выпрямитель УВ, индуктивный фильтр L_Φ и собственно АИТ (рис. 11.6, а). Управление амплитудой выпрямленного тока i_d осуществляется с помощью управляемого выпрямителя, по разности сигналов тока задания i_d^* и обратной связи i_d звена постоянного тока; управление частотой f_1 выполняется ключами АИТ путем изменения частоты управляющих импульсов ключей инвертора по сигналу задания f_1^* .

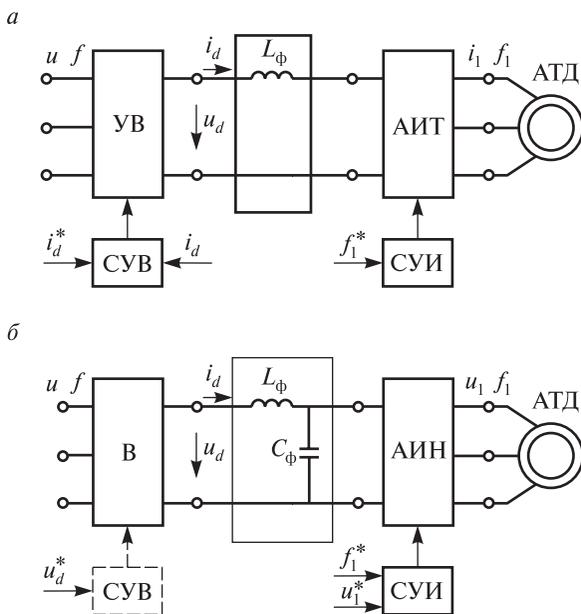


Рис. 11.6. Принципиальные схемы двухзвенного преобразователя частоты на основе АИТ (а) и АИН (б):

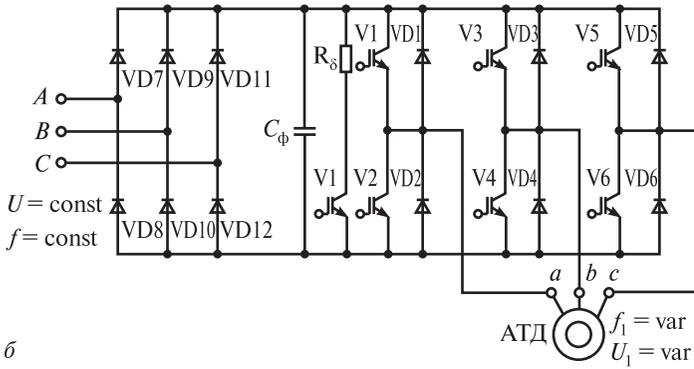
УВ, В — управляемый и неуправляемый выпрямители; АИТ, АИН — автономные инверторы тока и напряжения; L_Φ , C_Φ — накопители; СУВ, СУИ — системы управления выпрямителем и инвертором; u, f — напряжение и частота входного напряжения; i_d, u_d — ток и напряжение звена постоянного тока; u_1, f_1 — напряжение и частота выходного напряжения (напряжения питания АТД); i_d^*, u_d^* — ток и напряжение задания звена постоянного тока; f_1^*, u_1^* — частота и напряжение задания выходного напряжения

Регулирование параметров выходного напряжения ПЧ на основе инвертора напряжения чаще всего осуществляется собственно АИН с импульсной модуляцией (рис. 11.6, б). Из импульсных методов регулирования напряжения наибольшее распространение получила широтно-импульсная модуляция (ШИМ) (см. п. 1.8). При использовании АИН с ШИМ параметры выходного напряжения u_1 и f_1 регулируются с помощью коммутации ключей АИН по сигналам заданий u_1^* и f_1^* . В настоящее время, благодаря развитию силовой электроники и, прежде всего, появлению силовых транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*—транзисторов), этот тип ПЧ стал наиболее распространенным. Однако и в ПЧ на основе инвертора напряжения для управления амплитудой выходного напряжения может использоваться управляемый выпрямитель с системой управления (СУВ).

На рис. 11.7, а, представлена схема ПЧ на основе инвертора напряжения, предназначенного для питания асинхронного двигателя. Преобразователь состоит из неуправляемого выпрямителя, выполненного на диодах VD7—VD12, сглаживающего фильтра C_Φ , блока тормозного резистора R_ζ и автономного инвертора, собранного на *IGBT*-транзисторах V1—V6 и диодах VD1—VD6. Диоды VD1—VD6 служат для пропуска тока при коммутации транзисторов (см. п. 11.3.1). Торможение двигателя обеспечивается переводом АИН в режим управляемого выпрямителя напряжения: при превышении напряжением на конденсаторе фильтра заданного значения транзистор V7 включается и энергия, передаваемая от электрической машины, рассеивается на тормозном резисторе R_ζ . Индуктивный фильтр L_Φ необходим для надежной работы выпрямителя. За счет применения ШИМ осуществляется регулирование амплитуды напряжения на выходе преобразователя и приближение его формы к синусоидальной (рис. 11.7, б).

На вход ПЧ подается трехфазное синусоидальное напряжение $u(t)$ с постоянными значениями частоты f и амплитуды U . Трехфазный мостовой выпрямитель I преобразует напряжение в постоянное пульсирующее u_d . Емкостной фильтр уменьшает пульсации выпрямленного напряжения, в результате чего напряжение становится практически постоянным U_d . Постоянное напряжение поступает на вход инвертора. В инверторе с помощью транзисторных ключей и ШИМ осуществляется преобразование постоянного напряжения U_d

a



б

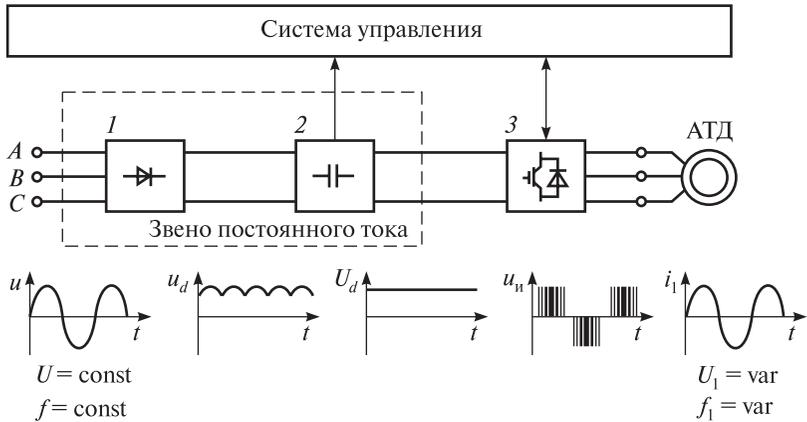


Рис. 11.7. Принципиальная схема преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока и инвертором напряжения (а) и последовательность преобразования параметров напряжения в преобразователе (б):
 1 — выпрямитель; 2 — емкостной накопитель; 3 — инвертор

в трехфазное импульсное напряжение $u_{и}$ изменяемой частоты. По сигналам системы управления каждая обмотка двигателя подсоединяется через соответствующие силовые транзисторы инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Длительность подключения каждой обмотки модулируется по синусоидальному закону. Поэтому напряжение на выходе АИН имеет форму импульсов положительной и отрицательной полярности с нулевыми паузами. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается

в середине полупериода, а к началу и концу полупериода уменьшается. Таким образом система управления обеспечивает широтно-импульсную модуляцию напряжения на обмотках двигателя. При высокой частоте ШИМ в обмотках двигателя из-за их высокой индуктивности протекают практически синусоидальные токи $i_1(t)$.

В НПЧ-преобразователях выходное напряжение формируется из участков синусоид напряжения сети; при этом двигатель в процессе работы преобразователя через открытые ключи в каждый момент времени оказывается включенным непосредственно на источник. Применение транзисторных ключей позволяет регулировать выходную частоту в области ниже и выше частоты сети. Однако сам принцип работы НПЧ требует использования по крайней мере тройного количества ключевых элементов по сравнению с ПЧ со звеном постоянного тока.

Преимуществом НПЧ является однократное преобразование энергии, позволяющее получить более высокий КПД преобразователя, а недостатком — низкий коэффициент мощности, вызванный непрерывным регулированием угла управления ключами. Этот недостаток преобразователя сводит на нет преимущества, обусловленные однократным преобразованием энергии. Поэтому такие преобразователи не нашли распространения в энергетических цепях локомотивов.

11.2.2. Алгоритмы управления инверторами

Для нормальной работы тяговых асинхронных электродвигателей необходимы инверторы, генерирующие трехфазное синусоидальное напряжение или симметричное несинусоидальное напряжение, у которого может быть выделена основная гармоническая, значительно преобладающая над высшими гармоническими (см. п. 3.5, рис. 3.11). Трехфазное напряжение широкого диапазона частоты можно получить в обмотках статора АТД с помощью схемы, представленной на рис. 11.8.

Условно инвертор может быть представлен системой из шести ключей К1—К6, включенной на источник постоянного напряжения U_d (рис. 11.8, *a*). Для получения трехфазного напряжения на обмотках статора двигателя и формирования вращающейся магнитодвижущей силы F необходимо в определенной последовательности замыкать ключи.

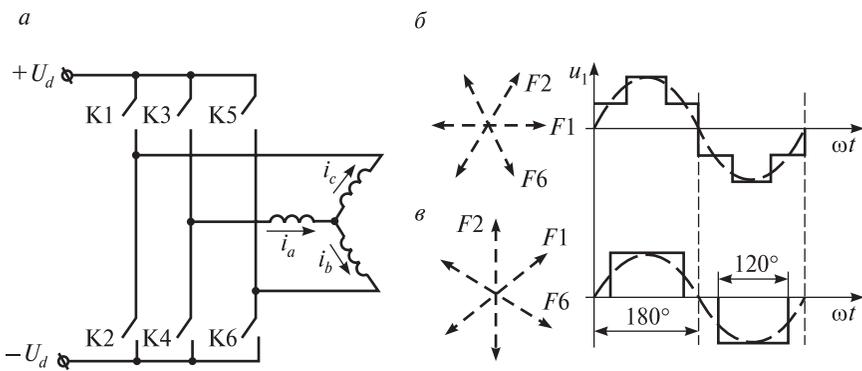


Рис. 11.8. Формирование переменного напряжения в обмотке статора асинхронного двигателя при использовании инвертора:
a — условная схема управления ключами; *б* — вращение магнитодвижущей силы обмотки статора и ее фазное напряжение при алгоритме 180-градусного управления; *в* — вращение магнитодвижущей силы обмотки статора и ее фазное напряжение при алгоритме 120-градусного управления

Пусть при $\omega t = 0$ замкнуты ключи K2, K3, K6. Тогда по обмоткам фаз статора будет протекать ток i_a , i_b и i_c ; причем ток i_a будет разветвляется на i_b и i_c (рис. 11.8, б). Под действием токов i_a , i_b и i_c сформируется МДС и займет положение F1. Если через $\Delta\omega t = \pi/3$ разомкнуть ключи K2, K3, K6 и замкнуть ключи K2, K3, K5, направления токов i_a , i_b , i_c изменятся, а МДС повернется по часовой стрелке на угол $\pi/3$ и займет положение F2. Таким образом, замыкая ключи инвертора в определенной последовательности, можно получить вращение магнитного потока обмотки статора (см. п. 11.1), необходимое для создания электромагнитного момента двигателя. При таком алгоритме управления одновременно замкнуты три ключа системы, во всех фазах статорной обмотки двигателя непрерывно протекает ток, а напряжение на фазах будет иметь ступенчатую форму. Из кривой фазного напряжения может быть выделена основная гармоническая составляющая (штриховая линия на рис. 11.8, б), частота которой определяется частотой переключения ключей. Поскольку при таком алгоритме за полупериод к каждой фазе обмотки статора напряжение приложено на интервале 180° , он и называется *180-градусным алгоритмом управления инвертором*.

В инверторах применяется и *120-градусный алгоритм управления* (рис. 11.8, в), когда в каждый момент времени замкнуты только два ключа и ток протекает только по двум фазам обмотки статора. Например, пусть в $\omega t = 0$ замкнуты ключи К3, К2; при этом ток будет протекать по фазам *a* и *c* обмотки. Под действием этих токов сформируется МДС, которая займет положение *F1*. Если теперь разомкнуть ключи К3, К2 и замкнуть ключи К2, К5, ток в обмотке статора будет протекать в фазах *b* и *c*, а МДС повернется по часовой стрелке на угол $\pi/3$ и займет положение *F2*. Таким образом, и при 120-градусном алгоритме управления ключами инвертора создается вращение магнитного поля, только в данном случае к фазе обмотки статора напряжение будет приложено не весь полупериод, а только $2\pi/3$, т.е. 120° . При такой форме фазного напряжения также может быть выделена основная гармоническая составляющая (штриховая линия на рис. 11.8, в), которая и определит электромагнитный момент двигателя.

В настоящее время на локомотивах преимущественно применяются двухзвенные преобразователи частоты с инвертором напряжения и 180-градусным алгоритмом управления. Это объясняется тем, что 180-градусный алгоритм управления позволяет получить лучший гармонический состав переменного напряжения на фазах обмотки статора электродвигателя и уменьшить его потери.

11.3. Инвертор как преобразователь частоты напряжения

Для работы АТД требуется трехфазное напряжение, поэтому в энергетических цепях локомотивов используются трехфазные АИН. Но и однофазные АИН используются на электровозе в приводе вспомогательных систем.

Рассмотрим сначала работу АИН в качестве преобразователя частоты напряжения без внутреннего регулирования его амплитуды. Напряжение источника U_d принимаем идеально сглаженным.

11.3.1. Принцип работы однофазного инвертора напряжения

Рассмотрим принцип работы однофазного АИН на простейшей схеме, состоящей из четырех идеальных ключей К1—К4 и активной нагрузки *r*; схема включена на источник постоянного напряжения U_d (рис. 11.9, а). Пусть при $t = 0$ замыкаются ключи К1 и К4; тогда нагрузка окажется включена на напряжение $u_{ab} = U_d/2$, под дейст-

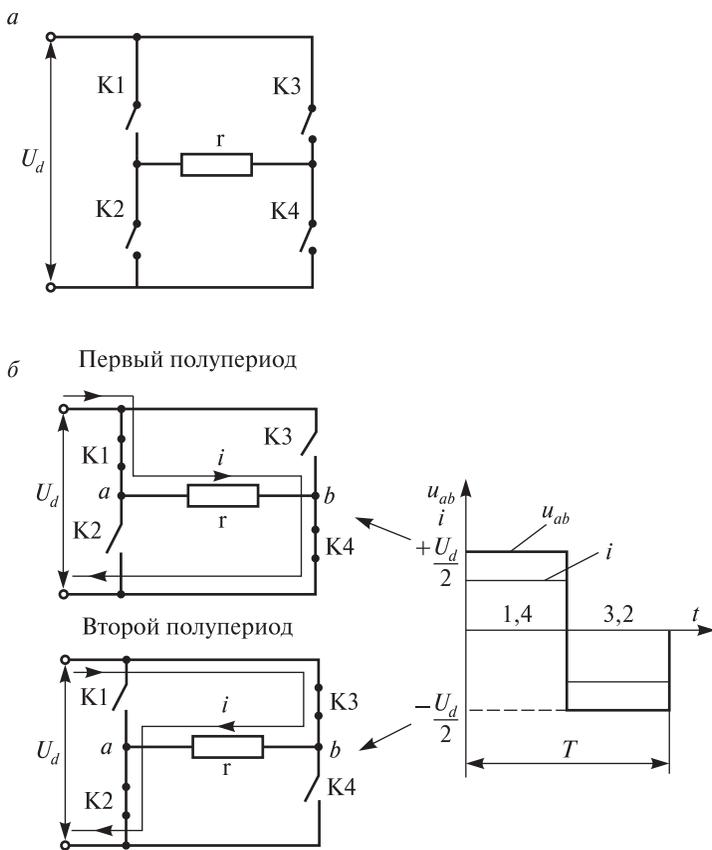


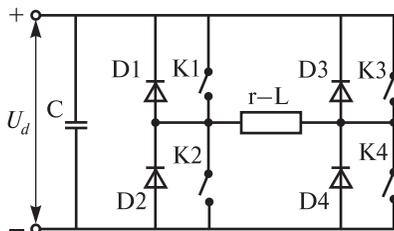
Рис. 11.9. Принципиальная схема работы ключей в однофазном инверторе, нагруженном активным сопротивлением, (а) и диаграмма работы инвертора (б)

вием которого через нее потечет ток i (рис. 11.9, б). Если при $t = T/2$ ключи K1, K4 разомкнуть, а ключи K3, K2 замкнуть, то полярность напряжения на нагрузке изменится, т.е. будет $u_{ab} = -U_d/2$ и ток i изменит свое направление. Таким образом, при попарной коммутации ключей K1, K4—K3, K2—K1, K4 и т.д. через $t = T/2$ к резистору r будет прикладываться переменное напряжение u_{ab} прямоугольной формы с частотой $f_1 = 1/T$. Ток при активной нагрузке будет повторять форму напряжения. *Изменяя коммутационный интервал $T/2$, можно менять частоту $f_1 = 1/T$ в любых пределах.*

При активно-индуктивной нагрузке $r-L$ размыкание ключа недопустимо без дополнительных мер, поскольку энергия, запасенная в индуктивности, при размыкании цепи вызовет большие перенапряжения (рис. 11.10, *a*). Поэтому при размыкании ключей должны оставаться контуры, по которым продолжал бы протекать ток в прежнем направлении, и энергия, запасенная в индуктивности, передавалась бы в другой накопитель, например в емкость C . Для этого параллельно ключам устанавливают диоды обратного тока $D1-D4$; вместе с конденсатором C они образуют контуры для обмена энергией при коммутации ключей (рис. 11.10, *b*).

Пусть в начальный момент времени были замкнуты ключи $K3$, $K2$ и ток i протекал по цепи «плюс» U_d , ключ $K3$, нагрузка $r-L$, ключ $K2$, «минус» U_d . В момент $t = 0$ ключи $K3$, $K2$ размыкаются и замыкаются ключи $K1$, $K4$ и полярность напряжения на нагрузке меняется. После коммутации ключей под действием ЭДС самоин-

a



b

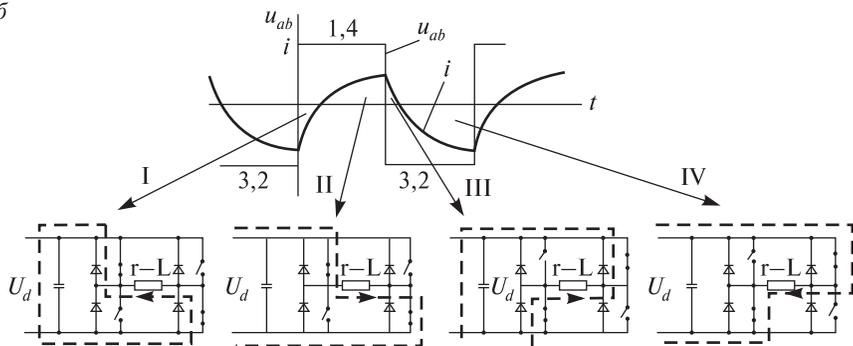


Рис. 11.10. Принципиальная схема работы ключей в однофазном инверторе, нагруженном активно-реактивным сопротивлением (*a*) и диаграмма работы инвертора (*b*)

дукции ток i на некотором интервале времени продолжает протекать в прежнем направлении (обратном по отношению к напряжению), замыкаясь по цепи диодов обратного тока D1, D4 и емкости C (схема I).

Уравнение энергетического баланса на этом режиме

$$ri + \omega_1 L \frac{di}{d\omega_1 t} = -U_d.$$

Под действием напряжения U_d ток i экспоненциально увеличивается, и когда его текущее значение достигает нуля, схема переходит в состояние II, ток меняет свое направление, а нагрузка включается на напряжение U_d . Уравнение энергетического баланса на этом режиме

$$ri + \omega_1 L \frac{di}{d\omega_1 t} = U_d. \quad (11.14)$$

Решение уравнения (11.14) относительно значения i дает результат:

$$i = i_{\text{вын}} + i_{\text{св}},$$

где $i_{\text{вын}} = U_d / r$ — вынужденная составляющая тока;

$i_{\text{св}} = A \exp\left(\frac{-r}{L} t\right)$ — свободная составляющая тока.

Принимая, что при $t = 0$ $i = i_0$, получим выражение для тока нагрузки

$$i = \frac{U_d}{r} - \left(\frac{U_d}{r} - i_0 \right) \exp\left(\frac{-r}{L} t\right).$$

При $t = T/2$ ключи K1, K4 размыкаются и замыкаются ключи K3, K2, а к нагрузке прикладывается напряжения обратной полярности (схема III). Под действием ЭДС самоиндукции ток i постепенно уменьшается, замыкаясь через диоды D3, D2 и емкость C. Когда мгновенное значение тока достигает $i = 0$ схема переходит в состояние IV.

Важно отметить, что коммутация ключей происходит как и в схеме с активной нагрузкой (см. рис. 11.9), однако формы напря-

жения и тока при $r-L$ нагрузке существенно различны и ток в силу индуктивного характера нагрузки отстает от напряжения.

11.3.2. Принцип работы трехфазного инвертора напряжения

Рассмотрим процесс преобразования постоянного напряжения в трехфазное периодическое напряжение с помощью АИН (рис. 11.11) [33].

Инвертор состоит из транзисторных ключей $V1-V6$ и диодов обратного тока $VD1-VD6$, которые включены параллельно транзисторам (рис. 11.11, *a*). При таком соединении транзистор и диод представляют собой ключ с двусторонней проводимостью. Например, при подключении фазы a к «плюсу» источника постоянного напряжения U_d через транзистор $V1$ может протекать ток нагрузки прямого направления (от точки a к точке 0), а через диод $VD1$ может протекать ток нагрузки обратного направления.

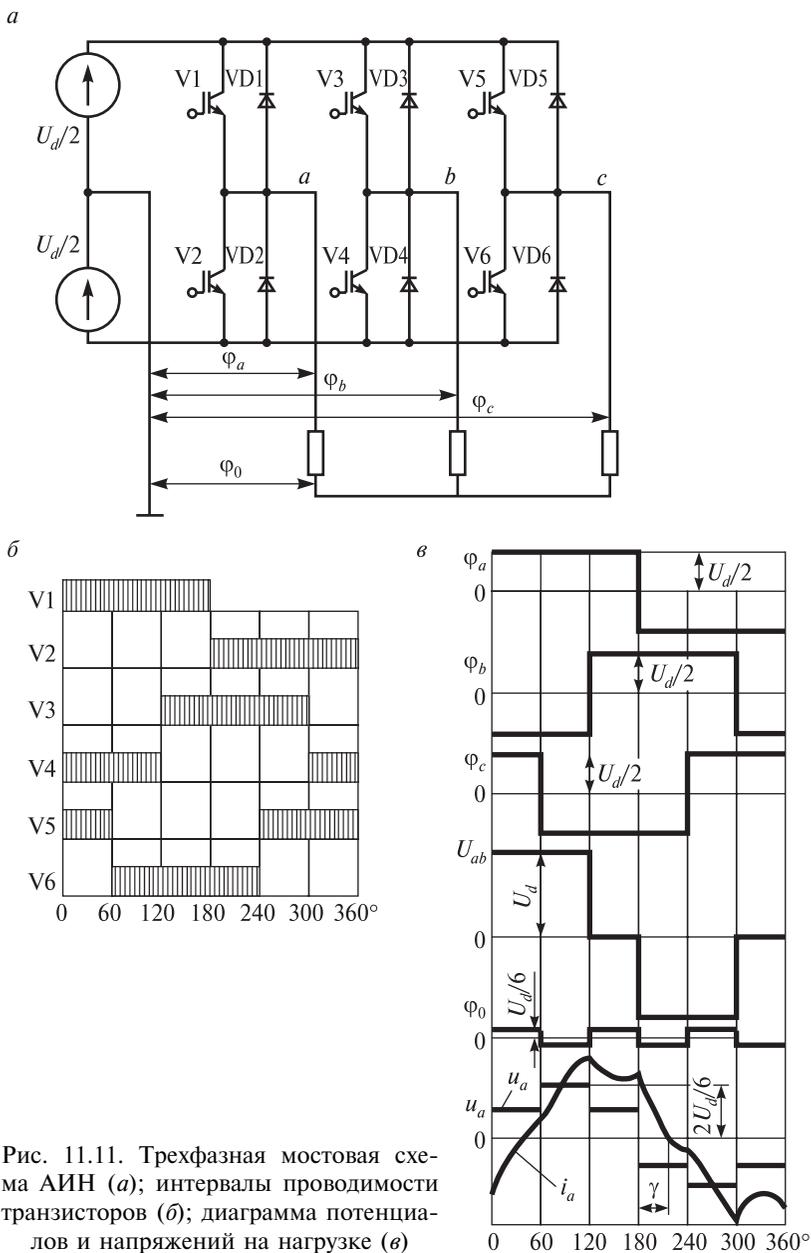
Пренебрегая незначительным падением напряжения на транзисторе (и диоде) можно считать, что потенциал точек a, b, c равен или потенциалу положительного полюса источника (при проводящем состоянии транзисторов $V1, V3, V5$), или потенциалу отрицательного полюса источника (при проводящем состоянии транзисторов $V2, V4, V6$).

Рассмотрим работу АИН в качестве преобразователя частоты напряжения со 180° -градусным алгоритмом управления ключами и без внутреннего регулирования его амплитуды. Напряжение источника U_d принимаем идеально сглаженным.

Чтобы на выходе АИН была сформирована симметричная трехфазная система напряжений, зоны проводимости транзисторов одноименной группы должны быть сдвинуты относительно друг друга на 120° (рис. 11.11, *б*). За нулевой потенциал принимают потенциал средней точки источника U_d . В этом случае потенциалы фаз на выходе инвертора $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ принимают значение $+U_d/2$ или значение $-U_d/2$ (рис. 11.11, *в*).

Линейные напряжения на фазах обмотки статора АТД $u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$, $u_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$, $u_{bc} = \varphi_b - \varphi_c$. Они имеют вид прямоугольных импульсов длительностью 120° и амплитудой U_d .

Мгновенные значения напряжений на фазах обмотки статора двигателя



$$u_a = \varphi_a - \varphi_0, \quad u_b = \varphi_b - \varphi_0, \quad u_c = \varphi_c - \varphi_0, \quad (11.15)$$

где φ_0 — потенциал средней точки:

$$\varphi_0 = \frac{(\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c)}{3}. \quad (11.16)$$

Потенциал φ_0 имеет вид прямоугольных импульсов с коммутационным интервалом $T/6$ (60 эл. град.) и амплитудой $U_d/6$. С учетом (11.15) и (11.16) получаем, что мгновенные значения напряжений на фазах имеют вид двухступенчатой ломаной, причем меньшая ступень имеет амплитуду $U_d/3$, а большая ступень — амплитуду $2U_d/3$. Как и в случае однофазного инвертора, *изменяя коммутационный интервал $T/6$, можно менять частоту напряжения на выходе инвертор $f_1 = 1/T$ в любых пределах.*

Рассмотрим работу инвертора начиная с момента $\omega t = 180^\circ$. Сразу же после выключения транзистора V1 и включения V2 произошло изменение полярности напряжения фазы a . Поскольку обмотка имеет индуктивность, после выключения транзистора V1, ток фазы a на интервале угла γ сохраняет прежнее направление. Транзистор V2 не может проводить ток фазы a такого направления. Поэтому после выключения транзистора V1 вступает в работу диод VD2, через который ток фазы a протекает на интервале γ . К транзистору V2 в это время приложено обратное напряжение, равное падению напряжения на диоде VD2.

Напряжение на фазе a при этом равно — $U_d/3$. Отсюда следует, что в режиме 180-градусного управления ключами выходное напряжение АИН (значение и форма) не зависит от индуктивности нагрузки, т.е. АИН обладает свойствами источника напряжения.

Мгновенное значение фазного напряжения на выходе АИН может быть представлено в виде гармонического ряда

$$u_1 = \frac{2}{\pi} U_d \sin(\omega t) + \frac{2}{v\pi} U_d \sum_{k=5}^{\infty} \sin(v\omega t), \quad (11.17)$$

где $v = 5, 7, 11, 13$ — т.е. в фазном напряжении на выходе АИН присутствуют только нечетные и некратные трем высшие гармонические составляющие.

Первое слагаемое в (11.17) соответствует основной гармонической напряжению инвертора. Соотношения между постоянной составляющей напряжения на входе инвертора U_d , амплитудным U_{1m}

и действующим U_1 значениями основной гармонической выходного напряжения АИН имеют вид:

$$\begin{aligned} U_{1m} &= \frac{2}{\pi} U_d \approx 0,63 U_d; \\ U_1 &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d \approx 0,45 U_d. \end{aligned} \quad (11.18)$$

Кривая фазного тока обмотки статора двигателя на каждом участке коммутации транзисторов зависит от значений фазного напряжения и нагрузки (рис. 11.11, *в*). Мгновенные значения фазного тока также можно представить в виде основной составляющей тока $i_1(\omega t)$ и суммы высших гармонических составляющих $i_k(\omega t)$:

$$i_1 = i_1(\omega t) + \sum_{k=5}^{\infty} i_k(\omega t).$$

Значение среднего тока фазы на выходе инвертора I_1 можно получить, исходя из следующих соображений. Мощность постоянного тока на входе в инвертор $P_d = U_d I_d$. Пренебрегая потерями в инверторе активную мощность на его выходе (и на входе АД) можно записать как $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos(\varphi)$, где $m_1 = 3$ и $\cos(\varphi)$ — число фаз обмотки статора и коэффициент мощности АД. Поскольку $P_d \approx P_1$ и учитывая, что $U_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d$, средний ток фазы на выходе инвертора

$$I_1 = \frac{U_d I_d}{m_1 U_1 \cos(\varphi)} = \frac{U_d I_d}{m_1 \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d \cos(\varphi)} = \frac{\sqrt{2} \pi I_d}{2 m_1 \cos(\varphi)}. \quad (11.19)$$

Таким образом, АИН формирует на выходе переменное напряжение прямоугольно-ступенчатой формы, а форма кривой фазного тока определяется свойствами нагрузки.

11.4. Инвертор как преобразователь амплитуды напряжения

При использовании в ПЧ автономных инверторов напряжения применяют два основных способа регулирования амплитуды выходного напряжения (напряжения на обмотке статора АД) [33].

1. Амплитудный способ, при котором амплитуда выходного напряжения регулируется путем изменения напряжения на входе инвертора U_d (см. п. 11.2.1).

При амплитудном регулировании выходного напряжения частота коммутаций ключей одной фазы инвертора равна частоте основной гармонической тока статора f_1 , а форма кривых фазного и линейного напряжения соответствует диаграммам, представленным на рис. 11.11, *в*. Недостатком амплитудного способа регулирования является повышенный уровень пульсаций момента асинхронного тягового двигателя на режиме пуска.

2. Широтно-импульсный способ, при котором выходное напряжение регулируется методом ШИМ при неизменном входном напряжении U_d путем многократного переключения ключей инвертора за один период выходного напряжения (см. п. 1.8). Инвертор, в котором применяют такой способ регулирования, называют *инвертором с широтно-импульсной модуляцией*.

Для питания асинхронных тяговых двигателей в АИН используют два вида ШИМ: *синусоидальную* и *прямоугольную*. Прямоугольная ШИМ реализуется проще и называется *широтно-импульсным регулированием* (ШИР).

Современные ПЧ с функцией широтно-импульсного регулирования амплитуды выходного напряжения практически повсеместно используются в асинхронном приводе мощностью от 0,5 до 100 000 кВт. Современные инверторы могут работать с частотой коммутации ключей 2—20 кГц, что позволяет обеспечить высокую динамику привода и сформировать на обмотках статора двигателя практически синусоидальные напряжения и токи, работая в режиме источника напряжения или в режиме источника тока.

11.4.1. Принцип широтно-импульсной модуляции однофазного синусоидального напряжения

На рис. 11.12, *а*, показана принципиальная схема однофазного инвертора, работающего на активно-индуктивную нагрузку r_1-L_1 [31]. Инвертор включен на источник постоянного напряжения U_d . Для управления ключами инвертора используется генератор пилообразного сигнала ГПС, генерирующий пилообразное переменное напряжение u_s (напряжение *линейной развертки*) с частотой f_s , которая называется *несущей частотой*. Логический сигнал

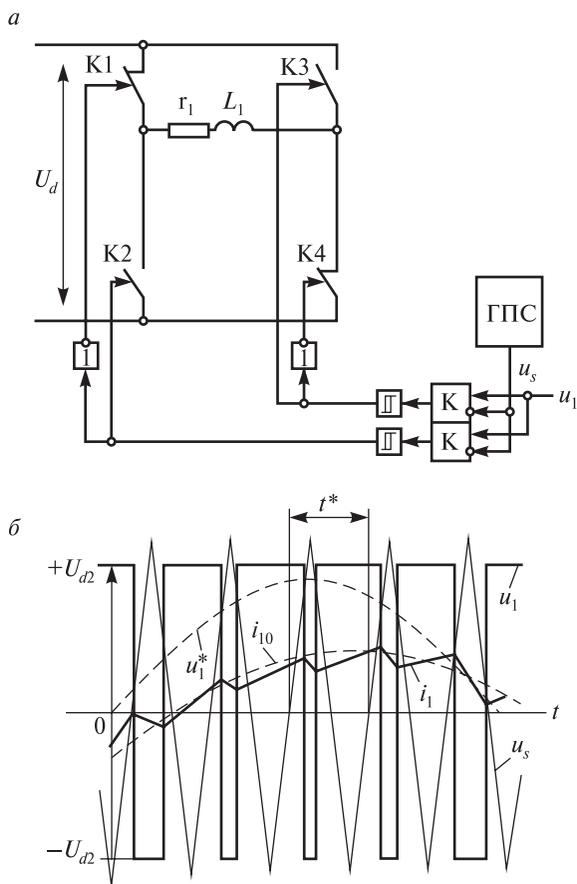


Рис. 11.12. К работе системы широтно-импульсной модуляции фазного напряжения автономным инвертором:
 а — принципиальная схема однофазного инвертора; б — диаграмма работы инвертора при широтно-импульсной модуляции напряжения

управления ключами формируется компараторами К (релейными регуляторами). На входы компараторов К подается синусоидальный сигнал заданного напряжения u_1^* (модулирующий сигнал) с заданной частотой f_1^* и сигнал u_s (рис. 11.12, б). Отношение амплитуд этих сигналов называется глубиной модуляции $\mu = \frac{(U_1^*)_м}{(U_s)_м}$.

Компаратор определяет знак разности $(u_1^* - u_s)$ и определяет управление ключами

$$\text{состояния ключей} = \begin{cases} \text{замкнуты ключи K1 и K4, если } u_1^* - u_s > 0; \\ \text{замкнуты ключи K3 и K2, если } u_1^* - u_s < 0. \end{cases}$$

На выходе компараторов установлены двухпозиционные реле с гистерезисом. Наличие гистерезиса необходимо для исключения режима «звонковой работы» при переключении компаратора.

Принцип формирования синусоидального напряжения на нагрузке заключается в том, что с частотой f_s ключи K1—K4 изменяют направление напряжения на нагрузке.

Если мгновенные значения сигналов задания и развертки таковы, что $u_1^* > u_s$, то реле переключает ключи и обмотка статора оказывается подсоединенной к положительному полюсу источника постоянного тока $(+U_d/2)$ (в соответствии со схемой рис. 11.12, а). В случае $u_1^* < u_s$, обмотка статора подключается к отрицательному полюсу источника $(-U_d/2)$. В результате напряжение на нагрузке u_1 формируется из прямоугольных импульсов с частотой f_s . Среднее значение напряжения u_1 на периоде развертки t^* равно среднему значению сигнала задания u_1^* (см. рис. 11.12, б), а основная гармоническая напряжения u_1 совпадает по фазе и амплитуде с напряжением задания u_1^* . Изменяя амплитуду задания u_1^* можно в любом диапазоне управлять значением амплитудой напряжения на фазе инвертора u_1 . В инверторе с ШИМ на одном интервале t^* выполняется две коммутации ключей, а за период T таких коммутаций выполнится $2n_k$, где n_k — кратность частоты коммутаций. Таким образом, $T = n_k t^*$, а несущая частота определится как $f_s = \frac{1}{t^*} = n_k f_1$.

Фазный ток i_1 на межкоммутационных интервалах формируется из участков экспонент (см. рис. 11.12, б). При этом, если частота сигнала развертки $f_s \geq 10f_1^*$, то кривая тока i_1 более чем на 99 % состоит из основной гармонической i_{10} .

11.4.2. Принцип широтно-импульсной модуляции трехфазного синусоидального напряжения

В соответствии с алгоритмом 180° управления в трехфазном АИН одновременно замыкаются два нечетных ключа и один четный ключ или два четных ключа и один нечетный ключ (рис. 11.13, а) [33]. На каждом интервале коммутации две фазы обмотки статора соединяются параллельно и подключаются последовательно к третьей фазе (рис. 11.13, б). При этом на разных межкоммутационных интервалах

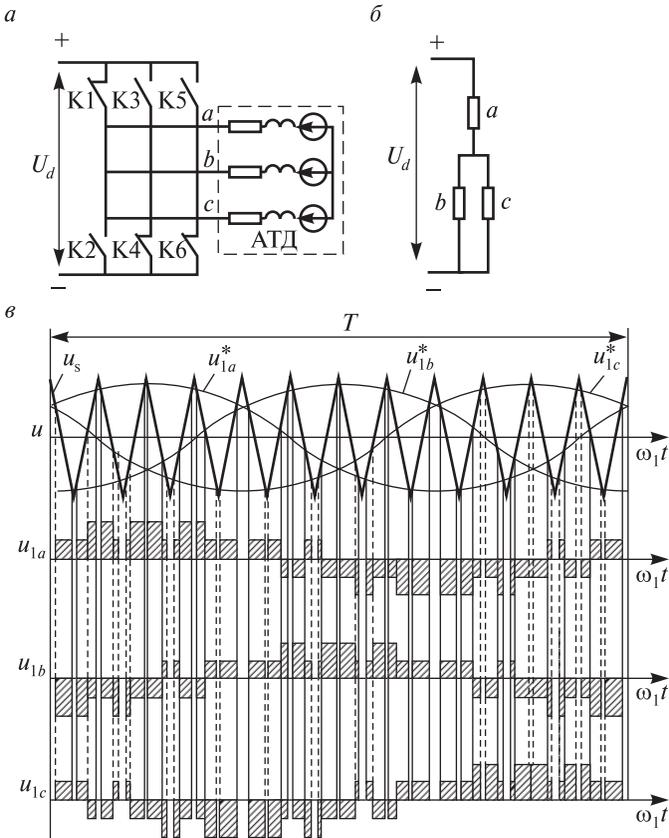


Рис. 11.13. Принципиальная схема трехфазного АИН, работающего на асинхронный тяговый двигатель (а); схема соединения фаз двигателя на межкоммутационном интервале ключей инвертора (б); диаграммы формирования фазных напряжений на обмотке статора двигателя методом ШИМ (в)

лах амплитудные значения фазного напряжения могут достигать значений $\pm U_d/3$ или $\pm 2U_d/3$ (см. рис. 11.11, в). Если же одновременно замыкаются три четных или нечетных ключа, то все три фазы оказываются соединенными параллельно и отключенными от напряжения источника питания U_d .

На рис. 11.13, в, представлены диаграммы формирования трехфазного напряжения методом ШИМ. По значениям напряжений сигнала развертки u_s и модулирующих сигналов фазных напряжений u_{1a}^* , u_{1b}^* и u_{1c}^* происходит управление ключами К1—К6, в результате чего фактическое фазное напряжение на статорной обмотке двигателя формируется из импульсов амплитудой $\pm U_d/3$, $\pm 2U_d/3$ и интервалов с нулевым входным напряжением.

Таким образом, управление выходным напряжением u_1 осуществляется изменением соотношения между интервалами подключения фазы двигателя к «плюсу» и «минусу» источника питания в течение одного периода T . Тем самым изменяют глубину регулирования выходного напряжения, которая определяется коэффициентом регулирования K_p . Действующее значение первой гармоники фазного напряжения при использовании ШИМ в инверторе в соответствии с (11.18) $U_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d K_p$, а среднее значение выходного тока в соответствии с (11.19) [33]

$$I_1 = \frac{U_d I_d}{m_1 U_1 \cos(\varphi)} = \frac{U_d I_d}{m_1 \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d K_p \cos(\varphi)} = \frac{\sqrt{2} \pi I_d}{2 m_1 K_p \cos(\varphi)}.$$

Коэффициент регулирования изменяется в диапазоне $0 \leq K_p \leq 1$. При $K_p = 0$ напряжение на выходе инвертора $U_1 = 0$; ток в промежуточном звене постоянного тока $I_d = 0$. Значение $K_p = 1$ означает, что регулирование способом ШИМ завершилось и частота коммутаций ключей фазы равна f_1 . При этом кривые фазного напряжения и тока соответствуют диаграммам, представленным на рис. 11.11, в.

Очевидно, что система управления ключами инвертора чаще всего реализуется методами цифровой обработки информации.

Управление инвертором способом ШИМ применяют для решения двух задач: изменения первой гармонической выходного напряжения u_1 и приближения формы кривой фазного тока двигателя к

синусоидальной. При решении второй задачи кратность коммутаций ключей должна быть достаточно большой. Но увеличение частоты коммутаций транзисторов инвертора влечет за собой возрастание потерь и снижение КПД инвертора.

По этим причинам высокие значения кратности коммутаций транзисторов используют только при малых выходных частотах напряжения инвертора при пуске АТД (рис. 11.14). В начальной стадии пуска при $f_1 = 1\text{--}10$ Гц кратность коммутаций ключей инвертора n_k может изменяться от 200 до 20 и обеспечивается хорошее приближение формы тока фазы двигателя к синусоидальной. По мере возрастания частоты напряжения (тока) обмотки статора кратность коммутаций уменьшают до значений $n_k = 3$. В зоне частот $f_1 > 50$ Гц кратность коммутаций $n_k = 1$.

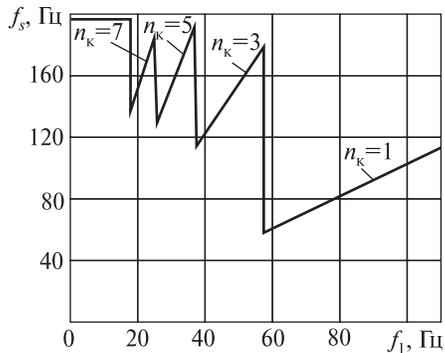


Рис. 11.14. Зависимость частоты коммутации ключей АИН в зависимости от частоты фазного напряжения обмотки статора АТД

11.5. Системы частотного управления асинхронным тяговым двигателем

До середины 70-х гг. прошлого столетия частотное (модульное) управление было основным в асинхронном электроприводе, так как позволяло просто решать многие технические задачи. Это относится в первую очередь к приводам с малым диапазоном регулирования и низкими требованиями к динамике. Термин «модульное управление» связан с тем, что управление моментом двигателя осуществляется изменением модуля напряжения (или тока) статора в зависимости от частоты питающего напряжения.

11.5.1. Регулирование по абсолютному скольжению

Для устойчивой работы асинхронного двигателя важно, чтобы автоматически устанавливалось равновесие механического и нагрузочного моментов. С увеличением нагрузки на валу двигателя должен возрастать и его механический момент. В узком диапазоне

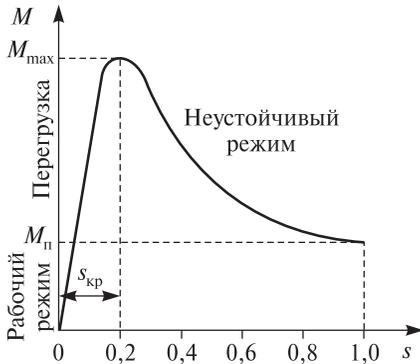


Рис. 11.15. Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения при постоянных значениях частоты f_1 и амплитуды U_1 питающего напряжения:

M_n — пусковой момент; $s_{кр}$ — критическое скольжение

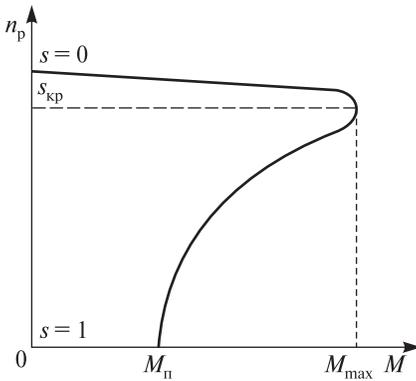


Рис. 11.16. Механическая характеристика асинхронного двигателя при постоянных значениях частоты f_1 и амплитуды U_1 питающего напряжения:
 n_p — частота вращения ротора

скольжения так и происходит: при увеличении нагрузки частота вращения ротора уменьшается, т.е. возрастает скольжение, а повышение скольжения вызывает увеличение механического момента двигателя по характеристике $M = f(s)$ (рис. 11.15). Однако устойчивое увеличение момента возможно только в очень узком диапазоне скольжения $0 < s < s_{кр}$, где $s_{кр}$ — значение критического скольжения. За границей этого диапазона равновесие моментов не восстанавливается и ротор двигателя останавливается (двигатель «опрокидывается»).

Для целей электропривода большое значение имеет механическая характеристика электродвигателя, т.е. зависимость $M = f(n_p)$, где n_p — частота вращения ротора (рис. 11.16). Она определяется при постоянной частоте вращения поля (а соответственно и частоте питающего напряжения f_1), поэтому отличается от характеристики $M = f(s)$ только положением относительно осей координат. Именно механические характеристики АД на участках устойчивой работы формируют тяговую характеристику локомотива (рис. 11.17).

Наличие режимов неустойчивой работы асинхронного двигателя предъявляют особые требования к управлению его моментом в системах электропривода. Как известно, электромагнитная мощность асинхронного двигателя

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_n,$$

где $M_{\text{эм}}$ — модуль электромагнитного момента двигателя;

$$\omega_n = \frac{2\pi f_1}{p} \text{ — угловая скорость магнитного поля двигателя;}$$

p — число пар полюсов обмотки статора.

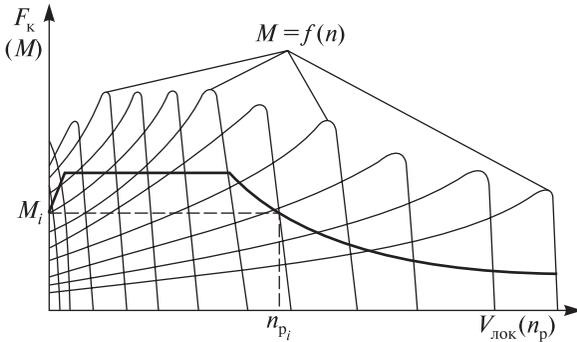


Рис. 11.17. Формирование тяговой характеристики локомотива из механических характеристик тягового асинхронного двигателя

Механическая мощность на валу двигателя зависит от угловой скорости вращения ротора ω_p

$$P_2 = M_{\text{эм}} \omega_p.$$

Поскольку в роторе асинхронного двигателя магнитные потери практически равны нулю, а механические потери очень малы, приблизительно можно считать, что разность между его электромагнитной и механической мощностью составляют электрические потери в роторе $\Delta P_{2\text{эл}}$ [2]

$$P_{\text{эм}} - P_2 \approx \Delta P_{2\text{эл}} = m_1 (I_2')^2 r_2' = m_1 \left(\frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right)^2 r_2',$$

где I_2' — приведенный ток фазы обмотки ротора;
 U_1 — фазное напряжение обмотки статора;
 r_1, x_1 — активное и реактивное сопротивления фазы обмотки статора;
 r_2', x_2' — активное и реактивное сопротивления фазы обмотки ротора, приведенные к параметрам фазы обмотки статора;
 s — относительное скольжение.

После преобразования получаем

$$M_{\text{эм}}(\omega_n - \omega_p) = M_{\text{эм}}(\omega_n - \omega_p) \frac{\omega_n}{\omega_n} = M_{\text{эм}} s \omega_n = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

Откуда электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{эм}} \approx \frac{1}{s \omega_n} \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

или

$$M_{\text{эм}} \approx \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \frac{r_2'}{s}. \quad (11.20)$$

Из (11.20) следует, что асинхронный двигатель является трех-параметрической электромагнитной системой, так как его момент определяется значениями трех параметров режима работы $M_{\text{эм}} = f(U_1, f_1, s)$. В частности, одно и то же значение момента можно получить при разных значениях частоты и амплитуды фазного напряжения (или фазного тока) обмотки статора. Иллюстрацией этому является *U-образная характеристика* асинхронного двигателя, которая получается при постоянных значениях $M_{\text{эм}}$ и f_1 (рис. 11.18). При изменении значения скольжения s значение фазного тока статора I_1 будет меняться, достигая своего минимума при оптимальном значении скольжения $s_{\text{опт}}$ [33].

Зависимость $\eta = f(s)$ при $M_{\text{эм}} = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ называется *П-образной характеристикой* асинхронного двигателя (рис. 11.18). Если пренебречь магнитными и механическими потерями, которые

в тяговом двигателе не превышают 15 %, то можно считать, что минимальному значению тока статора $I_{1\min}$ будет соответствовать максимальное значение его КПД η_{\max} . Очевидно, чтобы двигатель наиболее эффективно использовать в энергетической цепи локомотива, система управления должна обеспечить его работу по экстремумам U - или Π -образных характеристик.

Каждая точка тяговой характеристики локомотива

$\{V_{\text{лок } i}; F_{Ki}\}$ определяется значениями $\{n_{pi}; M_i\}$ (см. рис. 11.17), что позволяет установить значение $s_{\text{опт } i}$ (см. рис. 11.18). В соответствии с (11.13) на каждой точке тяговой характеристики частота питающего напряжения определится как

$$f_{li} = \frac{p n_{pi}}{1 - s_{\text{опт } i}},$$

возможный момент двигателя $M_i = f(I_{1i\min}, f_{li}, s_{\text{опт } i})$. Это значит, что для формирования тяговой характеристики локомотива необходимо независимо управлять значением частоты фазного напряжения f_1 — обеспечивая заданную скорость движения, и модулем амплитуды тока обмотки статора I_1 (или напряжения на обмотке статора) — обеспечивая заданное значение силы тяги. В соответствии с требованием независимого управления значениями f_1 и I_1 система управления асинхронным тяговым приводом локомотива должна иметь два контура, а закон управления — обеспечивать функциональную связь между контурами управления частотой и модулем тока (напряжения) обмотки статора (так как момент зависит от частоты f_1).

11.5.2. Закон управления М.П. Костенко

В 1925 г. академик М.П. Костенко сформулировал закон оптимального управления асинхронным двигателем. Закон М.П. Костенко справедлив при следующих условиях:

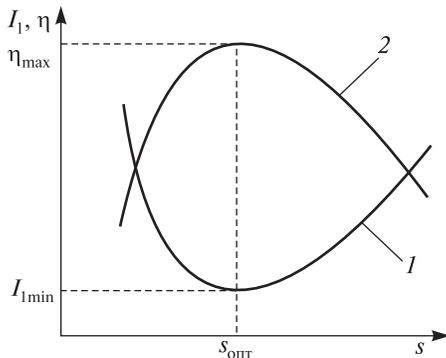


Рис. 11.18. U -образные (1) и Π -образные (2) характеристики асинхронного электродвигателя

- трехфазное синусоидальное напряжение на обмотке статора двигателя;
- ненасыщенная магнитная цепь (пренебрежимо малое значение тока холостого хода);
- пренебрежимо малое значение активного r_1 и реактивного x_1 сопротивлений фазы обмотки статора;
- постоянное значение абсолютного скольжения $\beta_s = s \cdot f_1$ (при $s \leq s_{кр}$).

Этот закон сформулирован следующим образом: чтобы обеспечить работу асинхронного двигателя с максимальными значениями КПД, коэффициента мощности и перегрузочной способностью при разных значениях f_1 и $M_{эм}$, напряжение на обмотке статора нужно изменять по зависимости

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \sqrt{\frac{M'_{эм}}{M_{эм}}}, \quad (11.21)$$

где U'_1 и $M'_{эм}$ — величины, соответствующие значению f'_1 , а U_1 и $M_{эм}$ — соответствующие значению f_1 .

Зависимость (11.21) вытекает из следующих соображений. С учетом того, что $r_1 \rightarrow 0$, $x_1 \rightarrow 0$ и $x'_2 = 2\pi f_1 L_{2\sigma}$ из (11.11) имеем

$$\begin{aligned} M_{эм} &\approx \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x'_2)^2} \cdot \frac{r'_2}{s} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{\frac{(r'_2)^2 + (sx'_2)^2}{s^2}} \cdot \frac{r'_2}{s} = \\ &= \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 r'_2 s}{(r'_2)^2 + (s2\pi f_1 L_{2\sigma})^2}. \end{aligned}$$

Выполнив подстановку $sf_1 = \beta_s$ и домножив дробь на f_1 , получим

$$M_{эм} \approx \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 r'_2 s}{(r'_2)^2 + (s2\pi f_1 L_{2\sigma})^2} \cdot \frac{f_1}{f_1} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1^2} \cdot \frac{U_1^2 r'_2 \beta_s}{(r'_2)^2 + (\beta_s 2\pi L_{2\sigma})^2}.$$

Компонуя переменные и постоянные величины

$$\frac{M_{\text{эм}} f_1^2}{U_1^2} = \frac{m_1 p}{2\pi} \cdot \frac{r_2' f_s}{(r_2')^2 + (f_s 2\pi L_{2\sigma})^2} = \text{const.} \quad (11.22)$$

Зависимость (11.22) и является преобразованным выражением закона М.П. Костенко; в частности, для управления силой тяги локомотива из него следует (рис. 11.19):

– при трогании локомотива, когда требуется поддерживать $F_{\text{к}} = F_{\text{сц}} = \text{const}$ (где $F_{\text{сц}}$ — сила сцепления колеса с рельсом) и момент двигателя также должен оставаться постоянным $M_{\text{эм}} = \text{const}$, алгоритм управления двигателем выражается

$$\text{зависимостью } \frac{U_1}{f_1} \sim \sqrt{M_{\text{эм}}} = \text{const};$$

– работа локомотива с постоянной мощностью реализуется при алгоритме управления двигателем

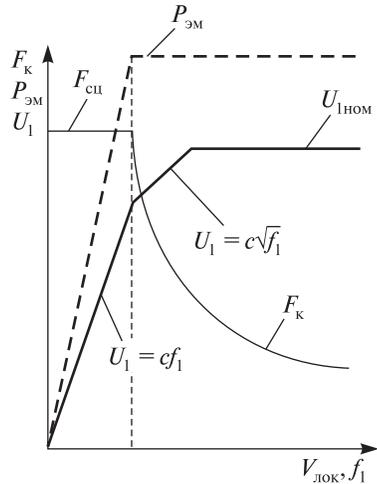


Рис. 11.19. Зависимости $U_1(f_1)$ на разных участках тяговой характеристики локомотива

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} \sim \sqrt{f_1 M_{\text{эм}}} \sim \sqrt{P_{\text{эм}}} = \text{const} \quad (11.23)$$

или, что примерно то же самое $\frac{U_1}{\sqrt{V_{\text{лок}}}} = \text{const};$

– когда напряжение при увеличении скорости достигает номинального значения и должно оставаться в дальнейшем постоянным, алгоритм управления двигателем должен быть следующим: $f_1 \sqrt{M_{\text{эм}}} \sim U_{1\text{ном}} = \text{const}$ (или $V_{\text{лок}} \sqrt{F_{\text{к}}} = \text{const}$).

Алгоритм М.П. Костенко в настоящее время используется, как правило, для управления промышленными асинхронными двигателями невысокой мощности.

11.6. Системы векторного управления асинхронным тяговым двигателем

11.6.1. Система трансвекторного управления моментом двигателя

Полная управляемость электроприводом обеспечивается, если обеспечивается управление электромагнитным моментом двигателя [31]. Из (11.11) и табл. 11.1 следует, что его момент образуется в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора или потокосцепления одного и тока другого. Для управления моментом обе величины должны быть независимы друг от друга, и тогда одну из них можно поддерживать постоянной, а с помощью другой осуществлять регулирование. В двигателе постоянного тока существуют две отдельные электрические цепи — обмотки якоря и обмотки возбуждения — для управления моментом. В асинхронных двигателях с короткозамкнутой обмоткой ротора есть только одна цепь — обмотка статора, в которой объединены обе составляющие, и в задачу системы управления входит функция их разделения.

В 1971 году фирма *Siemens* запатентовала принцип *трансовекторного управления* асинхронным двигателем FOC (*field-oriented control*), сформулированного *F. Blaschke*. Его математической основой являются уравнения электромагнитных процессов двигателя в векторной форме, представленные в системе координат, одна из осей которой совмещена с вектором вращающегося магнитного поля (ориентирована по вектору поля). Отсюда и происходит название способа. Этот метод управления моментом успешно используется до настоящего времени.

В п. 11.1 было показано, что электромагнитный момент асинхронного двигателя может быть представлен любой парой векторов токов и потокосцеплений его обмоток (11.11). Однако от выбора векторов в значительной мере зависит степень сложности системы управления моментом. Желательно, чтобы эти векторы были наблюдаемы, т.е. чтобы их можно было непосредственно измерить и воздействовать на них при управлении моментом. У двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора есть только две такие величины — это напряжение и ток статора, и только одна из них, а именно ток статора, может входить в уравнение момента. Тогда другой величиной может быть только ток ротора или какое-либо

потокосцепление. Ток ротора принципиально ненаблюдаем. Поэтому для выбора остаются три потокосцепления: статора, ротора и основного потока (см. табл. 11.1).

Простейший вид имеют уравнения электромагнитных процессов в двигателе, если их представить через вектор потокосцепления обмотки ротора $\bar{\Psi}_2$. То обстоятельство, что $\bar{\Psi}_2$ невозможно измерить не является препятствием, так как потокосцепление $\bar{\Psi}_2$ легко вычисляется по значениям $\bar{\Psi}_1$ при решении (11.10).

В соответствии с (11.11) и табл. 11.1 в неподвижной системе координат $\alpha\beta$ модуль электромагнитного момента будет иметь вид

$$m_{эм} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_2} |\bar{\Psi}_2 \bar{i}_1| = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2\alpha} i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} i_{1\alpha}).$$

Однако векторы $\bar{\Psi}_2$ и \bar{i}_1 вращаются в пространстве с угловой скоростью $\omega_n = 2\pi f_1 / p$. Поэтому если для описания процессов выбрать неподвижную систему координат, то проекциями векторов $\bar{\Psi}_2$ и \bar{i}_1 в соответствии с (11.3) будут мгновенные значения тока фазы и потокосцепления фазы, которые являются синусоидальными функциями времени и регулирование таких величин будет сложной технической задачей. В случае же выбора системы координат dq , вращающейся в пространстве с синхронной частотой ω_n , проекции векторов будут постоянными величинами, и управление моментом двигателя будет не сложнее, чем управление токами якоря и возбуждения двигателя постоянного тока (рис. 11.20).

Задачу управления можно еще более упростить, если совместить какую-либо ось вращающейся системы координат с одним из двух векторов, например совместить ось d с вектором потокосцепления $\bar{\Psi}_2$. Тогда проекция вектора $\bar{\Psi}_2$ на эту ось будет равна его модулю, а другая проекция будет равна нулю. При этом уравнение электромагнитного момента примет вид

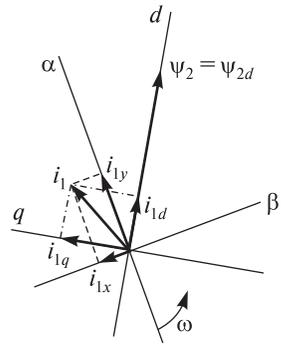


Рис. 11.20. Представление векторов тока обмотки статора \bar{i}_1 и потокосцепления обмотки ротора $\bar{\Psi}_2$ асинхронного двигателя в неподвижной ($\alpha\beta$) и вращающейся (dq) системах координат при использовании трансвекторного алгоритма управления асинхронным двигателем

$$m_{\text{эм}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_2} |\bar{\Psi}_2 \bar{i}_1| = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2d} i_{1q}). \quad (11.24)$$

Выражение (11.24) в принципе не отличается от выражения для расчета электромагнитного момента двигателя постоянного тока (4.4), и основной задачей системы управления будет определение проекций Ψ_{2d} и i_{1q} . Если при этом управление построить так, чтобы потокосцепление обмотки ротора сохранялось постоянным на всех режимах работы двигателя, то регулирование его момента сведется к управлению поперечной составляющей тока статора i_{1q} .

Пространственное положение вектора $\bar{\Psi}_2$ в каждый момент времени во вращающейся системе координат можно определить по мгновенным значениям фазных напряжений и токов обмотки статора асинхронного двигателя.

11.6.2. Система прямого управления моментом двигателя

В последнее время с развитием цифровых устройств обработки информации появился другой способ управления моментом двигателя, также основанный на векторном представлении электромагнитных величин, но алгоритм управления которого отличается от трансвекторного. Этот способ называется *прямым управлением моментом* — DTC (*direct torque control*); принцип такого управления был опубликован в 1985 г., и через 10 лет появились первые сообщения о промышленных образцах систем управления фирмы АВВ, использующих алгоритм DTC [31].

Задачей прямого управления моментом является повышение быстродействия системы управления асинхронным двигателем. В отличие от систем трансвекторного управления, где изменение момента выполняется путем изменения тока статора, который, таким образом, является управляемой величиной, в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора. Изменение потокосцепления достигается путем переключения ключей инвертора напряжения, от которого питается асинхронный двигатель.

В основу работы системы DTC положено уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя

$$m_{эм} = \frac{m_1}{2} p \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} |\bar{\Psi}_1 \bar{\Psi}_2| = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} \Psi_1 \Psi_2 \sin \vartheta, \quad (11.25)$$

где ϑ — угол между обобщенными векторами потокосцеплений статора $\bar{\Psi}_1$ и ротора $\bar{\Psi}_2$.

Если модули векторов Ψ_1 и Ψ_2 поддерживать постоянными, то значением момента можно управлять, изменяя угол ϑ .

Рассмотрим схему, представленную на рис. 11.21. Фазы статорной обмотки асинхронного двигателя подключены на источник постоянного напряжения U_d через систему ключей К1—К6. Если одновременно замкнуть ключи К3, К2, К6, то к фазам обмотки статора будут приложены напряжения с мгновенными значениями u_{1a} , u_{1b} и u_{1c} . Напряжения u_{1a} , u_{1b} и u_{1c} образуют обобщенный вектор напряжения обмотки статора $\bar{u}^1 = \frac{2}{3}(\bar{1}u_{1a} + \bar{a}u_{1b} + \bar{a}'u_{1c})$. Если теперь вместо ключей К3, К2, К6 замкнуть ключи К3, К2, К5, то вектор напряжения повернется на угол 60° по часовой стрелке и займет положение \bar{u}^2 и т.д. Таким образом, переключая ключи К1—К6 инвертора можно на обмотке статора сформировать восемь векторов напряжения статора $\bar{u}^0 \div \bar{u}^7$, называемых *базовыми*. Причем для поворота базового вектора напряжения необходимо переключить только один ключ инвертора. Векторы \bar{u}^0 и \bar{u}^7 называются *нулевыми*. Они получаются при замыкании ключей К1, К3, К5 и К2,

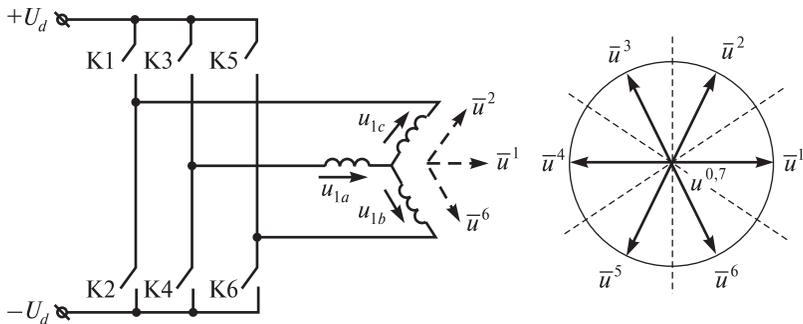


Рис. 11.21. Формирование базовых векторов напряжения обмотки статора асинхронного двигателя переключением ключей инвертора

К4, К6; в этом случае ток по обмоткам двигателя не потечет, что соответствует $\bar{u}^0 = 0$ и $\bar{u}^7 = 0$.

Для того чтобы связать уравнение момента двигателя со значением напряжения на обмотке статора, воспользуемся (11.12)

$$\bar{u}_1 = r_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt}.$$

$$\text{Откуда } \bar{\Psi}_1 = \int (\bar{u}_1 - r_1 \bar{i}_1) dt. \quad (11.26)$$

Асинхронный двигатель, как и всякая электрическая машина, является источником ЭДС, поэтому $u_1 \gg r_1 i_1$. Значит, можно считать, что $\bar{\Psi}_1 = \int \bar{u}_1 dt$, или, переходя к конечным разностям,

$$\Delta \bar{\Psi}_1 = \bar{u}_1 \Delta t. \quad (11.27)$$

Таким образом, вектор приращения потокосцепления обмотки статора $\Delta \bar{\Psi}_1$ совпадает по направлению с вектором напряжения \bar{u}_1 и пропорционален длительности его формирования Δt .

В асинхронных двигателях электрическая постоянная времени обмотки ротора значительно больше, чем обмотки статора. Поэтому считается, что после коммутации ключей инвертора обобщенный вектор потокосцепления ротора не меняется $\bar{\Psi}_2 = \text{const}$, и изменение момента двигателя $\Delta m_{\text{эм}} \approx f(\Delta \Psi_1, \Delta \vartheta)$. Поскольку в соответствии с (11.17) $\Delta \bar{\Psi}_1 = f(\bar{u}_1)$, то воздействуя на обобщенный вектор напряжения статора \bar{u}_1 , можно поддерживать постоянное значение $|\Delta \bar{\Psi}_1| = \text{const}$. При этом электромагнитный момент двигателя можно изменять так быстро, как только быстро можно изменять значение угла ϑ , т.е. переключать ключи К1—К6.

На рис. 11.22 показан обобщенный вектор потокосцепления статора $\Delta \bar{\Psi}_1$, который в данный момент расположен в секторе I [31]. В процессе регулирования значения $m_{\text{эм}}$ напряжение на обмотке статора может переключаться только в соответствии с базовыми векторами. Переключение происходит только тогда, когда момент двигателя или потокосцепление статора отличаются от заданного значения на величину, большую, чем допустимая ошибка.

Для того чтобы показать, как переключение базовых векторов напряжений влияет на значение электромагнитного момента воспользуемся зависимостью (11.25), из которой следует, что при за-

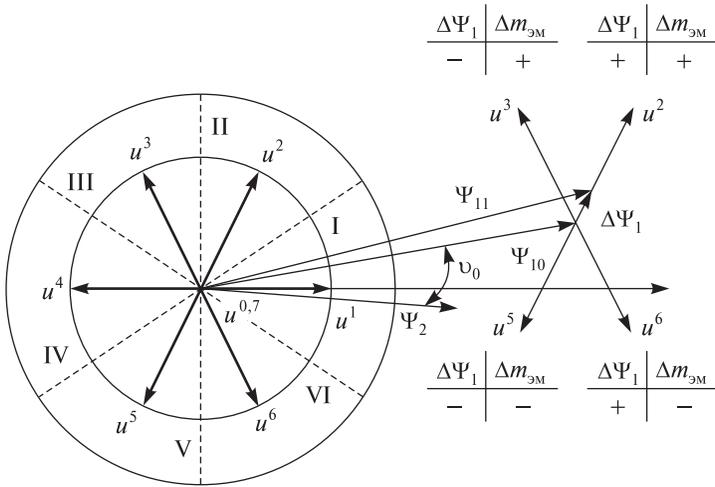


Рис. 11.22. К принципу прямого управления моментом асинхронного двигателя

данных значениях $|\bar{\Psi}_1|$ и $|\bar{\Psi}_2|$ момент возрастает, если возрастает угол между этими векторами, т.е. если вектор $\bar{\Psi}_1$ поворачивается по направлению вращения двигателя.

Пусть в текущий момент векторы $\bar{\Psi}_{10}$ и $\bar{\Psi}_2$ занимали положение, как показано на рис. 11.22; при этом угол между ними имеет значение ϑ_0 . Перенесем диаграмму базовых векторов напряжения в конец вектора $\bar{\Psi}_{10}$ (кроме векторов \bar{u}^1 и \bar{u}^4 , так как при расположении вектора $\bar{\Psi}_{10}$ в секторе I их использование не дает однозначного решения при управлении моментом). Если теперь на фиксированное время Δt замкнуть ключи К3, К2, К5, сформируется вектор \bar{u}^2 . Это приведет к увеличению вектора потокосцепления обмотки статора на $\Delta\bar{\Psi}_1 = \bar{u}^2 \Delta t$, в результате чего сформируется новый вектор $\bar{\Psi}_{11}$. Одновременно увеличится угол ϑ , и момент двигателя возрастет.

Каждый базовый вектор (см. рис. 11.22) указывает на таблички, в которых отмечены знаки приращения потокосцепления обмотки статора и электромагнитного момента двигателя, в случае переключения схемы ключей на него. Например, если в данный момент

времени $|\bar{\Psi}_1|$ велик, а $|\bar{m}_{\text{ЭМ}}|$ мал, то ключи должны переключить схему на формирование вектора \bar{u}^3 , что приведет к уменьшению потокосцепления статора и увеличению момента двигателя.

В том случае, если в текущий момент времени $|\bar{\Psi}_1|$ и $|\bar{m}_{\text{ЭМ}}|$ соответствуют заданным значениям, обмотки статора замыкаются накоротко, формируя один из нулевых базовых векторов \bar{u}^0 или \bar{u}^7 . При этом, например, $\bar{\Psi}_{11} = \bar{\Psi}_{10} + \bar{u}^0 \Delta t = \bar{\Psi}_{10} + 0 \cdot \Delta t = \bar{\Psi}_{10}$, т.е. вектор потокосцепления обмоток статора не изменит своего значения и направления, а это равносильно тому, что электромагнитный момент также не изменит своего значения. Выбор одного из двух нулевых векторов производится из условия коммутации минимального числа ключей инвертора при переходе к новому режиму управления.

Результат, полученный для сектора I диаграммы, может быть распространен на все другие секторы. В общем виде он может быть сформулирован следующим образом: электромагнитный момент двигателя увеличивается, когда вектор потокосцепления статора поворачивается по направлению вращения двигателя, и уменьшается при повороте этого вектора против направления вращения.

Таким образом, переключение ключей АИН должно осуществляться в зависимости от отклонения текущих значений Ψ_1 и $m_{\text{ЭМ}}$ от их заданных значений Ψ_1^* и $m_{\text{ЭМ}}^*$. Значения Ψ_1 и $m_{\text{ЭМ}}$ рассчитываются моделью асинхронного двигателя по текущим значениям u_{1a} , u_{1b} , u_{1c} и i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} . Выбор требуемой комбинации включения ключей инвертора производится в соответствии с таблицей оптимальных переключений. Входными величинами для таблицы служат выходные сигналы компаратора Ψ_1 и компаратора $m_{\text{ЭМ}}^*$ (рис. 11.23). На входах компараторов формируются разности заданного и фактического (рассчитанного по модели) значений величин $\Psi_1^* - \Psi_1$ и $m_{\text{ЭМ}}^* - m_{\text{ЭМ}}$. Выходной сигнал компаратора потокосцепления Ψ_1 может принимать значения 1 или 0:

$$\text{компаратор } \Psi_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \Psi_1^* \geq \Psi_1; \\ 0, & \text{если } \Psi_1^* < \Psi_1. \end{cases} \quad (11.28)$$

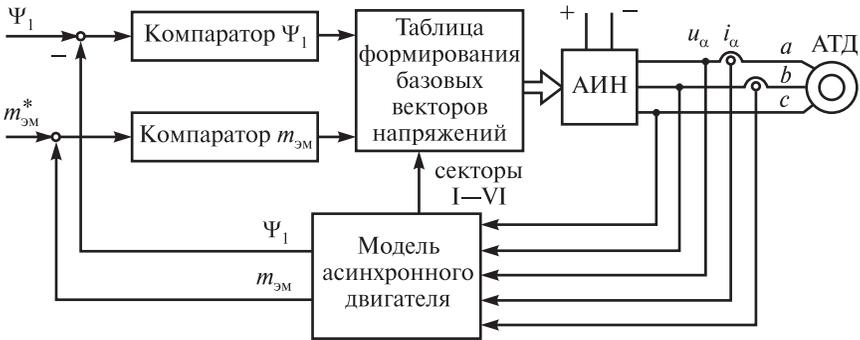


Рис. 11.23. Блок-схема реализации алгоритма прямого управления моментом асинхронного двигателя:

$m_{эм}^*$, Ψ_1^* — заданные значения электромагнитного момента и обобщенного вектора потокосцепления обмотки статора асинхронного двигателя

Выходной сигнал компаратора момента может принимать значения 1, 0, -1 , так как требования к ошибке управления моментом гораздо выше, чем при управлении потокосцеплением:

$$\text{компаратор } m_{эм} = \begin{cases} 1, & \text{если } m_{эм}^* > m_{эм}; \\ 0, & \text{если } m_{эм}^* = m_{эм}; \\ -1, & \text{если } m_{эм}^* < m_{эм}. \end{cases} \quad (11.29)$$

Знак сигнала ошибки соответствует знаку требуемого приращения величины. На основании этих сигналов можно выбрать необходимую комбинацию включения ключей К1—К6. При этом будет сформирован базовый вектор напряжения, поддерживающий допустимые отклонения $\Psi_1^* - \Psi_1$ и $m_{эм}^* - m_{эм}$. Выбор базового вектора, минимизирующего ошибку регулирования, выполняют в зависимости от текущего сектора расположения вектора $\bar{\Psi}_1$ (табл. 11.2).

В отличие от системы трансвекторного управления асинхронным двигателем, система прямого управления моментом не требует преобразования координат для описания его электромагнитных процессов.

Таблица формирования базовых векторов напряжений

Ошибка		Сектор расположения вектора $\bar{\Psi}_{10}$					
Δ_{Ψ}	Δ_m	I	II	III	IV	V	VI
+1	+1	\bar{u}^2	\bar{u}^3	\bar{u}^4	\bar{u}^5	\bar{u}^6	\bar{u}^1
	0	\bar{u}^0	\bar{u}^7	\bar{u}^0	\bar{u}^7	\bar{u}^0	\bar{u}^7
	-1	\bar{u}^6	\bar{u}^1	\bar{u}^2	\bar{u}^3	\bar{u}^4	\bar{u}^5
-1	+1	\bar{u}^3	\bar{u}^4	\bar{u}^5	\bar{u}^6	\bar{u}^1	\bar{u}^2
	0	\bar{u}^7	\bar{u}^0	\bar{u}^7	\bar{u}^0	\bar{u}^7	\bar{u}^0
	-1	\bar{u}^5	\bar{u}^6	\bar{u}^1	\bar{u}^2	\bar{u}^3	\bar{u}^4

11.7. Система управления электрической передачей переменного тока

На современных локомотивах применяется система *поосного* управления тяговыми двигателями, или система управления тяговыми двигателями одной тележки, поэтому на рис. 11.24 в качестве примера приведена принципиальная схема энергетической цепи и системы управления для одной тяговой оси тепловоза 2ТЭ25А [34]. Энергетическая цепь тепловоза с электрической передачей переменного тока состоит из дизеля Д, синхронного генератора СГ, неуправляемого выпрямителя (выпрямительной установки) ВУ, емкостного фильтра C_{ϕ} , автономного инвертора напряжения АИН и асинхронного тягового двигателя АТД; частота вращения ротора каждого двигателя тепловоза измеряется датчиком скорости ДС. Управление скоростью тепловоза осуществляется изменением частоты напряжения f_1 на обмотке статора АТД в соответствии с (11.13); управление силой тяги — системой векторного управления моментом DTC (см. п. 11.6.2). В качестве ключей АИН используются биполярные транзисторы с изолированным затвором — IGBT-транзисторы.

Основными блоками системы управления моментом двигателя являются: блок вычисления задания момента БВМЗ, блок вычисления задания потока БВПЗ, адаптивная модель асинхронного двигателя «МОДЕЛЬ АТД», блок вычисления сектора потока БВСП и блок быстродействующего логического автомата БЛА.

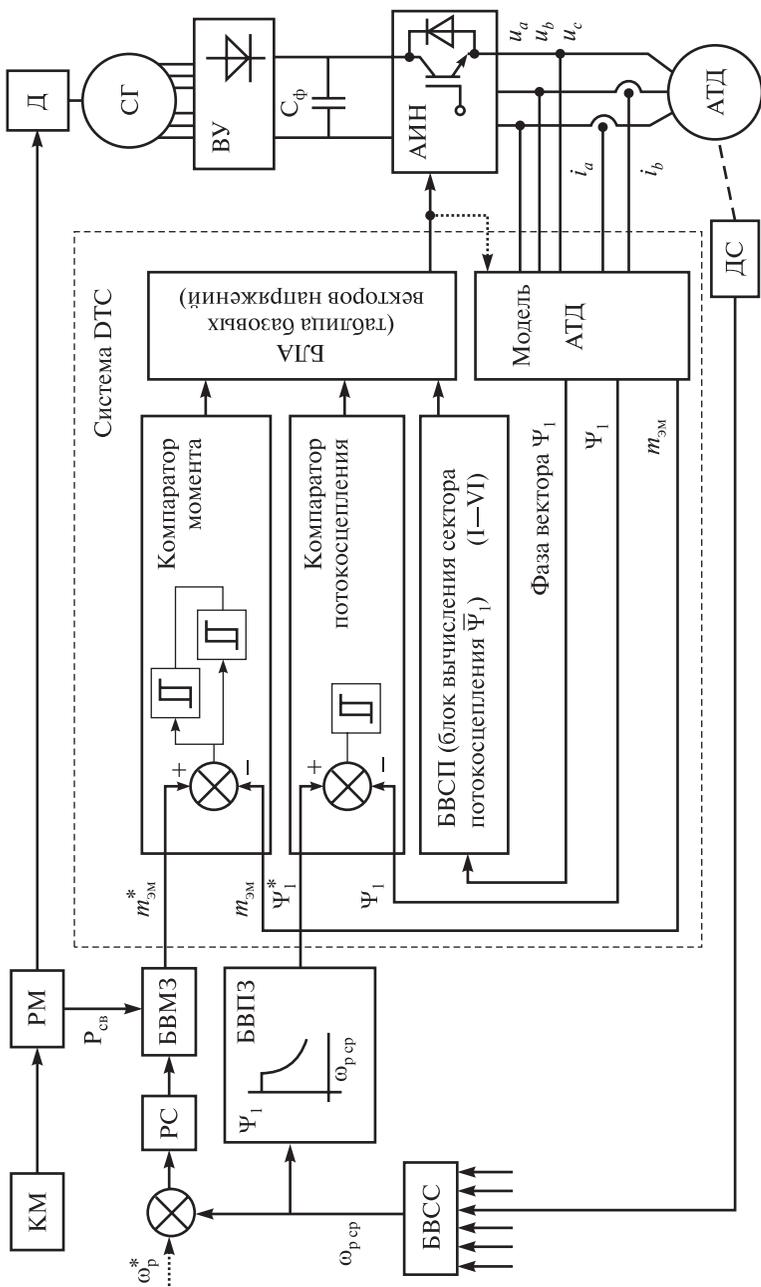


Рис. 11.24. Принципиальная блок-схема системы векторного управления моментом асинхронного тягового двигателя тепловоза

Входными сигналами для системы управления моментом является свободная мощность дизеля $P_{\text{св}}^*$ и средняя скорость вращения роторов АТД $\omega_{\text{р ср}}$. Значение $P_{\text{св}}^*$ задается регулятором мощности дизеля (РМ); значение $\omega_{\text{р ср}}$ рассчитывается блоком вычисления средней скорости БВСС по текущим значениям скоростей всех колесных пар тепловоза, измеряемых датчиками скорости ДС. Сигнал $\omega_{\text{р ср}}$ проходит через блок регулятора скорости РС, который ограничивает увеличение момента двигателя, если скорость превышает допустимое значение (или значение, установленное машинистом, $\omega_{\text{р}}^*$).

Сигналы $P_{\text{св}}^*$ и $\omega_{\text{р ср}}$ поступают в блок БВМЗ, где рассчитывается сигнал задания момента двигателя как

$$m_{\text{эм}}^* = \frac{P_{\text{св}}}{n \omega_{\text{р ср}}},$$

где n — число осей тепловоза.

Одновременно сигнал $\omega_{\text{р ср}}$ поступает в блок БВПЗ, который формирует сигнал задания потокосцепления обмотки статора двигателя Ψ_1^* . Чаще всего в память блока БВПЗ записывается электронная таблица значений Ψ_1^* в зависимости от значений $\omega_{\text{р ср}}$, элементы которой могут определяться с использованием алгоритма М.П. Костенко.

На участке ограничения силы тяги по сцеплению характеристики $F_{\text{к}}(V_{\text{лок}})$ момент АТД должен оставаться постоянным. Из (11.21) следует, что режиму постоянного момента двигателя соответствует

$$\text{его работа с } \frac{U_1}{f_1} = \text{const.}$$

Напряжение на обмотке статора определяется частотой f_1 и магнитным потоком двигателя Φ_m

$$U_1 \approx 4,44 w_1 k_1 f_1 \Phi_m, \quad (11.30)$$

где w_1, k_1 — число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора.

Значит, при $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ магнитный поток двигателя должен оставаться постоянным. Поэтому при разгоне тепловоза блок БВПЗ

формирует сигнал задания $\Psi_1^* = \text{const}$, соответствующий номинальному значению магнитного потока $\Phi_{m\text{ном}}$. В этом случае момент двигателя будет создаваться при минимально возможном токе, что позволит снизить потери энергетической цепи тепловоза.

На участке ограничения мощности характеристики $F_k(V_{\text{лок}})$ в соответствии с (11.23) $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$, т.е. $\Phi_m \sqrt{f_1} = \text{const}$ (см. 11.30).

Поскольку $f_1 = \frac{pn_p}{1-s}$ или $f_1 = \frac{p\omega_p}{2\pi(1-s)}$, блок БВПЗ сформирует сигнал задания Ψ_1^* , удовлетворяющий условию $\Psi_1^* \sqrt{\omega_{\text{р.ср}}} = \text{const}$.

Таким образом, для каждого текущего значения $(\omega_{\text{р.ср}})_i$ блоками БВМЗ и БВПЗ формируются сигналы момента $m_{\text{эм}}^*$ и потокосцепления Ψ_1^* , являющиеся сигналами задания системы ДТС.

Одновременно с этим датчиками непрерывно измеряются текущие значения напряжений на всех фазах обмотки статора двигателя u_a, u_b, u_c и токи в двух его фазах i_a, i_b ; значения этих сигналов поступают в блок «МОДЕЛЬ АТД».

В блоке «МОДЕЛЬ АТД» выполняются следующие расчеты.

1. Вычисляется текущее значение тока третьей фазы как $i_c = -(i_a + i_b)$, поскольку для трехфазных обмоток, соединенных по схеме «звезда» $i_a + i_b + i_c = 0$.

2. По значениям u_a, u_b, u_c и i_a, i_b, i_c в соответствии с (11.6) и (11.7) рассчитываются обобщенные векторы напряжения \bar{u}_1 и тока \bar{i}_1 обмотки статора, т.е. их значения и ориентация на плоскости, так как единичные векторы $\bar{j}, \bar{1}$ определяют их положение относительно осей координат.

3. По значению \bar{u}_1 и зависимости (11.27) с шагом Δt вычисляется вектор потокосцепления статора $\bar{\Psi}_1$, а соответственно его значение Ψ_1 и его ориентация (фаза).

4. Решение (11.10) позволяет рассчитать обобщенный вектор потокосцепления ротора по значениям $\bar{\Psi}_1$ и \bar{i}_1

$$\bar{\Psi}_2 = \frac{L_2}{L_m} \bar{\Psi}_1 + \left(L_m - \frac{L_1 L_2}{L_m} \right) \bar{i}_1.$$

5. По значениям $\bar{\Psi}_1$ и $\bar{\Psi}_2$ в соответствии (11.25) вычисляется текущее значение модуля электромагнитного момента двигателя

$$m_{\text{ЭМ}} = \frac{m_1}{2} p \frac{L_m}{L_1 L_2 - L_m^2} |\bar{\Psi}_1 \bar{\Psi}_2|.$$

Текущие значения $m_{\text{ЭМ}}^*$ и $m_{\text{ЭМ}}$ подаются на вход компаратора момента.

В соответствии с (11.29) компаратор момента представляет собой трехпозиционное реле, гистерезис которого определяет знак ошибки регулирования момента $\Delta_m = m_{\text{ЭМ}}^* - m_{\text{ЭМ}}$.

Текущие значения Ψ_1^* и Ψ_1 подаются на вход компаратора потокосцепления. В соответствии с (11.28) компаратор потокосцепления является двухпозиционным реле, гистерезис которого определяет знак ошибки регулирования потокосцепления $\Delta_{\Psi} = \bar{\Psi}_1^* - \bar{\Psi}_1$.

Текущая ориентация вектора $(\bar{\Psi}_{10})_i$ (сектор расположения потока обмотки статора) определяется блоком вычисления сектора потокосцепления БВСП по расчетному значению фазы обобщенного вектора $\bar{\Psi}_1$.

Выходные сигналы компараторов и блока БВСП поступают в блок быстродействующего логического автомата БЛА, переключающего ключи автономного инвертора в соответствии с табл. 11.2.

Как уже говорилось, модуль потокосцепления ротора меняется медленно, но и модуль потокосцепления статора, если рассматривать небольшой отрезок времени, так же можно считать постоянным. Поэтому быстродействие системы управления электромагнитным моментом двигателя определяется временем выбора сектора расположения базового вектора напряжения, обеспечивающего необходимые знаки приращения электромагнитного момента и модуля потокосцепления и временем коммутации ключей инвертора.

Для определения обобщенного вектора \bar{u}_1 может использоваться значение напряжения в звене постоянного тока U_d и информация о текущем состоянии ключей инвертора (указано на рис. 11.24 штриховой стрелкой). В этом случае отпадает необходимость установки датчиков для измерений напряжений фаз обмотки статора АД u_a, u_b, u_c .

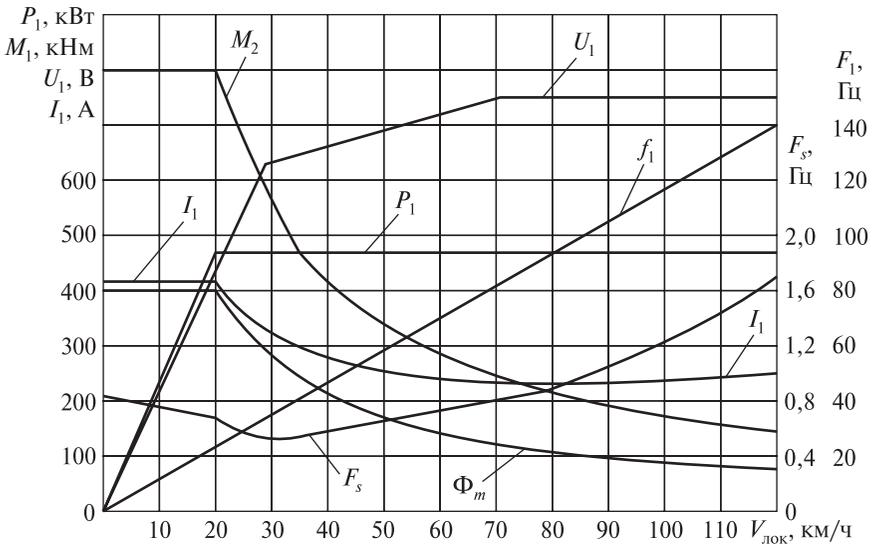


Рис. 11.25. Характеристики режимов работы асинхронного тягового двигателя ДАТ-470 в энергетической цепи тепловоза 2ТЭ25А; расчетная скорость $V_p = 24$ км/ч

На рис. 11.25 приведены характеристики режимов работы тягового асинхронного двигателя ДАТ470 в энергетической цепи тепловоза 2ТЭ25А. Из них видно, что частота напряжения на обмотке статора двигателя f_1 увеличивается пропорционально скорости движения тепловоза, т.е. $f_1 \sim n_p$. При трогании тепловоза, когда момент двигателя $M_2 = \text{const}$, амплитуда его напряжения увеличивается пропорционально скорости, т.е. $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$, а магнитный поток Φ_m остается постоянным. На рабочей части характеристики, до тех пор пока напряжение на двигателе не достигнет номинального значения, оно изменяется по алгоритму $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$, в дальнейшем его значение поддерживается постоянным, равным $U_{\text{ном}}$.

Приведенные характеристики режимов работы асинхронного двигателя в энергетической цепи тепловоза подобны характеристикам асинхронного двигателя, работающего по алгоритму управления М.П. Костенко (см. рис. 11.19).

Глава 12. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

12.1. Общие принципы построения микропроцессорной системы локомотива

Современные тенденции развития локомотивостроения предполагают широкое использование средств вычислительной техники в системах управления и регулирования энергетического оборудования. Причиной тому являются прежде всего высокая точность работы цифровых систем и низкие массо-габаритные показатели. Кроме того, цифровая автоматическая система обладает повышенной моральной стойкостью по сравнению с аналоговыми регуляторами, так как ее совершенствование связано только с перепрограммированием управляющего алгоритма [35]. Поэтому при разработке систем с микроЭВМ для локомотивов, расчетный ресурс которых составляет 40 лет, главное внимание уделяется выбору функциональной схемы, организации систем ввода-вывода, созданию программного обеспечения, отладке и тестированию оборудования.

Управление локомотивами с микроЭВМ ничем не отличается от управления локомотивами с релейными системами, а ремонт и настройка всегда сложнее, так как требуют специальных знаний персонала ремонтных бригад. Сложность эта вызвана цифровым способом представления, обработки и передачи сигналов управления и не похожа на аналоговые схемы, с которыми работали на протяжении десятков лет. Поэтому технология ремонта таких локомотивов предусматривает хорошие знания средств вычислительной техники и взаимодействие всех систем локомотива. Отказы цифровых систем породили новый круг проблем в локомотивных депо, где эксплуатируются локомотивы нового поколения.

Примером локомотивов с микроЭВМ являются тепловозы с унифицированной микропроцессорной системой управления и регулирования (УСТА) серий М62 и 2ТЭ116.

Подсистемой микропроцессорной системы управления тепловоза является система бортового диагностического устройства. Ее работа основывается на анализе возможных состояний энергетического и вспомогательного оборудования с использованием диагностических моделей. При этом алгоритм диагностирования обеспечивает:

- оперативный автоматический поиск места и определение причин отказов контролируемого оборудования локомотива, угрожающих безопасности движения или препятствующих (ограничивающих) движение;
- автоматический контроль исправности датчиков;
- облегчение условий труда локомотивной бригады и сокращение времени поиска и определения неисправностей в пути следования за счет автоматизации контроля основных параметров работы оборудования тепловоза с выводом на экран тревожных сообщений;
- накопление, хранение и передачу диагностической информации для последующего анализа эксплуатационной и ремонтной службами локомотивного депо;
- снижение трудоемкости отладочных и контрольных испытаний локомотива в условиях локомотивного депо.

Система диагностирования обрабатывает информацию, собранную с соответствующих датчиков и выполняет следующих функций:

- диагностирует состояние фильтрующих элементов масляной системы дизеля;
- контролирует основные параметры режима работы турбокомпрессора дизеля;
- контролирует исправность цепей возбуждения тягового генератора;
- контролирует исправность цепей возбуждения генератора энергоснабжения;
- диагностирует состояние силовых полупроводниковых преобразователей;
- диагностирует состояние аккумуляторной батареи;
- контролирует сопротивление изоляции низковольтных и высоковольтных цепей локомотива;
- контролирует исправность электрических цепей тяговых электродвигателей;
- контролирует исправность электропривода компрессора;

- контролирует уровень воды в расширительном баке системы охлаждения;
- контролирует исправность системы автоматического регулирования температуры теплоносителей дизеля;
- контролирует гидравлические характеристики радиаторов охлаждения дизеля;
- выдает на дисплей системы управления тревожные сообщения в случаях выхода контролируемых величин за пределы допустимых значений и при возникновении аварийных ситуаций;
- отображает необходимую диагностическую информацию на дисплее пульта управления по запросу машиниста или обслуживающего персонала локомотивного депо; результаты диагностирования также могут сохраняться в цифровом формате на съемном энергонезависимом накопителе.

Кроме диагностирования систем тепловоза программное обеспечение системы позволяет осуществлять тестирование аппаратных средств самой микропроцессорной системы, а также обеспечивает связь системы бортового диагностического устройства с переносной контрольно-проверочной аппаратурой. Контрольно-проверочная аппаратура подключается к бортовому диагностическому устройству локомотива и используется для поиска неисправностей в его системах.

Микропроцессорная система автоматического регулирования и управления выполняется в виде специализированных модулей. Каждый модуль самостоятельно или в совокупности с другими модулями позволяет решать задачи управления и вычисления. Принципиальная схема энергетической системы тепловоза 2ТЭ116, оборудованного микропроцессорной системой, представлена на рис. 12.1. Функционально микропроцессорная система состоит из блока регулирования (БР), имеющего модульную конструкцию и набора датчиков, количество которых зависит от варианта исполнения системы.

Любая микропроцессорная система автоматического регулирования и управления включает три составные части (подсистемы): вычислительную, интерфейсную и подсистему электропитания.

Вычислительной частью системы является модуль процессора, в котором располагается микроЭВМ. МикроЭВМ представляет собой большую или сверхбольшую интегральную микросхему, которая

содержит все логические элементы, необходимые для образования полноценной вычислительной системы. Она предназначена для обработки цифровой информации о состоянии объектов регулирования и управления и определения необходимых управляющих воздействий на объект.

Формирование напряжений для питания внутренних цепей всех модулей микропроцессорной системы и ее датчиков осуществляется специальным модулем питания блока БР.

Интерфейсная часть системы (от англ. *interface*, означающего «стык, взаимодействие») включает средства ввода аналоговых, дискретных и частотных сигналов, средства вывода аналоговых и дискретных управляющих сигналов. Она предназначена для обеспечения связи вычислительной части системы с объектом регулирования и представлена пятью модулями: модулем аналого-цифрового преобразователя, модулем ввода дискретных сигналов, модулем выходных ключей «ВЫХ», модулем управления широтно-импульсным модулятором «Упр. ШИМ» и модулем силовых ключей «ШИМ». К интерфейсной части системы относятся также датчики, обеспечивающие первичное преобразование аналоговых сигналов, характеризующих режим работы дизель-генераторной установки тепловоза.

Интерфейсная часть системы выполняет следующие основные функции:

- ввод в вычислительную часть аналоговых (непрерывных) сигналов, характеризующих значения параметров состояния объекта регулирования (например, ток и напряжение генератора, выход реек топливных насосов высокого давления дизеля и т.д.);

- ввод в вычислительную часть частотных сигналов; эти сигналы чаще всего используются для определения скоростей вращения различных механизмов объекта регулирования (например, частоты вращения коленчатого вала дизеля или колесной пары локомотива);

- ввод в вычислительную часть дискретных (релейных) сигналов, характеризующих состояние объекта регулирования; дискретные сигналы используются для определения признака включения или невключения какого-либо устройства или аппарата.

Подсистема электропитания предназначена для формирования напряжений питания, необходимых для работы всех составных частей микропроцессорной системы локомотива. Эта подсистема

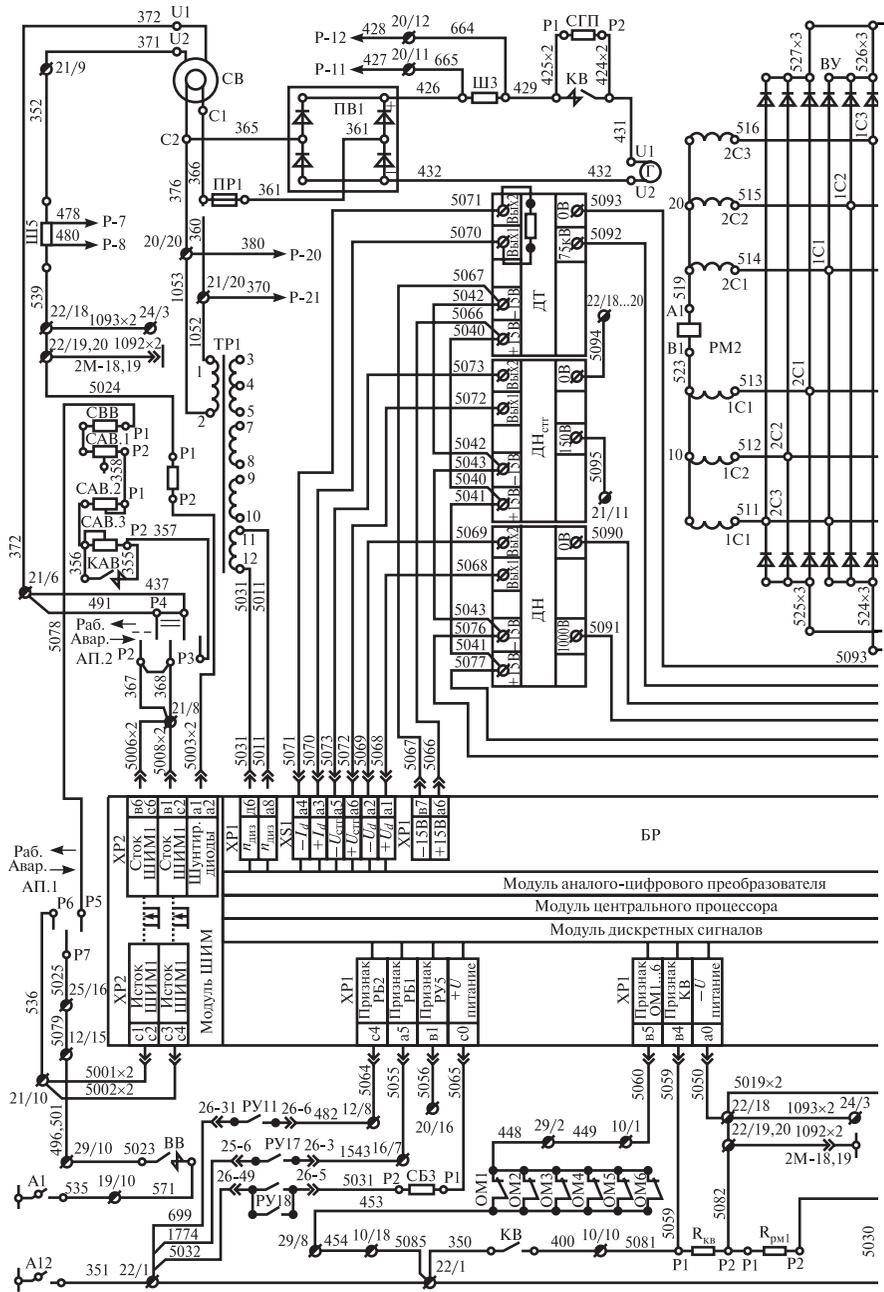
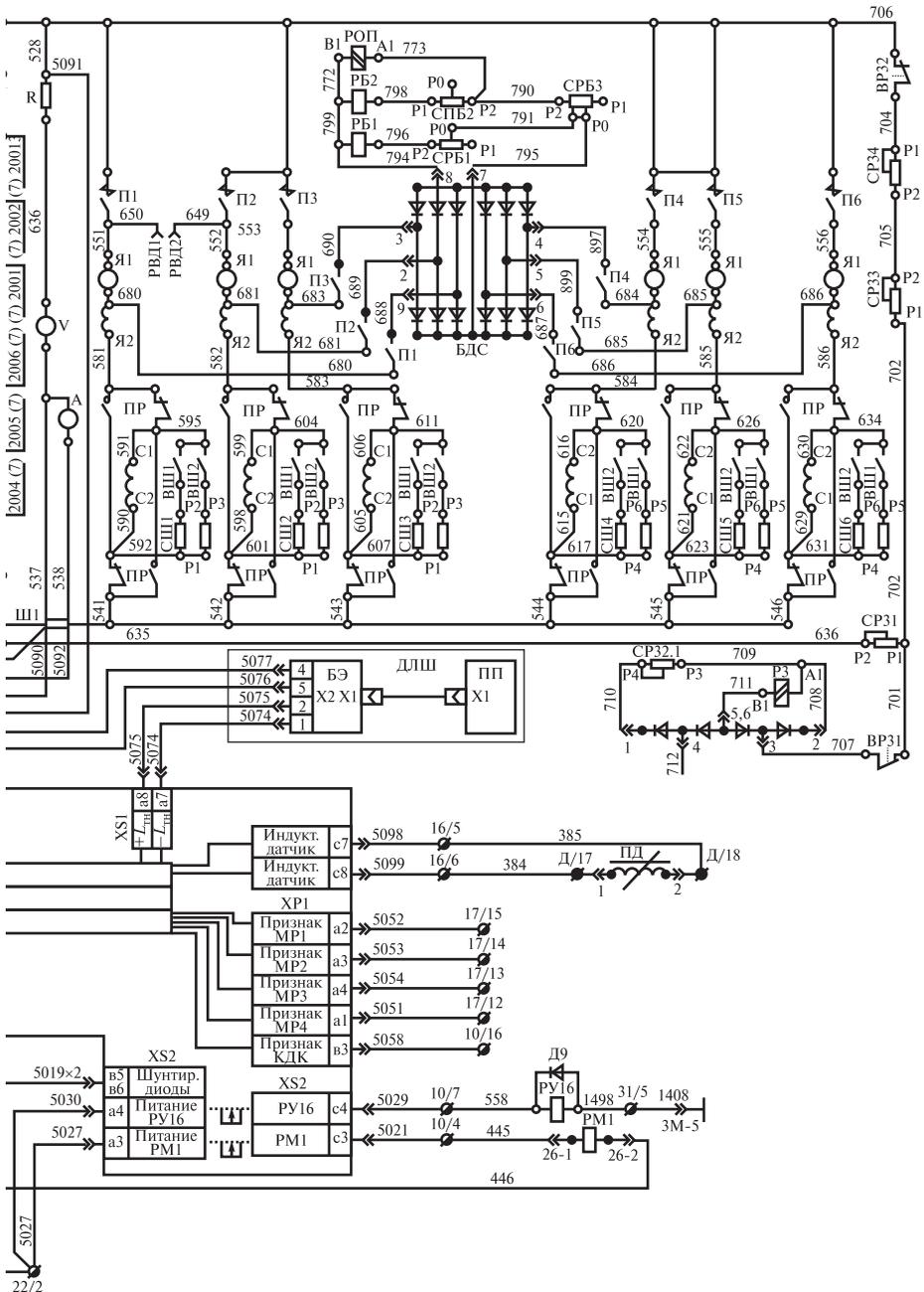


Рис. 12.1 Принципиальная схема энергетической системы тепловоза



2ТЭ116 с микропроцессорной системой управления и регулирования

обязательно присутствует в бортовых системах регулирования силовых установок транспортных средств, но может отсутствовать в стационарных системах, питаемых от внешних источников.

Модуль питания блока БР преобразует входное напряжение 110 В постоянного тока в следующие напряжения:

- от 0 до +5 В с нагрузочной способностью 1 А — для питания цепей процессора, аналого-цифрового преобразователя АЦП, гальванических развязок, выходного модуля дискретных сигналов и модуля управления ключами ШИМ;

- от 0 до +15 В с нагрузочной способностью 0,15 А — для питания модулей АЦП и процессора;

- от 0 до –15 В с нагрузочной способностью 0,25 А — для питания модуля АЦП;

- ±15В с нагрузочной способностью 1 А — для питания датчиков;

- переменное напряжение с амплитудой 5 В и частотой 1 кГц — для питания цепи индуктивного датчика;

- переменное напряжение с амплитудой 12 В и частотой 40 кГц — для питания выходного модуля дискретных сигналов и модуля управления ключами ШИМ.

Поскольку при пуске дизеля напряжение аккумуляторной батареи падает ниже допустимой величины, обеспечить требуемое качество электропитания системы в этом режиме модуль питания не может. По этой причине напряжение бортовой сети на модуль питания подается только после окончания пуска дизеля и включения контактора регулятора напряжения КРН. При этом автоматический выключатель А12 «Питание БУВ» должен быть включен.

Логика работы микропроцессорной системы управления и регулирования, т.е. порядок ее взаимодействия с объектом регулирования, полностью определяется управляющей программой вычислительной части системы.

Управляющей программой называется циклически замкнутая, непрерывно выполняемая вычислительной частью системы последовательность операций, обеспечивающая определенный порядок взаимодействия микропроцессорной системы с объектом регулирования. Сам порядок взаимодействия, реализуемый управляющей программой, называется алгоритмом работы микропроцессорной системы.

12.2. Принципиальная схема энергетической цепи тепловоза с микропроцессорной системой

Энергетическая цепь тепловоза, оборудованного микропроцессорной системой, идентична передаче тепловоза с аналоговой системой регулирования напряжения тягового генератора (рис. 12.1): от статорных обмоток тягового синхронного генератора через выпрямительную установку напряжение поступает к тяговым двигателям постоянного тока. Для защиты от боксования колесных пар используются реле боксования РБ1 и РБ2 (см. п. 6.10), а для защиты от обрыва обмоток возбуждения тяговых двигателей — реле обрыва полюсов РОП (см. п. 6.12), которые через блок диодного сравнения включены на напряжения обмоток возбуждения и добавочных полюсов ТЭД. В схему включено реле заземления РЗ для защиты от замыкания силовой цепи на корпус тепловоза (см. п. 6.9).

В передаче используется цифровая система регулирования напряжения тягового генератора. Система регулирования включает блок регулирования (БР) микропроцессорной системы, синхронный возбудитель СВ, однофазный двухполупериодный выпрямитель ПВ1, собственно обмотку возбуждения тягового генератора Г, датчики тока ДТ и напряжения ДН тягового генератора, а также датчики положения реек топливных насосов высокого давления ДЛП (датчик линейных перемещений) дизеля и положения якоря индуктивного датчика ИД. Регулирование напряжения тягового генератора осуществляется путем широтно-импульсной модуляции напряжения, а соответственно и тока возбуждения СВ, а не тока его статорной обмотки с помощью управляемого выпрямителя УВВ, как при аналоговой системе (см. п.п. 4.2, 4.5). Это позволило заменить блок УВВ в цепи обмотки возбуждения тягового генератора неуправляемым однофазным выпрямительным мостом.

Входным сигналом датчика ДН является напряжение на выходе выпрямительной установки U_d ; входным сигналом датчика ДТ — падение напряжения на измерительном шунте Ш1, пропорциональное току на выходе выпрямительной установки I_d .

В микропроцессорной системе предусмотрен канал измерения частоты вращения коленчатого вала дизеля $n_{\text{диз}}$; входным сигналом этого канала является переменное напряжение синхронного возбудителя. Сигнал по частоте вращения коленчатого вала дизеля дубли-

руется определением текущей позиции контроллера по состоянию электромагнитов МР1—МР4.

Таким образом, в блок БР микропроцессорной системы поступают сигналы задания по частоте вращения коленчатого вала дизеля и положению реек топливных насосов дизеля, сигнал обратной связи — с датчика ДН, и сигнал по возмущению — с датчика ДТ. По внутренним соединениям блока БР эти сигналы передаются на аналого-цифровой преобразователь АЦП, который преобразует аналоговые сигналы датчиков в цифровые коды и передает далее в модуль центрального процессора. Микроконтроллер процессора по внутреннему каналу 1 (каналу регулирования напряжения тягового генератора) управляет модулем ШИМ, задавая ширину импульсов напряжения возбуждения возбудителя СВ и меняя необходимым образом средний ток в его обмотке возбуждения.

Изменение тока возбуждения СВ приводит к соответствующему изменению напряжения на его статорной обмотке и тока в обмотке возбуждения тягового генератора Г. В результате напряжение тягового генератора меняется таким образом, чтобы обеспечить полное использование свободной мощности дизеля на тягу.

Наряду с микропроцессорной системой регулирования напряжения тягового генератора на тепловозе применяется микропроцессорная система регулирования напряжения стартер-генератора, которая также использует принцип широтно-импульсной модуляции напряжения.

Входным сигналом канала измерения напряжения стартер-генератора $U_{\text{СТГ}}$ является полная величина этого напряжения. По внутренним соединениям блока БР значение $U_{\text{СТГ}}$ передается в модуль центрального процессора, где сравнивается с сигналом задания. Микроконтроллер процессора по внутреннему каналу 2 (каналу регулирования напряжения стартер-генератора) управляет модулем ШИМ, задавая ширину импульсов напряжения возбуждения стартер-генератора и управляя его напряжением.

12.3. Алгоритм работы энергетического оборудования тепловоза с микропроцессорной системой управления и регулирования

Система регулирования напряжения тягового генератора вне зависимости от ее исполнения должна решать следующие основные задачи:

– формировать характеристику генератора, обеспечивающую полное использование свободной мощности дизеля на тягу и ограничивать напряжение и ток тягового генератора (рис. 12.2);

– обеспечивать защиту от режимов боксования колесных пар тепловоза (работу тягового генератора по жестким характеристикам);

– снижать мощность тягового генератора при отключении тягового электродвигателя.

В микропроцессорной системе эти задачи решаются изменением значения заданного напряжения $U_{d \text{ зад}}$, которое рассчитывается процессором в зависимости от сигналов датчиков и передается в регулятор напряжения тягового генератора.

12.3.1. Алгоритм работы системы регулирования напряжения тягового генератора

Работа микропроцессорной системы сводится к непрерывному циклическому выполнению некоторой последовательности операций. Эта последовательность устанавливается управляющей программой вычислительной части системы, записанной в запоминающее устройство ПЗУ центрального процессора.

Характеристика тягового генератора имеет гиперболический участок ограничения мощности (2–3) и прямолинейные участки ограничения напряжения (1–2) и тока (3–4) (см. рис. 12.2). На участке 1–2 заданное напряжение остается постоянным и равным максимально допустимому значению для каждой позиции контроллера. На участке 3–4 напряжение резко снижается для исключения увеличения тока нагрузки генератора выше максимально допустимого. На участке 2–3 система регулирования решает задачу полного использования мощности дизеля, т.е. $P_d = U_d I_d = \text{const}$.

Для реализации этого алгоритма на вход регулятора подаются текущие значения тока I_d , напряжения U_d , измеренные датчиками

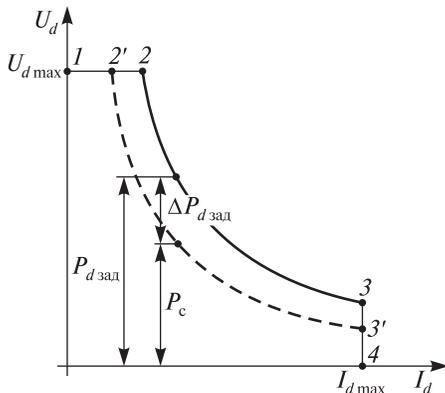


Рис. 12.2. К формированию характеристики тягового генератора

ДТ и ДН, и значение заданной мощности генератора $P_{d \text{ зад}}$. На выходе регулятора формируется текущее значение заданного напряжения $U_{d \text{ зад}}$. Если текущее значение фактической мощности генератора $P_d = U_d I_d$ превосходит величину $P_{d \text{ зад}}$ (т.е. имеет место перегрузка дизеля), значение $U_{d \text{ зад}}$ уменьшается, что приводит в результате работы регулятора к уменьшению текущего напряжения U_d , а следовательно, тока I_d и мощности P_d . В противном случае, если $P_d < P_{d \text{ зад}}$, величина $U_{d \text{ зад}}$ увеличивается регулятором, что приводит к возрастанию P_d . Таким образом, в результате работы регулятора поддерживается равновесие $P_{d \text{ зад}} \approx P_d$.

Алгоритмом работы регулятора напряжения тягового генератора текущее значение заданной мощности вычисляется как сумма двух составляющих:

$$P_{d \text{ зад}} = P_c + \Delta P_{d \text{ зад}} \quad (11.1)$$

Первая из них P_c представляет собой аналог селективной мощности генератора и рассчитывается процессором в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля $n_{\text{диз}}$ (см. п. 4.1, рис. 4.3). Вторая составляющая представляет собой корректирующий сигнал к селективной мощности, которая обеспечивает соответствие свободной мощности дизеля мощности генератора для каждой позиции контроллера.

Поскольку автоматическая система регулирования напряжения тягового генератора определяет работу всей энергетической цепи тепловоза, каналы расчета величин P_c и $\Delta P_{d \text{ зад}}$ дублируются. Для гарантированной работы регулятора напряжения величина P_c рассчитывается по двум каналам: каналу измерения частоты вращения коленчатого вала дизеля, т.е. $P_c = f(n_{\text{диз}})$ — если канал измерения $n_{\text{диз}}$ исправен; или в зависимости от текущей позиции контроллера, т.е. $P_c = f(nк)$ — если канал измерения $n_{\text{диз}}$ неисправен.

Составляющая $\Delta P_{d \text{ зад}}$ зависимости (11.1) также может определяться по двум каналам: если канал определения выхода реек ТНВД исправен, то величина $\Delta P_{d \text{ зад}}$ рассчитывается по разности заданного значения выхода реек ТНВД $L_{\text{тн зад}}$ и текущего значения этой величины $L_{\text{тн}}$. В противном случае величина $\Delta P_{d \text{ зад}}$ определяется каналом измерения положения якоря ИД, а именно разностью заданного положения якоря ИД $L_{\text{ид зад}}$, которое одинаково для всех позиций контроллера, и его текущего положения $L_{\text{ид}}$.

В худшем случае, если неисправны каналы измерения выходов реек ТНВД и якоря ИД, заданная мощность генератора определяется только в зависимости от величины $n_{\text{диз}}$

$$P_{d \text{ зад}} = f(n_{\text{диз}})$$

или, если и канал измерения $n_{\text{диз}}$ неисправен — в зависимости от позиции контроллера

$$P_{d \text{ зад}} = f(nк).$$

Таким образом, при исправности каналов микропроцессорной системы процесс регулирования напряжения тягового генератора будет похож на регулирование в серийной системе: к постоянной «селективной» мощности будет добавляться переменная составляющая, догружая дизель до той мощности, при которой измеренный выход реек ТНВД достигнет заданного значения для данной позиции контроллера (или до соответствия текущего положения якоря ИД заданному). При неисправности всех каналов на каждой позиции контроллера будет поддерживаться постоянная мощность генератора независимо от работы вспомогательных систем. В табл. 12.1 приведены ограничения селективных характеристик тягового генератора ГС-501 тепловоза 2ТЭ116 по позициям контроллера.

Таблица 12.1

Ограничения селективных характеристик и сигналов задания микропроцессорной системы регулирования напряжения тягового генератора ГС-501 по позициям контроллера

Величина	Позиции контроллера машиниста															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\text{хх}}$	70	70	170	200	240	270	300	325	350	375	400	425	440	460	475	500
$U_{d \text{ max}}$, В	—	50	100	150	290	330	380	440	475	520	560	600	638	680	715	750
$I_{d \text{ max}}$, А	—	2660	3000	3330	3670	3990	4335	4670	5000	5325	5680	6000	6330	6330	6330	6330
$P_{d \text{ зад}}$, кВт	—	60	160	260	364	465	576	708	830	950	1090	1235	1375	1540	1680	1820
$P_{\text{с}}$, кВт	—	60	160	260	270	350	440	550	670	780	900	1030	1170	1320	1456	1610

Алгоритм микропроцессорной системы обеспечивает увеличение тока возбуждения возбудителя при напряжении $U_d < U_{d \text{ зад}}$ и уменьшение его при напряжении $U_d > U_{d \text{ зад}}$ темпом, зависящим от абсолютного значения разности напряжений $\Delta U_d = (U_{d \text{ зад}} - U_d)$.

Это позволяет наиболее точно поддерживать значение напряжения U_d равным $U_{d \text{ зад}}$.

Электрические машины (стартер-генератор, синхронный возбудитель, тяговый синхронный генератор) имеют малое значение электрической постоянной времени (малую инерцию на изменение тока возбуждения). Поэтому для обеспечения требуемой точности регулирования напряжения U_d и эффективной защиты энергетического оборудования тепловоза управляющая программа канала регулирования тока возбуждения возбудителя имеет шаг 10 мс, т.е. с интервалом 10 мс микропроцессорная система определяет текущие значения U_d и формирует сигнал на управление током возбуждения возбудителя.

С другой стороны режимы работы тепловозного дизель-генератора в основном определяются режимами движения тепловоза и позицией контроллера машиниста, которые изменяются сравнительно медленно. Поэтому корректировать величину заданного напряжения генератора с такой же частотой не имеет смысла. В связи с этим все остальные операции алгоритма выполняются в 10 раз реже, т.е. с шагом 0,1 с.

12.3.2. Управление контакторами ослабления возбуждения тяговых электродвигателей

Для реализации режимов ослабления возбуждения тяговых двигателей необходимо в точке 2 характеристики тягового генератора (на границе участков ограничения мощности и напряжения) включать контакторы ослабления возбуждения ВШ1, ВШ2 (см. рис. 12.2). В серийной схеме с аналоговой системой регулирования для приблизительного определения этой точки и управления контакторами ВШ1, ВШ2 используются дифференциальные реле. Настройкой дифференциального реле достаточно приблизительно задается определенное соотношение между напряжением и током тягового генератора, при котором оно включается. Включение реле приведет к срабатыванию контакторов ВШ1, ВШ2.

Микропроцессорной системой момент достижения точки 2 легко определяется по равенству измеренного напряжения U_d максимально допустимому напряжению генератора для данной позиции контроллера $U_{d \text{ max}} n_{\text{диз}}$. Поэтому включение контакторов ВШ1 и ВШ2 можно осуществлять очень точно по мере увеличения ско-

рости движения тепловоза: при первом достижении напряжением генератора $U_d = \frac{13}{16} U_{d \max} n_{\text{диз}}$ включается контактор ВШ1, при втором — ВШ2. При снижении скорости тепловоза последовательность выключения контакторов ВШ1 и ВШ2 будет обратной при $U_d = \frac{5}{8} U_{d \max} n_{\text{диз}}$.

Когда скорость тепловоза становится очень высокой, при включенном контакторе ВШ2, энергетическая система может перейти на участок ограничения напряжения генератора. На тепловозах с аналоговой системой регулирования напряжения тягового генератора в этом режиме включается реле РПЗ и собирает цепь питания реле РУ2. Срабатывание реле РУ2 приводит к отключению возбуждения генератора. Алгоритмом микропроцессорной системы предусмотрено, что при переходе на режим ограничения напряжения генератора выдается команда на включение реле РМ1, которое, включившись, разбрасывает цепь возбуждения генератора.

12.3.3. Защита от режимов боксования

Признаком боксования колесных пар тепловоза является увеличение разности падений напряжения на обмотках возбуждения тяговых двигателей. Поэтому сигналы от всех электродвигателей поступают на блок диодного сравнения БДС (см. п. 6.10). При развитии боксования колесных пар сначала срабатывает реле РБ1, имеющее большую чувствительность. Своим замыкающим контактом РБ1 собирает цепь питания реле РУ17, снижающего сигнал уставки по мощности селективного узла. В результате напряжение генератора уменьшается, снижая момент тяговых двигателей (1-я ступень защиты от боксования). В случае дальнейшего развития боксования срабатывает реле РБ2 и включает реле РУ11, что приводит к еще более глубокому снижению напряжения тягового генератора и включению звукового сигнала (2-я ступень защиты от боксования). Микропроцессорная система определяет момент включения этих реле по значениям дискретных входных сигналов, поступающих в блок БР: равенство единице сигнала «РУ17» свидетельствует о срабатывании первой ступени защиты от боксования, обоих сигналов «РУ17»=1 и «РУ11»=1 — о срабатывании второй ступени. Алгоритмом работы микропроцессорной системы предусмотрено, что при этом снижается сигнал задания напряжению

$U_{d \text{ зад}}$, а соответственно и напряжение тягового генератора U_d . Если только сигнал «РУ17»=1, темп снижения U_d более медленный; если оба сигнала «РУ17»=1 и «РУ11»=1 темп снижения U_d возрастает. Снижение напряжения тягового генератора продолжается до прекращения боксования и отключения реле РУ11 и РУ17, либо до достижения заданным напряжением $U_{d \text{ зад}} = 0$.

12.3.4. Ограничение мощности генератора при отключении тягового электродвигателя

В случае неисправности тягового двигателя (или нескольких двигателей) машинист отключает его одним из тумблеров ОМ1—ОМ6, расположенных на пульте, например ОМ1. Факт отключения тумблера идентифицируется программой присвоением дискретному сигналу значения «ОМ1»=1. В этом случае микропроцессорная система воздействует на регулятор, ограничивая мощность генератора: величина заданной мощности, как «селективной» P_c , так и полной $P_{d \text{ зад}}$, будет ограничиваться уровнем, соответствующим 10-й позиции контроллера. Это относится и к значениям максимально допустимых значений напряжения $U_{d \text{ max}}$ и тока $I_{d \text{ max}}$, которые также будут ограничены уровнем 10-й позиции контроллера.

Соответственно на позициях контроллера 1—10 отключение одного или большего количества тяговых двигателей никак не отразится на процессе регулирования напряжения генератора, так как на этих позициях даже при отключении части двигателей нагрузка исправных двигателей не превысит допустимых значений.

12.3.5. Алгоритм работы системы регулирования напряжения стартер-генератора

Источником стабилизированного постоянного напряжения на тепловозе является стартер-генератор, работающий в режиме вспомогательного генератора (см. п. 5.6). Назначение системы регулирования напряжения стартер-генератора — обеспечить его постоянное напряжение в широком диапазоне изменения $n_{\text{диз}}$ и нагрузок.

Регулятор напряжения стартер-генератора микропроцессорной системы выполняет еще несколько функций. Во-первых, при отключении компрессора он снижает напряжение стартер-генератора, ограничивая его амплитуду при переходных процессах; во-вторых, осуществляет контроль собственной работоспособности и, в случае ее утери, включает в работу резервный регулятор РНТ-6. Контроль

работоспособности системы регулирования напряжения стартер-генератора осуществляется реле РУ16 (рис. 12.1). Это реле всегда срабатывает при включении микропроцессорной системы, шунтируя своими нормально разомкнутыми контактами силовую цепь регулятора РНТ-6 и включая в «плюсовую» цепь обмотки возбуждения вспомогательного генератора переходы «сток—исток» транзисторов канала 2 модуля ШИМ микропроцессорной системы.

Микропроцессорная система сравнивает заданное напряжение стартер-генератора $U_{\text{СТГ зад}} = 110 \text{ В}$ с фактическим текущим его значением $U_{\text{СТГ}}$. Если $U_{\text{СТГ зад}} > U_{\text{СТГ}}$, система уменьшает скважность напряжения канала 2 модуля ШИМ, если $U_{\text{СТГ зад}} < U_{\text{СТГ}}$, — увеличивает. Скорость изменения скважности будет зависеть от разности $(U_{\text{СТГ зад}} - U_{\text{СТГ}})$. Признаком исправности регулятора является способность удерживать напряжение $U_{\text{СТГ}}$ в пределах 110—135 В. Если это не удается, регулятор выдает команду о выключении реле РУ16. Реле РУ16 выключается, своими контактами шунтируя канал 2 модуля ШИМ и собирая цепь обмотки возбуждения стартер-генератора через регулятор РНТ-6.

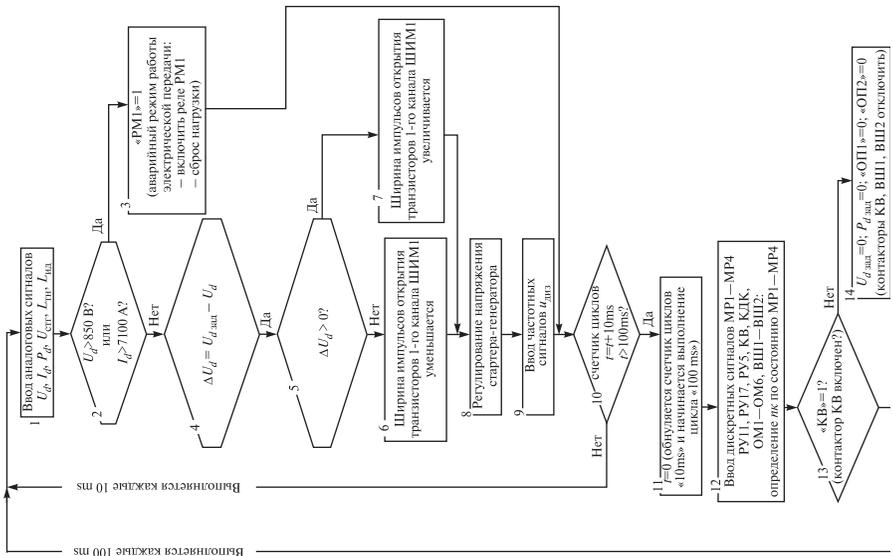
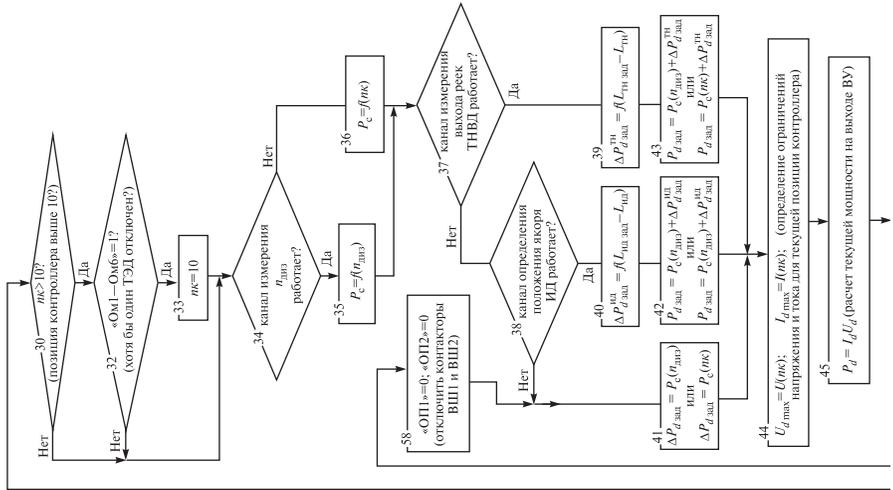
Кроме того, микропроцессорная система регулятора стартер-генератора контролирует отключение контактора КДК. Если контактор КДК отключился, система устанавливает заданное напряжение $U_{\text{СТГ зад}} = 95 \text{ В}$, предварительно сбросив признак работы компрессора, благодаря чему при следующем цикле работы программы, если контактор КДК включился, снижения напряжения уже не будет.

Алгоритм работы микропроцессорных систем тепловозов 2М62, 2ТЭ10, ТЭП70 и других принципиально не отличается от рассмотренного выше. Основные отличия сводятся к изменению величин настроек параметров характеристики тягового генератора, которые указаны в Руководстве по эксплуатации тепловоза каждой серии.

12.4. Управляющая программа микропроцессорной системы управления

12.4.1. Алгоритм регулирования напряжения тягового генератора

Управляющая программа, записанная в центральном процессоре, заменяет исполнительные схемы системы регулирования напряжения тягового генератора, системы регулирования напряжения стартер-генератора и основных цепей защиты (рис. 12.3).



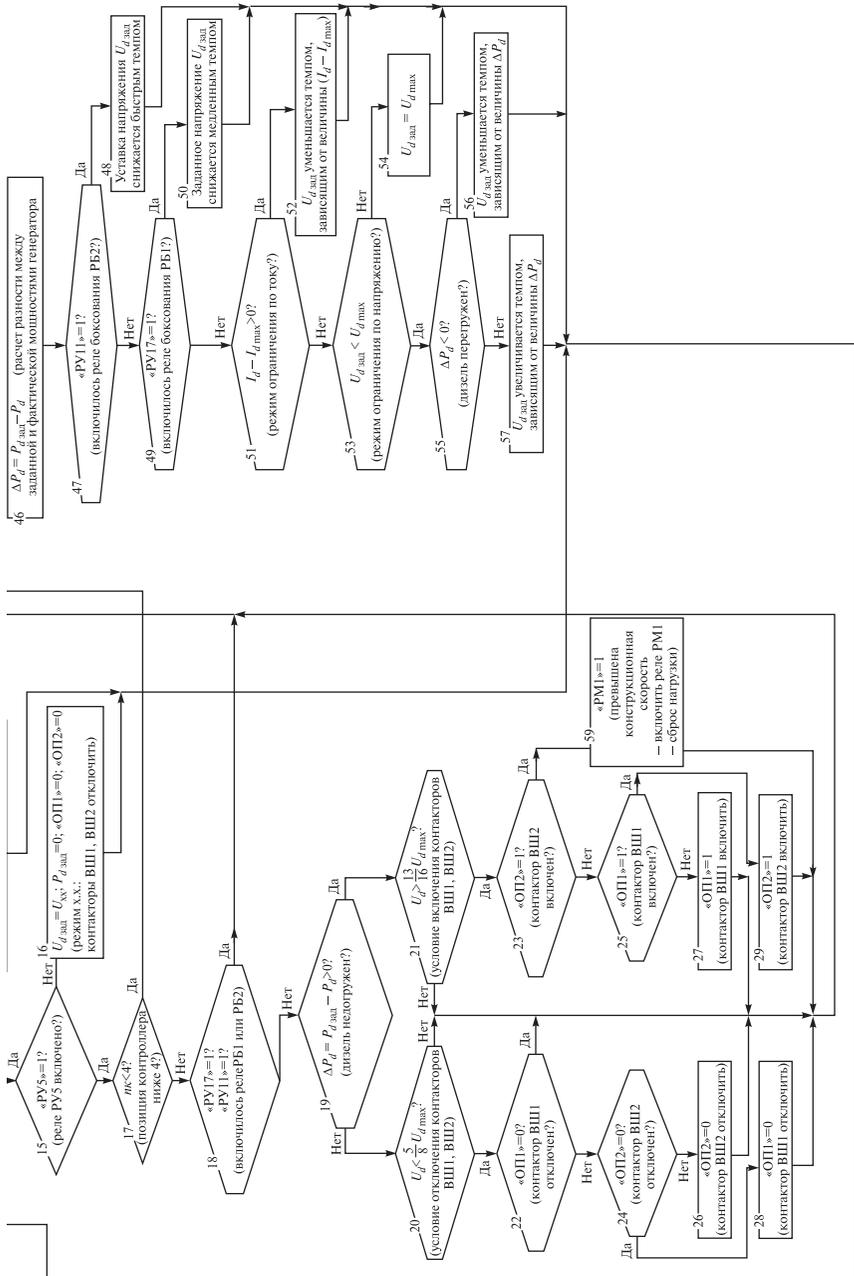


Рис. 12.3. Упрощенная блок-схема управляющей программы микропроцессорной системы тепловоза

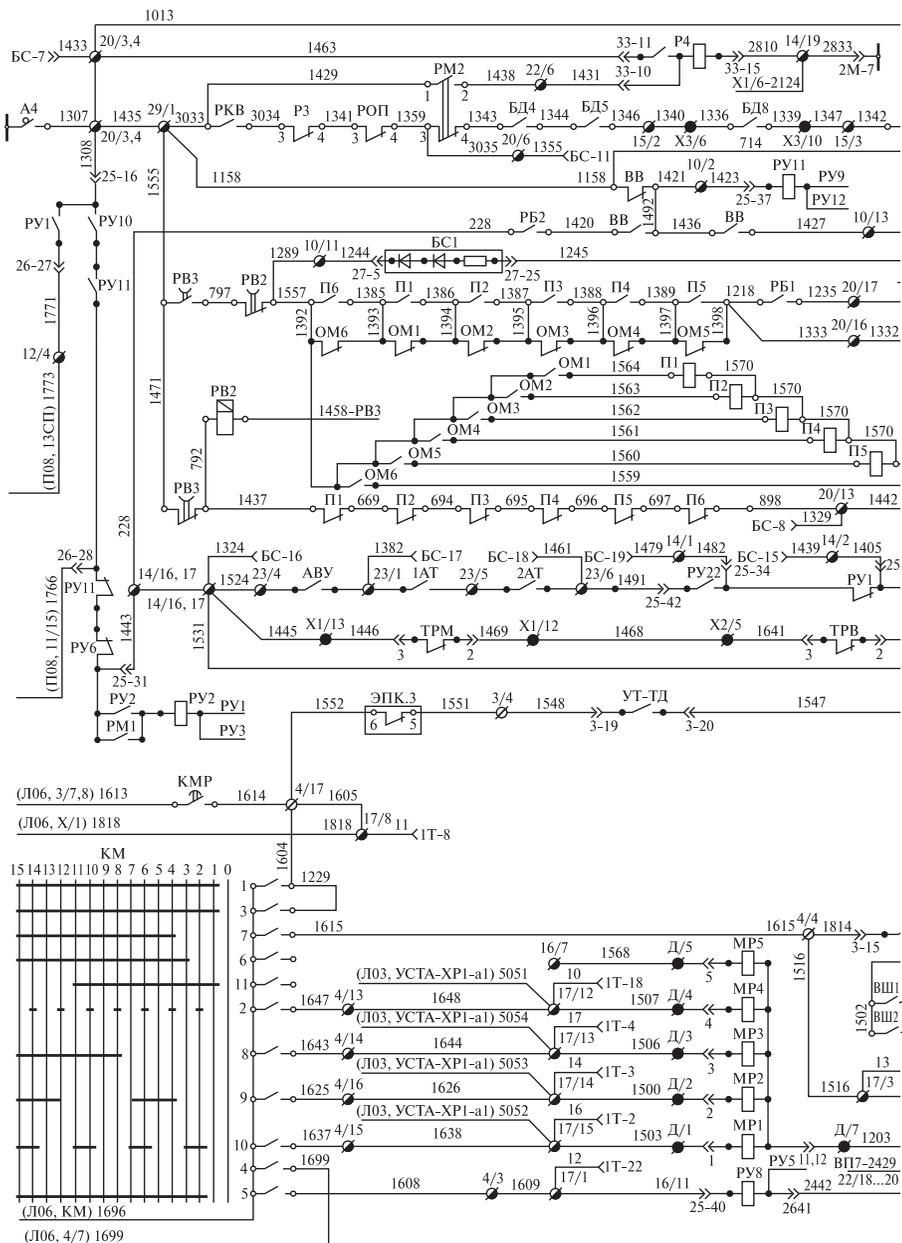


Рис. 12.4. Принципиальная схема цепей управления тепловоза 2ТЭ116

Основная часть алгоритма работы регулятора напряжения тягового генератора образована блоками 1–7 управляющей программы. В блоке 1 осуществляется ввод информации о текущих значениях сигналов, характеризующих состояние дизель-генераторной установки. В блоке 2 проверяется, не является ли текущий режим аварийным, т.е. не превышены ли предельные значения напряжения U_d и тока I_d на выходе выпрямительной установки ВУ соответственно $U_{d \max} = 850$ В и $I_{d \max} = 7100$ А. Если такое превышение обнаруживается, в блоке 3 дискретному сигналу «PM1» присваивается значение 1. Сигнал «PM1»=1 передается на интерфейсную часть микропроцессорной системы и далее к исполнительной схеме тепловоза. Формирование сигнала «PM1=1» приводит к включению реле PM1. Реле срабатывает и своим нормально разомкнутым контактом собирает цепь питания реле РУ2 (рис. 12.4). Последнее, включившись, осуществляет сброс нагрузки тягового генератора с отключением контакторов возбуждения возбудителя ВВ и тягового генератора, КВ и поездных контакторов П1–П6 (см. п. 6.8).

Если допустимые значения тока и напряжения на выходе ВУ не превышены, в блоках 4 и 5 определяются величина и знак рассогласования между заданным и измеренным напряжениями на выходе ВУ $\Delta U_d = (U_{d \text{ зад}} - U_d)$. При $\Delta U_d > 0$ сигнал поступает в блок 7, который формирует команду на увеличение ширины импульсов открытия транзисторов канала 1 модуля ШИМ; темп увеличения ширины импульсов напряжения определяется модулем величины ΔU_d . Это приводит к возрастанию тока возбуждения синхронного возбудителя, а соответственно и напряжения генератора U_d . При $\Delta U_d < 0$ сигнал поступает в блок 6, который формирует команду на уменьшение ширины импульсов открытия транзисторов канала 1 модуля ШИМ, в результате чего ток возбуждения синхронного возбудителя, а соответственно и напряжения генератора U_d уменьшаются.

В блоке 8 выполняются операции по регулированию напряжения стартер-генератора, которые подробнее будут рассмотрены в п. 12.4.2, а в блок 9 передается информация о значении частотных сигналов, например частоте вращения вала дизеля.

Контроль за текущими значениями U_d и I_d осуществляется программой циклически с шагом $\Delta t = 10$ мс (10 ms). Когда значение

счетчика достигает $t = 100$ мс, программа переходит к внешнему циклу, операции в котором осуществляются с шагом $\Delta t = 100$ мс. Счетчики времени находятся в блоках 10—11.

В блок 12 внешнего цикла программы от интерфейсной части системы поступают дискретные сигналы, с помощью которых микропроцессорная система контролирует состояние аппаратов и органов управления электрической схемой, и определяется текущая позиция контроллера по включению электромагнитов МР1—МР4 (см. п. 8.6).

Текущий режим работы дизель-генератора определяется в блоках 13—16. Текущее значение дискретного сигнала «КВ» (блок 13) устанавливает, собралась ли силовая схема цепей возбуждения генератора (т.е. включились ли контакторы КВ и ВВ). Если сигнал имеет значение «КВ»=0 — контактор КВ не включен. Это воспринимается процессором как факт нерабочего состояния схемы, поэтому в блоке 14 сигналам задания присваиваются нулевые значения $U_{d \text{ зад}} = 0$, $P_{d \text{ зад}} = 0$ и выдаются команды на отключение контакторов ВШ1 и ВШ2. Если же схема собралась, т.е. дискретный сигнал «КВ»=1, управляющая программа переходит к блоку 15, где определяется режим работы дизель-генератора по состоянию реле РУ5. Значение сигнала «РУ5»=1 (выключенное состояние реле) свидетельствует о работе дизель-генератора под нагрузкой; тогда в последующих блоках программа вычисляет значения сигналов задания с учетом состояния тепловоза. Если сигнал «РУ5»=0 (режим холостого хода дизель-генератора), управление передается в блок 16, по команде которого заданное напряжение тягового генератора принимается равным напряжению холостого хода для текущей позиции контроллера $U_{d \text{ зад}} = U_{x,x}$, заданное значение мощности принимается равным нулю $P_{d \text{ зад}} = 0$, а контакторы ВШ1 и ВШ2 отключаются (если были включены). После этого управление возвращается на блок 1 и определяются новые текущие значения сигналов, определяющих работу передачи.

В блоках 17—58 управляющая программа формирует текущий сигнал задания напряжения тягового генератора и управляет контакторами ВШ1 и ВШ2.

После того как в блоке 15 было установлено, что дизель-генератор работает под нагрузкой, управление передается в блок 17, который контролирует значение текущей позиции контроллера nk и определяет дальнейшую работу управляющей программы.

В соответствии с алгоритмом работы передачи тепловоза, на позициях контроллера ниже 4-й тяговый генератор работает по селективной характеристике без корректирующего сигнала от индуктивного датчика, т.е. $U_{\text{кор}} = 0$ (см. п. 4.3), а режимы ослабления возбуждения тяговых двигателей исключаются (контакты ВШ1 и ВШ2 включаться не должны). Поэтому при $nk < 4$ управление передается сначала на блок 58, где контролируется состояние контактов ВШ1 и ВШ2 и формируется команда на их отключение (если они были включены), а затем непосредственно на блок 41, где формируется сигнал задания мощности, определяемый только позицией контроллера $P_{d \text{ зад}} = f(nk)$.

Начиная с 4-й позиции контроллера, алгоритм управляющей программы учитывает в сигнале задания мощности $P_{d \text{ зад}}$ положение реек ТНВД $L_{\text{ТН}}$ или сердечника ИД $L_{\text{ИД}}$.

В случае $nk \geq 4$ выполнение алгоритма управления передачей начинается с проверки состояния реле боксования 1-й и 2-й ступени. Для этого используются значения дискретных входных сигналов «РУ17» и «РУ11» (блок 18). Если боксование отсутствует, т.е. дискретные сигналы «РУ17» = 0 и «РУ11» = 0, программа определит знак разности между заданной и измеренной мощностями генератора ΔP_d (блок 19) и текущую координату режима работы U_d (блоки 20, 21). Например, если $\Delta P_d > 0$ (т.е. дизель недогружен), а $U_d > \frac{13}{16} U_{d \text{ max}}$, должны включаться контакты ослабления возбуждения ТЭД. Сначала в блоке 23 по значению дискретного сигнала «ОП2» проверяется, включен ли контактор ВШ2? Если «ОП2» = 1, т.е. контактор ВШ2 уже включен, а напряжение достигло значения $\frac{13}{16} U_{d \text{ max}}$ — значит, превышена конструкционная скорость тепловоза. Управление передается на блок 59, который формирует дискретный сигнал «РМ1» = 1 и выдает команду на блок вывода дискретных сигналов «реле РМ1 включить», что приводит к сбросу нагрузки и переводу системы возбуждения генератора в режим холостого хода. После этого управление передается на блок 30, где начинается вычисление сигналов заданий работы передачи, соответствующих новому режиму работы.

При «ОП2» = 0 (контактор ВШ2 не включен) управление передается блоку 25, где проверяется, включена ли первая ступень

ослабления возбуждения («ОП1»=1?). Если «ОП1» = 1, т.е. контактор ВШ1 включен, а $U_d > \frac{13}{16}U_{d \max}$, должен включиться контактор ВШ2. Поэтому управление переходит к блоку 29, который формирует команду «Контактор ВШ2 включить» и, далее, на блок 30. При «ОП1» = 0 в блоке 27 формируется команда «контактор ВШ1 включить» и управление также передается блоку 30. Тем самым гарантируется требуемый порядок включения ступеней ослабления возбуждения ТЭД.

Значению $U_d < \frac{5}{8}U_{d \max}$ соответствуют режимы последовательно отключения контакторов ВШ1 и ВШ2. Поэтому в блоках 20, 22, 24 и 26 анализируется текущее значение напряжения генератора и, если $U_d < \frac{5}{8}U_{d \max}$, контакторы ослабления возбуждения начинают отключаться в обратном порядке.

В том случае, если в блоке 18 хотя бы один из дискретных сигналов принимает значение «1», что означает наличие боксования колесных пар, независимо от величины напряжения U_d состояние контакторов ВШ1 и ВШ2 сохраняется неизменным во избежание их преждевременного включения и последующей звонковой работы. Поэтому управление из блока 18 сразу передается блоку 30.

После выполнения операций по управлению контакторами ВШ1 и ВШ2 управляющая программа переходит к решению главной задачи — расчету сигналов заданной мощности и заданного напряжения тягового генератора. Первоначально в блоках 30—33 проверяется состояние тумблеров ОМ1—ОМ6. Если хотя бы один из двигателей отключен, а позиция контроллера $пк > 10$, возникает необходимость снижения мощности тягового генератора. Поэтому в блоке 30 анализируется значение позиции контроллера. Если $пк \leq 10$, факт отключения ТЭД игнорируется, сигнал задания мощности тягового генератора не снижается и управление сразу передается на блок 34. Если же текущая позиция контроллера превышает десятую, проверяется значение дискретных сигналов «ОМ1» — «ОМ6» (блок 32). При значении хотя бы одного из сигналов «1» (что свидетельствует об отключении ТЭД), управляющая программа устанавливает текущую позицию $пк = 10$ (блок 33) и именно для этой позиции будет рассчитывать значения сигналов

заданной мощности и заданного напряжения тягового генератора. В том случае, если все тяговые двигатели исправны и значения дискретных сигналов «ОМ1»—«ОМ6» равны нулю, управляющая программа игнорирует команду блока 33 и рассчитывает сигналы заданной мощности и заданного напряжения тягового генератора для текущей позиции контроллера.

Блоки 34—43 формируют сигнал задания мощности системы регулирования напряжения тягового генератора. В том случае, если работает канал измерения частоты вращения вала дизеля, текущее значение $n_{\text{диз}}$ определяется блоком 34, а значение сигнала задания селективной мощности $P_c = f(n_{\text{диз}})$ вычисляется блоком 35 управляющей программы. При неисправности канала измерения $n_{\text{диз}}$ задание селективной мощности определяется позицией контроллера $P_c = f(n_k)$ (блок 36). Сформированный сигнал $P_c = f(n_{\text{диз}})$ (или $P_c = f(n_k)$) передается в блок 37 расчета корректирующего сигнала.

Блок 37 программы анализирует исправность канала измерения выхода реек ТНВД. В том случае, если этот канал исправен, мощность корректирующего сигнала рассчитывается блоком 39 в зависимости от заданного и фактического выходов реек для данной позиции контроллера $\Delta P_{d \text{ зад}}^{\text{ТН}} = f(L_{\text{ТН зад}} - L_{\text{ТН}})$. При неисправности канала измерения выхода реек ТНВД управление из блока 37 передается в блок 38, где анализируется работоспособность канала измерения выхода якоря ИД. Если канал исправен, выполнение программы переходит в блок 40, и тогда мощность корректирующего сигнала рассчитывается как $\Delta P_{d \text{ зад}}^{\text{ИД}} = f(L_{\text{ид зад}} - L_{\text{ид}})$. Корректирующий сигнал увеличивается, если выход реек ТНВД менее заданного (или якорь ИД сместился далее среднего положения), и уменьшается в противном случае. Далее управляющая программа рассчитывает мощность корректирующего сигнала и переходит в соответствующий блок формирования сигнала задания мощности тягового генератора $P_{d \text{ зад}}$ (блоки 41—43), который определяется как сумма селективной мощности и мощности корректирующего сигнала

$$P_{d \text{ зад}} = P_c + \Delta P_{d \text{ зад}}.$$

В табл. 12.1 приведены значения сигналов заданий полной P_d зад и селективной P_c мощностей генератора, а также допустимые значения напряжения $U_{d \max}$ и тока $I_{d \max}$ для различных позиций контроллера машиниста, записанные в блоке 44 управляющей программы.

На последнем этапе алгоритма управляющая программа рассчитывает значение напряжения $U_{d \text{ зад}}$, которое является сигналом задания для регулятора напряжения тягового генератора в течение следующего внешнего 100 мс цикла.

С этой целью в блоке 45 вычисляется значение фактической мощности генератора как произведение измеренных значений напряжения и тока $P_d = U_d I_d$, а в блоке 46 определяются абсолютное значение и знак разности между заданной и фактической мощностями генератора $\Delta P_d = P_{d \text{ зад}} - P_d$. По значению ΔP_d управляющая программа должна изменять сигнал задания напряжения $U_{d \text{ зад}}$ темпом, зависящим от значения ΔP_d (блоки 55, 56, 57). Однако, если $\Delta P_d < 0$, а устойчивого сцепления колес тепловоза с рельсами нет, команда на повышение напряжения $U_{d \text{ зад}}$ приведет к дальнейшему развитию боксования. Поэтому, прежде чем формировать команду на изменение значения $U_{d \text{ зад}}$, блоками 47, 49 проверяется состояние системы защиты от боксования, а именно значение дискретных сигналов «РУ17» и «РУ11». Если дискретный сигнал «РУ11» = 1 (а соответственно и «РУ17» = 1), когда включена вторая ступень защиты от боксования, управление передается блоку 48, по команде которого значение $U_{d \text{ зад}}$ будет снижаться быстрым темпом. В том случае, когда «РУ11» = 0, а «РУ17» = 1, т.е. включена только первая ступень защиты от боксования, управление передается блоку 50, по команде которого значение $U_{d \text{ зад}}$ будет снижаться медленным темпом.

Кроме того, прежде чем увеличивать значение $U_{d \text{ зад}}$ необходимо гарантировать, что напряжение или ток тягового генератора не превысят допустимых значений $U_{d \max}$ и $I_{d \max}$. Поэтому если боксование не обнаружено, т.е. «РУ11» = 0, «РУ17» = 0, блоком 51 определяется текущее значение разности $I_{d \max} - I_d$. При $(I_d < I_{d \max}) > 0$, т.е. имеет место превышение тока над допустимым значением, управление перейдет блоку 52, который сформирует команду на снижение напряжения $U_{d \text{ зад}}$, ограничивая значение тока. При $(I_d < I_{d \max}) < 0$ проверяется соотношение между текущим значением заданного напряжения $U_{d \text{ зад}}$ и допустимым его значением $U_{d \max}$

(блок 53). Если ($U_{d \text{ зад}} < U_{d \text{ max}}$), выполнение программы передается блоку 55 и заданное напряжение определяется в зависимости от значения и знака величины ΔP_d (блоки 56, 57). В противном случае принимается ($U_{d \text{ зад}} = U_{d \text{ max}}$) (блок 54). На этом выполнение внешнего 100 мс цикла программы заканчивается и управление вместе с вычисленным значением заданного напряжения $U_{d \text{ зад}}$ передается в регулятор напряжения генератора (блок 1).

12.4.2. Алгоритм регулирования напряжения стартер-генератора

Алгоритмом работы управляющей программы предусмотрен контроль работоспособности микропроцессорного регулятора напряжения стартер-генератора и включения двигателя компрессора, а также сравнение сигнала задания напряжения стартер-генератора $U_{\text{СТГ зад}} = 110 \text{ В}$ с фактическим текущим значением $U_{\text{СТГ}}$ с шагом 0,1 с.

Упрощенная блок-схема алгоритма работы микропроцессорной системы регулирования напряжения стартер-генератора представлена на рис. 12.5.

В блоках 8-1 и 8-2 управляющей программы осуществляется контроль состояния реле РУ16 и контактора двигателя компрессора КДК. При значениях дискретных сигналов «РУ16» = 1 (реле РУ16 включено) и «КДК» = 1 (контактор КДК включен) управление передается блокам 8-3, 8-4, 8-5, где формируется напряжение задания напряжения стартер-генератора $U_{\text{СТГ зад}}$. Если текущее значение $U_{\text{СТГ зад}} < 110 \text{ В}$ блоком 8-5 формируется команда на увеличение значения $U_{\text{СТГ зад}}$. В противном случае при $U_{\text{СТГ зад}} \geq 110 \text{ В}$ управление передается в блок 8-4, где его значение устанавливается $U_{\text{СТГ зад}} = 110 \text{ В}$. Сформированный сигнал задания напряжения передается в блок 8-7, где рассчитывается разность между напряжением задания и текущим напряжением стартер-генератора $\Delta U_{\text{СТГ}} = \Delta U_{\text{СТГ зад}} - U_{\text{СТГ}}$ (информация о значении $U_{\text{СТГ}}$ поступает из блока 1 управляющей программы микропроцессорной системы, см. рис. 12.3) и управление переходит на блок 8-8. В блоке 8-8 определяется знак величины $\Delta U_{\text{СТГ}}$. Если $\Delta U_{\text{СТГ}} > 0$, управляющая программа формирует команду на увеличение ширины импульсов напряжения транзисторов 2-го канала модуля ШИМ (блок 8-10); если $\Delta U_{\text{СТГ}} < 0$ — на уменьшение ширины импульсов (блок 8-9). Темп изменения управления транзисторами будет зависеть от значения $\Delta U_{\text{СТГ}}$.

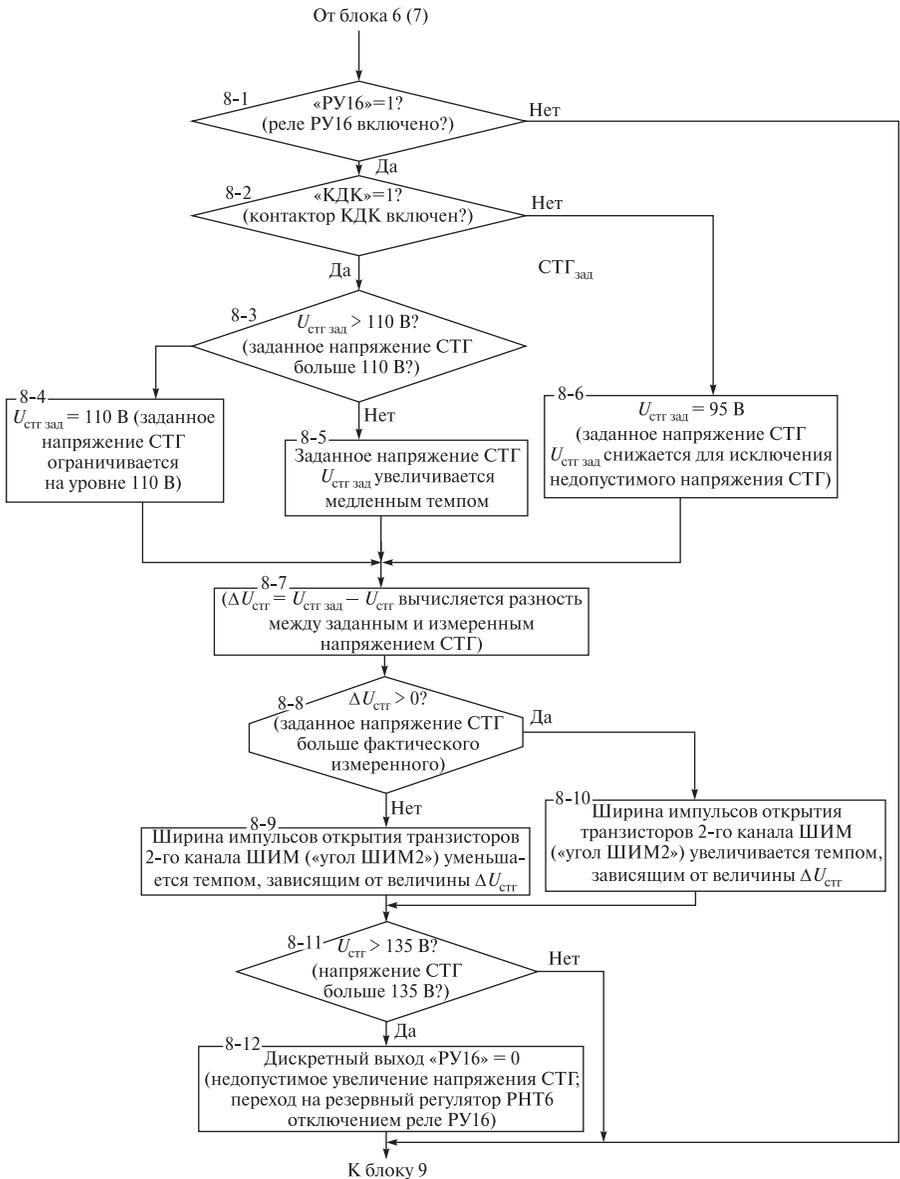


Рис. 12.5. Упрощенная блок-схема управляющей программы микропроцессорной системы управления напряжением стартер-генератора

Блоками 8-11 и 8-12 осуществляется диагностирование исправности микропроцессорного регулятора напряжения стартер-генератора. Признаком его исправности является способность поддерживать напряжение $U_{\text{СТГ}} = 110\text{--}135 \text{ В}$ (блок 8-11). Если $U_{\text{СТГ}} \text{ зад} > 135 \text{ В}$ программа формирует выходной дискретный сигнал «РУ16» = 0 (блок 8-12), по которому реле РУ16 отключается. Контакты РУ16 шунтируют переходы «сток—исток» транзисторов канала 2 модуля ШИМ в «плюсовой» цепи обмотки возбуждения СТГ и включают в цепь обмотки возбуждения регулятор РНТ-6. Регулятор напряжения РНТ-6 будет осуществлять регулирование напряжения стартер-генератора до включения микропроцессорного регулятора.

Если проверка в блоке 8-1 показывает, что реле РУ16 отключено, т.е. микропроцессорная система не регулирует напряжение стартер-генератора, управление сразу передается на блок 9 основного алгоритма (см. п. 12.4.1, рис. 12.3), т.е. программа регулирования напряжения СТГ не выполняется. При отключении контактора КДК в блоке 8-2 формируется дискретный сигнал «КДК» = 0 и управление передается в блок 8-6, который формирует команду на снижение задания напряжения стартер-генератора до $U_{\text{СТГ}} \text{ зад} = 95 \text{ В}$.

12.5. Модули дискретных сигналов микропроцессорной системы

12.5.1. Модуль ввода дискретных сигналов

Алгоритм управляющей программы микропроцессорной системы наряду с аналоговыми сигналами использует дискретные сигналы от аппаратов управления. Они идентифицируют текущее состояние следующих аппаратов и органов управления:

- электромагнитов регулятора дизеля МР1—МР2;
- контактора возбуждения тягового генератора КВ;
- реле нагрузки РУ5;
- тумблеров отключения тяговых электродвигателей ОМ1—ОМ6;
- контактора пуска электродвигателя компрессора КДК;
- групповых контакторов ослабления возбуждения тяговых электродвигателей ВШ1, ВШ2;
- реле первой ступени защиты от боксования колесных пар РУ17;
- реле второй ступени защиты от боксования колесных пар РУ11.

«Минусовые» цепи всех каналов микропроцессорной системы объединены между собой внутренними соединениями блока регулирования (БР) и через контакт а0 «—U питание» внешнего разъема ХР1 и провод 5050 соединяются с «минусовым» зажимом высоковольтной камеры (ВВК) (см. рис. 12.1).

Включенное состояние электромагнитов регулятора МР1—МР4 определяется блоком БР по наличию напряжения +110 В на их катушках (см. рис. 12.4). Например, от электромагнита МР1 к блоку БР сигнал поступает по цепи: катушка МР1, клемма 17/15, (см. рис. 12.1) провод 5052, контакт а2 разъема ХР1 блока БР.

Состояние контактора КВ определяется по состоянию его замыкающего вспомогательного контакта между проводами 350 и 400 (см. рис. 12.1). При включении контактора КВ на вход «Признак КВ» блока БР поступает напряжение +110 В по цепи: автоматический выключатель А12 «Питание БУВ», клемма 22/1, провод 350, замкнувшийся контакт КВ, провод 400, клемма 10/10, провод 5081, клемма Р1, провод 5059, контакт в4 «Признак КВ» внешнего разъема ХР1 блока БР.

Включение реле нагрузки РУ5 определяется по напряжению на его катушке, которое поступает на вход блока БР по цепи (см. рис. 12.4): катушка РУ5, клемма 20/16, провод 5056 (рис. 12.1), контакт в1 разъема ХР1 блока БР.

Включение тумблеров отключения тяговых электродвигателей ОМ1—ОМ6 определяется состоянием их вспомогательных контактов между проводами 448 и 453 (см. рис. 12.1). Когда все тяговые двигатели находятся в рабочем состоянии, эти контакты разомкнуты, и напряжение +110 В от выключателя А12 на вход блока БР не подается. При отключении хотя бы одного из двигателей на вход в5 «Признак ОМ1...6» блока БР напряжение подается по цепи: выключатель А12, клемма 22/1, провода 5085, 454, 453, замкнутый контакт (или несколько контактов) тумблеров ОМ1—ОМ6, провода 448, 449, 5060, контакт в5 внешнего разъема ХР1 блока БР.

Включение контактора КДК определяется по напряжению на его катушке, которое подается в блок БР по цепи (см. рис. 12.1): катушка КДК (на схеме не показана), клемма 10/16 провод 5058, контакт в3 «Признак КДК» разъема ХР1 блока БР.

Включение контакторов ослабления возбуждения тяговых двигателей ВШ1 и ВШ2 определяется по состоянию их вспомогательных

замыкающих контактов между проводами 1517 и 5087 (ВШ1), 1502 и 5086 (ВШ2) (см. рис. 12.4). При срабатывании контактора ВШ1 (или ВШ2) его вспомогательный контакт замыкается и напряжение +110 В поступает в блок БР по цепи: 7-й контакт контроллера, замкнутый начиная с 4-й позиции, замкнутый контакт тумблера управления переходами ТУП, клемма 18/18, контакт ВШ1 (или ВШ2), контакт с1 «Признак ВШ1» (или с2 «Признак ВШ2») разъема ХР1 блока БР.

Включение первой и второй ступеней защиты от боксования определяется состояниями замыкающих контактов реле РУ17 (первая ступень) и РУ11 (вторая ступень). При включении первой ступени защиты от боксования сигнал напряжения +110 В в блок БР поступает по цепи (см. рис. 12.1): автоматический выключатель А12, провода 351, 1774, замыкающий контакт РУ17, провода 1543, 5055, контакт а5 «Признак РБ1» разъема ХР1 блока БР; при включении второй ступени — по цепи: автоматический выключатель А12, провода 351, 699, замыкающий контакт РУ11, провода 482, 5064, контакт с4 «Признак РБ2» разъема ХР1 блока БР.

Все дискретные сигналы с разъема ХР1 поступают в модуль ввода дискретных сигналов, который расположен в блоке БР. Этот модуль предназначен для передачи сигналов напряжением 95—135 В из электрической схемы в вычислительную часть микропроцессорной системы с напряжением 5 В. Очевидно, что соединить непосредственно эти цепи нельзя, так как напряжение 95—135 В приведет к выходу из строя вычислительной части. Поэтому для передачи дискретных сигналов используют гальваническую развязку.

Под *гальванической развязкой* понимается передача сигнала от источника к приемнику при отсутствии их непосредственной связи электрическими проводниками. Гальваническая развязка высоковольтных и низковольтных вычислительных цепей предназначена в том числе и для исключения повреждения последних пиковыми выбросами напряжения, всегда присутствующими в цепях, коммутирующих индуктивные нагрузки (катушки реле, контакторов и электропневматических вентилей). Она является необходимым условием надежной работы вычислительного устройства микропроцессорных систем.

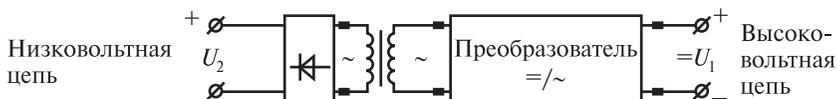
Для передачи электрического сигнала между гальванически развязанными цепями чаще всего используется либо энергия магнит-

ного поля (трансформаторная развязка), либо энергия излучения (оптоэлектронная развязка). Для передачи изменяющихся аналоговых электрических сигналов используется трансформаторная гальваническая развязка; для передачи дискретных электрических сигналов — оптоэлектронная гальваническая развязка.

Трансформаторная гальваническая развязка представляет собой трансформатор (рис. 12.6, а). В том случае, если защищается цепь постоянного тока, на входе и выходе гальванической развязки устанавливаются преобразователи: преобразователь постоянного тока в переменный (инвертор) и преобразователь переменного тока в постоянный (выпрямитель).

Основным элементом *оптоэлектронной (оптронной) гальванической развязки* является оптоэлектронная пара (оптрон), состоящая из светоизлучающего диода и светочувствительного элемента (фоторезистор, фотодиод, фототранзистор) (рис. 12.6, б). Принцип действия оптопары — открывать фотоприемник световым лучом без непосредственного электрического контакта между ними. Оптопара обеспечивает высокую электрическую прочность между входной

а



б

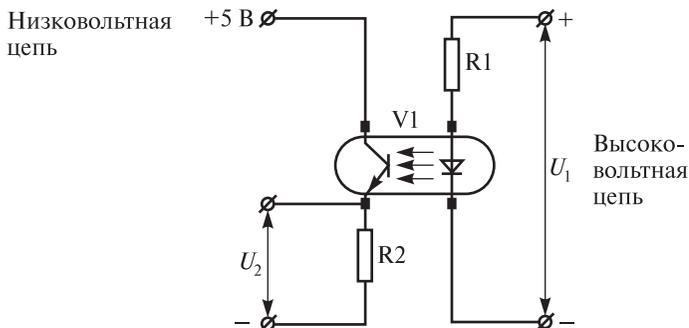


Рис. 12.6. Принципиальная схема гальванических развязок:
а — трансформаторная; б — оптоэлектронная

и выходной цепями — до 3000 В, и позволяет передавать данные между системами с разными уровнями напряжения.

Модуль ввода дискретных сигналов содержит 16 идентичных каналов и позволяет контролировать высоковольтные (+110 В) однополярные сигналы (рис. 12.7). На входе каждого канала включен RC-фильтр, образованный резисторами R1 и конденсатором C1, который исключает кратковременные импульсные сигналы, наводимые в электрической цепи тепловоза при коммутации цепей с индуктивностями. Диоды VD1 и VD2 защищают светоизлучающий диод оптопары DA1 от импульсных напряжений обратной полярности.

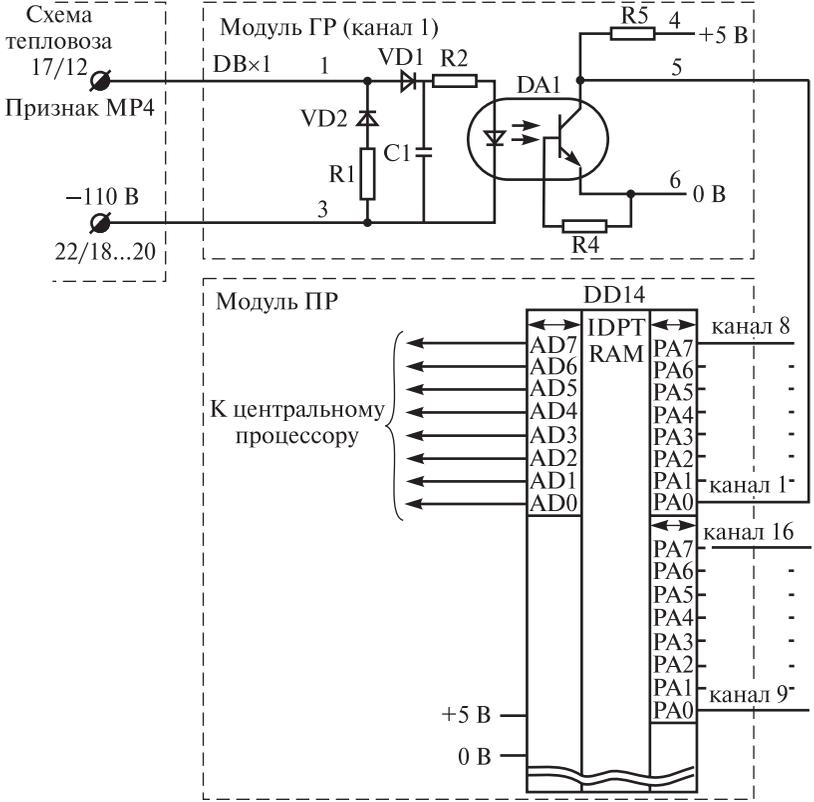


Рис. 12.7. Принципиальная схема канала ввода дискретных сигналов

Работа всех каналов одинакова; рассмотрим ее на примере канала передачи дискретного сигнала «МР4». Если на входе оптопары DA1 напряжения нет, то ее транзистор закрыт, а на коллекторе транзистора присутствует напряжение +5 В. Когда на вход канала (к выводам 1, 3) подводится дискретный сигнал цепей управления +110 В, транзистор открывается и соединяет коллектор с общей шиной питания, в результате чего выходное напряжение канала становится близким к нулю. По внутренним соединениям блока БР оно поступает на вход PA0 микросхемы DD14 и, далее, к центральному процессору. Выходы всех 16 дискретных каналов образуют две группы по 8 сигналов в каждой, присоединенных к соответствующим портам (группам входов) микросхемы DD14. Микросхема DD14 позволяет центральному процессору определять значения именно той группы сигналов, которая нужна в текущий момент для работы управляющей программы.

«Минусы» входных цепей всех каналов соединены между собой и с «минусом» цепей управления тепловоза.

12.5.2. Модуль выходных ключей дискретных сигналов

Микропроцессорной системой формируется четыре дискретных выходных сигнала. Они используются для управления следующими аппаратами электрической схемы:

– групповыми контакторами ВШ1 и ВШ2 для включения первой и второй ступеней ослабления возбуждения тяговых электродвигателей;

– реле максимального тока РМ1 для защиты агрегатов силовой цепи тепловоза от перегрузок и режимов короткого замыкания (для включения реле РУ2 с последующим отключением возбуждения тягового генератора);

– реле РУ16, обеспечивающим автоматическое переключение системы возбуждения стартер-генератора с резервного (через БРН-6) на основное (через канал 2 модуля ШИМ).

Модуль выходных ключей («ВЫХ») имеет десять каналов и выполняет задачу, обратную модулю ввода дискретных сигналов. Из десяти каналов микропроцессорная система тепловоза использует только четыре (рис. 12.8). Модуль формирует управляющие сигналы на включение электрических аппаратов электрической схемы тепловоза. Каждый канал состоит из входного формирователя сигнала

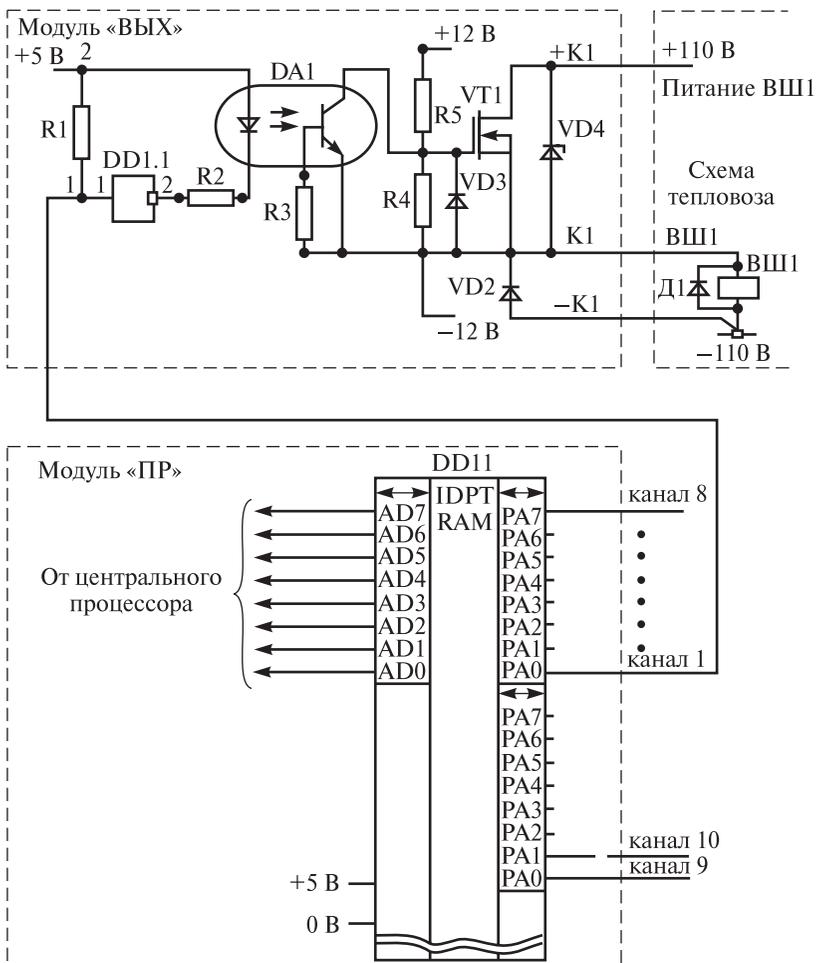


Рис. 12.8. Принципиальная схема канала вывода дискретных сигналов

управления, выполненного на инверторе DD1.1, оптотары гальванической развязки и силового транзистора VT1 (выходного ключа). Диоды VD2, VD3 и стабилитрон VD4 служат для защиты силового транзистора VT1 и выходного транзистора DA1 от превышения допустимого напряжения и напряжения обратной полярности, которые возникают в модуле при коммутации цепей тепловоза.

Работа канала происходит по следующему алгоритму. Когда на вход 1 инвертора DD1.1 приходит сигнал высокого уровня (+5 В), на его выходе 2 формируется сигнал низкого уровня (0 В). Под действием разности потенциалов 5В через светодиод оптопары DA1 протекает ток, вследствие чего ее транзистор открывается и шунтирует управляющий переход «затвор—сток» транзистора VT1. Это приводит к закрытию транзистора VT1. Таким образом, при наличии дискретного сигнала +5 В на входе канала ключ VT1 закрыт и ток через катушку (в данном случае катушку контактора ВШ1) не протекает. При подаче из модуля процессора управляющего сигнала низкого уровня (0В) на вход 1, на выходе 2 инвертора DD1.1 формируется сигнал высокого уровня (+5 В). Транзистор оптопары закрывается и на затвор транзистора VT1 от источника стабилизированного напряжения через резистор R2 поступает напряжение питания +12 В. Транзистор VT1 открывается и через переход «исток—сток» собирает цепь питания катушки ВШ1 от источника +110 В.

Выходы «-К» всех десяти каналов модуля «ВЫХ» соединены между собой внутренними соединениями блока БР и через контакт в5 внешнего разъема XS2, проводом 5019 соединены с «минусовой» клеммой 22/18. Выходы «+К» каналов подключаются к «плюсовой» цепи бортовой сети отдельными проводами для уменьшения перепадов напряжений в цепях модуля «ВЫХ».

Включение контактора ВШ1 (ВШ2) по команде от блока БР происходит по цепи (см. рис. 12.4): контакт 7 контроллера (с напряжением +110 В), замкнутый контакт тумблера ТУП «Управление переходом», клемма 18/18, провод 5017 (5022), контакт a1 (a2) внешнего разъема XS2 блока БР, по его внутренним соединениям на переход «исток—сток» силового транзистора VT1 (см. рис. 12.5), по внутренним соединениям блока БР на контакт с1 (с2) разъема XS2 (см. рис. 12.4) и, далее, на катушку ВШ1 (ВШ2) и «минусовую» клемму цепей управления 22/4.

Включение реле РМ1 происходит по цепи (см. рис. 12.1): выключатель А12, клеммы 22/1, 22/2, провод 5027, контакт a3 разъема XS2 блока БР, по его внутренним соединениям на переход «исток—сток» силового транзистора, по внутренним соединениям блока БР на контакт с3 его внешнего разъема XS2, по проводам 5021, 445, на катушку РМ1, и по проводам 446, 5082, на «минусовую» клемму 22/19.

Включение реле РУ16 происходит по цепи (см. рис. 12.1): выключатель А12, клеммы 22/1, 22/2, провод 5030, контакт а4 разъема XS2 блока БР, по его внутренним соединениям на переход «исток—сток» силового транзистора, по внутренним соединениям блока БР на контакт с4 внешнего разъема XS2, по проводам 5029, 558 на катушку РУ16, и по проводам 1498, 1408 на разъем «минусовых» цепей.

12.6. Модуль аналогово-цифрового преобразователя

Аналоговые управляющие сигналы используются в микропроцессорной системе для бесступенчатого регулирования тока возбуждения синхронного возбудителя и тока возбуждения стартер-генератора (см. рис. 12.1). Все сигналы датчиков поступают на вход микропроцессорной системы в аналоговом виде в определенном диапазоне постоянного напряжения. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) решает задачу поиска однозначного соответствия сигналу постоянного напряжения (аналоговому сигналу) цифрового кода, т.е. на вход аналогово-цифрового преобразователя поступает постоянное напряжение и спустя время преобразования (20—200 мкс) на его выходе появляется соответствующий цифровой десятиразрядный код.

Аналоговыми сигналами микропроцессорной системы являются: напряжение тягового генератора U_d ; ток тягового генератора I_d ; напряжение стартер-генератора $U_{ст}$; положение реек ТНВД; положение якоря ИД.

При работе с высоковольтными аналоговыми электрическими сигналами (например, напряжение и ток тягового генератора тепловоза) их гальваническая развязка, а также первичное масштабирование сигнала осуществляется в датчиках. Измерение неэлектрических величин, например выход реек ТНВД, также выполняют датчики, которые преобразуют первичный сигнал в электрическое напряжение с определенным масштабным коэффициентом. С этой целью на вход датчиков подается стабилизированное низковольтное напряжение.

Кроме того, модуль АЦП используется для преобразования частотных сигналов в цифровой код, поскольку в микропроцессорной системе предусмотрен канал измерения частоты вращения коленчатого вала дизеля.

Питание всех датчиков аналоговых сигналов осуществляется стабилизированным напряжением постоянного тока ± 15 В, формируемым в блоке БР, по цепям (см. рис. 12.1):

+15 В — с выхода модуля питания блока БР на контакт в6 с внешнего разъема XS1 блока БР по проводу 5066 на зажим «+15 В» датчика тока тягового генератора ДТ; по проводу 5041 на зажим «+15 В» датчика напряжения тягового генератора ДН; по проводу 5077 на разъема X2 блока БЭ датчика линейных перемещений ДЛП; по проводам 5066 и 5040 на зажим «+15 В» датчика напряжения стартер-генератора ДНсг;

–15 В — с выхода модуля питания блока БР на контакт в7 его внешнего разъема XS1, далее — по проводу 5067 на зажим «–15 В» датчика ДТ, по проводу 5043 на зажим «–15 В» датчика ДНсг, по проводу 5043 на зажим «–15 В» датчика ДН, далее — по проводу 5076 на контакт 5 разъема X2 блока БЭ датчика ДЛП.

Входным сигналом датчика напряжения тягового генератора ДН является напряжение на выходе выпрямительной установки U_d . «Плюсовой» потенциал напряжения U_d поступает на вход «1000 В» датчика ДН с зажима штатного вольтметра тепловоза V по проводу 5091; «минус» силовой цепи (с измерительного шунта Ш1) проводом 5090 соединен с входом «0 В» датчика. Выходной сигнал датчика ДН, пропорциональный текущему значению U_d , с выхода «Вых1» по проводу 5068, через контакт а1 разъем XS1 поступает в блок БР и по его внутренним соединениям — на вход модуля АЦП; с выхода модуля АЦП по внутренним соединениям блока БР на контакт а2 разъема XS1 и по проводу 5069 на зажим «Вых2» датчика ДН.

Входным сигналом датчика тока тягового генератора ДТ является падение напряжения на измерительном шунте Ш1, пропорциональное току на выходе выпрямительной установки I_d . «Плюсовой» потенциал этого напряжения поступает на вход «75 мВ» датчика ДТ по проводу 5092; «минус» силовой цепи с шунта Ш1 проводом 5093 соединен с входом «0 В» датчика. Выходной сигнал датчика ДТ, пропорциональный текущему значению I_d , с выхода «Вых1» по проводу 5070 поступает на контакт а3 разъема XS1 блока БР и по внутренним соединениям блока БР — на вход модуля АЦП; и, далее, с выхода модуля АЦП через контакт а4 разъема XS1 на зажим «Вых2» датчика ДТ.

Перемещение реек топливных насосов высокого давления измеряется датчиком линейных перемещений ДЛП, в состав которого входят первичный преобразователь (ПП), устанавливаемый непосредственно на дизеле, и электронный блок обработки сигнала преобразователя (БЭ) (см. рис. 12.1). Первичный преобразователь представляет собой катушку специального исполнения, внутри которой перемещается сердечник, связанный рычажной передачей с валом управления ТНВД. Выходной разъем XI преобразователя ПП специальным экранированным кабелем связан с входным разъемом XI блока БЭ. Сигнал датчика ДЛП, пропорциональный выходу реек ТНВД, по проводу 5075 подается на контакт а8 разъема XS1 блока БР и, далее, на вход АЦП; с выхода модуля АЦП через контакт а7 разъема XS1, по проводу 5074 — на контакт 1 датчика ДЛП.

Положение сердечника ИД определяется, как и в серийной схеме тепловоза, по значению тока цепи его катушки. Аналогично, с датчика ИД сигнал поступает на разъем XS1 блока БР и по его внутренним соединениям на модуль АЦП.

Входным сигналом канала измерения напряжения стартер-генератора $U_{\text{СТГ}}$ является полная величина этого напряжения. «Плюс» напряжения $U_{\text{СТГ}}$ поступает на зажим «150 В» датчика ДНсг с зажима 21/11 клеммных реек высоковольтной камеры по проводу 5095. «Минус» напряжения стартер-генератора поступает на зажим «0 В» датчика ДНсг с зажимов 22/18...20 клеммных реек по проводу 5094. Выходной ток датчика ДНсг, пропорциональный значению $U_{\text{СТГ}}$, протекает по цепи: зажим «Вых1» датчика, провод 5072, контакт а6 разъема XS1 блока БР, по внутренним соединениям блока БР на вход модуля АЦП; с выхода модуля АЦП по внутренним соединениям блока БР на контакт а5 разъема XS1, далее — по проводу 5073 на зажим «Вых2» датчика ДНсг.

Частотным сигналом микропроцессорной системы является частота вращения коленчатого вала дизеля $n_{\text{диз}}$, в качестве которого используется выходное напряжение синхронного возбуждителя. Напряжение синхронного возбуждителя с помощью трансформатора снижается до 15—20 В и поступает в модуль «Управление ШИМ», где он преобразуется в гальванически развязанный от внешних цепей сигнал, представляющий собой последовательность прямоугольных однополярных импульсов с амплитудой 5 В. Далее этот

сигнал передается в модуль процессора, где частота импульсов идентифицируется значением $n_{\text{диз}}$.

Входной сигнал канала измерения частоты вращения коленчатого вала дизеля проходит по цепи: зажим 12 вторичной обмотки трансформатора ТР1, провод 5031, контакт а6 разъема ХР1 блока БР, далее — по его внутренним соединениям на вход модуля АЦП; с выхода модуля АЦП на контакт а8 разъема ХР1, по проводу 5011 на зажим 11 обмотки трансформатора ТР1.

Входные аналоговые сигналы сначала подаются на интегральный коммутатор, назначение которого — подключить один из каналов, по которым передается аналоговый сигнал, к микросхеме десятиразрядного АЦП. Эта микросхема рассчитана на входное напряжение $-5 \text{ В} \dots +5 \text{ В}$. По окончании преобразования аналогового сигнала каждого канала (через 30 мкс) на кодовых выходах АЦП устанавливается информация, соответствующая результату преобразования. Выходная десятиразрядная кодовая комбинация через соответствующий адаптер передается на входную шину центрального процессора для использования в управляющей программе. Опрос аналоговых каналов в системе происходит каждые 0,01 с.

Кроме того, в блок АЦП входят программируемые таймеры. Один программируемый таймер предназначен для преобразования частотных сигналов в цифровой код; второй программируемый таймер — для формирования сигналов управления силовыми транзисторами каналов ШИМ. Трехканальный программируемый таймер используется для работы микропроцессорной системы в режиме реального времени и позволяет формировать импульсы управления с различными временными и частотными характеристиками.

Обмен информацией блока АЦП с центральным процессором осуществляется по 8-разрядной двунаправленной шине данных.

12.7. Модуль центрального процессора

Работа микропроцессорной системы тепловоза, как и любой микропроцессорной системы, сводится к непрерывному циклическому выполнению последовательности определенного набора операций. Эта последовательность устанавливается управляющей программой вычислительной части системы, записанной в запоминающем устройстве центрального процессора (см. п. 12.4).

Модуль центрального процессора построен на базе микроконтроллера и предназначен для логической и арифметической обработки информации на основе принципа программного управления. Микроконтроллер управляется программой, записанной в его памяти.

Внутренняя структура (архитектура) микроконтроллера определяется его функциями. Обработку и пересылку данных микропроцессор, входящий в состав микроконтроллера, осуществляет с помощью наборов электрических импульсов, составленных из двоичных сигналов 0 и 1. Выбор такого алфавита объясняется тем, что технически наиболее просто различить одно из двух возможных состояний элементарного электрического сигнала: включено/выключено.

Архитектура микроконтроллера содержит Flash программируемое и стираемое *постоянное запоминающее устройство* (ПЗУ), *оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ), встроенные генератор и схему формирования тактовых импульсов, программируемые линии ввода/вывода, дуплексный (двунаправленный) порт, вектор из шести двухуровневых прерываний, три таймера (счетчика) событий.

Постоянное запоминающее устройства ПЗУ предназначено для постоянного хранения информации, которая записывается туда и не подлежит изменению. Следовательно, прочитать эту информацию можно, а изменить нельзя. Даже при выключении питания информация в ПЗУ остается.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) используется для кратковременного хранения необходимой информации, которая, как правило, постоянно изменяется и уничтожается при перезагрузке системы или выключении питания.

Flash-память — это электрически стираемое перепрограммируемое полупроводниковое устройство, выполненное в виде интегральной микросхемы, в которую можно записать данные и хранить их сколь угодно долго при отсутствии напряжения питания. Стирание информации производится электрическим разрядом, после чего на него можно записывать новые данные.

К основным характеристикам микропроцессора относятся: длина слова (число битов, обрабатываемых одновременно), число и схема организации внутренних регистров; число портов для ввода и вывода информации, набор команд, быстродействие — число операций

в 1 с. Чем выше численное значение указанных характеристик, тем большими возможностями обладает микропроцессор. Быстродействие микроконтроллера определяется периодом системных тактовых сигналов и соответствует времени выполнения одной микрооперации. Системные тактовые сигналы поступают в том или ином виде на все устройства микропроцессорной системы.

Конкретное построение системы синхронизации очень тесно связано с архитектурой отдельных устройств микропроцессорной системы автоматического регулирования и с элементной базой, на которой она реализована.

В процессоре синхронизация операций осуществляется генератором прямоугольных тактовых импульсов, выполненным на базе кварцевого резонатора, с частотой модуляции 10 МГц. Такая высокая тактовая частота синхронизации определяется тем, что выполнение каждой команды управляющей программы включает ряд элементарных операций. Поэтому, чтобы выполнить одну команду, необходимо то или иное число тактов генератора.

В любой микропроцессорной системе необходимы средства обмена данными с разнообразными внешними устройствами. В зависимости от требований к работе системы и характеристик периферийного оборудования передача данных производится в параллельном или последовательном формате. В микропроцессорной системе тепловоза функции ввода-вывода выполняют программируемые контроллеры параллельного обмена. Обмен информацией осуществляется через три 8-разрядных двунаправленных канала. В результате для связи с периферийными устройствами микроконтроллер используются 24 линии ввода-вывода, сгруппированные в три независимых канала.

Каждое периферийное устройство может посылать в процессор сигнал о том, что оно готово к передаче или приему информации или тогда, когда нежелательно организовывать программный опрос его готовности. Такой сигнал называется прерыванием INT. Получив такой сигнал, процессор приостанавливает выполнение основной программы и переходит к выполнению подпрограммы обработки прерывания.

Прерывание может появиться в любой момент времени. Главным условием правильной реакции вычислительного устройства на прерывание является возобновление прерванной программы так,

как будто прерывания не было вообще (восстановление контекста программы). Следовательно, реагируя на прерывание, вычислительное устройство должно временно запомнить место в прерванной программе, а когда обслуживание прерывания завершится, программа продолжает выполняться из того состояния, в котором она была прервана.

Сигналы INT подаются на порт ввода-вывода, основная функция которого заключается в восприятии сигналов от подключенных внешних устройств. Если сигналов прерывания много, то определяется их приоритетность.

Управляющая программа микропроцессорной системы работает по схеме бесконечного цикла, а ее функционирование контролируется с использованием сигналов, выполняющих функции «будильника». В начале каждого цикла управляющая программа формирует соответствующий сигнал и производит сброс значений «будильника», после чего отсчет времени начинается сначала. При правильной работе программы, когда время выполнения цикла вычислений меньше интервала времени, установленного в «будильнике», защита не срабатывает. Если в результате сбоя программа закичивается, то срабатывает «будильник» и в процессор посылается сигнал RESET, приводящий микроконтроллер в исходное состояние.

Сторожевой таймер, выполненный на специальной микросхеме, обеспечивает перезапуск (RESET) микроконтроллера.

Остальные элементы модуля выполняют функции логического согласования сигналов.

12.8. Модуль ключей ШИМ

Микропроцессорная система включает два совершенно одинаковых по конструкции канала (канал 1 и канал 2), каждый из которых выполнен в виде двух отдельных модулей — модуля управления широтно-импульсным модулятором (Управление ШИМ), модуля ключей широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и нескольких элементов управления, размещенных на платах модулей аналогово-цифрового преобразователя АЦП и центрального процессора ПР. Упрощенная схема каналов представлена на рис. 12.9.

Для управления током возбуждения возбудителя используется канал 1 модуля ШИМ. Канал образован четырьмя параллельно соединенными IGBT-транзисторами VT1—VT4, включенными в

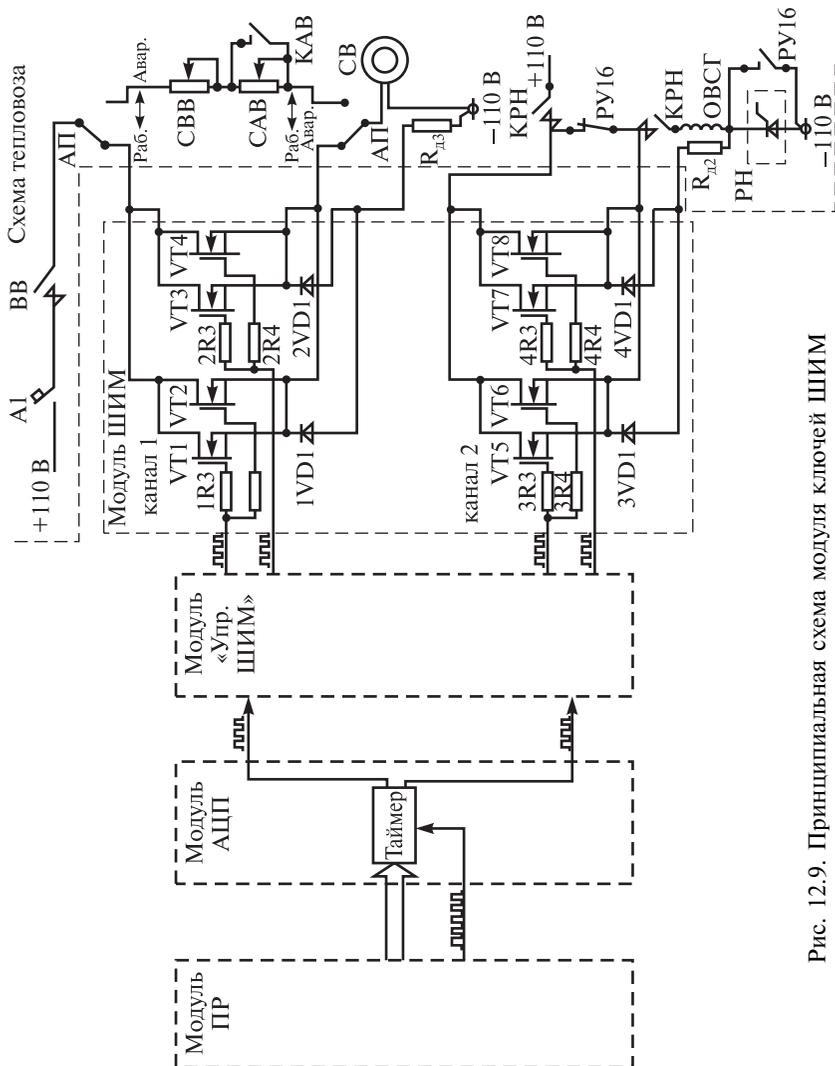


Рис. 12.9. Принципиальная схема модуля ключей ШИМ

цепь обмотки возбуждения возбудителя, и системой управления транзисторами. Транзисторы установлены на радиаторах в модуле ШИМ. Там же размещена и система управления каналом 1.

Стоки и истоки всех четырех транзисторов объединены. Сигналы управления транзисторами формируются в модуле «Упр. ШИМ» и подаются на попарно объединенные затворы: один — на затворы транзисторов VT1, VT2, а другой — на затворы транзисторов VT3, VT4. Эти сигналы представляют собой непрерывную последовательность импульсов с постоянными амплитудой 5 В и частотой 100 Гц, но переменной ширины (скважности). Скважность импульсов устанавливается соответствующим таймером, размещенным в модуле АЦП по заданию центрального процессора. Соответственно изменяется и действующее значение тока, протекающего по обмотке возбуждения возбудителя. Если необходимо увеличить ток возбуждения, центральный процессор увеличивает ширину управляющих импульсов, в противном случае — уменьшает. Диоды 1VD1, 2VD1 модуля ШИМ вместе с резистором Rд3 схемы тепловоза образуют цепи разряда индуктивности обмоток возбуждения. Для обеспечения возбуждения возбудителя при отказе микропроцессорной системы предусмотрен режим аварийного возбуждения.

Переход на аварийное возбуждение возбудителя осуществляется традиционным способом — переключением рубильника АП (см. п. 4.7). При этом контакты на переключение АП отключают обмотку возбуждения возбудителя от транзисторов модуля ШИМ и включают последовательно с ней резисторы СВВ и САВ, обеспечивая тем самым работу возбудителя с постоянным током возбуждения (аналогично серийной схеме тепловоза).

Цепь обмотки возбуждения возбудителя при работе микропроцессорной системы собирается от автоматического выключателя А1 «Возбудитель» (см. рис. 12.1), далее — по проводам 535, 571, через замкнутый главный контакт контактора возбуждения возбудителя ВВ, по проводам 5023, 496, 501, 5079, 5025, через контакт Р7—Р6 аварийного переключателя АП, замкнутый в положении «Рабочее», по проводам 536, 5001 и 5002 на контакты с1—с4 внешнего разъема ХР2 блока БР, далее — по его внутренним соединениям на переходы «исток—сток» четырех параллельно соединенных транзисторов VT1—VT4 канала 1 модуля ШИМ, и далее — по внутренним соединениям блока БР на контакты в1, в2, в6, с6 его внешнего

разъема ХР2, по проводам 5006, 5008, 367, 368, через контакт Р2—Р4 переключателя АП, замкнутый в положении «Рабочее», по проводам 491, 437, 372, на обмотку U1—U2 синхронного возбудителя, по проводам 371, 352, через измерительный шунт Ш5, по проводу 539 на «минусовую» клемму 22/18.

В режиме аварийного возбуждения возбудителя цепь его обмотки возбуждения до зажима Р7 переключателя АП аналогична рассмотренной выше; далее — контакт Р7—Р5 переключателя АП, замкнутый в положении «Аварийное», провод 5078, резисторы СВВ, САВ.1—САВ.3, провод 357, контакт Р3—Р4 переключателя АП, замкнутый в положении «Аварийное», провода 491 и 437 и далее — на «минусовую» клемму 22/18.

Канал 2 модуля ШИМ предназначен для регулирования тока возбуждения стартер-генератора и имеет такое же исполнение, как и канал 1 (рис. 12.9). Четыре параллельно соединенных IGBT-транзистора VT5—VT8 включены в цепь обмотки возбуждения стартер-генератора. Сигналы управления транзисторами формируются в модуле «Упр. ШИМ» и подаются: один — на затворы транзисторов VT5, VT6, а другой — на затворы транзисторов VT7, VT8. Как и в канале 1, эти сигналы представляют собой последовательность импульсов с постоянными амплитудой 5 В, частотой 100 Гц и переменной скважности, которая устанавливается алгоритмом центрального процессора. Соответственно изменяется действующее значение тока, протекающего по обмотке возбуждения стартер-генератора ОВСГ, и его напряжение.

Выбор режима работы системы возбуждения стартер-генератора (штатное или резервное возбуждение) осуществляется самой микропроцессорной системой путем включения или отключения реле РУ16 по дискретному сигналу управляющей программы. При штатной схеме ток в обмотку возбуждения стартер-генератора поступает по цепи (рис. 12.10): автоматический выключатель АЗ «Дизель» (на схеме не показан), провод 948, силовой контакт контактора КРН, замкнутый после окончания пуска дизеля и включения контактора КРН, провода 5046, 417, 420, 5009, 5007, контакты а4—а7 разъема ХР2 блока БР, далее — по его внутренним соединениям к переходам «исток—сток» четырех параллельно включенных транзисторов 2-го канала модуля ШИМ, от стоков транзисторов по внутренним соединениям блока БР на контакты в3, в4, в7, с7 его разъема ХР2,

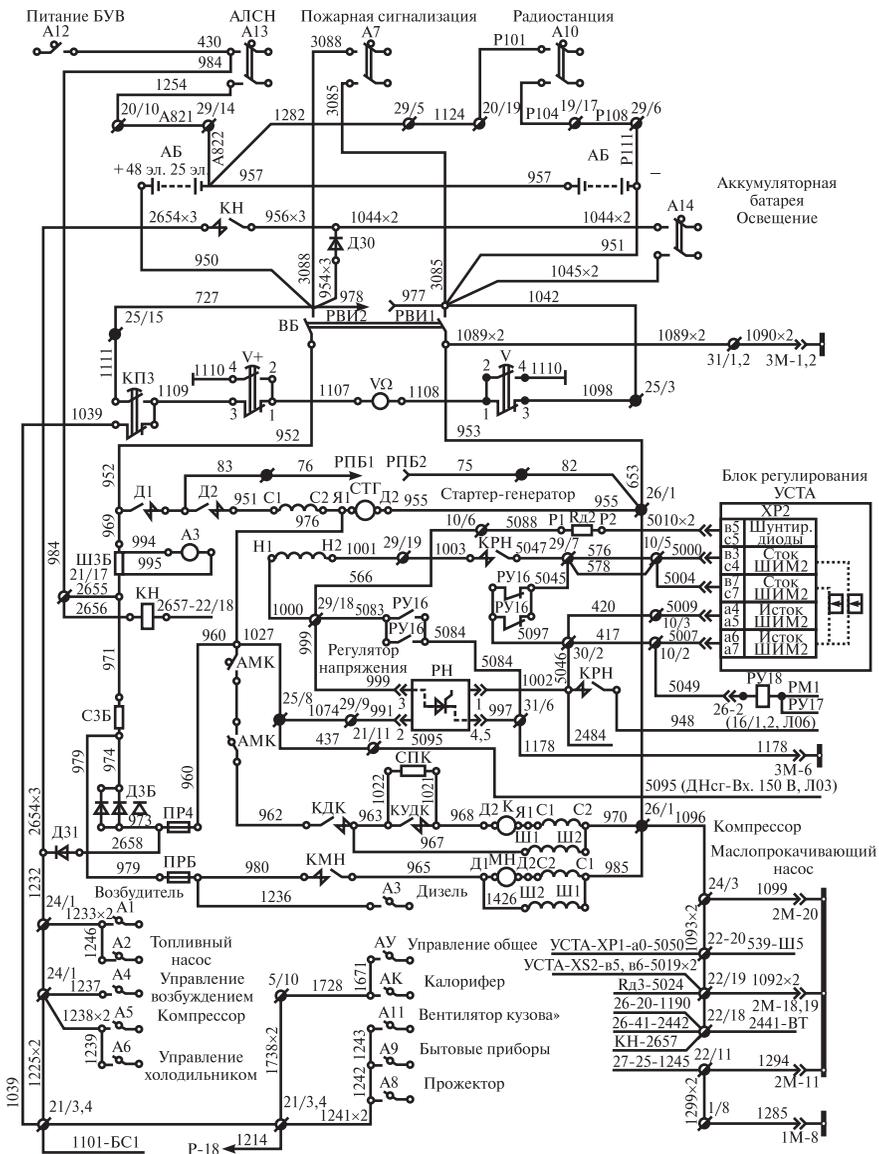


Рис. 12.10. Цепи управления приводом вспомогательных систем тепловоза 2ТЭ116 с микропроцессорной системой управления и регулирования

по проводам 5000, 5004, 576, 578, 5047, через замкнутый силовой контакт КРН, по проводам 1003, 1001, на обмотку возбуждения Н1—Н2 стартер-генератора и далее — по проводам 1000, 5083, через замкнутые контакты реле РУ16, по проводам 5084, 1178 на «минусовую» шину.

В режиме резервного возбуждения реле РУ16 отключается, в результате чего его контакты между проводами 5097 и 5045 замыкаются, а контакты между проводами 5083 и 5084 размыкаются. При этом ток в обмотку Н1—Н2 стартер-генератора потечет через регулятор РН по цепи: клемма 29/18, провод 999, контакт 3 разъема регулятора напряжения РНТ-6, по внутренним цепям регулятора на контакты 4,5 разъема, по проводу 987 на клемму 31/6.

Модуль управления ключами ШИМ формирует сигналы управления силовыми транзисторами VT1—VT4 и VT5—VT8, поэтому выполнен на базе двух совершенно идентичных схем А1—В1, А2—В2 (рис. 12.11).

Каждый модуль состоит из двух каналов: канала формирования сигнала управления на силовые транзисторы модуля ШИМ (А1 и А2) и канала преобразования входных частотных сигналов (В1 и В2).

Управляющий сигнал на открытие силовых транзисторов модуля ШИМ формируются в модуле АЦП программируемым таймером и подается на вход инвертора DD1.1. Низкий уровень сигнала на входе DD1.1 (нет сигнала на выходе таймера АЦП) создает цепь питания светодиода оптопары 1DA1 от источника +5 В через резистор 1R2. Транзистор оптопары 1DA1 открывается и на сигнальный вход 3 компаратора 1DA2 поступает напряжение. Кроме того, на опорный вход 2 компаратора поступает опорное напряжение с резистора 1R6. Компаратор используется как пороговое устройство для модуляции сигнала управления ключами широтно-импульсного модулятора. На выходе компаратора формируется сигнал высокого уровня, если разность его входных сигналов меньше напряжения срабатывания компаратора; или сигнал низкого уровня, если разность его входных сигналов превышает напряжение срабатывания компаратора.

При высоком уровне входного сигнала на инверторе DD1.1 (есть сигнал на выходе таймера АЦП) через транзистор оптопары 1DA1 будет протекать ток. На сигнальном входе 3 компаратора 1DA2 уро-

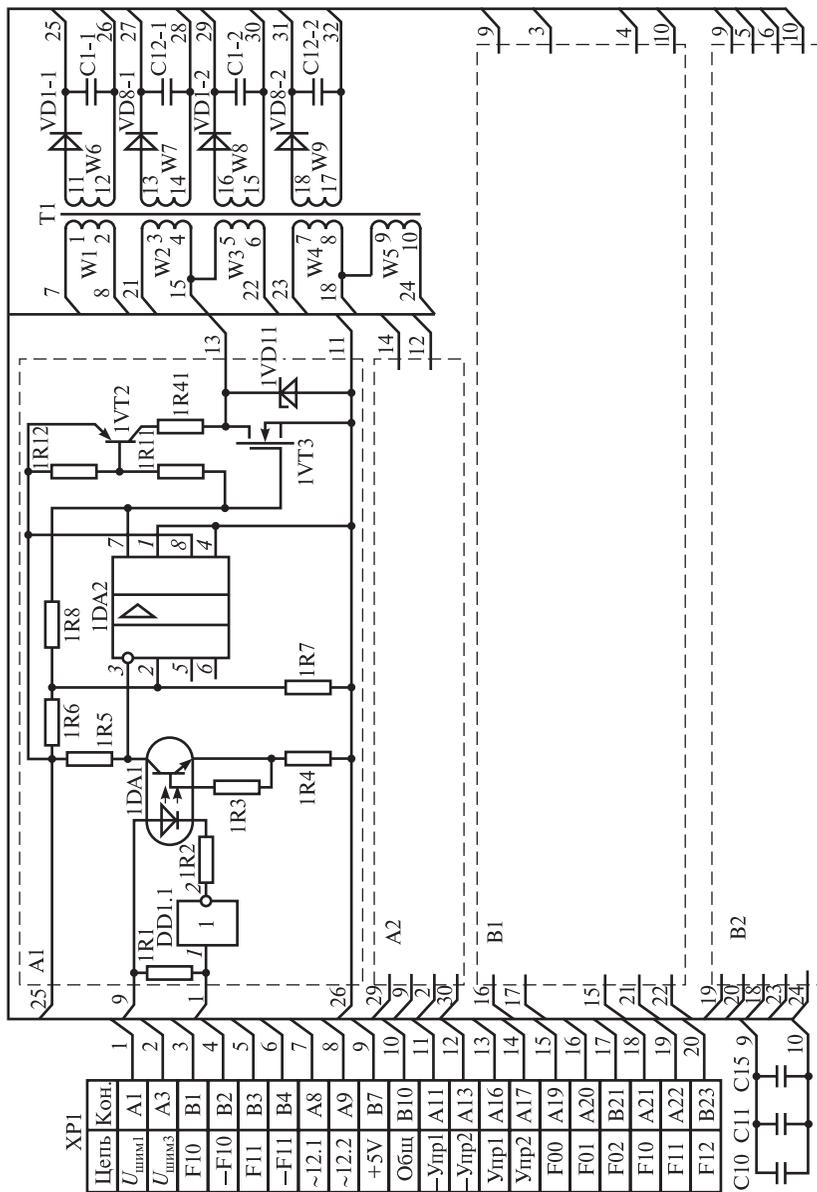


Рис. 12.11. Принципиальная схема модуля управления ключами ШИМ

вень напряжения будет выше напряжения на его опорном входе 2, и на выходе компаратора сформируется сигнал низкого уровня, который закроет транзистор 1VT2 и откроет транзистор 1VT3. В результате на выводе 13 сборной шины напряжение будет равно нулю. Вывод 13 является выходом канала формирования управляющего сигнала «Упр1» блока БР. Поэтому на силовых ключах канала 1 модуля ШИМ управляющий сигнал будет отсутствовать и ключи VT1—VT4 будут закрыты (см. рис. 12.9).

Ключи VT1—VT4 канала 1 модуля ШИМ откроются при изменении уровня входного сигнала на инверторе DD1.1 на «низкий» (нет сигнала на выходе таймера АЦП). При этом через светодиод оптопары 1DA1 перестает протекать ток и ее транзистор закроется. Выходной транзистор 1VT2 компаратора 1DA2 откроется, потому что уровень сигнала на его опорном входе 2 будет выше, чем на сигнальном входе 3. В результате на выходе компаратора сформируется сигнал высокого уровня, который откроет транзистор 1VT2 и закроет транзистор 1VT3. При этом на выводе 13 разъема XP1 появится управляющий сигнал на транзисторы VT1—VT4.

Управление ключами VT5—VT8 канала регулирования напряжения стартер-генератора осуществляется аналогичным блоком А2.

Для работы микропроцессорной системы в соответствии с заданным алгоритмом необходимо определение текущего значения частоты вращения коленчатого вала дизеля. Каналы преобразования входных частотных сигналов В1 и В2 модуля управления ключами ШИМ осуществляют преобразование входного синусоидального напряжения синхронного возбудителя в прямоугольные импульсы для последующего использования их в работе модулей АЦП и центрального процессора. Входы цепей F01 и F11 разъема XP1 предназначены для подключения частотных сигналов; входы F00 и F10 являются общими для цепей F01, F02 и F11, F12.

Глава 13. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ПООСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КАСАТЕЛЬНОЙ СИЛЫ ТЯГИ

13.1. Общие сведения

В п. 2.3 было показано, что для локомотивов по условию использования свободной мощности дизеля на тягу необходима мягкая механическая характеристика тягового электродвигателя. Поэтому основным видом двигателя, используемым в тяговом приводе тепловоза, является двигатель постоянного тока последовательного возбуждения. Однако по условию устойчивого сцепления колеса с рельсом в тяговом приводе локомотива должны использоваться электродвигатели с жесткой механической характеристикой, так как мягкая характеристика тяговых электродвигателей отрицательно сказывается на их противобоксовочных свойствах. Процесс боксования колесных пар возникает в том случае, когда момент двигателя превышает момент сил сцепления в контакте колеса и рельса; в результате частота вращения вала тягового двигателя может возрастать выше допустимого значения, что часто вызывает разрушение подшипникового узла, разрыв бандажей, удерживающих обмотку якоря двигателя, и заклинивание самого якоря.

Для защиты от боксования колесных пар на локомотивах применяются системы защиты. В частности, на тепловозах с передачей переменного-постоянного тока используется две ступени защиты от боксования, срабатывание которых приводит к снижению тока возбуждения тягового генератора, а соответственно и моментов всех тяговых двигателей (см. п. 6.10). В результате сила тяги тепловоза уменьшается, а свободная мощность дизеля используется не полностью.

С развитием силовой полупроводниковой техники и микропроцессорных систем управления энергетическим оборудованием локомотива стало возможно отказаться от группового привода тяго-

вых двигателей (когда управление моментами всех двигателей осуществляется одновременно) и перейти к индивидуальному приводу (когда управление моментом каждого двигателя осуществляется в зависимости от состояния только этого двигателя).

При групповом приводе все тяговые электродвигатели включены параллельно на выпрямительную установку, поэтому напряжение на них одинаково и равно U_d (см. п. 2.1). Такая схема включения тяговых электродвигателей предполагает, что их скоростные и нагрузочные характеристики идентичны. В этом случае обеспечивается эффективное использование мощности дизеля, а сила тяги каждой колесной пары максимальна и равна силе тяги остальных колесных пар. Однако, как свидетельствует опыт эксплуатации, характеристики тяговых электродвигателей, работающих на одной секции локомотива, имеют значительные различия. Это приводит к существенному разбросу значений тока по отдельным электродвигателям, что, в свою очередь, вызывает разброс значений механического момента на их валу. Большой момент отдельно взятого тягового двигателя способствует увеличению относительной скорости проскальзывания соответствующей колесной пары и развитию боксования.

Внедрение индивидуального привода тяговых двигателей позволяет оптимизировать режимы работы энергетического оборудования локомотивов, т.е. при имеющемся разбросе характеристик тягового привода обеспечить полное использование мощности дизеля на тягу за счет повышения противобоксовочных свойств самого локомотива. Примером тому является микропроцессорная система поосного регулирования касательной силы тяги тепловоза 2ТЭ116 УСТА-М, принципиальная схема которой приведена на рис. 13.1 [35].

При индивидуальном приводе каждый тяговый электродвигатель ТЭД1—ТЭД6 подключен к тяговому генератору через индивидуальную управляемую выпрямительную установку УВМ1—УВМ6. Для измерения частоты вращения каждой колесной пары тепловоза на крышах букс установлены датчики Тх1—Тх6. Такое включение тяговых двигателей дает возможность значительно повысить коэффициент использования сцепного веса локомотива при реализации предельных по условию сцепления касательных сил тяги на ободах колес.

По своей сути микропроцессорная система поосного регулирования касательной силы тяги локомотива является продолжением

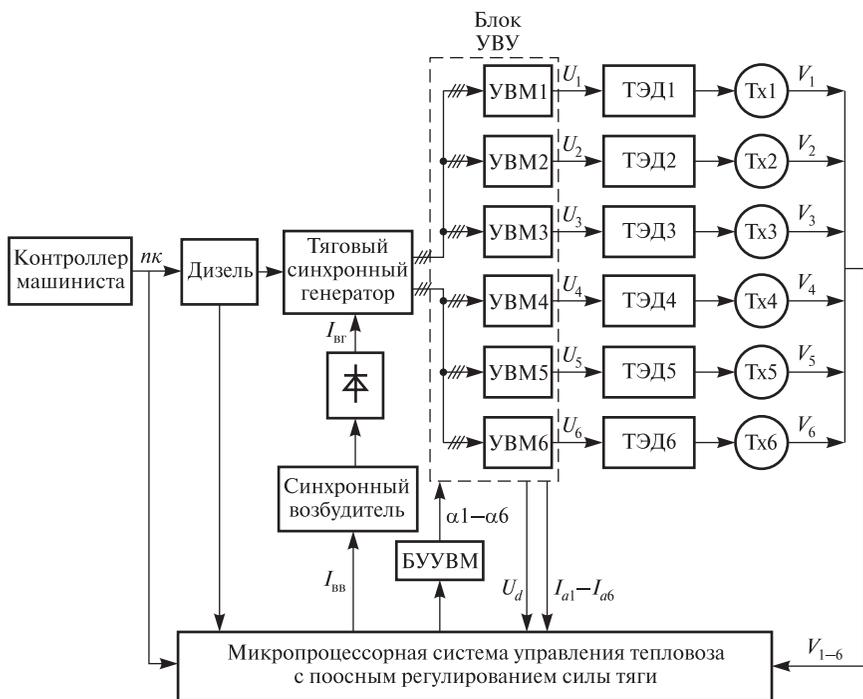


Рис. 13.1. Принципиальная схема энергетической цепи тепловоза с микропроцессорной системой поосного регулирования касательной силы тяги

и развитием микропроцессорной системы, рассмотренной в п. 12; основные принципы регулирования мощности дизель-генератора в ней практически те же.

Машинист рукояткой контроллера задает частоту вращения вала дизеля и положение реек топливных насосов высокого давления, соответствующее экономической характеристике дизеля. Заданная частота вращения коленчатого вала дизеля поддерживается его объединенным регулятором на всех режимах работы тепловоза за счет изменения выхода реек топливных насосов высокого давления. Процессор микропроцессорной системы поосного регулирования получает информацию о текущем положении реек ТНВД $L_{ТН}$ от датчика линейных перемещений ДЛП (см. п. 12.2) или штатного индуктивного датчика $L_{ид}$.

На режимах устойчивого сцепления колес с рельсами мощность, подведенная к тяговым электродвигателям, регулируется так же, как и микропроцессорной системой тепловоза: в зависимости от разности сигналов задания и фактического значения мощностей $\Delta P_d = (P_{d \text{ зад}} - P_d)$ изменяется ток возбуждения возбудителя, а соответственно и напряжение тягового генератора (см. п. 12.3.1).

В случае потери сцепления колесной парой напряжение на ее тяговом электродвигателе снижается управляемым выпрямительным мостом УВМ, чтобы исключить увеличение частоты вращения. При этом напряжение двигателей небоксующих колесных пар не только не снижается, но может и повышаться, увеличивая их механический момент по мере снижения его у тягового двигателя боксующей колесной пары. На режимах боксования напряжение генератора меняется таким образом, чтобы сохранить неизменной отбираемую от дизеля мощность. Соответственно напряжение на электродвигателях небоксующих колесных пар возрастает, а касательная мощность тепловоза остается неизменной за счет перераспределения ее между боксующими и небоксующими двигателями. Электромеханическая постоянная времени тягового двигателя с учетом приведения к его валу всех масс колесно-моторного блока составляет десятые доли секунды. Поэтому быстроедействие системы регулирования напряжения должно быть достаточно высоким для реализации всего цикла управления двигателями при потере сцепления.

Очевидно, что при индивидуальном регулировании напряжения, подводимого к каждому тяговому электродвигателю, резкое снижение силы тяги локомотива может быть существенно уменьшено, а во многих случаях — полностью исключено. Это позволяет обеспечить на ободу колесной пары максимально возможную по условиям сцепления касательную силу тяги.

Несколько худшие результаты по тяговым свойствам тепловоза можно получить при подключении к одному управляемому выпрямителю тяговых электродвигателей тележки.

13.2. Алгоритм работы микропроцессорной системы поосного регулирования

Электрическая передача с системой поосного регулирования касательной силы тяги включает (см. рис. 13.1):

- тяговый синхронный генератор;
- управляемый выпрямительный модуль (ВВУ), состоящий из шести управляемых выпрямителей УВМ1—УВМ6, собранных в виде одной конструкции (от каждой статорной обмотки тягового генератора получают питание три управляемых выпрямителя);
- шесть тяговых электродвигателей ТЭД1—ТЭД6, каждый из которых подключен к отдельному управляемому выпрямителю;
- датчики частоты вращения колесных пар Тх1—Тх6, установленные на крышках букс колесных пар тепловоза;
- микропроцессорную систему поосного регулирования касательной силы тяги, обеспечивающую регулирование напряжения на выходах управляемых выпрямителей и в обмотке возбуждения тягового генератора по заданному алгоритму;
- блок управления управляемыми выпрямителями (БУ).

При работе тепловоза микропроцессорная система с поосным регулированием касательной силы тяги получает информацию о позиции контроллера машиниста *пк*, напряжении тягового генератора U_d , токах $I_{ТЭД}$ и напряжениях каждого тягового двигателя $U_{ТЭД}$, положении рейки топливных насосов высокого давления $L_{ТН}$ и $L_{ид}$, частоте вращения каждой колесной пары $n_{кол}$ и регулирует напряжение тягового генератора, управляя током возбуждения синхронного возбудителя (см. п. 12.3).

Изменение тока обмотки возбуждения синхронного возбудителя осуществляется транзисторными ключами модуля ШИМ блока БР (см. рис. 12.1, 12.9).

Основные принципы регулирования напряжения тягового генератора на тепловозе, оборудованном микропроцессорной системой поосного регулирования, идентичны тепловозам с микропроцессорной системой, рассмотренной в гл. 12. Они сводятся к поддержанию напряжения генератора, при котором частота вращения колленчатого вала дизеля и удельный расход топлива соответствуют его экономической характеристик при всех режимах работы тепловоза и ограничении тока и напряжения тягового генератора в случае превышения ими максимально допустимых значений. Это достигается совместной работой объединенного регулятора дизеля и микропроцессорной системы автоматического регулирования. Однако способ реализации этих принципов в системе поосного регулирования касательной силы тяги несколько отличается.

В микропроцессорной системе регулирования ток возбуждения возбудителя изменяется по значению разности заданного и фактического напряжений тягового генератора $\Delta U_d = \Delta U_{d \text{ зад}} - U_d$ (см. п. 12.3). Значение заданного напряжения $U_{d \text{ зад}}$ определяется исходя из разности между заданным и фактическим значениями мощности тягового генератора ΔP_d .

При потере сцепления колеса с рельсом частота вращения якоря тягового двигателя $n_{\text{ТЭД}}$ повышается, а ток генератора I_d уменьшается. Это приводит к снижению мощности генератора $P_d = U_d I_d$ и появлению рассогласования между заданным и фактическим ее значениями. В результате величины ΔP_d и ΔU_d возрастают, увеличивая напряжение тягового генератора, что неизбежно приводит к увеличению частоты вращения якоря двигателя

$$n_{\text{ТЭД}} = \frac{U_d - I_a R_{\text{ТЭД}}}{c \Phi_d},$$

а соответственно и колесной пары локомотива. Поэтому ликвидировать начавшееся боксование без включения защиты (принудительного снижения напряжения генератора) такая система не может.

В микропроцессорной системе поосного регулирования напряжение тягового генератора изменяется по сигналу рассогласования некоторой заданной $V_{\text{зад}}$ и фактической V скоростей движения тепловоза (рис. 13.2). Заданная скорость движения $V_{\text{зад}}$ на каждом i -м цикле управляющей программы рассчитывается по изменению *дискретного сигнала* рассогласования заданной и текущей мощности тягового генератора $\Delta P_{di} = P_{d \text{ зад } i} - P_{di}$. Сигнал задания мощности $P_{d \text{ зад } i}$ формируется блоком задания БЗ по частоте вращения вала дизеля $n_{\text{диз}}$ и положению реек ТНВД $L_{\text{ТН}}$. Текущая мощность генератора вычисляется в блоке вычисления мощности БВМ как произведение текущих значений его тока I_d и напряжения U_d . Кроме того, в блок сравнения канала формирования сигнала $V_{\text{зад}}$ поступает корректирующий сигнал максимальной мощности тяговых двигателей, вычисленной как произведение максимального тока $I_{a \text{ max}}$ и максимального напряжения тяговых двигателей U_{max} . По значениям этих сигналов управляющая программа рассчитывает заданное значение ускорения локомотива $\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\text{зад}}$ и само значение $V_{\text{зад}}$.

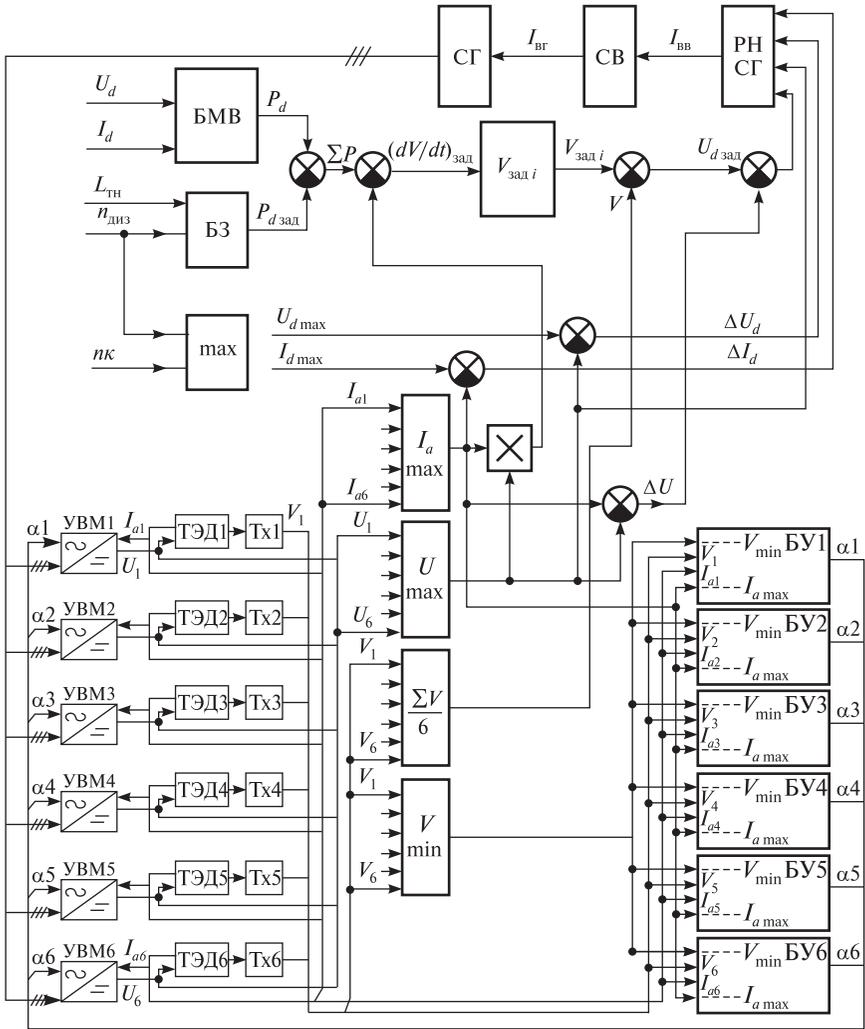


Рис. 13.2. Принципиальная схема микропроцессорной системы поосного регулирования касательной силы тяги тепловоза

Для реализации этого алгоритма в канал формирования сигналов задания управляющей программы добавлен блок расчета дискретной величины рассогласования мощностей

$$S_i = S_{i-1} + \text{sign}(\Delta P_{di}),$$

где S_{i-1} — значение переменной S в предыдущем ($i-1$ -м) цикле выполнения управляющей программы;

$$\text{sign}(\Delta P_{di}) = \begin{cases} +1 & \text{при } \Delta P_{di} > 0; \\ -1 & \text{при } \Delta P_{di} < 0; \\ 0 & \text{при } \Delta P_{di} = 0. \end{cases}$$

Само значение заданной скорости рассчитывается как

$$V_{\text{зад}i} = K(\Delta P_{di})S_i,$$

где $K(\Delta P_{di})$ — коэффициент, значение которого определяется модулем величины ΔP_{di} .

Фактическая скорость движения локомотива V определяется управляющей программой как среднее значение скоростей колесных пар в блоке « $\frac{\sum V}{6}$ » по сигналам осевых датчиков Тх1—Тх6.

В блоке сравнения величин V и $V_{\text{зад}}$ по их разности рассчитывается сигнал задания напряжения тягового генератора $U_{d \text{ зад}}$, который поступает на вход регулятора напряжения тягового генератора РН СГ. Таким образом, в каждом цикле выполнения управляющей программы значение заданной скорости движения локомотива будет непрерывно увеличиваться (при $\Delta P_{di} > 0$) или уменьшаться (при $\Delta P_{di} < 0$) темпом, зависящим от абсолютного значения величины ΔP_{di} . Сигнал рассогласования заданной и фактической скоростей движения локомотива является задающим сигналом для пропорционально-интегрального регулятора напряжения тягового генератора (блок «РН СГ»).

При таком способе регулирования увеличение частоты вращения колесных пар тепловоза будет приводить к уменьшению заданного, а следовательно, и фактического напряжения тягового генератора из-за уменьшения разности ($V_{\text{зад}i} - V_i$). Снижение напряжения генератора приведет к уменьшению его мощности, а соответственно величина $\Delta P_{di} = \Delta P_{d \text{ зад}i} - P_{di}$ возрастет и увеличит значение $V_{\text{зад}i} = K(\Delta P_{di})S_i$. Следствием этого будет восстановление заданного значения напряжения за счет увеличения $V_{\text{зад}}$. Если изменение частоты вращения колесных пар вызвано изменением скорости движения, темп увеличения напряжения будет намного ниже темпа изменения заданной скорости. Поэтому по мере разгона тепловоза

напряжение тягового генератора будет повышаться из-за снижения тока I_d , обеспечивая поддержание постоянной мощности дизеля.

При интенсивном изменении частоты вращения колесных пар, вызванном потерей сцепления одной или несколькими из них, изменение сигнала V приведет к быстрому снижению напряжения тягового генератора с последующим медленным его восстановлением за счет увеличения $V_{\text{зад}}$. Такой алгоритм регулирования не только предотвращает развитие уже начавшегося боксования, но и способствует его быстрому прекращению без значительного снижения мощности генератора, неизбежного в случае срабатывания противобоксовочной защиты.

Кроме того, система поосного регулирования касательной силы тяги обеспечивает индивидуальное управление напряжением, приложенным к каждому тяговому электродвигателю. Управляющее воздействие при таком способе регулирования заключается в изменении угла открытия тиристорov управляемых выпрямителей УВМ1—УВМ6. При нормальном сцеплении и отсутствии боксования никакого воздействия на напряжение питания тяговых электродвигателей не оказывается и оно определяется текущим напряжением тягового генератора. В случае потери сцепления колесной парой напряжение питания соответствующего тягового двигателя будет уменьшаться.

Исполнительным устройством регулятора напряжения питания тяговых электродвигателей является блок управления выпрямителями БУ, формирующий импульсы управления тиристорами каждого моста УВМ1—УВМ6. Фазы импульсов α_1 — α_6 рассчитываются управляющей программой в соответствии с алгоритмом:

$$\alpha_k = 180 \cdot N_k,$$

где $0 \leq N_k < 1$ — нормированный сигнал, зависящий от угловой скорости вращения k -й колесной пары, ее углового ускорения и тока k -го тягового электродвигателя.

Для определения значения N_k по текущим значениям V_1 — V_6 управляющей программой рассчитываются значения угловых ускорений каждой колесной пары и их минимальная частота вращения V_{min} (см. рис. 13.2). В блоке выделения максимального значения тока $I_{a \text{ max}}$ определяются значение максимального тока тяговых двигателей по сигналам, поступающих от датчиков токов I_{a1} — I_{a6} .

Далее логические блоки управляющей программы анализируют текущее состояние каждой колесной пары и соответствующего электродвигателя и в блоках ББ1—ББ6 формируют сигналы управления на каждый управляемый выпрямитель УВМ1—УВМ6.

Если частота вращения k -й колесной пары V_k не отличается от минимальной V_{\min} более чем на 3 %, ее угловое ускорение не превышает допустимую величину, а ток k -го электродвигателя I_{dk} не отличается от $I_{d \max}$ более чем на 7 %, то сигнал $N_k = 0$ и соответственно угол управления $\alpha_k = 0$. Это означает, что соответствующие тиристоры k -го управляемого выпрямителя УВМ откроются в начале положительного полупериода подаваемого на них напряжения, т.е. управляемый выпрямитель работает как обычный неуправляемый двухполупериодный выпрямитель. При этом напряжение на тяговом электродвигателе будет равно напряжению тягового генератора U_d , сформированного блоком РН СГ.

При нарушении хотя бы одного из указанных выше условий для k -й колесной пары управляющая программа увеличит значение N_k , вследствие чего напряжение на тяговом электродвигателе снизится, ограничивая его вращающий момент.

Микропроцессорная система поосного регулирования контролирует текущие значения тока и напряжения тягового генератора. В том случае, если $I_{di} > I_{d \max}$ или $U_{di} > U_{d \max}$ сигнал их разности поступает в блок РН СГ, который соответственно снижает U_d до требуемого значения или устанавливает $U_d = U_{d \max}$.

13.3. Аппаратные средства микропроцессорной системы поосного регулирования

Структура микропроцессорной системы поосного регулирования полностью соответствует структуре микропроцессорной системы тепловоза (см. рис. 12.1), однако дополнительные задачи по управлению электрической передачей, решаемые этой системой, потребовали введения дополнительных измерительных и управляющих каналов.

Средства ввода аналоговых сигналов в микропроцессорной системе поосного регулирования дополнительно имеют 12 каналов и контролируют аналоговые сигналы напряжения на выходе управляемых выпрямителей УВМ1—УВМ6 $U_1—U_6$ и токов тяговых электродвигателей $I_{a1}—I_{a6}$.

Средства ввода дискретных сигналов контролируют состояние тех же электрических аппаратов схемы управления тепловоза, что и в микропроцессорной системе, за исключением реле боксования первой и второй ступеней защиты.

Средства ввода частотных сигналов в микропроцессорной системе поосного регулирования дополнительно имеют шесть каналов, используемых для измерения частоты вращения колесных пар тепловоза. В связи с увеличением количества каналов они размещены в двух дополнительных модулях. Первичное преобразование частоты вращения колесных пар в частотные сигналы осуществляется шестью частотными датчиками Тх1—Тх6, устанавливаемыми на крышки букс колесных пар тепловоза.

Средства вывода аналоговых управляющих сигналов включают:

- канал регулирования тока возбуждения возбудителя (аналогичный микропроцессорной системе);
- канал регулирования тока возбуждения стартер-генератора (аналогичный микропроцессорной системе);
- шесть каналов управления управляемыми выпрямителями УВМ1—УВМ6.

В связи со значительным увеличением количества аналоговых управляющих сигналов для размещения их аппаратных средств в систему включены дополнительные модули.

Средства вывода дискретных управляющих сигналов обеспечивают управление четырьмя аппаратами электрической схемы тепловоза: контакторы ВШ1, ВШ2, РМ1, РУ16 (см. п. 12.3).

Модуль управляемого выпрямителя УВМ представляет собой единую конструкцию, где размещены шесть трехфазных мостовых тиристорных выпрямителей УВМ1—УВМ6. Силовая электрическая часть управляемого выпрямительного модуля состоит из 36 тиристоров, объединенных в шесть независимых управляемых выпрямительных мостов (см. рис. 3.4). Напряжение к модулю УВМ подается от двух трехфазных статорных обмоток тягового генератора. Основу силовой части одного моста составляет схема, состоящая из шести тиристоров и РС-цепей, служащих для защиты тиристоров от коммутационных перенапряжений. Для защиты тиристоров от перегрузки по току используются быстродействующие предохра-

нители, снабженные блок-контактами, которые замыкаются при повреждении предохранителей.

В силовом шкафу УВМ размещаются также включатели тиристорных, шесть высокочастотных трансформаторов и два трехфазных трансформатора синхронизации. Включатели тиристорных обеспечивают усиление по мощности импульсов управления, формируемых в блоке управления, а также гальваническую развязку силовых цепей УВМ и блока управления. На вход силового шкафа поступает трехфазное переменное напряжение со статорных обмоток тягового генератора. Там же расположены датчики напряжения ДН1— ДН6 и датчики тока ДТ1—ДТ6 тяговых двигателей. Выходные сигналы датчиков напряжения и тока из силовой части выпрямительного модуля поступают в блок управления. Кроме того, в силовом шкафу находятся блокировки дверей для защиты обслуживающего персонала от поражения высоким напряжением.

Управляемая выпрямительная установка (УВУ) обеспечивает:

- индивидуальное питание тяговых электродвигателей путем преобразования переменного трехфазного напряжения тягового генератора в шесть регулируемых по величине напряжений постоянного тока;

- прием сигналов управления тиристорами по 36 каналам;

- формирование дискретных сигналов с уровнем напряжения 110 В по семи каналам для управления.

Блок управления управляемым выпрямительным модулем (БУ УВМ) выполняет следующие функции:

- прием входных аналоговых сигналов от микропроцессорной системы, датчиков тока и напряжения с уровнем сигнала ± 5 В (± 5 мА) по 18 каналам;

- прием входных частотных сигналов от датчиков частоты;

- выдачу сигналов управления на формирователи импульсов включения тиристорных УВМ — 36 каналов с уровнем сигнала +15 В и током нагрузки 20 мА;

- формирование переменного напряжения 24 В частотой 25 кГц и током нагрузки 1 А для создания импульсов управления тиристорами по шести каналам;

- прием входных дискретных сигналов от схемы тепловоза с уровнем напряжения 110 В;

- индикацию состояния БУ УВМ светодиодами на лицевых панелях.

Комплект датчиков обеспечивает передачу информации о величинах токов и напряжений тяговых электродвигателей с уровнем сигнала $0... \pm 5$ В или $0... \pm 5$ мА и частоты вращения колесных пар с уровнем напряжения от 0 до 30 В.

В состав блока БУ УВМ входят шесть идентичных модулей БУ1—БУ6, имеющие по три ячейки каждый. В состав одного модуля входят: ячейка питания, ячейка периферии и ячейка контроллера.

Ячейки контроллера и периферии выполнены в виде печатных плат, на которых устанавливаются элементы микроэлектроники. Ячейка питания преобразует напряжение питания бортовой сети тепловоза (110 В) в напряжения: +5 В, ± 15 В, 18 В, 24 В. На лицевых панелях ячеек питания установлены тумблеры для подачи питающего напряжения и предохранитель.

Ячейка периферии принимает дискретные сигналы с уровнем напряжения 110 В от схемы тепловоза, а также низковольтные сигналы управления 5В от микропроцессорной системы. Высоковольтные сигналы преобразуются в сигналы с уровнем +5 В. После этого все сигналы передаются в ячейку контроллера. Ячейка контроллера служит для сбора и обработки дискретных, аналоговых, частотных сигналов и выдачи импульсов управления тиристорами.

13.4. Работа микропроцессорной системы с поосным регулированием

Микропроцессорная система поосного регулирования на режимах пуска и остановки дизеля не используется; ее блоки получают питание от бортовой сети после запуска дизеля тепловоза и включения контактора регулятора напряжения КРН. После включения контакторов возбуждения возбудителя ВВ и генератора КВ на вход блока БР подается сигнал включить возбуждение возбудителя через модуль ключей ШИМ в режиме холостого хода. На нулевой позиции контроллера машиниста микропроцессорная система поосного регулирования поддерживает напряжение тягового генератора, достаточное для нормальной работы асинхронных электродвигателей вентиляторов охлаждения дизеля.

При переводе контроллера машиниста на 1-ю поездную позицию в соответствии с алгоритмом управления тепловозом кратковременно отключаются контакторы КВ и ВВ, для того чтобы поездные контакторы П1—П6 собрали силовую цепь энергетической системы

тепловоза без напряжения (см. п. 8.5). Соответственно микропроцессорная система закрывает ключи модуля ШИМ. После того как контакторы П1—П6 включились и собралась силовая схема тепловоза, вновь включаются контакторы КВ и ВВ. Микропроцессорная система получает сигнал о включении поездных контакторов от реле нагрузки РУ5 и плавно, с заданным темпом, уменьшает угол открытия ключей тяговых выпрямителей. Напряжение на тяговых двигателях возрастает и тепловоз приходит в движение. Условиями, при которых микропроцессорная система поосного регулирования переводит электропередачу тепловоза в режим тяги, являются присутствие на дискретных входах блока БР сигналов обратной связи (+110 В) о включении контакторов КВ, ВВ и реле РУ5.

Список использованной литературы

1. *Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.* Общий курс электропривода: учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 544 с.
2. *Стрекопытов В.В., Грищенко А.В., Кручек В.А.* Электрические передачи локомотивов: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. В.В. Стрекопытова. — М.: Маршрут, 2003. — 310 с.
3. *Виктюк К.Т., Грищенко П.И., Коробов П.К.* Судовые электроустановки и их автоматизация: учебник для вузов водн. трансп. — 2-е изд. — М.: Транспорт, 1986. — 496 с.
4. *Колесник И.К., Кузнецов Т.Ф., Липовка В.И.* и др. Электропередачи тепловозов на переменном-постоянном токе. — М.: Академкнига, 2005. — 160 с.
5. ГОСТ 2.756—76. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Воспринимающая часть электромеханических устройств.
6. ГОСТ 2.755—87. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения.
7. *Розанов Ю.К.* Основы силовой электроники. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 296 с.
8. *Засорин С.Н., Мицкевич В.А., Кучма К.Г.* Электронная и преобразовательная техника: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. С.Н. Засорина. — М.: Транспорт, 1981. — 319 с.
9. *Гусев В.Г., Гусев Ю.М.* Электроника: учебное пособие для студентов приборостроительных специальностей вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1991. — 622 с.
10. *Литовченко В.В., Баранцев О.Б., Чекмарев А.Е.* Современные силовые управляемые полупроводниковые приборы // Локомотив. — 1998. — №10. — С. 24—28.
11. *Рогинский Ю.В.* Электропитание радиоустройств. — Л.: Энергия, 1970. — 320 с.
12. Тепловоз 2ТЭ116 / С.П. Филонов, А.И. Гибалов, Е.А. Никитин и др. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1996. — 334 с.

13. *Быков В.Г., Морошкин Ю.Н., Серделевич Г.Е.* Пассажирский тепловоз ТЭП70. — М.: Транспорт, 1976. — 232 с.
14. *Ковчин С.А., Сабинин Ю.А.* Теория электропривода. — М.: Энегоатомиздат, 1994. — 496 с.
15. ГОСТ 2582—82. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.
16. ГОСТ 17516.1. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам.
17. ГОСТ 15150. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
18. ГОСТ 15543.1. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам.
19. *Скалин А.В., Бухтеев В.Ф., Кононов В.Е.* Электрические машины и аккумуляторные батареи тепловозов (конструкция, ремонт и испытания). — М.: Желдориздат, Трансинфо, 2005. — 232 с.
20. ГОСТ Р 52083—2003. Аккумуляторы никель-железные открытые призматические. Общие технические условия.
21. ГОСТ Р МЭК 60623—2002. Аккумуляторы никель-кадмиевые открытые призматические.
22. Электрооборудование тепловозов: справочник / В.Е. Верхогляд, Б.И. Вилькевич, В.С. Марченко и др. — М.: Транспорт, 1981. — 287 с.
23. Тепловоз 2ТЭ116. Инструкция по эксплуатации и обслуживанию. 2ТЭ116.ИЭ.004.
24. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10У. Руководство по эксплуатации / Под ред. О.А. Кикнадзе. — М.: Транспорт, 1981. — 519 с.
25. *Грищенко А.В., Стрекопытов В.В.* Электрические машины и преобразователи подвижного состава: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. — М.: Академия, 2005. — 320 с.
26. Электрические и электронные аппараты: учебник для вузов / Под ред. Ю.К. Розанова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Информ-электро, 2001. — 420 с.
27. ГОСТ 9219—88. Аппараты электрические тяговые. Общие технические требования.

28. *Захарченко Д.Д.* Тяговые электрические аппараты: учебник для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1991. — 247 с.

29. Магистральные электровозы. Электрические аппараты, полупроводниковые преобразователи, системы управления / В.И. Бочаров, Н.М. Васько, А.Г. Вольвич и др.; под ред. В.И. Бочарова, Б.А. Тушканова. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 384 с.

30. Электровоз ВЛ80с. Руководство по эксплуатации. — М.: Транспорт, 1982. — 622 с.

31. *Усольцев А.А.* Векторное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. — СПб.: ГИТМО (ТУ), 2002. — 43 с.

32. *Виноградов А.Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока. — Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. — 298 с.

33. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; под ред. Н.А. Ротанова. — М.: Транспорт, 1991. — 336 с.

34. *Федяева Г.А.* Реализация предельных тяговых усилий тепловозами с асинхронным тяговым приводом // Вестник ВНИИЖТ. — 2007. — №5. — С. 29—34.

35. Микропроцессорные системы автоматического регулирования электропередачи тепловозов: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / А.В. Грищенко, В.В. Грачев, С.И. Ким, Ю.И. Клименко и др.; под редакцией А.В. Грищенко. — М.: Маршрут, 2004. — 172 с.

Оглавление

От автора	3
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1. Общие сведения теории электропривода	5
1.2. Магнитные усилители	14
1.3. Бесконтактное тахометрическое устройство	34
1.4. Датчик переменной индуктивности	36
1.5. Элементы теории релейных систем	37
1.6. Основные элементы преобразовательной техники	44
1.7. Фильтры	67
1.8. Сельсин	74
1.9. Широтно-импульсная модуляция переменного напряжения	76
Глава 2. АГРЕГАТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛОКОМОТИВОВ С ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА	79
2.1. Энергетическая система тепловоза	79
2.2. Энергетическая система электровоза	85
2.3. Источники и потребители электроэнергии на тепловозе	100
2.4. Условия эксплуатации и требования, предъявляемые к электрооборудованию	113
2.5. Аккумуляторные батареи	114
2.6. Импульсные конденсаторы	125
Глава 3. СИСТЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	128
3.1. Общие сведения	128
3.2. Однофазная однополупериодная схема выпрямления	129
3.3. Однофазная мостовая схема выпрямления	135
3.4. Трехфазная мостовая схема выпрямления	143
3.5. Гармонический состав выпрямленного напряжения	147
3.6. Сравнительный анализ схем выпрямления	152
3.7. Коммутация и режимы работы выпрямителя	155
3.8. Внешние характеристики выпрямителей	160

3.9. Особенности выпрямительной установки тепловоза и ее характеристики	164
Глава 4. ОСНОВНЫЕ БЛОКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА ТЕПЛОВОЗА.....	170
4.1. Назначение автоматической системы регулирования напряжения тягового генератора.....	170
4.2. Алгоритм работы автоматической системы регулирования напряжения генератора	175
4.3. Селективный узел в тяговом режиме работы тепловоза.....	181
4.4. Блок управления возбуждением	198
4.5. Силовая система управления возбуждением генератора	204
4.6. Система гибкой обратной связи.....	209
4.7. Система аварийного возбуждения тягового генератора.....	211
4.8. Настройка системы регулирования напряжения тягового генератора.....	212
4.9. Работа блоков системы регулирования в тормозном режиме	214
4.10. Расчет силовой системы возбуждения генератора	220
Глава 5. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ И ДАТЧИКИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВОЗА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	231
5.1. Узел коррекции напряжения синхронного возбудителя.....	231
5.2. Электрические датчики системы регулирования напряжения генератора (трансформаторы постоянного тока и постоянного напряжения).....	233
5.3. Индуктивный датчик.....	238
5.4. Узел выделения максимального сигнала	240
5.5. Система формирования жестких характеристик тягового генератора	242
5.6. Регулятор напряжения.....	245
Глава 6. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	251
6.1. Характеристика аварийных режимов электрооборудования.....	251
6.2. Внутренние короткие замыкания в силовых цепях	255

6.3. Внешние короткие замыкания в силовых цепях	264
6.4. Замыкание силовой цепи на «землю»	266
6.5. Влияние системы регулирования напряжения тягового генератора тепловоза на процесс короткого замыкания	267
6.6. Требования к устройствам защиты силовой цепи	269
6.7. Применение плавких предохранителей для защиты выпрямительной установки	272
6.8. Применение реле максимального тока для защиты от коротких замыканий в силовой цепи.....	275
6.9. Применение реле заземления для защиты от замыкания силовой цепи на корпус.....	278
6.10. Система защиты от боксования колесных пар тепловоза	280
6.11. Система защиты от юза колесных пар тепловоза	285
6.12. Защита от обрыва обмоток тяговых электродвигателей тепловоза	286
Глава 7. ЭЛЕКТРОПРИВОД ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОВОЗОВ	287
7.1. Общие сведения.....	287
7.2. Управление вспомогательными системами с электроприводами постоянного тока	289
7.3. Управление вспомогательными системами с электроприводами переменного тока	297
7.4. Электрические машины приводов вспомогательного оборудования.....	301
Глава 8. ОСНОВНЫЕ ЦЕПИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЗОМ.....	308
8.1. Общие сведения.....	308
8.2. Цепи заряда батареи	311
8.3. Цепи управления пуском дизеля	312
8.4. Цепи возбуждения тягового генератора.....	317
8.5. Цепи приведения тепловоза в движение	320
8.6. Цепи набора позиций контроллера.....	326
8.7. Цепи отключения напряжения тягового генератора при срабатывании защиты дизеля.....	329
8.8. Управление схемой при аварийном отключении тягового двигателя	330
8.9. Управление тепловозом в маневровом режиме.....	331
8.10. Цепи управления в режиме электрического торможения	331

8.11. Цепи взаимодействия электрического и пневматического тормоза	338
8.12. Цепи защиты от юза колесных пар	338
8.13. Цепи защиты от превышения допустимого тока торможения	339
8.14. Цепи вентиляторов тормозных резисторов	340
8.15. Цепи защиты локомотивной бригады от высокого напряжения	340
8.16. Цепи автоматической локомотивной сигнализации	340
8.17. Указатель повреждений	343
Глава 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ТЕПЛОВОЗОВ.....	345
9.1. Общие сведения	345
9.2. Контакт электрических соединений	346
9.3. Условия возникновения электрической дуги и методы ее гашения.....	353
9.4. Расчет электромагнитных аппаратов.....	360
9.5. Понятие о динамической характеристике электромагнита	367
9.6. Классификация коммутационных аппаратов тепловозов.....	370
9.7. Электропневматические контакторы и переключатели.....	371
9.8. Электромагнитные контакторы и выключатели.....	376
9.9. Электромагнитные реле	388
9.10. Аппараты контроля и защиты.....	398
Глава 10. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ЭЛЕКТРОВОЗОВ	405
10.1. Токоприемник.....	405
10.2. Главные и быстродействующие выключатели	411
10.3. Разрядники и ограничители перенапряжения	422
10.4. Тяговый трансформатор	425
10.5. Главный контроллер	430
10.6. Реакторы и индуктивные шунты	434
10.7. Электропневматические контакторы	441
10.8. Групповые коммутационные аппараты	444
10.9. Электромагнитные контакторы и реле.....	449
10.10. Аппараты управления и защиты	452
Глава 11. ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЕ ЛОКОМОТИВОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ	456
11.1. Асинхронный двигатель как объект управления	456

11.2. Преобразователи частоты для тягового привода с асинхронными двигателями.....	463
11.3. Инвертор как преобразователь частоты напряжения.....	470
11.4. Инвертор как преобразователь амплитуды напряжения	477
11.5. Системы частотного управления асинхронным тяговым двигателем	483
11.6. Системы векторного управления асинхронным тяговым двигателем	490
11.7. Система управления электрической передачей переменного тока.....	498
Глава 12. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	
12.1. Общие принципы построения микропроцессорной системы локомотива.....	504
12.2. Принципиальная схема энергетической цепи тепловоза с микропроцессорной системой.....	511
12.3. Алгоритм работы энергетического оборудования тепловоза с микропроцессорной системой управления и регулирования.....	512
12.4. Управляющая программа микропроцессорной системы управления	519
12.5. Модули дискретных сигналов микропроцессорной системы.....	532
12.6. Модуль аналогово-цифрового преобразователя	540
12.7. Модуль центрального процессора	543
12.8. Модуль ключей ШИМ.....	546
Глава 13. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ПООСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КАСАТЕЛЬНОЙ СИЛЫ ТЯГИ.....	
13.1. Общие сведения	554
13.2. Алгоритм работы микропроцессорной системы поосного регулирования	557
13.3. Аппаратные средства микропроцессорной системы поосного регулирования.....	563
13.4. Работа микропроцессорной системы с поосным регулированием	566
Список использованной литературы.....	568

Учебное издание

Логинова Елена Юрьевна

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЛОКОМОТИВОВ

Учебник

Подписано в печать 02.04.2013 г.
Формат 60×84/16. Печ. л. 36,0. Тираж 200 экз. Заказ
ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию
на железнодорожном транспорте»
105082, Москва, ул. Бакунинская, д. 71
Тел.: +7 (495) 739-00-30,
e-mail: info@umczt.ru,
<http://www.umczt.ru>
