

*Заяц Д.С. Сглаживающие фильтры тяговых подстанций с 12-пульсовыми выпрямителями
// Академия педагогических идей «Новация». Серия: Студенческий научный вестник. – 2017.
– № 12 (декабрь). – АРТ 486-эл. – 0,4 п.л. - URL: <http://akademnova.ru/page/875550>*

РУБРИКА: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОСТИ

УДК 629.423.33

Заяц Дмитрий Сергеевич

студент 5 курс, электромеханический факультет

«Омский Государственный Университет Путей Сообщения»

г. Омск, Российская Федерация

E-mail: zayats.dimon1994@yandex.ru

**СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ
С 12-ПУЛЬСОВЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ**

Аннотация: важным преимуществом внедрения на тяговых подстанциях 12-пульсовых выпрямителей является возможность применения более простых и экономичных сглаживающих фильтров.

Ключевые слова: сглаживающий фильтр, выпрямитель, индуктивность, ёмкость, коэффициент сглаживания.

Zayats Dmitry Sergeevich

student 5 course, electromechanical faculty

"Omsk State University of Communication Pathways"

Omsk, Russian Federation

E-mail: zayats.dimon1994@yandex.ru

**SLIMMING FILTERS OF SLIDING SUBSTATIONS
WITH 12-PULSE RECTIFIERS**

Abstract: An important advantage of introducing 12-pulse rectifiers on traction substations is the possibility of using simpler and more economical smoothing filters.

Key words: smoothing filter, rectifier, inductance, capacitance, smoothing factor.

Вместо двухзвенных фильтров, применяемых на тяговых подстанциях с 6-пульсовыми выпрямителями, при 12-пульсовых могут быть применены однозвенные апериодические (рисунок 1) и резонансно-апериодические (рисунок 2) сглаживающие фильтры.

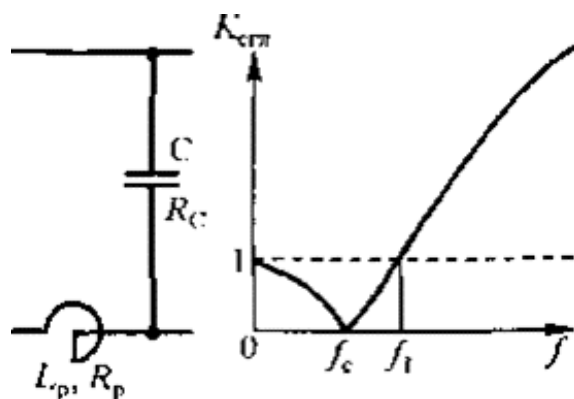


Рисунок 1 – Схема и характеристика коэффициента сглаживания однозвенного апериодического сглаживающего фильтра

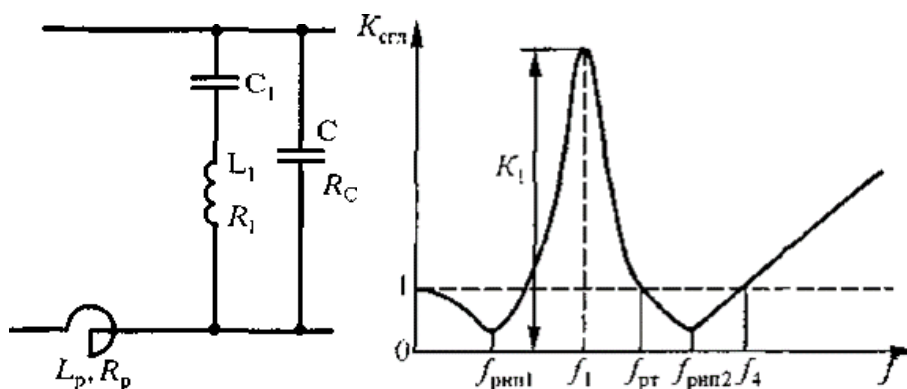


Рисунок 2 – Схема и характеристика коэффициента сглаживания
однозвенного резонансно-апериодического сглаживающего фильтра

Коэффициент сглаживания однозвенного апериодического СФ для любой частоты согласно формуле (1) можно определить следующим образом:

$$K_{сгл} = \sqrt{\frac{(1 - \omega^2 L_p C)^2 + [\omega C(R_p + R_c)]^2}{1 + (\omega C R_c)^2}}$$

(1)

где L_p , R_p – соответственно индуктивность и активное сопротивление реактора;

C , R_c – соответственно емкость и активное сопротивление параллельной части фильтра.

Для частного случая, когда $R = R_c = 0$, из выражения (1) получим

$$K_{сгл} = |1 - \omega^2 L_p C| = |1 - (f/f_c)^2|$$

(2)

где $f_c = 1/(2\pi\sqrt{L_p C})$ – частота резонанса напряжения, или частота среза фильтра в последовательной цепи фильтра между индуктивностью реактора L_p и емкостью батарей-конденсаторов C .

На тяговых подстанциях с двумя 12-пульсовыми выпрямительными агрегатами устанавливают один реактор индуктивностью 5 мГн из трех блоков РБФАУ-6500. Активное сопротивление такого реактора для диапазона частот от 100 до 1800 Гц

$$R_p = 0,23 + 0,73f \cdot 10^{-3}$$

(3)

Активное сопротивление R_c параллельной части в основном определяется сопротивлением соединительных проводов и переходным сопротивлением контактов. Для апериодических СФ его можно принимать не зависящим от частоты и равным 0,1 — 0,2 Ом.

Частотная характеристика однозвенного апериодического СФ (см. рисунок 1) показывает, что в диапазоне частот от нуля до $f_1 \approx \sqrt{2}f_c$ коэффициент сглаживания меньше единицы (коэффициент затухания $a < 0$) и, следовательно, напряжения U_{2k} всех гармоник, попадающих в этот диапазон, не уменьшаются, а усиливаются. Наименьший коэффициент сглаживания (максимальное усиление) наблюдается при частоте среза f_c .

На реальных тяговых подстанциях коэффициент сглаживания при частоте f_c обычно находится в пределах 0,1—0,2, т. е. на этой частоте происходит усиление в 5—10 раз. Поэтому при выборе параметров однозвенного апериодического СФ нежелательно допускать, чтобы частота f_c совпала или была близка к частоте одной из гармоник выпрямленного напряжения.

Экспериментальные исследования [1], выполненные на Московской, Кемеровской и Западно-Сибирской дорогах, показали, что при наличии на участке транспонированной линии продольного электроснабжения ЛПЭ-10 кВ, проложенной по опорам контактной сети, напряжение шума в цепях воздушной линии связи существенно не изменяется при увеличении психометрических напряжений на выходе тяговых подстанций до 5-6 В. Снижение этих величин с 3-4 до 0,5-1 В практически не приводит к уменьшению помех в линии связи, т. е. является бесполезным [2].

Опыт эксплуатации и исследования, проведенные на тяговых подстанциях стыковых участков, где коэффициент несимметрии питающих

напряжений $\alpha_{\text{и}}$ достигает 2% и более, показали, что при увеличении напряжения гармоники 100 Гц на выходе СФ выше значения $U_{2(2)} = 100$ В при некоторых дополнительных условиях (например, значительной несимметрии рельсовых цепей СЦБ) возможна ложная работа устройств железнодорожной сигнализации. Кроме того, вследствие больших токов в конденсаторах не обеспечивается надежная работа самих фильтров.

Учитывая изложенное, к СФ тяговых подстанций следует предъявить два основных требования:

1) по условию защиты воздушных линий связи от мешающих влияний среднее значение псофометрического напряжения на выходе сглаживающих фильтров тяговых подстанций не должно превышать 4 В, т.е. $U_{2\text{пс}} \leq 4$ В, а при интегральной вероятности $U_{2\text{пс}} \leq 0,95 \dots 5$ В;

2) напряжение любой гармоники на выходе СФ при длительности воздействия $t_{\text{в}} > 1$ с не должно превышать 100 В, т. е. $U_{2\text{к}} \leq 100$ В.

Второе ограничение относится прежде всего к гармонике с частотой 100 Гц, так как в случае увеличения на выходе фильтра напряжения любой другой гармоники до 100 В будет нарушено первое условие.

Значения ($U_{2\text{пс}}$ и $U_{2(2)}$) (рисунок 3) рассчитаны для однозвенного апериодического СФ при $L_{\text{р}} = 5$ мГн, $R_{\text{с}} = 0,1$ Ом и $\alpha_{\text{и}} = 2\%$ (кривые 1—3).

Кривая 1 соответствует случаю, когда 12-пульсовые выпрямители установлены на одной подстанции электрифицированного участка (на остальных подстанциях – 6-пульсовые), а кривая 3 – когда 12-пульсовые выпрямители установлены на всех подстанциях участка (см. таблицу 1). Максимумы $U_{2\text{пс}}$ и $U_{2(2)}$ наблюдаются при $C = 506,6$ мкФ ($f_{\text{с}} = 100$ Гц) из-за усиления гармоники 100 Гц.

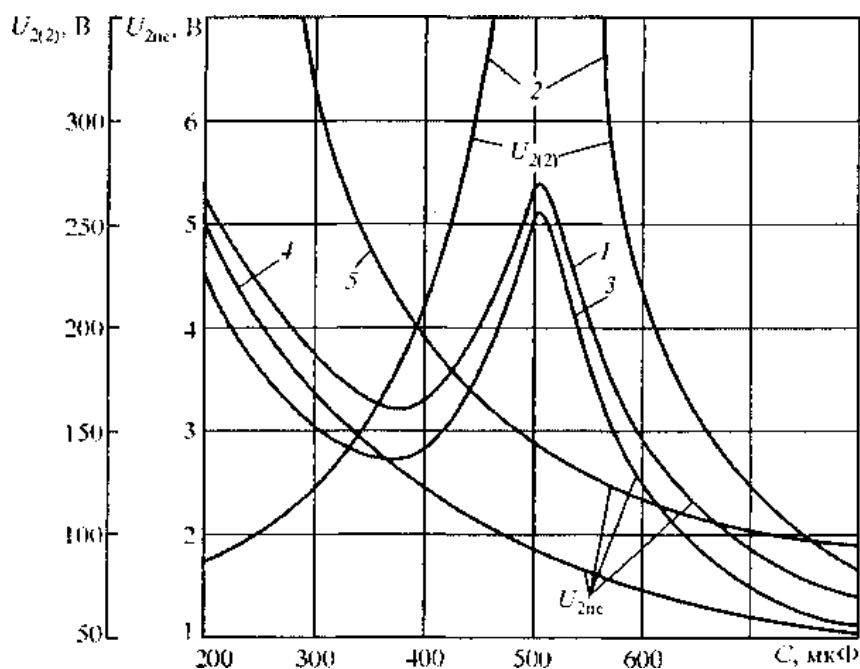


Рисунок 3 – Характеристика аperiодического (кривые 1-3) и резонансно-аperiодического (4,5) однозвенных сглаживающих фильтров

Из рисунка 3 следует, что при установке 12-пульсовых выпрямителей на одной подстанции участка для выполнения условия $U_{2пс} \leq 4$ В необходимо иметь емкость $C > 560$ мкФ либо от 270 мкФ до 450 мкФ. Для выполнения условия $U_{2к} \leq 100$ В необходимо иметь $C < 250$ мкФ или $C > 760$ мкФ. Таким образом, выполнение всех требований возможно только при $C \geq 760$ мкФ. После установки 12-пульсовых выпрямителей на всех подстанциях участка появляется возможность снизить емкость до 220—250 мкФ (кривые 2,3).

На электрифицированных участках, где питающие напряжения являются практически симметричными и несинусоидальными, при $L_p = 5$ мГн емкость параллельной части однозвенного аperiодического СФ может быть принята в пределах 200—250 мкФ.

В случае применения на тяговых подстанциях однозвенных апериодических СФ в тяговой сети и в цепи СФ при определенных условиях могут наблюдаться резонансные явления на низких частотах 50—150 Гц, при которых возрастают токи гармоник по СФ и в рельсовых цепях СЦБ.

В схеме замещения сети постоянного тока между подстанциями А и Б при наличии одного электровоза (рисунок 4, а) индуктивности реакторов и внутренние индуктивности выпрямительных агрегатов представлены их суммами L_A и L_B , а емкости тяговой сети и электровоза не учитываются вследствие их малых значений по сравнению с емкостями СФ C_A и C_B .

На рисунке 4 показан вариант питания от выпрямителя подстанции А, представленного генератора $E_{п.}$. Предполагается, что на подстанции Б среднее значение тока нагрузки выпрямителя по крайней мере в 2 раза превышает амплитуду возможного тока любой гармоники в его цепи от генератора $E_{п.}$ Цепь выпрямителя подстанции Б в этом случае показана замкнутой накоротко.

а)

б)

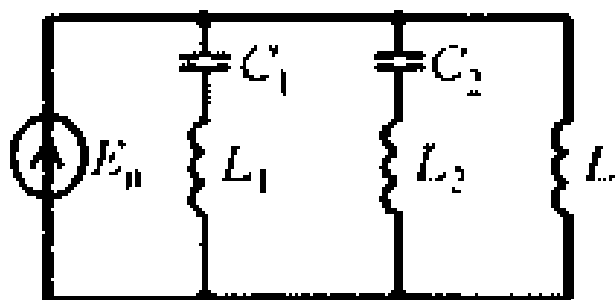
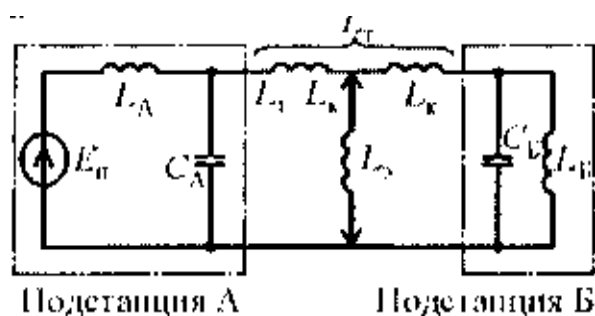


Рисунок – Схема замещения сети постоянного тока при однозвенных апериодических сглаживающих фильтрах (а) и преобразованная эквивалентная схема (б)

Генератор эдс гармоник подстанции А оказывается нагруженным на эквивалентный двухполюсник (рисунок 4, б), частотная характеристика которого показана на рисунке 5, а.

Таким образом, в рассматриваемой сети наблюдаются по два резонанса токов и напряжений. Для примера на рисунка 6, б представлены области изменения частот резонанса токов при $C_A = C_B = 400$ мкФ, $L_A = L_B = 5$ мГн и значениях $L_Э$ для электровоза ВЛ10 от 41,6 мГн (нижняя граница областей) до 0,9 мГн (верхняя граница) в зависимости от удаления $l_э$ электровоза от подстанции А. При этих условиях в тяговой сети возникает резонанс токов ($f_{рт1}$) на частоте 100 Гц при нахождении электровоза на расстоянии более 18 км от подстанции А.

Совпадение частоты резонанса с частотой гармоники 100 Гц приводит к возрастанию тока этой гармоники в цепи СФ и тяговой сети. Резонанс на частоте 200 Гц ($f_{рт2}$) является менее опасным, так как напряжение этой гармоники в несколько раз меньше, чем 100 Гц, а активные сопротивления всех элементов больше. Следует отметить, что опасные токи гармоники 200 Гц на реальных участках не наблюдались.

а)

б)

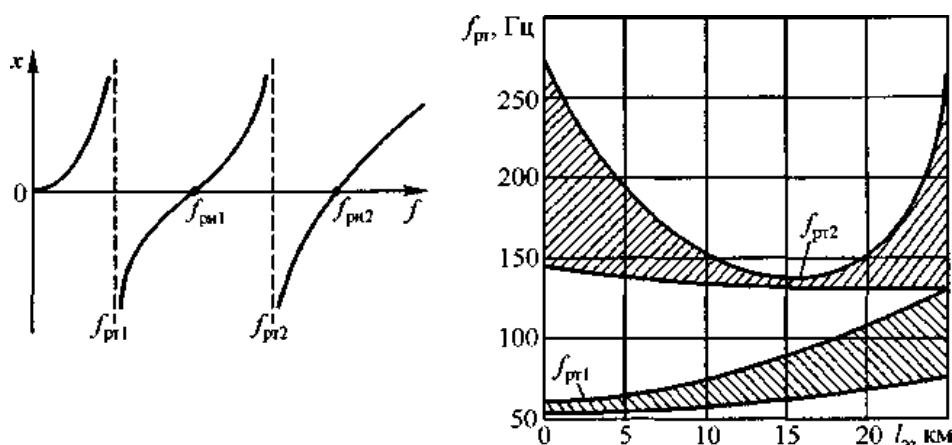


Рисунок 5 – Частотная характеристика схемы замещения (а) и области изменения частот резонанса токов (б)

Для демпфирования резонансных явлений рекомендуется [3] в параллельную часть СФ включить резонансный контур 100 Гц. Наличие такого контура позволяет не только исключить резонансные явления на этой частоте, но и повысить коэффициент сглаживания фильтра, что особенно важно при $\alpha_U > 1\%$ и $C < 760$ мкФ.

Коэффициент сглаживания однозвенного резонансно-апериодического СФ:

$$K_{сгл} = \left\{ \left[1 + \frac{\omega^2 C^2 R_c R_p - \omega^2 C L_p}{1 + (\omega C R_c)^2} + \frac{\omega^2 C_1^2 R_c R_p + \omega^2 C_1 L_p [(f/f_1)^2 - 1]}{(\omega C_1 R_1)^2 + [(f/f_1)^2 - 1]^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega^3 C_2 R_c L_p + \omega C R_p}{1 + (\omega C R_c)^2} + \frac{\omega^3 C_1^2 R_1 L_p - \omega C_1 R_p [(f/f_1)^2 - 1]}{(\omega C_1 R_1)^2 + [(f/f_1)^2 - 1]^2} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

где C_1 , R_1 , f_1 – соответственно емкость, активное сопротивление и частота настройки резонансного контура 100 Гц.

При этом частота настройки:

$$f_1 = 1 / (2\pi\sqrt{L_1 C_1})$$

(5)

Из выражения (4) следует, что коэффициент сглаживания на частоте f_1 :

$$K_1 \approx 2\pi f_1 L_p / R_1$$

(6)

Для выполнения условия $U_{2к} \leq 100$ В не требуется высокий коэффициент сглаживания K_1 даже для стыковых подстанций. Это позволяет на нестыковых подстанциях применять для резонансного контура 100 Гц катушки индуктивности из алюминиевых проводов, а активное сопротивление контура иметь 1 Ом и более.

При $L_p = 5$ мГн, $C_1 = 72$ мкФ и $C = 150$ мкФ (рисунок 6, а) частота $f_{рнп2} = 200$ Гц и усиление этой гармоники оказывается максимальным.

Поэтому при несимметричных питающих напряжениях и $L_p = 5$ мГн установка в СФ емкости C менее 250 мкФ нежелательна из-за приближения частоты $f_{рнп2} = 200$ Гц к 200 Гц. По этой же причине при $L_p = 3$ мГн не рекомендуется $C < 350$ мкФ (рисунок 6, б).

Зависимости псофометрического напряжения на выходе однозвенного резонансно-апериодического СФ при $C_1 = 72... 80$ мкФ, $R_1 = 1$ Ом, $R_c = 0,1$ Ом и индуктивностях реактора $L_p = 5$ мГн (кривая 4) и $L_p = 3$ мГн (кривая 5) для случая установки 12-пульсовых выпрямителей на всех тяговых подстанциях электрифицированного участка приведены на рисунке 3. Установка резонансного контура 100 Гц ведет к тому, что требование $U_{2к} \leq 100$ В выполняется всегда. Для выполнения условия $U_{2пс} \leq 4$ В при $L_p = 5$ мГн достаточно иметь $C > 250$ мкФ, а при $L_p = 3$ мГн $C > 400$ мкФ.

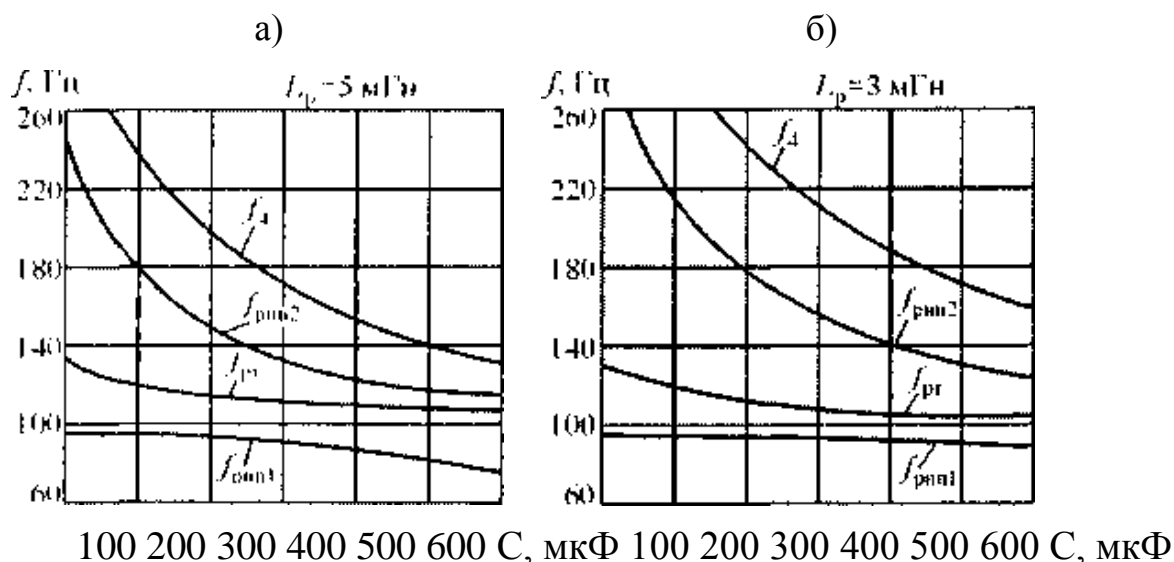


Рисунок 6 – Графики резонансных частот в цепи однозвенного резонансно-аперiodического сглаживающего фильтра

При 12-пульсовых выпрямителях с точки зрения защиты устройств связи и СЦБ от мешающих и опасных влияний гармоник тяговых токов можно снизить индуктивность реакторов на тяговых подстанциях до 3 мГн и при этом дополнительно уменьшить потери электрической энергии в реакторах.

Таким образом, на вновь строящихся несгиковых тяговых подстанциях с 12-пульсовыми выпрямителями рекомендуется применять однозвенные резонансно-аперiodические СФ с $L_p = 5 \text{ мГн}$, $C = 400 \text{ мкФ}$ и резонансным контуром 100 Гц. В условиях эксплуатации допускается снижение емкости C до 250 мкФ. При уменьшении индуктивности реакторов на несгиковых подстанциях до 3 мГн емкость C должна быть не менее 400 мкФ. На стыковых подстанциях принимают $L_p = 5 \text{ мГн}$ и $C = 600...800 \text{ мкФ}$.

Список использованной литературы:

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями. Дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.:МИИТ, 1999. 495 с.
2. Шалимов М.Г., Черемисин В.Т., Магай Г.С. Сопротивление нетранспортированной ЛЭП в нижнем спектре звукового диапазона частот. – Омск: Тр. ОМИИТ, 1983. С. 10-16.
3. Шалимов М.Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1990. 128 с.

Дата поступления в редакцию: 29.11.2017 г.

Опубликовано: 03.12.2017 г.

*© Академия педагогических идей «Новация». Серия «Студенческий научный вестник»,
электронный журнал, 2017*

© Заяц Д.С., 2017