

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

*Васильев В.О., Николенко А.А. Лабораторная работа по курсу «Электротехника «Изучение шагового электродвигателя» // V-я Всероссийская научно-практическая конференция «Особенности применения образовательных технологий в процессе обучения и воспитания», 01 – 10 декабря 2017 г. – 0,2 п. л. – URL: [http://akademnova.ru/publications\\_on\\_the\\_results\\_of\\_the\\_conferences](http://akademnova.ru/publications_on_the_results_of_the_conferences)*

### **СЕКЦИЯ: ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

**Васильев В.О., Николаенко А.А.**

Студенты педагогического института, сотрудники СКБ «Хронос»

ФГБУ ПО Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

*Научный руководитель:* Шарыгин Л.Н.,

профессор кафедры технологического и экономического образования

г. Владимир, Владимирская область,

Российская Федерация

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» «ИЗУЧЕНИЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ»**

В электроприводах систем автоматического управления находят применения шаговые двигатели, в которых обычно попользуются электромагнитное взаимодействие полюсов статора и ротора. Типичным примером служит электродвигатель с явно выраженными полюсами статора и ротора. Однако двигатели такого типа имеют низкий коэффициент полезного действия, их габариты быстро растут с увеличением мощности, они чувствительны к моменту инерции нагрузки. Проблема повышения

качества шаговых двигателей может быть решена на основе храпового механизма. Известные храповые механизмы имеют сложные механические цели фиксации, что снижает их быстродействие, а за счёт износа – долговечность.

Раздел по электрическим машинам занимает важное место в дисциплине «Электротехника». В этом разделе изучаются генераторы, синхронные и асинхронные электродвигатели, двигатели постоянного тока и шаговые. Предлагаемая лабораторная работа направлена на изучение шагового электродвигателя храпового типа. При подготовке к работе студент изучает теоретический материал по лекциям, литературе [1,2] и методическим указаниям по выполнению лабораторной работы. Для проведения эксперимента студенту выдается макет шагового электродвигателя, двухлучевой четырехканальный электронно-лучевой осциллограф С1-17, с помощью которого можно наблюдать эпюры напряжений на отдельных функциональных элементах двигателя, и методические указания по выполнению лабораторной работы. Здесь ограничится устройством и принципом работы шагового электродвигателя.

В электроприводах систем автоматического управления находят применения шаговые двигатели, в которых обычно используются электромагнитное взаимодействие полюсов статора и ротора. Типичным примером служит электродвигатель с явно выраженными полюсами статора и ротора. Однако двигатели такого типа имеют низкий коэффициент полезного действия, их габариты быстро растут с увеличением мощности, они чувствительны к моменту инерции нагрузки. Проблема повышения качества шаговых двигателей может быть решена на основе храпового механизма. Известные храповые механизмы имеют сложные механические

цели фиксации, что снижает их быстродействие, а за счёт износа – долговечность.

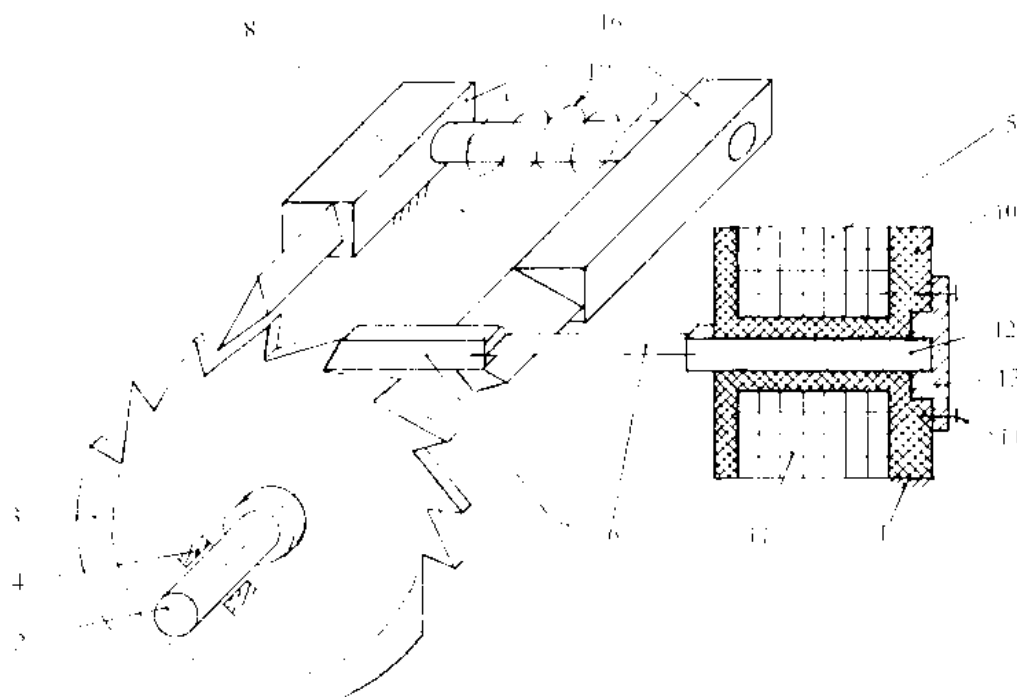


Рис. 1. Конструктивная схема шагового двигателя

Монтажной основой шагового двигателя является корпус 1. Вал 2 двигателя содержит храповое колесо 3 из магнитомягкого материала и установлен в подшипниках 4. Имеется привод храпового колеса, содержащий преобразователь 5 электрической энергии в механическую и толкатель с наконечником 7. Предусмотрены фиксатор 8 храпового колеса и устройство управления 9.

Преобразователь содержит каркас 10 с электрической катушкой 11. Внутри каркаса по его осевой линии помещён магнитоstrictionный стержень 12 с положительным коэффициентом магнитоstrictionции, например из материала марки ДТЖ-1. Форма сечения стержня выбирается из технологических соображений, это может быть квадрат или круг. Один конец стержня заземлен во втулке 13, например, с помощью клея. Втулка 13 присоединена к каркасу 10 винтами 14. Второй конец стержня жестко связан с толкателем 6. Толкатель по основному варианту выполнен из плоской упругой ленты и закреплен в пазу стержня с помощью заклёпок или клея. Аналогично выполнено соединение толкателя с наконечником 7. Таким образом, если задать в катушку 11 электрический ток, то стержень 12 получит удлинение, это удлинение толкателем будет передано зубу храпового колеса, что обеспечит момент вращения, и храповое колесо повернется на один шаг.

Устройство фиксации выполнено на основе магнитной системы, составленной из постоянного магнита 15, магнитных наконечников 16 из магнитомягкого материала и электрической катушки 17. Магнитная система фиксатора расположена в плоскости перпендикулярной плоскости храпового колеса 3. Торцы магнитных наконечников охватывают группу зубцов храпового колеса и образуют с ним некоторый зазор  $l_a$ .

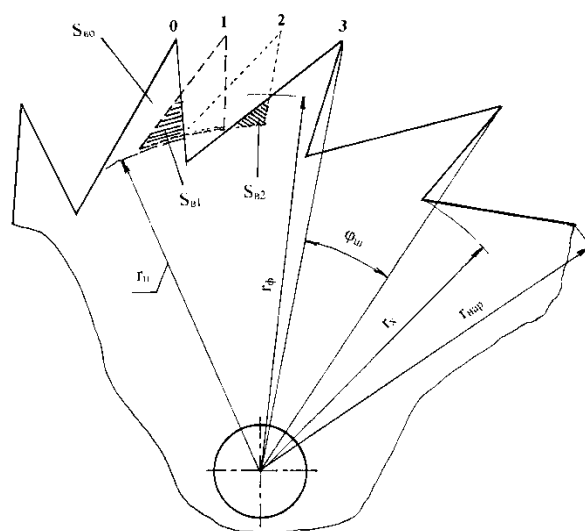


Рис. 2. Расчетная схема

Таким образом, в исходном положении магнитный поток  $\Phi_{\text{фм}}$  постоянного магнита 17, замыкается через полюсные наконечники 16, два зазора  $l_a$  и храповое колесо 3, что обеспечивает фиксацию последнего. Если задать в катушку 17 ( $W_{\text{ф}}$ ) электрический ток такого направления, чтобы создаваемый им магнитный поток  $\Phi_{\text{фэ}}$  был противоположен магнитному потоку  $\Phi_{\text{фм}}$ , но был бы равен ему по модулю, то силовое взаимодействие с храповым колесом будет ликвидировано.

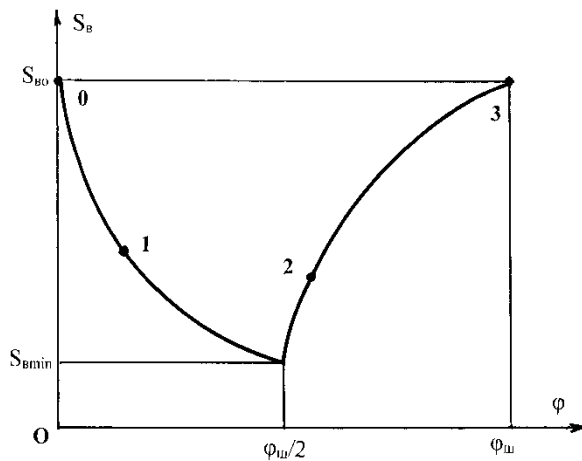


Рис. 3. Зависимость площади воздушного зазора фиксатора от угла поворота храпового колеса. Оцифрованные точки графика соответствуют относительному положению по рис. 2.

Устройство управления (рис.4) построено на типовых функциональных элементах электроники. Управляющим входом устройства управления является установочный вход RS-триггера 18. Единичный выход этого триггера подсоединен к входам, электронного ключа 19 катушки привода 11  $W_{\text{п}}$  и электронного ключа 20 катушки фиксации 17 ( $W_{\text{ф}}$ ). К входу ключа

20 также подключен вход формирователя (ограничителя) уровня 21. Срез (задний фронт) выходного импульса формирователя является импульсом сброса триггера 18. В частных случаях исполнения устройство управления может содержать встроенный регулируемый по частоте генератор 22 коротких прямоугольных импульсов. В отдельных случаях элементом управления может служить кнопка, подключающая на установочной вход триггера 18 напряжение питания. Исходное состояние триггера 18

устанавливается типовым образом по фронту включения электропитания. Блок питания на рис. 4 не показан.

В исходном положении торцы полюсных наконечников 16 расположены напротив соответствующих зубьев храпового колеса 3, наконечник 7 толкателя 6 находится во впадине зуба храпового колеса.

Намагничивающая сила от постоянного магнита 15 фиксатора равна

$$F_{\phi_m} = H_c l_{15}, \quad (1)$$

где  $H_c$  – коэрцитивная сила;

$l_{15}$  – рабочая длина магнита 15.

Без учета потоков рассеяния магнитный поток фиксатора составит

$$\phi_{\phi_m} = \frac{F_{\phi_m}}{R_{\phi}}, \quad (2)$$

$$\text{где} \quad R_{\phi} = \sum_{i=1}^4 \frac{l_{mi}}{\mu_a S_{mi}} + \frac{l_{\phi}}{\mu_0 S_{\phi}}$$

(3)

– магнитное сопротивление фиксатора;

$i=4$  – количество магнитопроводных участков (два полюсных наконечника, постоянный магнит, храповое колесо);

$l_{mi}, S_{mi}$  – длины и сечения магнитопроводных участков;

$l_{\phi}, S_{\phi}$  – суммарный воздушный зазор и сечение воздушного промежутка;

$\mu_a = \mu \mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость.

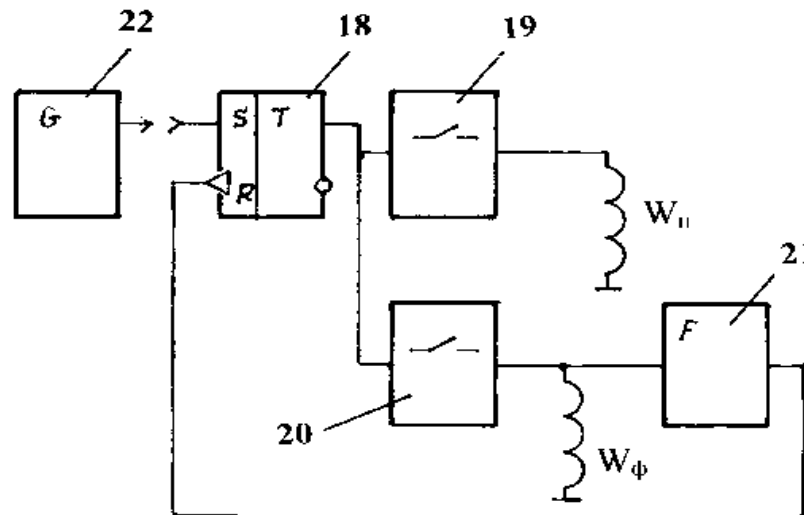


Рис. 4. Функциональная схема устройства управления

В предлагаемой конструкции шагового двигателя сечения торцов полюсных наконечников по двум сторонам повторяют форму зуба храпового колеса, а по третьей стороне выполнены по дуге окружности радиуса  $r_H$  эквидистантной окружности рабочего радиуса  $r_x$  (см. рис. 2), при этом

$$r_H > r_x \quad (4)$$

В исходном положении (положение 0 на рис. 2) сечения торцов полюсных наконечников находятся напротив соответствующих зубьев храпового колеса. При этом присутствует максимальная сила фиксации

$$P_{\phi m} = \frac{F_{\phi m}}{l_3 / S_3}, \quad (5)$$

где

$$l_3 = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{N_x} r_x \frac{r_x}{r_H} = \frac{\pi}{N_x} \frac{r_x^2}{r_H},$$

(6)

$$S_3 = (r_{нар} - r_x) d_x, \quad (7)$$

$N_X$  – число зубцов храпового колеса;

$d_x$  – толщина храпового колеса.

Эта сила приложена к центру тяжести сечения, т.е. на расстоянии  $r_\phi$  от оси вращения

$$r_\phi = \frac{1}{2}(r_{нар} + r_H). \quad (8)$$

С учетом двух зазоров момент фиксации храпового колеса составит

$$M_{\phi м} = 2P_{\phi м} r_\phi f \left( \frac{S_{gi}}{S_{го}} \right), \quad (9)$$

где  $S_{го}$  – площадь сечения торца магнитного наконечника;

$S_{gi}$  – текущее значение площади перекрытия торца магнитного наконечника зубом храпового колеса (см. рис. 2).

При подаче на вход устройства управления короткого импульса срабатывает триггер 18 и своим одиночным выходом открывает ключи 19 катушки 14 привода и 20 катушки фиксатора.

Ток в катушке привода нарастает по экспоненте

$$i_{II} = \frac{U_{19}}{R_{19} + R_{11}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{II}}} \right), \quad (10)$$

где  $R_{19}$  – выходное сопротивление ключа 19;

$R_{11}$  – активное сопротивление катушки привода;

$\tau_{II} = \frac{L_{11}}{R_{19} + R_{11}}$  – постоянная времени цепи;

$L_{11}$  – индуктивность катушки привода.

Появляется намагничивающая сила

$$F_{II} = i_{II} N_{11}, \quad (11)$$



где  $N_{11}$  – число витков катушки привода.

Намагничивающая сила (11) обеспечит удлинение магнитоэлектрического стержня 12, сила которого будет через толкатель 6 и наконечник 7 передаваться на зуб храпового колеса 3. в момент вращения  $t_1$  колесо 3 начнет поворачиваться. Параметры привода выбраны таким образом, что номинальному току катушки 11 – асимптота функции (10) – соответствует удлинение  $\Delta l_{12}$  магнитоэлектрического стержня равное шагу зубцовой зоны храпового колеса.

$$\Delta l_{12} = \frac{2\pi}{N_x} r_x . \quad (12)$$

Обратимся к фиксатору. Катушка 17 фиксатора подключена таким образом, что создаваемый ее током магнитный поток  $\Phi_{\phi\text{э}}$  противоположен магнитному потоку постоянного магнита – формула (2). Кроме того, напряжение питания, ключа 20 выбрано таким, что по модулю магнитный поток, создаваемый током катушки, превышает магнитный поток постоянного магнита

$$|\Phi_{\phi\text{э}}| > |\Phi_{\phi\text{м}}| . \quad (13)$$

При открытии ключа 20 ток катушки фиксатора нарастает по экспоненте

$$i_{\Pi} = \frac{U_{20}}{R_{20} + R_{17}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\phi}}} \right), \quad (14)$$

где  $\tau_{\phi} = \frac{L_{17}}{R_{20} + R_{17}}$  – постоянная времени цепи;

$R_{20}$  – выходное сопротивление ключа 20;

$R_{17}$  – активное сопротивление катушки 17 фиксатора;

$L_{17}$  – индуктивность катушки фиксатора.

Через время  $t = 3\tau_\phi$  ток (14) достигнет асимптотического значения и напряжение на катушке фиксатора составит

$$U_A = \frac{R_{17}}{R_{20} + R_{17}} U_{20}. \quad (15)$$

На стилизованной эюре напряжения  $U_\phi = f(\varphi)$  точка А условно совмещена с моментом  $t_l$  начала поворота храпового колеса.

Точке А эюры  $U_\phi = f(\varphi)$  соответствует магнитный поток в цепи фиксатора

$$\Delta\Phi_\phi = \Phi_{\phi\varepsilon} - \Phi_{\phi m} = \frac{\Delta I_\phi N_\phi}{R_\phi}, \quad (16)$$

где  $\Delta I_\phi$  – величина превышения тока катушки фиксатора относительно значения тока, соответствующего равенству магнитных потоков

$$\Phi_{\phi\varepsilon} = \Phi_{\phi m}. \quad (17)$$

Начиная с момента  $t_l$  начала движения храпового колеса уменьшается площадь воздушного зазора  $S_\varepsilon$  (см. рис. 2), следовательно, магнитный поток (16) становится переменным, что приводит к появлению ЭДС

$$U_{AB} = - \frac{\Delta\Phi_\phi}{dt}. \quad (18)$$

По мере поворота храпового колеса площадь магнитного зазора будет зависеть от очередного зуба. Начиная с точки В опоры напряжений площадь  $S_\varepsilon$  растет до момента поворота колеса на полный шаг  $\varphi_{ш}$  – точка С. На том участке движения знак ЭДС (17) изменяется. На рис. 3 приведена зависимость площади воздушного промежутка от угла поворота  $\varphi$  храпового колеса в пределах шага  $\varphi_{ш}$ .

Нумерация отдельных точек функции  $S_{\sigma} = f(\varphi)$  сохранена с номерами положения зуба по рис. 2.

Вернемся к функциональной схеме устройства управления – рис. 4. Формирователь 21 вырабатывает прямоугольный импульс  $U_F$  по уровню ограничения  $U_{FO}$  (рис. 5) и срезом импульса (задним фронтом) обеспечивает установку триггера 18 в исходное состояние, что приводит к закрытию ключей 19, 20. токи катушки 11, 17 будут падать до нуля по соответствующим экспонентам, пропорционально будут уменьшаться напряжения на катушках. Применительно к опоре  $U_{\phi} = f(\varphi)$  нулевое напряжение (точка Q) условно совмещено с окончанием поворота колеса на шаг  $\varphi_{ш}$ .

На рис. 5 эпюры напряжений входного импульса  $U_{вх}$ , выходных импульсов формирователя  $U_{21}$  и триггера  $U_{18}$  совмещены с фазовыми точками эпюры  $U_{\phi} = f(\varphi)$ .

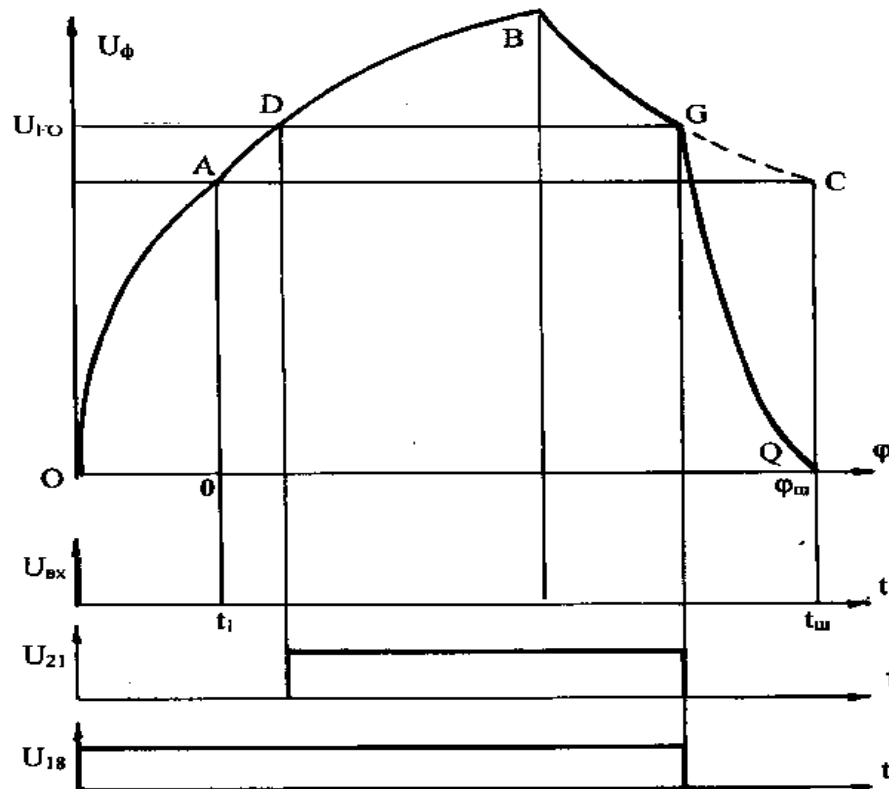


Рис. 5. Эпюры напряжений

После срабатывания триггера 18 и отключения катушек храповое колесо окажется под действием двух моментов:

- момент фиксации (9);
- инерционного момента, обусловленного кинетической энергией

$$E = \frac{1}{2} Y \dot{\varphi}_3^2, \quad (18)$$

где  $Y$  – суммарный момент инерции вращающихся элементов шагового двигателя и нагрузки;

$\dot{\varphi}_3$  – угловая частота вращения храпового колеса в момент времени  $t_3$ .

За счет указанных моментов вращения храповое колесо пройдет участок угла  $\varphi_3 - \varphi_{ш}$  за время  $t_3 - t_{ш}$ .

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

**(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)**

**Сайт:** [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

**e-mail:** [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

Таким образом, предлагаемый шаговый двигатель конструктивно прост, может работать в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, при этом амплитуда и длительность управляющего импульса неизменны.

#### **Список использованной литературы:**

1. Марченко, А. Л. Электротехника и электроника: учебник / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опачный. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 574 с.
2. Рекус, Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники: учеб. пособие / Г. Г. Рекус. – М.: Высш. шк., 2010. – 348 с.

***Опубликовано: 07.12.2017 г.***

***© Академия педагогических идей «Новация», 2017***

***© Васильев В.О., Николенко А.А., 2017***