

# Исследование влияния формы импульсов на работу шагового привода с индукторным двигателем\*

Смирнов А.Ю., Зимин А.Ю., Кудряшов Д.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

[a\\_yu\\_smirnov@mail.ru](mailto:a_yu_smirnov@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены модель и алгоритм, которые использованы для исследования режима пуска индукторного двигателя в шаговом приводе с преобразователем, обеспечивающим поддержание заданной формы импульсов тока в фазах. Исходя из условия пропорциональности токов производным индуктивностей фаз по углу поворота ротора, определена форма тока, при которой индукторный шаговый двигатель обеспечивает равномерное движение при отработке шагов. Приведены результаты расчётных исследований, подтвердившие, что наиболее близкая к определённой форма импульсов – “криволинейный треугольник” обладает наибольшим пусковым моментом и частотой приемистости в шаговом приводе с индукторным двигателем.

**Ключевые слова:** индукторная машина, шаговый двигатель, шаговый привод, импульс тока, уравнение движения, частота приемистости.

## ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 60-х годов прошлого столетия, в различных системах автоматики получил весьма широкое применение разомкнутый привод с синхронными двигателями, получающими дискретное питание импульсами напряжения или тока – шаговый привод [1, 2]. Преимуществами шагового привода являются:

- отсутствие развитой кинематической цепи, независимость от работы устройств обратной связи, за которыми сохраняется только функция контроля над перемещением, а не участие в его выполнении
- безопасность при заедании механизма
- отсутствие выбега при остановке.

По последней причине шаговый двигатель получил широкое применение в различных системах позиционирования, где каждому импульсу напряжения или тока, поданному на фазы обмотки, соответствует перемещение ротора на строго заданный угол, называемым шагом двигателя. Дискретность перемещения наилучшим образом сочетается с цифровым (процессорным) управлением, поскольку для перемещения ротора в заданное положение достаточно лишь подсчитать необходимое количество импульсов напряжения или тока и подать их на фазы обмотки.

Современные средства преобразовательной техники позволяют влиять на форму тока в фазах с тем, чтобы машина приобрела определённые, заранее заданные положительные качества. В шаговом приводе и шаговых двигателях переходные процессы отключения фаз обмотки происходят непрерывно. При этом важно обеспечить плавное движение ротора не только в области высоких частот

вращения, где вынужденные колебания ротора поглощаются приводом, но и в области низких частот. На частотах, от нескольких единиц до нескольких десятков об/мин, неравномерность момента приводят к резким колебаниям скорости, вплоть до полной остановки ротора и движения его в обратном направлении.

Сгладить этот процесс можно подбором формы импульсов тока, подаваемых в фазы обмотки якоря шагового двигателя. Электромеханический переходный процесс, при котором ток машины изменяют по определённому, заранее подобранному в соответствии с тем или иным критерием, закону можно назвать электрически управляемым или частично управляемым [3].

Для формирования тока каждая фаза обмотки подключается к источнику постоянного напряжения посредством ключа К1 (рис. 1) в предварительном усилителе преобразователя частоты. Этот ключ замыкается и размыкается по сигналам логического устройства – компаратора. Коммутация осуществляется по результатам сравнения мгновенного значения тока фазы  $i_j$ , измеренного датчиком тока ДТ, с заданным его значением  $i_3$ . Периодическая функция заданных значений  $i_3$  передаётся в компаратор из внешней устройства памяти.

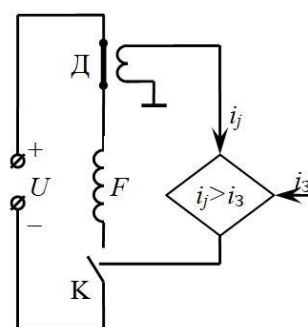


Рис. 1. Схема формирования тока в фазах ШД

Опрос и сравнение значений тока  $i_j$ ,  $i_3$  осуществляется с тактовой частотой несколько кГц. На каждом такте при  $i_j > i_3$  ключ К размыкается и ток фазы  $i_j$  спадает через разрядные цепи (на рис. 1 не показаны).

При  $i_j < i_3$  фаза вновь подключается к источнику напряжения  $U$ , обеспечивая ускоренное нарастание тока благодаря тому, что уровень напряжения источника значительно превышает величину, необходимую для обеспечения номинального фазного тока двигателя  $I_{ном}$ :

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE-2018), <http://icie-rus.org>

$$\frac{U}{R} \gg I_{\text{ном}}$$

где  $R$  – активное сопротивление фазы.

#### ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследований являются:

- 1) разработка алгоритма для расчётов в подтверждение работоспособности спроектированного двигателя в составе электротехнического комплекса из преобразователя тока, двигателя и преобразователя движения;
- 2) исследование работы электропривода на базе спроектированного двигателя в различных установившихся и переходных режимах: пуск, реверс, торможение, скачки нагрузки и др., в виде расчётных осциллограмм изменения во времени электрических и механических переменных, для их анализа и обобщения;
- 3) определение предельных значений мгновенных величин в уточнение исходных требований к компонентному составу электропривода: преобразователю частоты и нагрузочным устройствам;
- 4) определение (подбор) формы напряжения или тока в фазах двигателя по условиям минимизации пульсаций момента, мощности потребления, времени разгона на заданную частоту, обеспечения заданной частоты приемистости, и др. критериям.

В этом переходном процессе положение ротора, определяемое уравнением движения, выносится за рамки управляемого процесса. Оно является неуправляемым результатом действия всех токов машины: управляемых и неуправляемых, а также механических нагрузок электропривода.

#### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованию подлежит разомкнутый (шаговый) электропривод с синхронным двигателем индукторного типа, т.е. таким обмотка якоря и обмотка возбуждения расположены на статоре. Поток возбуждения может быть создан отдельными катушками, включёнными в независимый электрический контур [4, 5], постоянными магнитами с различными способами замыкания его в магнитопроводе [6-14], или образован совокупностью катушек обмотки якоря при нереверсивном питании всех фаз её обмотки якоря током неизменного направления [1, 3, 15, 16].

В условиях подавления влияния индуктивных связей система уравнений электромеханического преобразования энергии распадается на электрическую задачу формирования тока в фазах двигателя, и на электромеханическую задачу. Последняя описывает перемещение ротора под действием электромагнитного момента двигателя посредством единственного уравнения движения вида

$$\frac{1}{Z} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_1 + \frac{d\theta}{dt} \alpha + M_2 \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \frac{Z}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_j i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta}, \quad (1)$$

где  $J$  – приведённый момент инерции;  $M_1$  и  $M_2$  – составляющие нагрузки: потенциальная и типа “сухое трение” соответственно;  $\alpha$  – коэффициент составляющей нагрузки типа “вязкое трение”,  $Z$  – число зубцов на роторе двигателя.

Токи фаз в этом уравнении являются заданными величинами. Предполагается, что другие токи, в частности, наведённые в проводящих частях машины, отсутствуют или практически не оказывают влияния на её момент. Они учитываются при определении потерь.

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ ТОКА  
Если задаться условием равномерности движения ротора

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{const}, \quad (2)$$

то уравнение движения представляет собой баланс электромагнитного момента двигателя и связанной с ним механической нагрузки  $M_{\text{нагр}}$ , левая часть (1):

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N i_j \frac{dL_{jk}}{d\theta} i_k + M_{\text{нагр}} = 0. \quad (3)$$

Для минимизации электрических потерь при определении токов воспользуемся условием их пропорциональности - производным изменения индуктивности соответствующих фаз обмотки якоря по углу [3]:

$$i_1 : i_2 : i_3 : \dots : i_{m-1} : i_m = \frac{dL_{11}}{d\theta} : \frac{dL_{22}}{d\theta} : \frac{dL_{33}}{d\theta} : \dots : \frac{dL_{m-1,m-1}}{d\theta} : \frac{dL_{mm}}{d\theta}, \quad (4)$$

где основной составляющей собственных индуктивностей  $L_{11}, L_{22}, L_{33}, \dots, L_{mm}$  является доля, обусловленная потокосцеплением фаз с полем возбуждения.

При формировании алгоритма определения токов с учётом условия (4), фазы с отрицательной производной индуктивности по углу отключаем, т.е. приравняем их токи нулю. С учётом этого действия и условия (4) можно установить форму кривой тока в одной фазе, например, в первой ( $j=1$ ). На одном полупериоде ток определяется в соответствии с одной из пропорций условия (4), а на другом принимает нулевое значение.

Токи остальных повторяют найденную кривую с учётом пространственного смещения фазных зон:

$$\Delta\phi_j = \frac{2\pi}{m}(j-1).$$

В частотном приводе на базе синхронной машины задача решается при различных значениях кратности максимального момента  $K_M$ :

$$K_M = \frac{M_{\text{Эmax}}}{M_{\text{Эном}}}, \quad (5)$$

где  $M_{\text{Э max}}$  – максимальный электромагнитный момент двигателя, который он способен обеспечить при данном токе в положении наибольшей производной изменения индуктивности (4) или по углу.  $M_{\text{Э ном}}$  – номинальный момент двигателя,  $1 < K_M < 2.5$ .

Меньшим значениям кратности соответствует больший запас статической устойчивости. Повышение кратности максимального момента здесь, как и в любом синхронном приводе, достигается за счёт снижения КПД, вследствие увеличения электрических и магнитных потерь с ростом тока (рис. 2).

#### АЛГОРИТМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИВОДА С ИСТОЧНИКОМ ТОКА

В блоке интегрирования переменных он содержит единственное уравнение – уравнение движения (1). В алгоритме задаётся импульс тока. Можно рассмотреть несколько вариантов формы импульсов тока, дающих определённое приближение к представленной на рис. 2:

- треугольная (рис. 3, а);
- трапециевидная (рис. 3, б);

- симметричный “криволинейный треугольник” по рис. 2, аппроксимированный тремя фронтами линейного нарастания и спадания тока разной крутизны (рис. 3, в);
- аппроксимированная полуволна синусоиды (рис. 3, з).

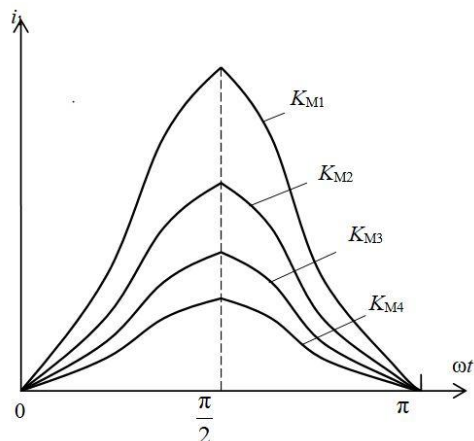


Рис. 2. Форма тока, определённая исходя из условия (4) при  $K_{M1} > K_{M2} > K_{M3} > K_{M4}$

Амплитуды и координаты характерных точек импульсов тока на рис. 3 даны с учётом обеспечения одинаковой мощности потерь в фазах обмотки, в функции безразмерного времени

$$\tau = \frac{2\pi t_l}{T_{ц}} \quad (0 < \tau_l < T). \quad (6)$$

где  $t_l$  – время, прошедшее от начала цикла коммутации, отсчитываемое с момента подачи тока на первую фазу обмотки двигателя.

Помимо блоков задания тока фаз и интегрирования скорости и ускорения в соответствии с (1), алгоритм моделирования работы шагового привода содержит модули расчёта составляющих момента нагрузки с учётом характеристик преобразователя движения, и задания начальных значений переменным.

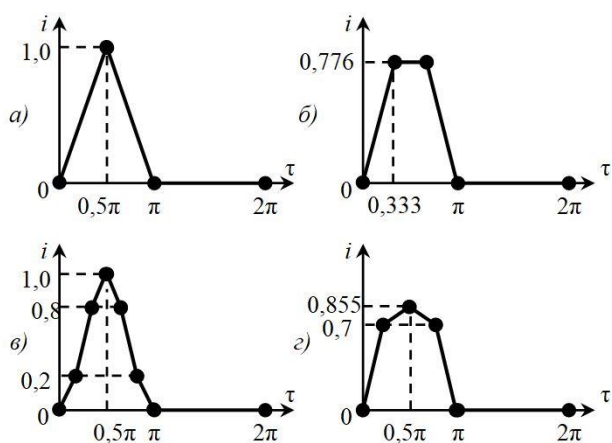


Рис. 3. Формы импульсов для работы в приводе с поддержанием тока

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанная модель использована для исследования режима пуска одного и того же одноимённо-полусного индукторного двигателя с постоянным магнитом на рото-

ре [17] в шаговом приводе системы управления с преобразователем движения, обеспечивающим преобразование вращательного движения ротора двигателя в поступательное перемещение регулирующего органа [18-20].

Характеристики двигателя, привода и преобразователя напряжения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики шагового электропривода и математической модели

Наименование параметра	Значение
Момент нагрузки на валу, типа “сухое трение”, Н·м	3,0
Номинальный момент инерции ротора двигателя с преобразователем движения, кг·м <sup>2</sup>	0,045
Индуктивность фазы, Гн:	
- минимальная	0,0016
- максимальная	0,0087
- рассеяния лобовых частей	0,0017
Число зубцов на роторе	100
Число фаз	4

Расчёты показывают, что изгиб переднего и заднего фронтов импульсов тока по сравнению с линейным его нарастанием и спаданием (рис. 3, в, по сравнению с рис. 3, а) практически не оказывает влияния на плавность движения ротора. Равномерность движения ротора оценивалась по максимальному угловому ускорению за время переходного процесса. При пуске с импульсами трапецидальной, рис. 3, б, и синусоидальной формы, рис. 3, з, этот показатель оказался на 30-40% выше, чем при треугольных импульсах, что можно объяснить большей долей составляющей первой гармоники в импульсах тока, аппроксимирующих синусоиду.

Из осциллограмм следует, что во всех случаях, кроме опыта с импульсами тока формы “криволинейный треугольник” (рис. 4, кривые, показанные тонкими линиями) ротор на первых тактах коммутации не успевает за полем, поэтому первоначально приобретает отрицательное ускорение и отрабатывает несколько шагов в противоположном направлении. В результате этого нарушается соответствие между количеством поданных импульсов и фактически отработанным угловым перемещением, что для разомкнутого привода точных систем позиционирования совершенно недопустимо.

При подаче импульсов формы “криволинейный треугольник” (рис. 4, утолщённые кривые) на первых тактах коммутации ротор успешно проходит положения неустойчивого равновесия, до поступления следующих импульсов тока, на отработку следующего шага. Поэтому выхода из синхронизма и пропуска шагов не происходит. Двигатель успешно втягивается в синхронизм без потери информации о положении ротора.

Предложенная модель применима для исследования других режимов работы шагового электропривода, таких как реверс, останов, наброс нагрузки, выход на упор и т.д. Модель может быть также использована для исследования влияния различных линейных и нелинейных механических устройств, присоединённых к валу двигателя: демпферов, обгонных муфт, упоров, для уточнения частоты приемистости спроектированного двигателя в составе привода.

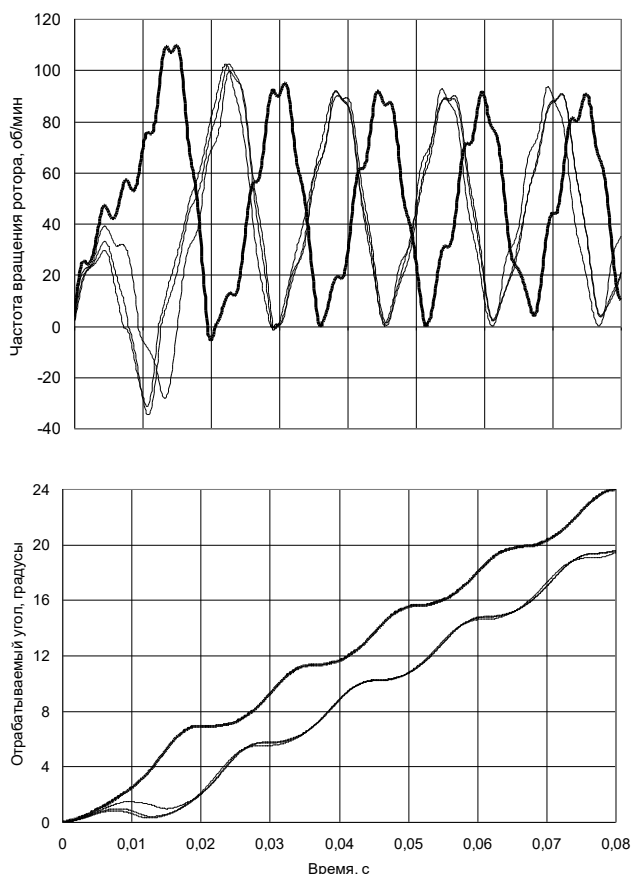


Рис. 4. Осциллограммы пуска шагового электропривода на частоту приёмности при различной форме импульсов тока в фазах

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках предположений об отсутствии влияния тока короткозамкнутых контуров и о синусоидальном законе изменения индуктивности фаз при повороте ротора, определена идеальная форма импульсов тока, при которой индукторный шаговый двигатель обеспечивает равномерное движение при обработке шагов.

Такая форма наиболее близко аппроксимируется “криволинейным треугольником” (рис. 3, в).

При одинаковой мощности потерь, форма импульсов тока “криволинейный треугольник” обеспечивает наибольшую частоту приемности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. / Под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. Ивоботенко Б.А. Проектирование шагового электропривода / Б.А. Ивоботенко, В.Ф. Козаченко; Под ред. Л.А. Садовского. – М.: МЭИ, 1985. – 100 с.
3. Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во Форум, 2015. – 192 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2006. – 607с.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромеханических и электроэнергетических спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 255с.

7. Балагуров В.А. Электрические машины с постоянными магнитами. / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев, А.Н. Ларионов. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 480 с.

8. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами. / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

9. Смирнов А.Ю. Анализ магнитоэлектрических машин с преобразованием энергии на высшей гармонике поля якоря // Электричество. – 2014. – №9. – С. 60-64.

10. Брускин Д.Э. Электрические машины: учебник для ВУЗов. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1979. – 304 с.

11. Cheng M. Static characteristics of a new doubly salient permanent magnet motor / M. Cheng, K.T. Chau, C.C. Chan. // IEEE Trans. On Energy Convers. – 2001. – Vol.16, no 1. – P. 20-25. DOI: 10.1109/60.911398

12. Li Y. Doubly salient permanent-magnet machine with skewed rotor and six-state commutating mode / Y. Li, C.C. Mi // IEEE Trans. On Magnetics. – 2007. – Vol.43, no 9. – P. 3623-3629. DOI: 10.1109/TMAG.2007.901949

13. Boldea I. Theoretical characterization of flux reversal machine in low-speed servo drives – the pole-PM configuration / I. Boldea, L. Zhang, S.A. Nasar // IEEE Trans. On Industry Appl. – 2002. – Vol.38, no.6. – P. 1549-1557. DOI: 10.1109/TIA.2002.804759

14. Zhu Z.Q. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines / Z.Q. Zhu, J.T. Chen // IEEE Trans. On Industry Magn. – 2010. – Vol.46, no.6. – P. 1447-1453. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044481

15. Смирнов А.Ю. Проектирование индукторных двигателей с самовозбуждением для частотного привода / А.Ю. Смирнов, Т.Н. Усунц-Кригер // Электричество. – 2012. – №5. – С. 50-56.

16. Pyrhönen J. Design of Rotating Electrical Machines / J.Pyrhönen, T.Jokinen, V.Hrabovcová. – John Wiley & Sons Ltd, 2008. – 503 p.

17. Смирнов А.Ю. Проектирование одноимённых полюсных индукторных двигателей с постоянными магнитами на роторе / А.Ю. Смирнов, А.Ю. Зимин // Электричество. – 2015. – №2. – С. 54-59.

18. Смирнов А.Ю. Совершенствование электромеханических устройств управления скоростью перемещения регулирующего органа исполнительных механизмов систем управления и защиты ядерных реакторов / А.Ю. Смирнов, Д.А. Кудряшов // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2016. – №5 (547). – С. 25-30.

19. Масленок Б.А. Типовые конструкции механизмов управления для энергетических реакторов с водой под давлением / Б.А. Масленок, В.В. Воскобойников // Атомная техника за рубежом. – 1973. – №12.

20. Исполнительные электродвигатели и элементы автоматики сервоприводов ядерных реакторов / А.М. Бамдас, А.И. Леонтьев, Е.Г. Титов, А.И. Юрченко. – М.: Атомиздат. – 1971. – 237 с.

# Research on Waveform Pulses on Step Drive Running with Inductor Motor

Smirnov A.Yu., Zimin A.Yu., Kudryashov D.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russian Federation

[a\\_yu\\_smirnov@mail.ru](mailto:a_yu_smirnov@mail.ru)

**Abstract.** The article considers the model and algorithm used to research the inductor motor start mode in the step drive with a transducer, providing the preset current pulse waveform in phases sustention. According to the conditions of currents proportionality the derivative of the phases inductivity for the rotor angle of rotation, has been determined the current waveform at which inductor stepping motor provides steady motion when processing the steps. The calculated analysis results are shown, which proved that the closest to the determined pulse form “curvilinear triangle” has the maximum starting moment and intake frequency in the step drive with an inductor motor.

**Keywords:** inductor machine, stepping motor, step drive, current pulse, motion equation, intake frequency.

## REFERENCES

1. M.G. Chilikina (Ed.) *Diskretnyy elektropriwod s shagovymi dvigatelyami* [Discrete electric drive with stepper motors], Moscow, Energy, 1971, 624 p. (in Russ.)
2. Ivobotenko B.A., Kozachenko V.F., L.A. Sadowski (Ed.) *Proektirovanie shagovogo elektropriroda* [Designing a stepper motor], Moscow, MEI, 1985, 100 p. (in Russ.)
3. Smirnov A.Yu. *Induktornye mashiny. Proektirovanie i vychislitel'nyy analiz (spetsial'nyy kurs): uchebnoe posobie dlya vuzov* [Induction machines. Design and computational analysis (special course): a textbook for universities], Moscow, Publishing House Forum, 2015, 192 p. (in Russ.)
4. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov* [Electrical machines: a textbook for high schools], Moscow, Higher School, 2006, 607 p. (in Russ.)
5. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov* [Electrical machines: a textbook for high schools], Moscow, Energy, 1980, 928 p. (in Russ.)
6. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny: ucheb. posobie dlya elektromekhanicheskikh i elektroenergeticheskikh spets. vtuzov* [Contactless electrical machines: studies. manual for electromechanical and electric specials. technical colleges], Moscow, Higher School, 1985, 255 p. (in Russ.)
7. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* [Electric machines with permanent magnets], Moscow, Leningrad, Energy, 1964, 480 p. (in Russ.)
8. Balagurov V.A., Galteev F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Electric generators with permanent magnets], Moscow, Energoatomizdat, 1988, 280 p. (in Russ.)
9. Smirnov A.Yu. Analysis of magnetolectric machines with energy conversion at the highest harmonic of the armature field [Analiz magnitoelektricheskikh mashin s preobrazovaniem energii na vysshey garmonike polya yakorya], *Elektrichestvo [Electricity]*, 2014, no.9, pp. 60-64. (in Russ.)
10. Bruskin D.E., Zorokhovich A.E., Khvostov V.S. *Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya VUZov* [Electrical machines: a textbook for universities], Moscow, Higher School, 1979, 304 p. (in Russ.)
11. Cheng M., Chau K.T., Chan C.C. Static characteristics of a new doubly salient permanent magnet motor, *IEEE Trans. On Energy Convers.*, 2001, vol.16, no 1, pp. 20-25. DOI: 10.1109/60.911398
12. Li Y., Mi C.C. Doubly salient permanent-magnet machine with skewed rotor and six-state commutating mode, *IEEE Trans. On Magnetics*, 2007, vol.43, no 9, pp. 3623-3629. DOI: 10.1109/TMAG.2007.901949
13. Boldea I., Zhang L., Nasar S.A. Theoretical characterization of flux reversal machine in low-speed servo drives – the pole-PM configuration, *IEEE Trans. On Industry Appl.*, 2002, vol.38, no.6, pp. 1549-1557. DOI: 10.1109/TIA.2002.804759
14. Zhu Z.Q., Chen J.T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines, *IEEE Trans. On Industry Magn.*, 2010, vol.46, no.6, pp. 1447-1453. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2044481
15. Smirnov A.Yu., Usnunts-Krieger T.N. Designing inductor motors with self-excitation for a frequency drive [Proektirovanie induktornykh dvigateley s samovozbuzhdeniem dlya chastotnogo privoda ], *Elektrichestvo [Electricity]*, 2012, no.5, pp. 50-56. (in Russ.)
16. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons Ltd, 2008, 503 p.
17. Smirnov A.Yu., Zimin A.Yu. Designing the same-pole inductor motors with permanent magnets on the rotor [Proektirovanie odnoimenno-polyusnykh induktornykh dvigateley s postoyannymi magnitami na rotore], *Elektrichestvo [Electricity]*, 2015, no.2, pp. 54-59. (in Russ.)
18. Smirnov A.Yu., Kudryashov D.A. Enhancement of electromechanical devices of the rate control of the lowering adjusting gear of the actuators of the system control and protection of nuclear reactors [Sovershenstvovanie elektromekhanicheskikh ustroystv upravleniya skorost'yu peremeshcheniya reguliruyushchego organa ispolnitel'nykh mekhanizmov sistem upravleniya i zashchity yadernykh reaktorov], *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika [News of Universities. Electromechanics]*, 2016, no.5 (547), pp. 25-30. (in Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-25-30
19. Maslenok B.A., Voskoboinikov V.V. Standard designs of control mechanisms for pressurized water reactors [Tipovye konstruksii mekhanizmov upravleniya dlya energeticheskikh

reaktorov s vodoy pod davleniem], *Atomnaya tekhnika za rubezhom [Atomic technology abroad]*, 1973, no.12. (in Russ.)

20. Bamdas A.M., Leontyev A.I., Titov E.G., Yurchenko A.I. *Ispolnitel'nye elektrodvigateli i elementy avtomatiki ser-*

*voprivodov yadernykh reaktorov [Executive motors and automation elements for servo drives of nuclear reactors]*, Moscow, Atomizdat, 1971, 237 p. (in Russ.)

---

**Библиографическое описание статьи**

Смирнов А.Ю. Исследование влияния формы импульсов на работу шагового привода с индукторным двигателем / А.Ю. Смирнов, А.Ю. Зимин, Д.А. Кудряшов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2018. – Т.5, №2. – С. 30-35. DOI: 10.24892/RIJEE/20180205

---

**Reference to article**

Smirnov A.Yu., Zimin A.Yu., Kudryashov D.A. Research on waveform pulses on step drive running with inductor motor, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol.5, no.2, pp. 30-35. DOI: 10.24892/RIJEE/20180205

---