

УДК 004.942

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

**Прошин И.А., Салмов Е.Н.**

*Пензенский государственный технологический университет, Пенза, e-mail: proshin.Ivan@inbox.ru*

Рассмотрен подход к моделированию работы непосредственного преобразователя электрической энергии с импульсным регулятором на базе широтно-импульсной модуляции. Предложенный численный метод основан на подходе, позволяющем исключить использование большого числа задаваемых параметров и множества различных структур, присущее подходам, подразумевающим моделирование каждого переключающего элемента. При этом используется предложенная авторами методика моделирования с представлением выходного напряжения непосредственного преобразователя электрической энергии в виде единственного гармонического колебания с дискретно управляемой начальной фазой. Выполнена разработка алгоритма численного моделирования и представлены результаты моделирования для преобразователей с однополярной и двухфазной широтно-импульсной модуляцией. На базе разработанного численного метода возможно выполнение компьютерного моделирования как однодвигательных, так и многодвигательных многосвязных вентильно-электромеханических систем, построенных на основе непосредственных преобразователей электрической энергии с широтно-импульсной модуляцией.

**Ключевые слова:** численный метод, непосредственный преобразователь электрической энергии, широтно-импульсная модуляция

## NUMERICAL METHOD FOR MODELING OF OUTPUT VOLTAGE OF GATE CONVERTER WITH PULSE-WIDTH MODULATION

**Proshin I.A., Salmov E.N.**

*Penza State Technological University, Penza, e-mail: proshin.Ivan@inbox.ru*

An approach to modeling of work of direct electrical energy converter with a pulse regulator on the basis of pulse-width modulation is considered. The proposed numerical method is based on an approach that allows to avoid the use of a large number of set parameters and a variety of different structures that is inherent to approaches implying modeling of each switching element. A modeling technique proposed by the authors with the submission of the output voltage of direct electrical energy converter in the form of a single harmonic oscillation with discretely controlled initial phase is used. Development of an algorithm for numerical simulation was performed and modeling results for converters with unipolar and two-phase pulse-width modulation are presented. On the basis of the developed numerical method computer simulations can be performed for a single motor and multiple motor multilinked gate-electromechanical systems constructed on the basis of direct electric energy converters with pulse-width modulation.

**Keywords:** numerical method, direct electrical energy converter, pulse-width modulation

Использование непосредственных преобразователей электрической энергии (НПЭ) для управления напряжением, током и мощностью основано на импульсной, релейной либо комбинированной дискретизации коэффициентов передачи мощности [1–9]. В данной работе рассмотрим моделирование работы НПЭ с импульсным регулятором на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Решение задачи математического моделирования НПЭ на базе существующих подходов осложняется факторами, связанными с наличием множества различных структур и большим числом

задаваемых параметров. Данные подходы, предполагающие моделирование каждого переключающего элемента (ПЭ), требуют задания множества возможных состояний каждого из них. При непрерывном режиме работы число возможных состояний НПЭ определяется выражением

$$N_n(m, n, k) = \sum_{v=k}^n \frac{m! \cdot n!}{v! \cdot (m-v)! \cdot (n-v)!}, \quad (1)$$

где  $m$  – число входных фаз;  $n$  – число выходных фаз;  $k$  – минимально возможное число фаз выходного напряжения.

Для НПЭ с  $n = 3$  и  $m = 3$  количество используемых состояний в соответствии с (1) при непрерывном режиме работы равно

$$N_3(3,3,2) = \sum_{v=2}^3 \frac{3! \cdot 3!}{v! \cdot (3-v)! \cdot (3-v)!} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} + \frac{3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1}{3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 18 + 6 = 24.$$

В работе рассмотрен предложенный авторами численный метод математического моделирования НПЭ с широтно-импульсным регулятором напряжения, в основе которого лежит предложенный авторами метод моделирования, основанный на представлении выходного напряжения НПЭ в виде единственного гармонического колебания с дискретно управляемой начальной фазой [2]. Принцип ШИМ применительно к НПЭ с искусственной коммутацией состоит в периодическом подключении на активный интервал времени  $T_a$  входного напряжения заданной фазы и в периодическом отключении на время пассивного интервала  $T_n$ .

Система поступающих на вход НПЭ напряжений включает  $m$  фаз

$$U_i(\omega_{\text{ВХ}}t) = U_m \sin(\omega_{\text{ВХ}}t - \varphi_i), \quad i = \overline{1, m} \quad (2)$$

где  $U_i(\omega_{\text{ВХ}}t)$  – мгновенное значение входного напряжения;  $U_m$  – амплитудное значение входного напряжения;  $\omega_{\text{ВХ}}$  – круговая частота;  $\varphi_i$  – фазовый сдвиг.

В каждый момент времени на выход НПЭ с отдельным управлением подается только одна из множества поступающих на вход ЭДС, и формируется напряжение с амплитудным и мгновенным значениями  $U_{m2}$  и  $U_i(\omega_{\text{ВЫХ}}t)$ , фазовым сдвигом  $\varphi_i$ , количеством фаз  $n$  и круговой частотой  $\omega_{\text{ВЫХ}}$ .

Гармоническое колебание с дискретно управляемой начальной фазой представим выражением

$$\left[ h_{pp}^1 \sin(\omega_1 t + h_g^2 [t] \varphi_g) \right] = \left[ h_{p1} [t] h_{p2} [t] \dots h_{pg} [t] \dots h_{pm} [t] \right] \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + \varphi_1) \\ \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + \varphi_2) \\ \dots \\ \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + \varphi_g) \\ \dots \\ \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + \varphi_m) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Процедуру непосредственного преобразования электрической энергии  $n$ -фазного НПЭ с отдельным управлением на основе предлагаемого метода и выражений (2) и (3) зададим моделью в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} U_1(\omega_{\text{ВЫХ}}t) \\ U_2(\omega_{\text{ВЫХ}}t) \\ \dots \\ U_p(\omega_{\text{ВЫХ}}t) \\ \dots \\ U_n(\omega_{\text{ВЫХ}}t) \end{bmatrix} = U_m \cdot \begin{bmatrix} h_{11}^1 [t] & 0 \dots 0 \dots 0 \\ 0 & h_{22}^1 [t] & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & h_{pp}^1 [t] & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & h_{nn}^1 [t] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + h_1^2 [t] \cdot \Delta\varphi) \\ \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + h_2^2 [t] \cdot \Delta\varphi) \\ \dots \\ \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + h_g^2 [t] \cdot \Delta\varphi) \\ \dots \\ \sin(\omega_{\text{ВХ}}t + h_m^2 [t] \cdot \Delta\varphi) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

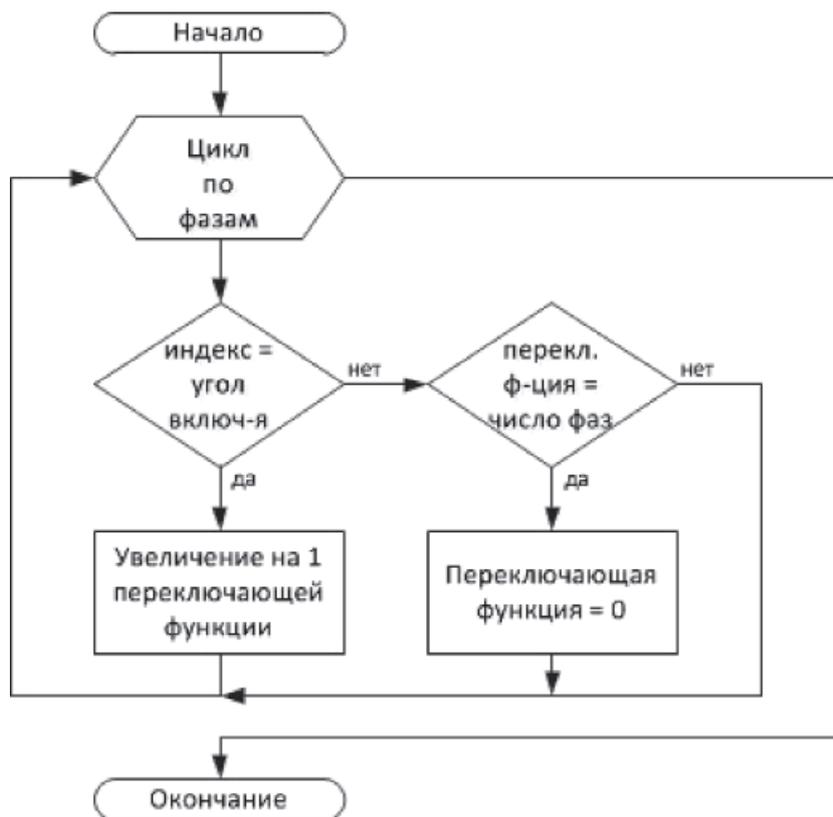
Переключающие функции, задающие возможные способы управления НПЭ в (4) с использованием однополярной ШИМ, представим выражениями

$$h^1 [t] = \left[ 1(t_k^i + T_{\text{П}}^i) - 1(t_{k+1}^i) \right]_{i \in [0, m-1]}; \quad h^2 [t] = i \cdot \left[ 1(t_k^i) - 1(t_{k+1}^i) \right]_{i \in [0, m-1]}.$$

Блок-схемы алгоритмов формирования кривых выходного напряжения НПЭ при использовании однополярной ШИМ отражены на рис. 1–2.

При моделировании НПЭ с использованием двухфазной ШИМ переключающая функция амплитуды равна единице, а переключающую функцию фазы представим выражением

$$h^2 [t] = (i+1) \cdot \left[ 1(t_k^i) - 1(t_k^i + T_{\text{П}}^i) \right] + i \cdot \left[ 1(t_k^i + T_{\text{П}}^i) - 1(t_{k+1}^i) \right]_{i \in [0, m-1]}, \quad (5)$$



а



б

Рис. 1. Алгоритм моделирования НПЭ с однополярной ШИМ:  
а – формирование переключающей функции начальной фазы;  
б – изменение переключающей функции амплитуды

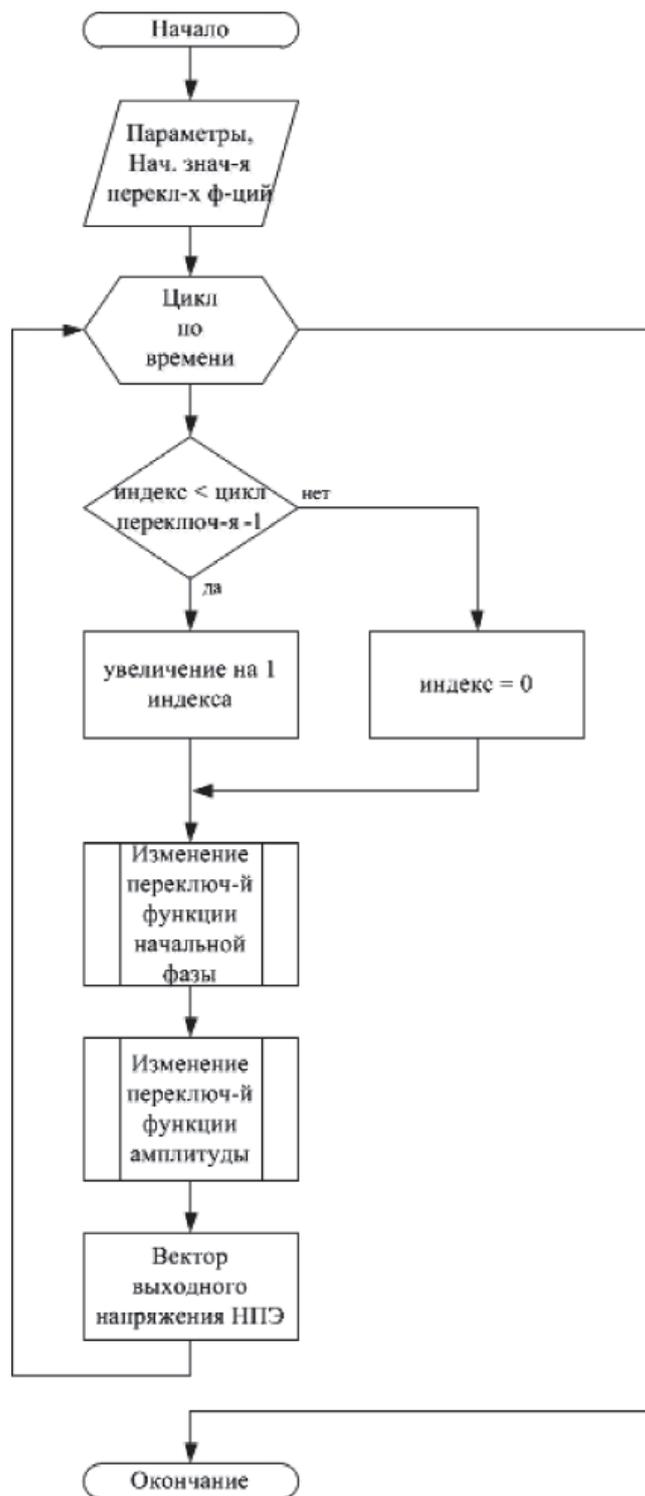


Рис. 2. Алгоритм основного цикла моделирования выходного напряжения НПЭ

Блок-схема алгоритма формирования переключающей функции начальной фазы при использовании двухфазной ШИМ (5) показана на рис. 3.

Результаты моделирования НПЭ с однополярной ШИМ на основе предложенного численного метода в среде

Mathcad показаны на рис. 4. Для параметров системы приняты значения: входная частота  $f = 50$  Гц, число фаз входного напряжения  $m = 9$ , фазовый угол включения тиристоров  $\alpha = 0$  эл. град. На рисунке представлены:  $X_A$  – выходное напряжение в фазе А.

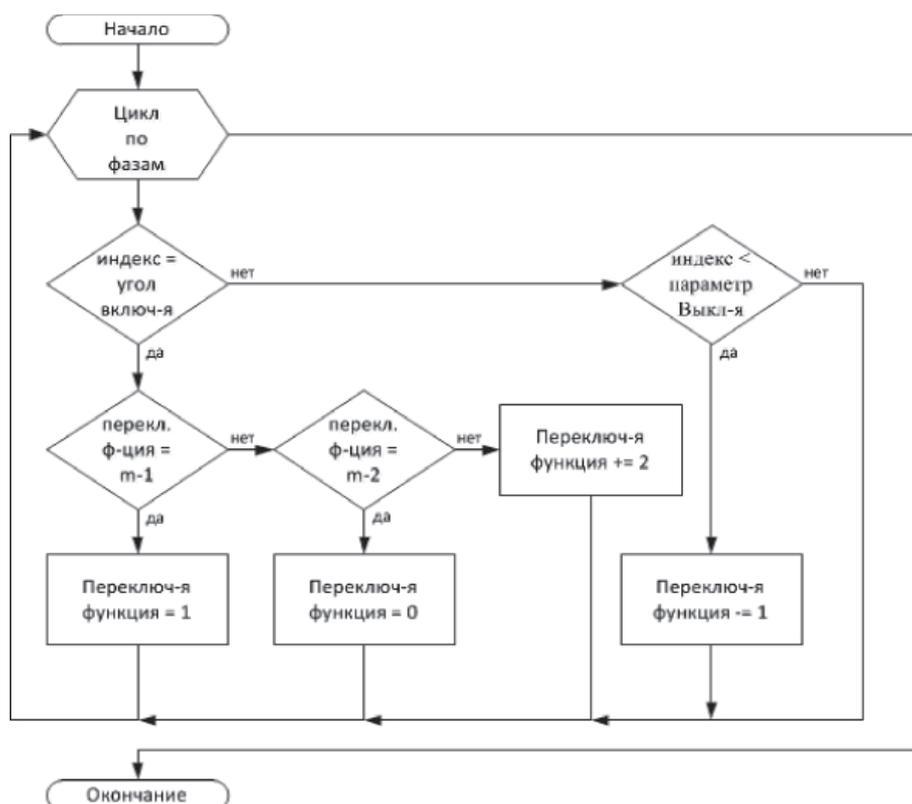


Рис. 3. Алгоритм формирования переключающей функции начальной фазы для двухфазной ШИМ

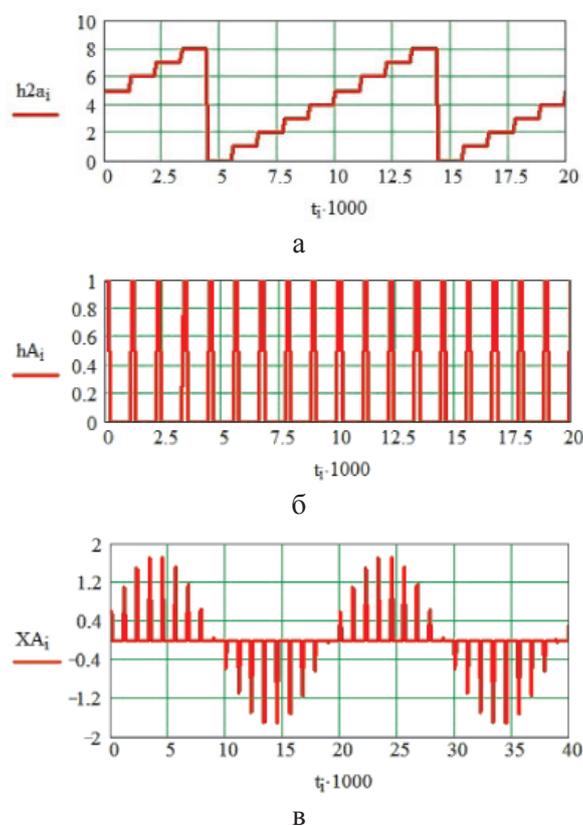


Рис. 4. Результаты моделирования при  $T_a = 0,25 T_n$  (однополярная ШИМ):  
 а – переключающая функция фазы; б – переключающая функция амплитуды;  
 в – выходное напряжение ИПЭ в фазе А

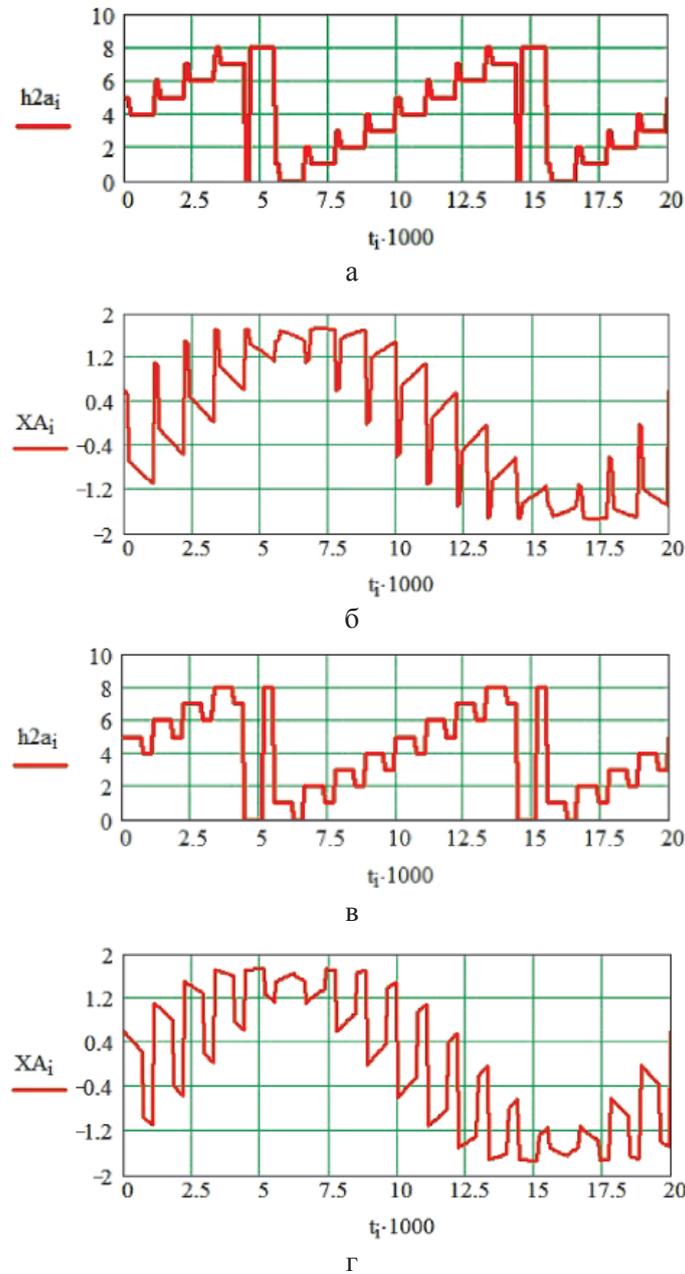


Рис. 5. Результаты моделирования НПЭ для двухфазной ШИМ:  
 а – переключающая функция фазы ( $T_a = 0,25 T_n$ ); б – выходное напряжение в фазе А ( $T_a = 0,25 T_n$ );  
 в – переключающая функция фазы ( $T_a = 4 T_n$ ), г – выходное напряжение в фазе А ( $T_a = 4 T_n$ )

Результаты моделирования НПЭ с двухфазной ШИМ на основе предложенного численного метода в среде Mathcad показаны на рис. 5. Для параметров системы приняты значения: входная частота  $f = 50$  Гц, число фаз входного напряжения  $m = 9$ , фазовый угол включения тиристоров  $\alpha = 0$  эл. град. На рисунке представлены: XA – выходное напряжение в фазе А.

Таким образом, разработанный численный метод моделирования НПЭ с широтно-импульсной модуляцией обеспечивает сокращение объема задаваемых исходных данных и упрощение компьютерного моделирования управляемых вентиляльно-электромеханических систем. Повышение эффективности моделирования достигается посредством сокращения до минимума количества моделируемых структур НПЭ

и количества задаваемых параметров. Разработанный метод рекомендует-ся для компьютерного моделирования при исследовании как однодвигательных, так и многодвигательных много-связных вентиляльно-электромеханических систем.

### Список литературы

1. Прошин И.А. Управление в вентиляльно-электромеханических системах. Кн. 1. Управление непосредственным преобразованием электрической энергии. – Пенза: ПТИ, 2003. – 333 с.
2. Прошин И.А. Теоретические основы моделирования управляемых вентиляльно-электромеханических систем с непосредственными преобразователями электрической энергии // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2000. – № 4. – С. 65–70.
3. Прошин И.А., Вольников М.И., Салмов Е.Н. Алгоритм комбинированного управления и метод математического моделирования асинхронного электропривода // Нива Поволжья. Научно-теоретический и практический журнал для учёных и специалистов. – Пенза: Изд. Пензенской ГСХА, 2014 – С. 102–109.
4. Прошин И.А., Прошин А.И., Мещеряков А.С. Математическая модель асинхронного двигателя с непосредственным преобразователем энергии в цепях статора // Наука производству. – 1998. – № 4. – С. 13–15.
5. Прошин И.А., Прошин А.И., Мещеряков А.С. Математическая модель электродинамического вбросенда // Наука производству. – 1998. – № 12. – С. 59–61.
6. Прошин И.А., Прошин А.И., Обухов В.А., Мещеряков А.С. Математическая модель валогенераторной установки // Наука производству. – 1998. – № 12. – С. 56–58.
7. Прошин И.А., Мещеряков А.С. Двухдвигательный электропривод роликоопор // Техника машиностроения. – 1996. – № 2. – С. 63–64.
8. Прошин И.А., Сапунов Е.А. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т.13 – № 1(2). – С. 337–340.
9. Proshin I.A., Salmov E.N. Mathematical modeling of the direct electrical energy converter. European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. The 2nd International scientific conference proceedings (May 12, 2014). Vienna: OR: «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014 – P. 47–52.

### References

1. Proshin I.A. Upravlenie v ventilno-jelektromehani-cheskih sistemah. Kn. 1. Upravlenie neposredstvennym preobra-zovaniem jelektricheskoj jenerгии. Penza: PTI, 2003. 333 p.
2. Proshin I.A. Teoreticheskie osnovy modelirovanija upravljajemyh ventilno-jelektromehani-cheskih sistem s neposredstvennymi preobrazovateljami jelektricheskoj jenerгии // Informacionnye tehnologii v proektirovanii i proizvodstve, 2000, no. 4. pp. 65–70.
3. Proshin I.A., Volnikov M.I., Salmov E.N. Algoritm kombinirovannogo upravlenija i metod matematicheskogo modelirovanija asinhronnogo jelektroprivoda. Niva Povolzhja. Nauchno-teoreticheskij i prakticheskij zhurnal dlja uchjonyh i specialistov. Penza: Izd. Penzenskoj GSHA, 2014 pp. 102–109.
4. Proshin I.A., Proshin A.I., Meshherjakov A.S. Matematicheskaja model asinhronnogo dvigatelja s neposredstvennym preobrazovatelem jenerгии v cepjah statora // Nauka proizvodstvu, 1998, no. 4. pp. 13–15.
5. Proshin I.A., Proshin A.I., Meshherjakov A.S. Matematicheskaja model jelektrodina-micheskogo vibrostenda // Nauka proizvodstvu, 1998, no. 12. pp. 59–61.
6. Proshin I.A., Proshin A.I., Obuhov V.A., Meshherjakov A.S. Matematicheskaja model valogeneratornoj ustanovki // Nauka proizvodstvu, 1998, no. 12. pp. 56–58.
7. Proshin I.A., Meshherjakov A.S. Dvuhdvigatelnyj jelektroprivod rolikoopor // Tehnika mashinostroenija, 1996, no. 2. pp. 63–64.
8. Proshin, I.A., Sapunov E.A. Modelirovanie privoda dinamicheskogo stenda aviacionnogo trenazhera // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011. T.13 no. 1(2). pp. 337–340.
9. Proshin I.A., Salmov E.N. Mathematical modeling of the direct electrical energy converter. European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. The 2nd International scientific conference proceedings (May 12, 2014). Vienna: OR: «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014 pp. 47–52.

### Рецензенты:

Бутаев М.М., д.т.н., профессор, учёный секретарь открытого акционерного общества «Научно-производственное предприятие “Рубин”», г. Пенза;

Зинкин С.А., д.т.н., профессор кафедры «Вычислительная техника», ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.