

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙНОЙ ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Т.Х. Абузьяров**

ORCID: 0000-0002-2527-7677 e-mail: atx888@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.Б. Дарьенков**

ORCID: 0000-0001-9941-4550 e-mail: darenkov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Для биполярного управления шаговыми двигателями широко применяется мостовая схема соединения силовых элементов. К ее недостаткам можно отнести малый диапазон регулирования по скорости, высокий размах пульсаций фазного напряжения и, как следствие, высокую мощность динамических потерь в полупроводниковом преобразователе, а также высокий размах пульсаций генерируемого электроприводом момента. Применение двух мостовых инверторов, соединенных последовательно для каждой фазы шагового двигателя, позволяет снизить размах пульсаций напряжения на обмотках электродвигателя, потери в преобразовательной части привода, увеличить максимальную скорость вращения вала при меньшем напряжении источника питания. Целью работы является проверка работоспособности предложенной ранее схемы двойной инверторной системы в составе шагового электропривода, а также ее системы управления.

**Ключевые слова:** двойная инверторная система, автономный инвертор напряжения, дробление шага, мостовой преобразователь, шаговый электродвигатель, двоянный инвертор напряжения.

**Для цитирования:** Абузьяров Т.Х., Дарьенков А.Б. Экспериментальное исследование двойной инверторной системы в составе шагового электропривода // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 55-64.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_55

## DUAL INVERTER-FED STEPPER DRIVE EXPERIMENTAL RESEARCH

**T.Kh. Abuzyarov**

ORCID: **0000-0002-2527-7677** e-mail: **atx888@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.B. Dar'enkov**

ORCID: **0000-0001-9941-4550** e-mail: **darenkov@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** A bridge circuit for connecting power elements is widely used for bipolar control of stepper motors. The disadvantages of this scheme include a small range of speed control, a high phase voltage pulsations amplitude and, as a consequence, high power of dynamic losses in the semiconductor converter, as well as a high pulsation amplitude of the torque generated by the electric drive. The use of a dual inverter system makes it possible to reduce the converter output voltage pulsations amplitude, losses in power semiconductor elements, and increase the speed control range at a lower supply voltage. This paper presents a results of performance test of the previously proposed dual inverter system circuit as part of a stepper electric drive., as well as its control system.

**Keywords:** dual inverter, field-oriented control, H-bridge, stepper motor, voltage inverter, microstepping

**For citation:** T.Kh. Abuzyarov and A.B. Dar'enkov, "Dual inverter-fed stepper drive experimental research", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 55-64, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_55

### I. Введение

Простота изготовления, параметрирования и настройки, отсутствие необходимости в обслуживании, а также высокие показатели наработки на отказ позволяют применять электропривод на основе шаговых двигателей (ШД) в таких устройствах, как бытовая техника, станки с числовым программным управлением, мобильные сервисные роботы, космические аппараты и т.д. [1-2].

Широко распространенным схемным решением преобразовательной части для управления током фаз гибридных шаговых электродвигателей является применение мостового инвертора. Большие частоты переключения силовых элементов (из-за активного характера импеданса фазы), а также сравнительно высокая величина коммутируемого напряжения (равная

напряжению питания) являются причинами высоких значений динамических потерь в инверторе.

Вместе с тем, наблюдаемые закономерности в параметрах современных полевых транзисторов (класс напряжения, сопротивление открытого канала, быстродействие) указывают на целесообразность применения электроприводов с нестандартными схемными решениями силовой части преобразователя [3-11]. В [4-11] рассматривается каскадная схема преобразователя (в составе электропривода на основе электродвигателя с разомкнутыми обмотками), состоящего из двух мостовых инверторов, соединенных последовательно. Примечательно, что для работы систем такого типа достаточно, чтобы независимый источник питания в звене постоянного тока (ЗПТ) был только у одного из соединенных последовательно инверторов [9-11]. Инвертор без независимого источника напряжения при этом работает, компенсируя реактивную энергию электрической машины. Среди преимуществ таких каскадных преобразователей по сравнению с классической мостовой схемой отмечается увеличение диапазона регулирования скорости вращения ротора ШД, сниженные динамические потери силовых транзисторов, уменьшенный коэффициент гармонических искажений потребляемого тока.

Данное исследование является продолжением [11] и посвящено экспериментальной проверке работоспособности силовой части предложенного двойного инвертора и ряда предложенных блоков системы управления, а также проверке возможности функционирования данной системы при разомкнутом контуре положения.

## II. Структура электропривода и алгоритм работы

Преобразовательная часть исследуемого двойного преобразователя для питания двухфазного шагового электродвигателя представлена на рис. 1.

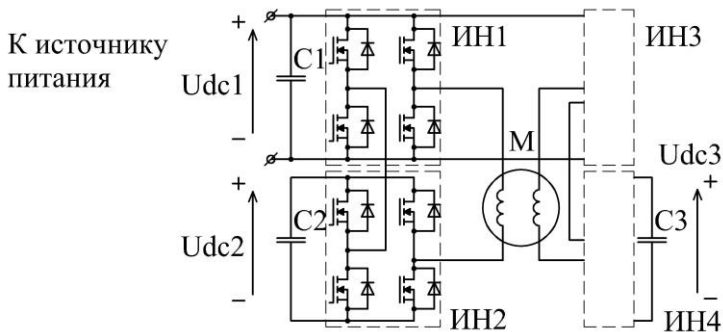


Рис. 1. Схема силовой части инвертора

Fig. 1. The dual inverter electric diagram

В [10, 11] для управления предложенным преобразователем предложено использовать принцип векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. В экспериментальной установке применяется тот же принцип построения силовой части и некоторые из блоков системы управления, однако информация о положении вала ШД в системе отсутствует.

Для управления двойной инверторной системой предлагается использовать ПИ регулирование вектора тока статора во вращающейся системе координат  $dq$ . При этом угол поворота вращающейся системы координат не привязан к фактическому положению ротора ШД (информация о положении вала отсутствует в системе управления), вместо него используется соответствующий сигнал задания  $\theta_{r.ref}$ . Функциональная схема системы управления экспериментального образца представлена на рис. 2.

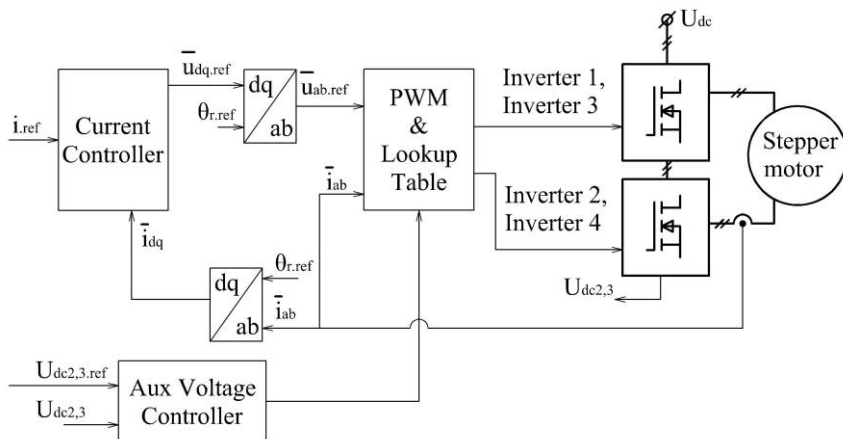


Рис. 2. Функциональная схема системы управления преобразователем

Fig. 2. The prototype dual inverter functional scheme

Применение преобразования Парка обеспечивает регулирование тока статора подобно тому, как это происходит при векторном управлении двигателем, позволяя (по сравнению с регулированием непосредственно наблюдаемых значений тока в фазах  $a$  и  $b$  ШД) избежать:

- снижения показателей качества регулирования фазного тока ШД при высоких скоростях вращения вала из-за значительно возрастающих возмущающих воздействий со стороны ЭДС, а также из-за возрастающей скорости изменения тока задания (при регулировании тока в осях  $ab$  ток задания постоянно изменяется по синусоидальному закону);
- необходимости перехода в полношаговый режим работы по достижении

некоторого порога скорости вращения вала для повышения максимального момента, генерируемого ШД.

Блок «*Aux Voltage Controller*» генерирует сигналы, используемые блоком «*PWM and Lookup Table*» для регулирования напряжения конденсаторов ЗПТ инверторов, ЗПТ которых не подключены к источнику питания.

Блок «*PWM and Lookup Table*» с помощью модулирующих сигналов задания напряжения и массива пилообразных несущих сигналов генерирует сигналы управления транзисторами двойного инвертора. В зависимости от текущего напряжения ЗПТ дополнительных инверторов, сигнала регулятора напряжения ЗПТ, и тока фазы с помощью таблицы поиска выбирается одна конфигурация состояний транзисторов двойной инверторной системы, реализующих необходимое выходное напряжение.

### III. Результаты исследования

Для проверки работоспособности фрагмента системы управления преобразователем разработана экспериментальная установка, включающая в себя:

- регулируемый источник питания 48 В;
- шаговый электродвигатель гибридного типа (параметры представлены в табл. 1);
- прототип двойного инвертора;
- систему управления на основе отладочной платы с микроконтроллером *STM32f407ZGT6*;
- 3д-печатный шкив, трос и грузы для создания момента нагрузки на валу ШД.

*Таблица 1.*

**Характеристики гибридного шагового электродвигателя**

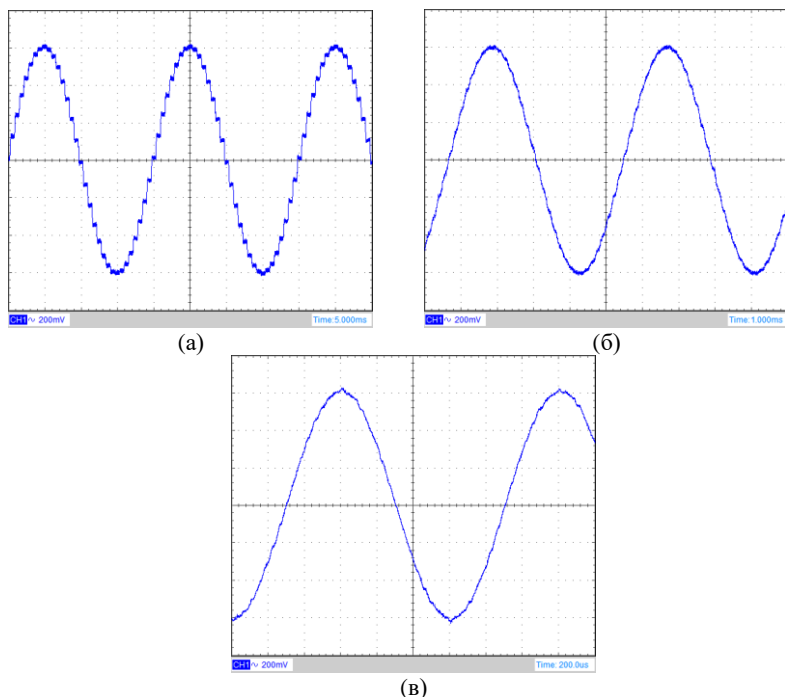
*Table 1.*

**Hybrid stepper motor specifications**

Характеристика	Значение
Число шагов на оборот	200
Число фаз	2
Номинальный момент, Н·м	0,89
Соппротивление фазы, Ом	1,6
Номинальный ток фазы, А	2,3
Масса, кг	0,47

Для проверки работоспособности предложенного двойного инвертора и системы управления в составе шагового электропривода были получены осциллограммы фазного тока (рис. 3) и напряжения (рис. 4) ШД при различных скоростях вращения вала электродвигателя.

Ступенчатая форма тока статора ШД при скорости вращения вала 60 об/мин (рис. 3, а) обусловлена дискретным изменением сигнала задания положения  $\theta_{r.ref}$  системы управления, имитирующим интерфейс *STEP/DIR* коммерческих драйверов ШД в режиме дробления шага 1/8. Следует отметить, что при дальнейшем росте скорости выше 60 об/мин «ступенчатость» формы исчезает, однако форма тока остается синусоидальной. При этом амплитуда тока сохраняется благодаря организации контура тока во вращающейся системе координат  $dq$ .

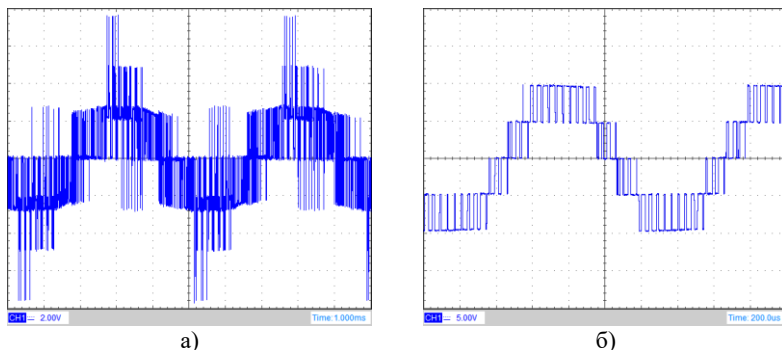


**Рис. 3. Осциллограммы фазного тока ШД (масштаб по вертикали 1,081 А/клетка) при скорости вращения вала ШД: 60 об/мин (а); 250 об/мин (б); 1000 об/мин (в)**

**Fig. 3. Stepper motor phase current oscillograms (scale 1.081 A per cell) with different rotor speed: 60 rpm (a); 250 rpm (б); 1000 rpm (в)**

Синусоидальная форма фазных токов при работе ШД на высоких скоростях вращения значительно снижает уровень шумов и вибраций, генерируемых электроприводом по сравнению с коммерческими моделями

драйверов ШД, применяющими разомкнутое регулирование контура положения. Следует отметить, что размах пульсаций выходного напряжения инвертора на низких скоростях вращения составляет всего  $\sim 26$  В. По мере разгона до 1000 об/мин этот показатель растет до 48 В, что связано с соответствующим регулированием напряжения конденсаторов дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 (рис. 1). Размах пульсаций выходного напряжения драйвера ШД с применением классической мостовой схемы, обеспечивающим эквивалентный диапазон регулирования по скорости, составляет 72 В.



**Рис. 4. Осциллограммы фазного напряжения ШД при скорости вращения вала ШД: 250 об/мин (масштаб по вертикали 20 В/клетка) (а); 1000 об/мин (масштаб по вертикали 50 В/клетка) (б).**

**Fig. 4. Stepper motor phase voltage oscillograms with different rotor speed: 250 rpm (scale 20 V per cell) (a); b – 1000 rpm (scale 50 V per cell) (b).**

Всплески напряжения на низких скоростях вращения вала обусловлены неодновременностью переключения транзисторов основного и дополнительного инверторов в случаях, когда оба инвертора работают в режиме ШИМ. На более высоких скоростях необходимость в таких режимах работы встречается реже, так как емкости конденсаторов ЗПТ становится достаточно, чтобы поддерживать заданное значение напряжения на входе дополнительного инвертора на протяжении всего периода основной гармоники фазного тока ШД.

#### IV. Заключение

Экспериментальное исследование работы двойного инвертора в составе шагового электропривода указывает на работоспособность предложенной в предыдущих исследованиях силовой схемы при разомкнутом контуре регулирования положения. Напряжение звена постоянного тока дополнительных инверторов успешно регулируется в пределах от 50 до 100 % напряжения питания, что позволяет снизить размах пульсаций выходного

напряжения почти в три раза при низких скоростях вращения вала по сравнению с эквивалентной по диапазону регулирования по скорости классической мостовой схемой преобразовательной части.

Организация контура тока во вращающейся системе координат  $dq$  позволяет сохранять синусоидальную форму тока в широком диапазоне скоростей вращения вала электропривода, снижая пульсации генерируемого электроприводом момента, шум и вибрации, что потенциально уменьшает риск возникновения резонансных явлений.

© Абузяров Т.Х., 2023

© Дарьенков А.Б., 2023

*Поступила в редакцию 04.12.2023*

*Принята к публикации 11.12.2023*

*Received 04.12.2023*

*Accepted 11.12.2023*

### Библиографический список

- [1] Derammelaere S., Vervisch B., De Belie F., Vanwalleghem B., Cottyn J., Cox P., Van den Abeele G., Stockman K., Vandeveld L. The efficiency of hybrid stepping motors: Analyzing the impact of control // IEEE Industry Applications Magazine. 2014. № 20 (4). P. 50-60. DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
- [2] Le K.M., Hoang H.V., Jeon J.W. An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motor // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. № 32 (9). P. 7244-7255. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] Абузяров Т.Х., Плехов А.С., Дарьенков А.Б., Ермолаев А.И. Разработка модели систем высококачественного бесколлекторного электропривода постоянного тока // Вестник ИГЭУ. 2020. №. 1. С. 31-45. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045
- [4] Franquelo L.G., Rodriguez J., Leon J.I., Kouro S., Portillo R., Prats M.A.M. The age of multilevel converters arrives // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2008. № 2 (2). P. 28-39. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519
- [5] Rodriguez J., Lai J.-S., Peng F.Z. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications // IEEE Transactions Industrial Electronics. 2002. № 49 (4). P. 724-738. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
- [6] Loncarski J., Leijon M., Srdović M., Rossi C., Grandi G. Comparison of output current ripple in single and dual three-phase inverters for electric vehicle motor drives // Energies. 2015. Vol. 8. P. 3832-3848. DOI: 10.3390/en8053832
- [7] Абузяров Т.Х., Плехов А.С. Каскадный преобразователь для электротранспорта с пространственно-векторным управлением // Актуальные проблемы электроэнергетики, Декабрь 17-18, 2020, Нижний Новгород, Россия: НГТУ, 2020. С. 41-47. DOI: 10.46960/39255930\_2020\_41
- [8] Олещук В.И., Сизов А.С., Станкович А.М., Ярошенко Е.М. Электроприводы со сдвоенными инверторами и синхронизированным многоуровневым выходным напряжением // Проблемы региональной энергетики. 2006. № 1. [Электронный



- ресурсы]. URL: <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyij-zhurnal-n-1-2006> (дата обращения 07.08.2022).
- [9] Chowdhury S., Wheeler P., Gerada C., Lopez Arevalo S. A dual inverter for an open end winding induction motor drive without an isolation transformer // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 2015, Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015. P. 283-289. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104364
- [10] Абузьяров, Т.Х. Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока // Электротехнические Системы и Комплексы. 2021. № 1 (50). С. 27-34. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34
- [11] Abuzyarov T., Plekhov A. Algorithm of field-oriented control of a dual inverter-fed stepper drive with use of the lookup table // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov. 10-12, 2021, Lipetsk, Russia: IEEE, 2021. P. 1061-1065. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025

### References

- [1] S. Derammelaere, B. Vervisch, F. De Belie, B. Vanwalleghem, J. Cottyn, P. Cox, G. Van den Abeele, K. Stockman, L. Vandeveldel, "The efficiency of hybrid stepping motors: Analyzing the impact of control", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 50-60, July-Aug. 2014. DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
- [2] K.M. Le, H.V. Hoang and J.W. Jeon, "An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 7244-7255, Oct. 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] T.N. Abuzyarov, A.S. Plehov, A.B. Darenkov and A.I. Ermolayev, "Development of a high-quality brushless DC electric drive systems model", *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 1, p. 31-45, 2020. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045
- [4] L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon, S. Kouro, R. Portillo and M.A.M. Prats, "The age of multilevel converters arrives", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39, Jun. 2008. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519
- [5] J. Rodriguez, J.-S. Lai and F.Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002. DOI: 10.1109/TIE.2002.801052
- [6] J. Loncarski, M. Leijon, M. Srdović, C. Rossi and G. Grandi, "Comparison of output current ripple in single and dual three-phase inverters for electric vehicle motor drives", *Energies*, vol. 8, pp. 3832-3848, May 2015. DOI: 10.3390/en8053832
- [7] Т.Х. Абузьяров and А.С. Плехов, "Kaskadnyj preobrazovatel' dlya elektrotransporta s prostranstvennovektornym upravleniem [Space vector control dual-inverter for an electric vehicle]", in proc. *Aktualnyye problemy elektroenergetiki [Actual problems of the electric power industry]*, Dec. 17-18, 2020, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 41-47 (in Russian). DOI: 10.46960/39255930\_2020\_41

- [8] V. Oleschuk, A. Sizov, A. Stankovic and E. Yaroshenko, “Dual inverter-fed drives with the synchronised multilevel voltage waveforms”, *Problemy regionalnoy energetiki*, no. 1, 2006. [Abstract]. Available at: Problemy regionalnoy energetiki, <https://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyj-zhurnal-n-1-2006>.
- [9] S. Chowdhury, P. Wheeler, C. Gerada and S. Lopez Arevalo, “A dual inverter for an open end winding induction motor drive without an isolation transformer”, in proc. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 15-19, 2015, Charlotte, NC, USA, pp. 283-289. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104364
- [10] T.H. Abuzyarov, “Dual inverter system for powering the stepper motor with reduced DC link voltage”, *Electrical Systems and Complexes*, vol. 1, no. 50, pp. 27-34, 2021. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34
- [11] T. Abuzyarov and A. Plekhov, “Algorithm of field-oriented control of a dual inverter-fed stepper drive with use of the lookup table”, in proc. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Nov. 10-12, 2021, Lipetsk, Russia, pp. 1061-1065. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Абузыров Тагир Хусаннович**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Tagir Kh. Abuzyarov**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Дарьенков Андрей Борисович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой, директор Образовательно-научного института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Andrey B. Dar'enkov**, D. Sci. (Eng.), head of the chair, director of the Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.