

УДК 621.313

Н. Н. ЗАБЛОДСКИЙ, В. Ю. ГРИЦЮК**МУЛЬТИГРАДИЕНТНОСТЬ ПОЛЕЙ В МАССИВЕ РОТОРА ШНЕКОВОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

С помощью численного моделирования проведен анализ величин, характеризующих мультифизические процессы в активных частях шнекового полифункционального электромеханического преобразователя. Представлены зависимости распределения векторного магнитного потенциала, напряженности электрического поля, электропроводности, механических напряжений, температуры и градиентов соответствующих величин по глубине, а также вдоль длины полого ферромагнитного ротора. Результаты моделирования подтверждают возможность концентрации тепловыделений в межмодульной и концевых зонах шнекового электромеханического преобразователя.

Ключевые слова: полифункциональный электромеханический преобразователь, массив ротора, электромагнитное поле, градиент температуры, механические напряжения.

С помощью численного моделирования проведен анализ величин, характеризующих мультифизические процессы в активных частях шнекового полифункционального электромеханического преобразователя. Представлены зависимости распределения векторного магнитного потенциала, напряженности электрического поля, электропроводности, механических напряжений, температуры и градиентов соответствующих величин по глубине, а также вдоль длины полого ферромагнитного ротора. Результаты моделирования подтверждают возможность концентрации тепловыделений в межмодульной и концевых зонах шнекового электромеханического преобразователя.

Ключевые слова: полифункциональный электромеханический преобразователь, массив ротора, электромагнитное поле, градиент температуры, механические напряжения.

For polyfunctional electromechanical converters in which the active moving parts at the same time experiencing the combined impact of several types of loading, there is an urgent need to address the problems of forecasting and monitoring the change of parameters and characteristics. Accurate modeling requires joint solving electromagnetic, thermal and mechanical problems. Electromagnetic problem is solved with respect to the magnetic vector potential. Calculation of the rotor deformation associated with magnetoelastic, carried out by a separate procedure. The temperature field and steady-state heat conduction problem we consider as composite wall and any number of fuel elements and the cooling media. With the help of numerical simulation analysis of quantities characterizing multiphysics processes in the active parts of screw polyfunctional electromechanical transducer. The dependences of the magnetic vector potential distribution, electric field strength, conductivity, mechanical stress, temperature, and gradient values corresponding to the depth and along the length of the hollow ferromagnetic rotor. The simulation results confirm the possibility of heat generation concentration in the inter-module and the end zones of the screw electromechanical transducer. The distribution function of the mechanical compressive stresses along the ferromagnetic rotor is formed as a result of two factors: the temperature and axial strain magnetostriction. It should be noted the essential values of temperatures (up to 320 °C) in parts of the rotor of the array corresponding to the boundary zones of stators of the motor and brake modules. Changes of distribution gradients possible at the design stage and subsequent manufacturing converters by incremental displacement of one of stators by tangential coordinate.

Key words: polyfunctional electromechanical converter, massive of rotor, electromagnetic field, temperature gradient, mechanical stresses.

Введение. Обмотки, магнитные цепи электрических машин представляют собой многослойную систему из активных и диэлектрических тел, взаимосвязанных в тепловом отношении. Тепловыделяющие элементы (твэлы) в системе распределены неравномерно по координатам [1]. Поэтому представляет практический интерес нахождение обобщенного решения с переменными по координатам внутренними источниками тепла для обоснования выбора геометрических размеров твэлов, их теплофизических свойств, условий охлаждения, допустимых тепловых нагрузок. Для нового класса полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП), в которых активные подвижные части испытывают одновременно комбинированное воздействие нескольких видов нагружения, возникает острая необходимость решения задач прогнозирования и контроля изменения параметров и характеристик [2]. Предварительная оценка процессов указывает на то, что в полом ферромагнитном роторе шнекового ПЭМП, находящемся в электромагнитном и тепловом полях, могут возникать существенные внутренние механические напряжения и проявления эффектов Матисси, Видемана, Виллари. Точное моделирование процессов ПЭМП требует совместного решения электромагнитной, тепловой и механической задач. На сегодняшний день существует небольшое количество конечно-элементных программных

комплексов, которые содержат указанные физические модули, и еще меньше тех, которые позволяют решать взаимосвязанные задачи [3-6].

Разработка аналитических методов и математических моделей для проведения численных экспериментов требует тщательной оценки градиентов потенциальных полей, действующих в массиве ротора ПЭМП.

Цель работы. Определение распределения скалярных и векторных величин, характеризующих магнитное, электрическое и тепловое поле, а также поле механических напряжений, оценка взаимосвязанности градиентов этих величин в краевых и активных зонах массивного ротора ПЭМП.

Изложение материала и его результаты. В массиве полого ферромагнитного ротора шнекового ПЭМП действуют четыре вида взаимосвязанных потенциальных полей: магнитное, электрическое, тепловое и поле механических напряжений. Вместе с тем, весь массив ротора условно состоит из отдельных твэлов, неравномерно распределенных по координатам, в общем случае – с функцией распределения $q_v(R, \varphi, Z)$. Даже в пределах твэла представление тепловыделений постоянным (среднеинтегральным) значением требует своего обоснования. Аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности представляет проблему даже при нулевых начальных условиях. На рис. 1 представлена расчетная схема

ПЭМП отображающая его гетерогенную рабочую структуру, в которой можно выделить три вида характерных областей.

Области I и II ограничены по координате Z торцами ротора и магнитопровода статора, на R – внешней поверхностью ротора и внутренней поверхностью неподвижного вала. Области III, IV ограничены торцами магнитопроводов статора соответственно двигательного и тормозного модулей по координате Z . Область V – межмодульное пространство, ограниченное по координате Z торцами магнитопроводов двигательного и тормозного модулей.

Все области по координате R ограничены внешней поверхностью ротора и внутренней поверхностью неподвижного вала.

Электромагнитная задача решается относительно векторного магнитного потенциала, а расчет деформаций ротора, связанных с магнитоупругостью, ведется по методике [7].

Температурное поле и стационарную задачу теплопроводности мы рассматриваем в составной стенке из произвольного числа твэлов и охлаждающих сред:

$$\begin{aligned} & \lambda_{Rj} \left(\frac{\partial^2 \theta_j}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_j}{\partial R} \right) + \lambda_{\varphi j} \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta_j}{\partial \varphi^2} + \\ & + \lambda_{Zj} \frac{\partial^2 \theta_j}{\partial Z^2} + q_{vj}(R, \varphi, Z) = 0, \quad (1) \\ & R_j < R < R_{j+1}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m, \\ & -\lambda_1 \frac{d\theta_1}{dR} \Big|_{R=R_1} = \alpha_1 (\theta_1 \Big|_{R=R_1} - \theta_{охл.1}), \\ & \lambda_1 \frac{d\theta_1}{dR} \Big|_{R=R_2} = \lambda_2 \frac{d\theta_2}{dR} \Big|_{R=R_2}, \\ & \theta_1 \Big|_{R=R_2} = \theta_2 \Big|_{R=R_2}, \\ & -\lambda_i \frac{d\theta_i}{dR} \Big|_{R=R_{i+1}} = \lambda_{i+1} \frac{d\theta_{i+1}}{dR} \Big|_{R=R_{i+1}}, \\ & \theta_i \Big|_{R=R_{i+1}} = \theta_{i+1} \Big|_{R=R_{i+1}}, \\ & -\lambda_m \frac{d\theta_m}{dR} \Big|_{R=R_{m+1}} = -\alpha_2 (\theta_m \Big|_{R=R_{m+1}} - \theta_{охл.2}), \end{aligned}$$

Здесь R, R_i – координата соответственно составного полого цилиндра и координата на границе соприкосновения слоев; $\theta_j(R), \theta_j(Z), \theta_j(\varphi)$ температуры в j -м слое по координатам R, φ, Z ; $q_{vj}(R, \varphi, Z)$ – тепловыделение твэла в j -м слое; α_1, α_2 – коэффициенты теплообмена; λ_j, λ_i – коэффициенты теплопроводности; $\theta_{охл.1}, \theta_{охл.2}$ – температуры охлаждающих сред; m – общее число слоев составного цилиндра. Принимая допущение об изотермичности температурного поля в j -м слое по координате φ , расчет ведем в ассиметричной постановке. Моделируемая плоскость – плоскость ZR .

На рис. 2 представлены функции распределения нормальной составляющей электрической напряженности E тангенциальной составляющей векторного магнитного потенциала A , механических напряжений σ , температуры θ , активной проводимости γ вдоль полого ферромагнитного ротора (Z -координата). В задаче рассматривается

ротор с относительно небольшой толщиной 12 мм, поэтому все указанные величины, кроме электрической напряженности, зарегистрированы по средней линии толщины ротора и, как мы увидим далее, существенных колебаний от толщины не испытывают. Значения E взяты на поверхности ротора со стороны расточки статоров и испытывают пятикратное изменение по толщине ротора.

Большинство из представленных функций для отдельных модулей можно отнести к гармоническим, анализ которых возможен и аналитическими методами.

В теории электромагнитного поля векторный магнитный потенциал A вводится с помощью следующего соотношения:

$$\text{rot } \vec{A} = \vec{E} \quad (2)$$

Дифференцируя уравнение (2) по времени и учитывая известное соотношение $\text{rot } E = -\partial B / \partial t$ получим:

$$\text{rot } \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\text{rot } \vec{E} \quad (3)$$

Таким образом, значения двух функций $\partial A / \partial t$ и E могут отличаться одно от другого только на некоторую постоянную независимую от координат величину. Вместе с тем, совпадение распределения вдоль координаты Z экстремумов представленных на рисунке 2 функций позволяет искать градиенты обобщенных функций (векторных и скалярных) для решения задач структурно-функциональной и тепловой интеграции ПЭМП. Функция распределения механических напряжений сжатия вдоль ферромагнитного ротора сформирована как результат воздействия двух факторов: температурных осевых деформаций и магнитоstriction. Количественно влияние первого фактора превышает на три порядка возникающие механические напряжения от воздействия магнитоstriction, однако усилия, возникающие вследствие магнитоstriction весьма заметны (до 0,4 МПа) и в сочетании с частотой колебаний формируют значительные ультразвуковые воздействия на рабочую среду ПЭМП. На данном этапе исследований пока не учитываются деформации кручения.

Необходимо отметить существенные значения температур (до 320 °С) в массиве ротора в областях I, II, V, соответствующих краевым зонам магнитопроводов статоров двигательного и тормозного модулей.

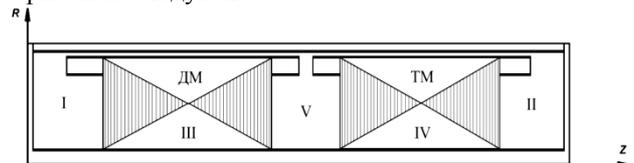


Рис. 1 – Расчетная схема шнекового ПЭМП

На рис. 3, 4 показаны соответственно распределения векторного магнитного потенциала, напряженности электрического поля, активной проводимости, механических напряжений, температуры и градиентов указанных величин. Расчет градиента температуры по глубине ротора, равно как

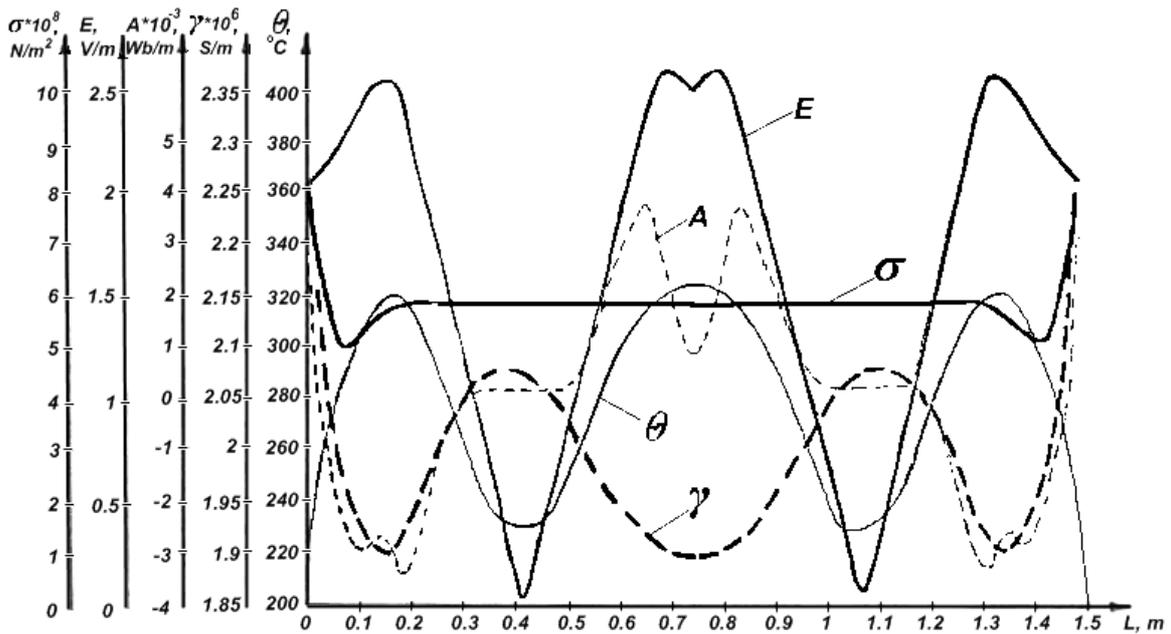


Рис. 2 – Функции распределения электромагнитных, тепловых и механических величин вдоль ротора ПЭМП

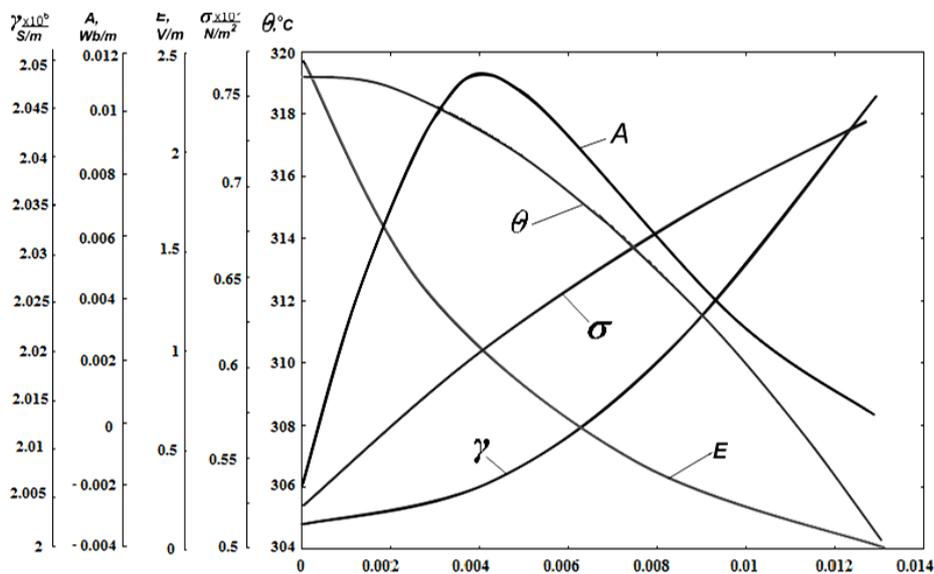


Рис. 3 – Распределение векторного магнитного потенциала, напряженности электрического поля, проводимости, температуры и механических напряжений по глубине ротора

и для других величин, ведется с учетом изменения Z-составляющей градиента по слоям:

$$\text{grad}\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta_R}{\partial R}\right)^2 + \left(\frac{\partial\theta_Z}{\partial Z}\right)^2} \quad (4)$$

Наибольшей полиградиентностью обладают I, II и V-я области шнекового ПЭМП, при этом последняя может регулироваться по основным компонентам электромагнитного и теплового поля в процессе работы ПЭМП путем переключений тормозного и двигательного модулей на различные направления вращения основного магнитного поля, изменением его частоты и уровня напряжений. Целевые изменения полиградиентного

распределения возможны также на стадии проектирования и последующего изготовления ПЭМП путем пошаговых смещений одного из статоров по координате \$\varphi\$. На рис. 5 представлен один из фрагментов распределения градиента температуры в области V, подтверждающий возможность концентрации тепловыделений в межмодульной зоне, где не проходит основной магнитный поток.

Фактически ферромагнитный ротор является основным элементом системы, регулирующим направленность термоградиента. Наряду с представленными выше величинами электромагнитного и теплового полей исследована одна из основных интегральных величин –

плотность магнитной энергии. Вектор градиента энергии есть ничто иное, как вектор силы, действующей на определенный объем активной части ПЭМП: $F = -gradW$. Это выражение общеквариантно, т.е. не зависит от системы отсчета.

ПЭМП относят к классу электромеханических преобразователей технологического назначения, и рабочая среда выступает, как правило, в роли

нагрузочно-охлаждающей, имеющей непосредственный контакт с активными частями ПЭМП.

Безусловно, оценка работы всей системы должна выполняться уже в трехмерной постановке задачи с вовлечением ещё одного вида градиента – градиента концентрации вещества, характеризующего величину и направленность концентрации какого-либо вещества в среде.

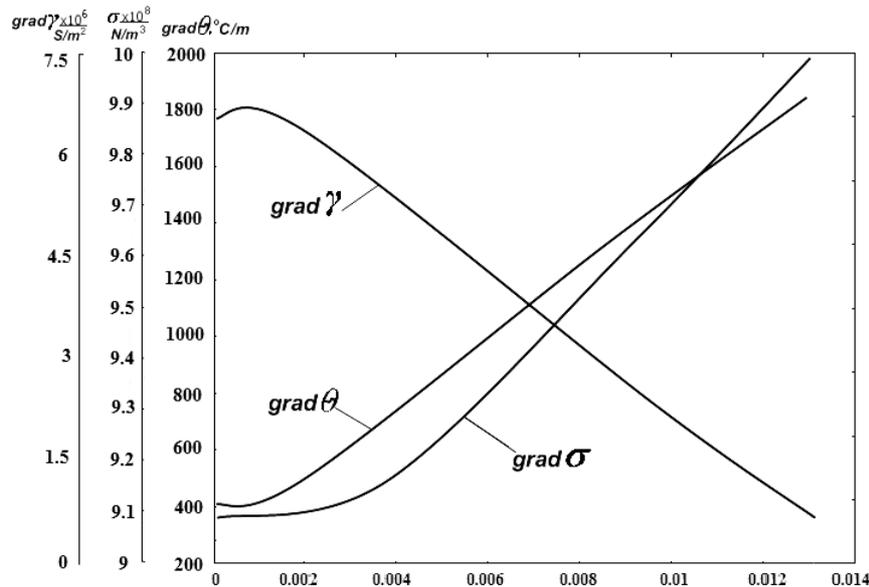


Рис. 4 – Температурный градиент, механическое напряжение и проводимость по глубине ротора

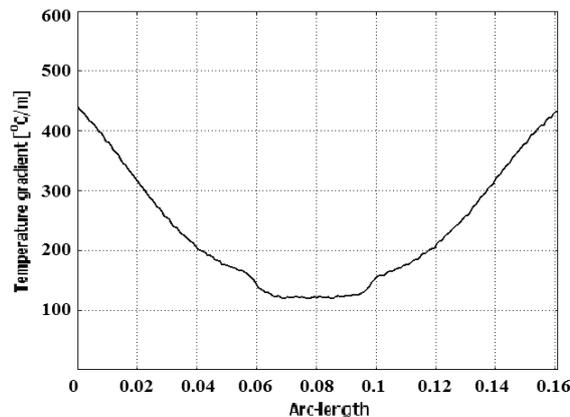


Рис. 5 – Распределение градиента температуры в межполюсной области

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенный методами численного моделирования анализ величин, характеризующих мультифизические процессы в активной части шнекового полифункционального электро-механического преобразователя, показал возможность установления градиентов функций (векторных и скалярных) для решения задач по оценке интенсивности и локализации областей преобразования энергии.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск методов установления градиентов обобщенных функций, в том числе

интегральных, для решения задач структурно-функциональной и тепловой интеграции полифункциональных электромеханических преобразователей.

Список литературы:

1. Логинов В. С. Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок / В. С. Логинов. – М.: ФизМатЛит, 2009. – 272 с.
2. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения / Н. Н. Заблодский – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 296 с.
3. Чумаченко Е. Н. Математическое моделирование в нелинейной механике (обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем) / Е. Н. Чумаченко // Статьи

- сайта IKI.RSSI.RU – Режим доступа : <http://www.iki.rssi.ru/books/2009chumachenko.pdf>. - Дата обращения : 15 июня 2016.
4. Васильев В. А. Анализ и выбор программных продуктов для решения инженерных задач приборостроения / В. А. Васильев, М. А. Калмыкова // Современная техника и технологии. – Март, 2013. – Режим доступа : <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702>. - Дата обращения : 12 июня 2016.
 5. Bailoni M. Mathematical modelling and simulation of magnetostrictive materials by Comsol Multiphysics / M. Bailoni, Y. Wei, L. Norum // Статьи сайта comsol.com – Режим доступа : <https://www.comsol.se/paper/download/37248/Norum.pdf>. - Дата обращения : 20 июня 2016.
 6. Slaughter J. C. Coupled structural and magnetic models: linear magnetostriction in Comsol / J. C. Slaughter // Статьи сайта comsol.com – Режим доступа : <https://www.comsol.se/paper/download/44538/Slaughter.pdf>. - Дата обращения : 20 июня 2016.
 7. Заблодский Н. Н. Моделирование взаимосвязанных электромагнитных и механических процессов в массиве ротора шнекового полифункционального электромеханического преобразователя / Н. Н. Заблодский, В. Е. Плюгин, В. Ю. Грицюк, И. Н. Кудырмаев // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – 2013. – Вып. 40. – С. 202–206.
 - electromechanical converters technological purpose] Alchevsk: DonGTU, 2008. – 296 p.
 3. Chumachenko E. N. Matematicheskoe modelirovanie v nelinejnoj mehanike (obzor programmyh kompleksov dlja reshenija zadach modelirovanija slozhnyh sistem). [Mathematical modeling in nonlinear mechanics (review of software packages for the solution of complex systems modeling problems)] E. N. Chumachenko. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/books/2009chumachenko.pdf>. (accessed 15.06.2016).
 4. Vasil'ev V. A., Kalmykova M. A. Analiz i vybor programmyh produktov dlja reshenija inzhenernyh zadach priborostroenija. [Analysis and selection of software to solve engineering problems of Instrumentation] Sovremennaja tehnika i tehnologii. – Mart, 2013. Available at: <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702>. (accessed 12.06.2016).
 5. Bailoni M., Wei Y., Norum L. Mathematical modelling and simulation of magnetostrictive materials by Comsol Multiphysics. Available at: <https://www.comsol.se/paper/download/37248/Norum.pdf>. (accessed 20.06.2016).
 6. Slaughter J. C. Coupled structural and magnetic models: linear magnetostriction in Comsol. Available at: <https://www.comsol.se/paper/download/44538/Slaughter.pdf>. (accessed 20.06.2016).
 7. Zablodskiy N. N., Plyugin V. E., Gritsyuk V. Yu., Kulydyrkaev I. N. Modelirovanie vzaimosvyazannykh elektromagnitnykh i mekhanicheskikh protsessov v massive rotora shnekovogo polifunktional'nogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya [Simulation of related electromagnetic and mechanical processes in the rotor screw array of polyfunctional electromechanical transducer]. *Sb. nauch. trudov DonGTU*. 2013. vol. 40. pp. 202–206.

References (transliterated):

Поступила (received) 10.08.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Мультиградиентность полей в массиве ротора шнекового электромеханического преобразователя / М. М. Заблодский, В. Ю. Грицюк // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 88–92. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Мультиградиентность полей в массиве ротора шнекового электромеханического преобразователя / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 88–92. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Multigradient of fields in the array of rotor screwing electromechanical converter / N. N. Zablodskij, V. Yu. Gritsyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Thematic edition "Electric machines and electromechanical energy conversion". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 11 (1183) – P. 88–92. – Bibliogr. 7. – ISSN 2409-9295.

«Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors»

Заблодський Микола Миколаєвич, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природовикористання, професор кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання; (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiyinn@gmail.com

Заблодский Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Национальный университет биоресурсов и природопользования, профессор кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования; (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiyinn@gmail.com

Zablodskij Nikolaj Nikolajevich, doctor of technical sciences, full professor, National University of life and environmental, professor of the department of electrical machines and maintenance of electric equipment; +38 (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiyinn@gmail.com

Грицюк Владимир Юрьевич, кандидат технічних наук, Донбаський державний технічний університет, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем і електроприводу; (099) 948-54-33; e-mail: grits.86@mail.ru

Грицюк Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, Донбасский государственный технический университет, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем и электропривода; (099) 948-54-33; e-mail: grits.86@mail.ru

Gritsyuk Vladimir Yurievich, candidate of technical sciences, Donbass State Technical University, associate professor at the Department of automated electromechanical systems and electric drive; +38 (099) 948-54-33; e-mail: grits.86@mail.ru