

**УДК 621.313.**

## МЕТОДОЛОГИЯ СПОСОБОВ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### METHODOLOGY METHODS OF ANALYSIS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**Падалко Дмитрий Андреевич,**

ассистент, аспирант, e-mail: padalko.da@gmail.com

**Padalko DmitriyA.,** assistant

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 street Lenin, Tomsk, 634050, Russian Federation

**Аннотация:** В статье рассмотрены методы изучения электромеханических систем на примере электрических машин различного типа. Показан системный подход к вопросу выбора метода изучения, исходя из поставленных требований и имеющихся ресурсов. Представлены результаты моделирования электромеханических систем различными методами.

**Abstract:** This article describes methods for studying electro-mechanical systems as an example of different types of electrical machines. Showed a systematic approach to the issue of choosing the method of study, based on the set of requirements and available resources. The simulation results of electromechanical systems by different methods.

**Ключевые слова:** электромеханические системы, визуальное моделирование, математический метод, подход с позиции ТАУ, методология, научно-технические решения.

**Keywords:** electromechanical systems, visual modeling, mathematical methods, the approach from the perspective of TAU, methodology, scientific and technical solutions.

#### **Актуальность**

В настоящее время методология выбора научно-технических решений состоит из широкого спектра способов проектирования электромеханических систем. Теория электромеханических систем возникла как обобщение постулатов и закономерностей, позволяющих применение классических методов к электротехническим объектам для изучения свойств и параметров сложных систем. Зачастую решение о способе проектирования принимается из расчета простоты получения результата, соответствующего первоначальным требованиям. Основными способами получения необходимых характеристик являются описание и решение систем дифференциальных уравнений и визуально - имитационное моделирование структурных схем в пакетах прикладных программ. Цель данной статьи – произвести обзор и дать рекомендации по выбору способа решения задач комплексного анализа электромеханических систем.

#### **Представление объекта исследования как системы дифференциальных уравнений**

Классический метод описания с помощью систем дифференциальных уравнений является наиболее обобщенным. Поскольку математические модели абстрактны, они широко используются в системных исследованиях. Математическая модель объекта является его идеализацией, поэтому

при составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов используют общепринятые ограничения и допущения, связанные с «идеализированным» объектом. Так при составлении уравнений для электрических машин считают, что фазные обмотки симметричны, пренебрегают потерями в стали и т.п. В связи с упрощением объекта возникает задача «настройки» математической модели на реальный объект, суть которой состоит в определении таких значений параметров, которые дадут результат, максимально приближенный к экспериментальным данным. В случае необходимости может быть учтено большее число факторов, однако это значительно усложняет решение системы дифференциальных уравнений, увеличивая время нахождения решения. В связи с этим поиск перекладывают на специализированные программы. Наибольшее распространение для решения систем дифференциальных уравнений получил метод Эйлера и его модифицированный вариант. В математических пакетах применительно к электротехническим системам наиболее часто используют метод Рунге-Кutta четвертого порядка. Реализации данного метода имеются в пакетах прикладных программ, таких как MatLAB, Mathcad, Mathematica и прочих[1-4].

В качестве примера приведем решение системы дифференциальных уравнений асинхронной машины. Как известно, есть несколько основных

форм записи уравнений асинхронного двигателя (АД) через токи и потокосцепления статорных и роторных контуров, через потокосцепления контуров двигателя в различных системах координат. Воспользуемся дифференциальными уравнениями АД в комплексной системе координат  $\alpha\beta$ , включающие выражения для тока и напряжения статора, потокосцепление ротора и статора, угловую скорость ротора, момент приводного двигателя и момент инерции (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sa}}{dt} = \frac{U_{sa}}{L_s} - \frac{r_s i_{sa}}{L_s} + \frac{kr}{L_s} \Psi_{ra} + \frac{kr}{L_s} \cdot s\omega \Psi_{r\beta}; \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{U_{s\beta}}{L_s} - \frac{r_s i_{s\beta}}{L_s} + \frac{kr}{L_s} \Psi_{r\beta} + \frac{kr}{L_s} \cdot s\omega \Psi_{ra}; \\ \frac{d\Psi_{ra}}{dt} = k_r \cdot r_r \cdot i_{sa} - \frac{\Psi_{ra}}{T_r} - s \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = k_r \cdot r_r \cdot i_{s\beta} - \frac{\Psi_{r\beta}}{T_r} - s \cdot \omega \cdot \Psi_{ra}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{k_r}{Jd} (\Psi_{ra} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} \cdot i_{sa}) - \frac{M_{bp}}{J_d}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Решение указанной системы дифференциальных уравнений выполним с помощью пакета прикладных программ MatLab. Для этого достаточно составить функцию с указанием параметров электрической машины. Определение исследуемых величин системы возможно выполнить через встроенную функцию ode45 в качестве входных параметров которой выступают: система дифференциальных уравнений, временной диапазон, начальные условия величин и точность нахождения решения. На рис. 1 представлен результат полученного решения для величины угловой скорости [3].

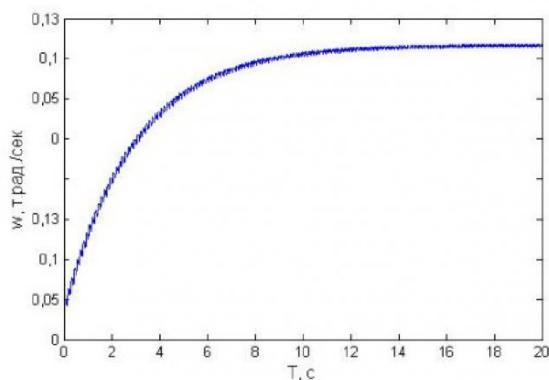


Рис. 1. Зависимость угловой скорости АД от времени

Fig. 1. The dependence of the angular velocity of the induction motor on the time

#### Метод визуального моделирования для описания электромеханических систем

Современный этап развития электротехниче-

ской промышленности характеризуется усложнением электромеханических систем, взаимодействий и связей между узлами. Наиболее простым в освоении и применении является метод визуального моделирования. Суть метода заключается в пошаговом воспроизведении преобразований в виде структурных блоков с конкретным функциональным назначением. Преимуществом таких моделей является высокая скорость работы программы относительно событий, исследуемой системы, в реальном масштабе времени. Существуют специальные языки визуального моделирования, которые значительно упрощают процесс создания программы, описывающей модель объекта по сравнению с универсальными языками программирования. В настоящее время на практике наиболее популярны такие языки визуального моделирования, как BPMN и UML. Существуют и более редкие языки для моделирования телекоммуникационных систем, для моделирования бизнес-процессов, такие как SADT/IDEF0 IDEF1x SDL и MSC, и другие. Применительно к электромеханическим системам наибольшую популярность получил Simulink – визуальная среда моделирования, дающая возможность при помощи стандартных блок-диаграмм, строить модели динамических систем, в том числе дискретных, не-прерывных и нелинейных систем. Данная программная среда отличается своей простотой и широкими возможностями выбора объектов моделирования с использованием стандартных библиотек для решения задач механических, электросиловых и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления. В настоящее время в арсенале исследователя присутствуют дополнительные пакеты расширений, позволяющие решать весь спектр задач разработки моделей от создания до тестирования и генерации кода для аппаратной реализации. При необходимости использования объекта не требующего детального описания имеется возможность воспользоваться готовыми элементами. Это позволяет значительно сократить время на разработку сложных моделей, включающих несколько электромеханических блоков [5].

Приведем пример моделирования электромеханической системы - асинхронной машины. Для реализации модели использованы встроенные в пакет прикладных программ функциональные блоки, которые реализуют операции интегрирования, суммирования и т.п.

На рис. 2 представлена структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат. Отметим, что данная структурная схема также получена из системы уравнений в операторной форме (2):

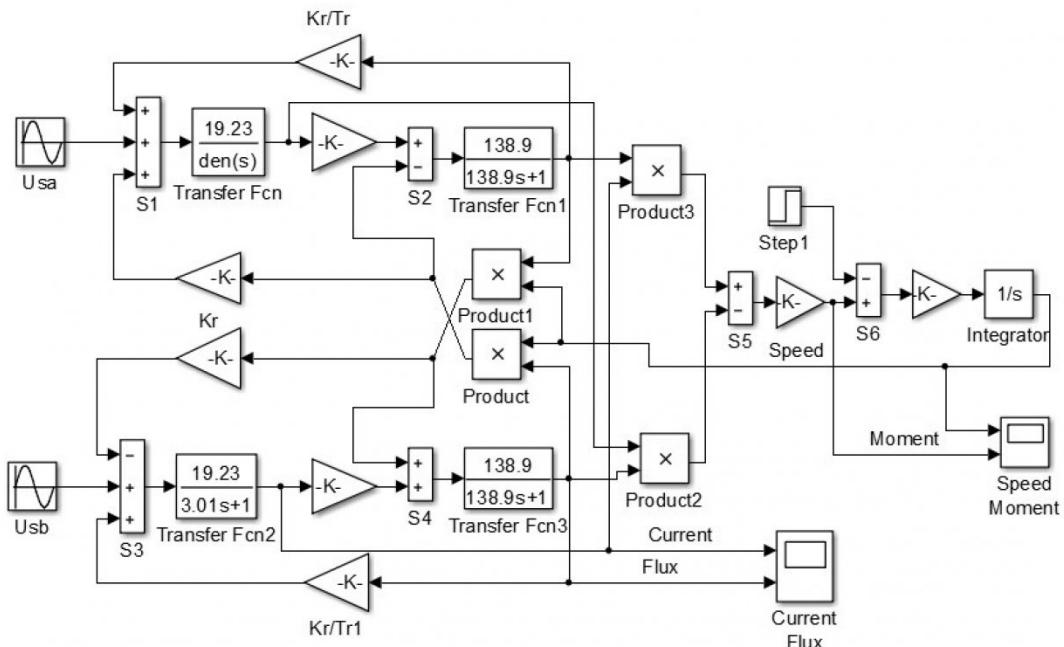


Рис. 2. Структурная схема асинхронного двигателя в неподвижной системе координат  
Fig. 2. Block diagram of the induction motor in a fixed coordinate system

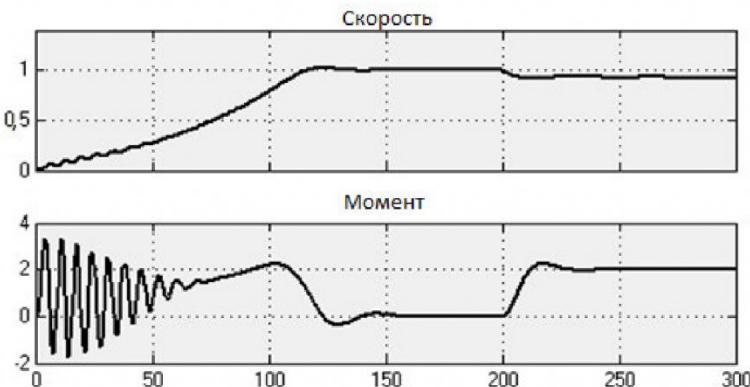


Рис. 3. Графики угловой скорости и момента асинхронного двигателя согласно схеме рис. 2  
Fig. 3. The graphs of the angular velocity and torque of the induction motor according to the diagram in Fig. 2

$$\begin{aligned}
 u_{sa} &= r(1 + Ts \cdot s)i_{sa} - \frac{kr}{T_r}\Psi_{ra} + kr \cdot s\omega\Psi_{rb}; \\
 u_{sb} &= r(1 + Ts \cdot s)i_{sb} - \frac{kr}{T_r}\Psi_{rb} + kr \cdot s\omega\Psi_{ra}; \\
 0 &= -k_r r_r \cdot i_{sa} + \frac{1}{T_r} \cdot (1 + Tr \cdot s)\Psi_{ra} - s\omega\Psi_{rb}; \\
 0 &= -k_r r_r \cdot i_{sb} + \frac{1}{T_r} \cdot (1 + Tr \cdot s)\Psi_{rb} - s\omega\Psi_{ra}; \\
 J \cdot s \cdot \omega &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{2}$$

В таком случае мы можем получить переходные процессы момента и скорости (рис. 3).

Основными преимуществами визуального моделирования является возможность получения результата без знания методов Эйлера и Рунге-Кutta для решения дифференциальных уравнений

и простота интеграции объекта в сложную систему без существенного увеличения времени расчета.

#### Описание научно-технических систем с позиций теории автоматического управления

Достаточно обобщенным методом изучения научно-технических систем с точки зрения моделирования являются методы теории автоматического управления (ТАУ). Они позволяют описывать динамические системы с помощью моделей в непрерывном и дискретном времени. Для этого необходимо построить функциональную схему системы или объекта, составленную по функциональному назначению элемента через типовые звенья ТАУ, то есть реализовать модель-алгоритм, воспроизводящий процесс функционирования системы во времени.

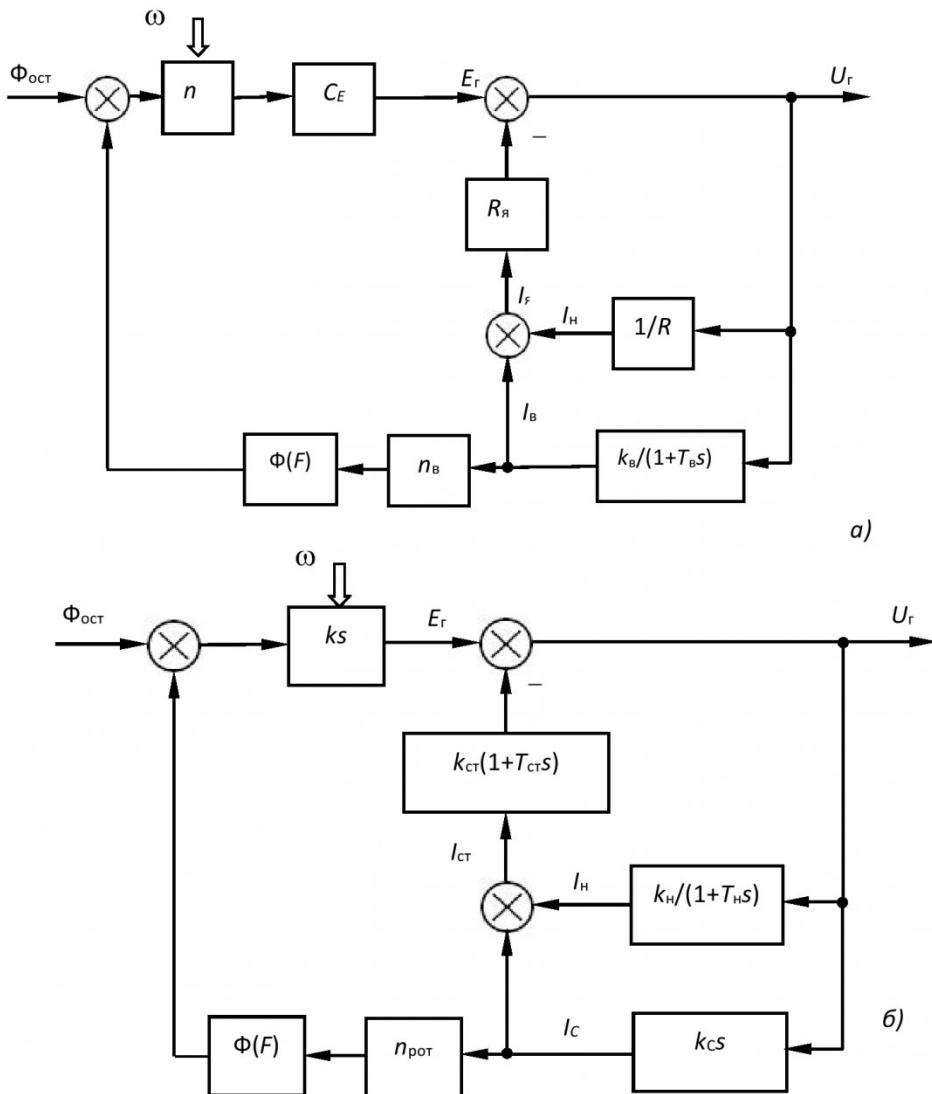


Рис. 4 Структурные схемы АГ (а) и ГПТ (б) с позиции ТАУ

Fig. 4. Block diagram of the asynchronous generator (a) and the constant current generator (b) with the position TAU

При этом процесс преобразования имитируются элементарными явлениями, составляющими логической структуры и последовательно протекающие во времени. Это дает возможность получить сведения о состоянии процесса в конкретный момент времени и оценить характеристики системы. Реализация данного метода требует серьезного понимания происходящих физико-математических процессов, знания преобразований физических величин в работе объекта или системы. Стоит отметить, что для моделирования сложных систем необходимо использование системного подхода, дифференцируя сложную систему на гораздо более простые узлы. В качестве примера рассмотрим создание модели асинхронного генератора (АГ) с позиции теории автоматического управления. Как известно, схема класси-

ческого АГ включает батарею конденсаторов выступающую источником реактивной энергии. Асинхронный генератор, как электромеханическая система состоит из электрического и магнитного контуров.

Наличие остаточного магнитного потока  $\Phi_{\text{ост}}$  приводит при вращении ротора к возникновению ЭДС  $E_r$  на выходе генератора, что по принципу генерирования электроэнергии в машинах переменного тока обуславливается выражением (3):

$$E_r = k \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Благодаря контуру положительной обратной связи с батареей конденсаторов, представленной звеном  $k_C s$ , возникает ток возбуждения, который создает магнитодвижущую силу  $F$  и соответству-

ящий магнитный поток (см. рис. 4). Амплитуда потока и ЭДС ограничиваются за счет нелинейности характеристики намагничивания. Процесс самовозбуждения характеризуется балансом фаз и амплитуд. Условия баланса амплитуд в таком случае характеризуется коэффициентом петлевого усиления больше единицы. Однако, для выполнения баланса амплитуд в статорной цепи переменного тока необходимо получить емкостную составляющую тока  $I_C$ , чему способствует блок дифференцирования, которая в цепи ротора «поддержит» развитие магнитного потока. Таким образом, получаем структурную схему АГ с позиции ТАУ.

Представленные схемы позволяют получить известные в теории электрических машин условия самовозбуждения, однако, с позиций теории автоматического управления [6-8].

Приведенная на рис. 4 схема генератора постоянного тока (ГПТ) аналогична схеме АГ не только из-за использования одного метода, но и за счет общности электромеханических процессов. Таким образом, построенные структурные схемы объектов схожей природы будут достаточно сильно коррелировать между собой, что упрощает их анализ.

### Выводы

Каждый из представленных методов анализа электромеханических систем имеет свои преимущества и недостатки. Так, метод представления в

виде структурной схемы с позиции ТАУ, является наиболее простым со стороны представления модели и позволяет максимально обобщенно описать работу системы, с минимальным числом учитываемых факторов. Визуальное моделирование является промежуточным звеном, требующее достаточно полного описания модели и позволяющее учитывать большое число факторов, не углубляясь при этом в способы решения систем дифференциальных уравнений. Классический метод описания с помощью систем дифференциальных уравнений позволяет учитывать сколь угодно большое число факторов, интегрировать объекты в сложные системы без особых трудностей проектирован, требуя, однако, при этом достаточных вычислительных и временных ресурсов при решении в специализированных программах.

При всем различии указанных методов, все они связаны между собой. Так, используя прямое и обратное преобразование Лапласа, можно совершить переход от визуального моделирования к методу ТАУ и обратно, а метод визуального моделирования вытекает из математического описания объекта. Независимо от используемого подхода от исследователя требуется понимание физики электромеханических процессов в электромеханической системе. Вопрос комплексного изучения электромеханических систем требует осознанного выбора способа исследования объекта, а окончательный выбор влияет на распределение ресурсов и выбор среды моделирования.[9]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин./ Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
2. Пятибратов Г.Я. Моделирование электромеханических систем: учеб. Пособие / Г.Я. Пятибратов, Д.В. Барыльник. – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013.-103 с.
3. Хейгеман Л. Прикладные итерационные методы./ Л. Хейгеман, Д. Янг – М.:Мир, 1986. – 438с.
4. Morteza Soleimania. Design for Reliability of Complex System with Limited Failure Data; Case Study of a Horizontal Drilling Equipment/Morteza Soleimania, Mohammad Pourgol-Mohammad - Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12, Honolulu, Hawaii, June 2014 – Режим доступа: [http://psam12.org/proceedings/paper/paper\\_410\\_1.pdf](http://psam12.org/proceedings/paper/paper_410_1.pdf). [06.12.2015]
5. Дворецкий С.И. Основы математического моделирования и оптимизации процессов и систем очистки и регенерации воздуха: учеб. пособие/ С.И. Дворецкий, С.В. Матвеева, С.Б. Путин, Е.Н. Туголуков. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2008. - 324 с.
6. Лукутин Б.В. Автономное электроснабжение от микрогидростанций: монография // Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.Б. Шандарова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 134 с.
7. Alexander G. Garganeev Principles of Electric Power Generation Based on the Self-Excited Electrical Machines Using the Perspectives of the Automatic Control Theory [Text] / Alexander G.Garganeev, Dmitry A. Padalko // Proceedings of the 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2013, Erlagol (Altai), Russia, July 1-5, 2013. – Novosibirsk: NSTU Printing Office, 2013. – Р. 319–321.
8. Бертинов А.И. Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока./ А.И. Бертинов, Г.А. Ризник – Оборонгиз: Государственное издание оборонной промышленности, 1958. – 423 с.
9. Падалко Д.А./ Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодёжного форума, 28 сентября - 2 октября 2015 г., г. Томск в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2015. — Т. 2.—252-255 с.

## REFERENCES

1. Sipajlo GA Mathematical modeling of electrical machines. / GA Sipajlo, AV Loos – M.: Higher School, 1980. - 176 p.
2. Pyatibratov GY Modelling of electromechanical systems: Proc. Manual // GY Pyatibratov, D.V.Barylnik. - Novocherkassk: YURGPU, 2013.-103 with.
3. Heygeman L. Applied Iterative Methods. / L. Heygeman, D. Young - M.: Mir, 1986. - 438s.
4. Morteza Soleimania. Design for Reliability of Complex System with Limited Failure Data; Case Study of a Horizontal Drilling Equipment / Morteza Soleimania, Mohammad Pourgol-Mohammad - Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12, Honolulu, Hawaii, June 2014 - Access:  
[http://psam12.org/proceedings/paper/paper\\_410\\_1.pdf](http://psam12.org/proceedings/paper/paper_410_1.pdf). [06/12/2015]
5. Butler SI Fundamentals of mathematical modeling and optimization of processes and systems, air purification and regeneration: studies. Benefit / SI Butler, S. Matveyev SB Putin EN Tugolukov. - Tambov Univ Thumb. Gos. Tech. University Press, 2008. - 324 p.
6. Lukutin BV Autonomous power supply from the mikrogidrostantsy: // monograph BV Lukutin, SG Obukhov, EB Shandarova. - Tomsk: Publishing house TPU, 2001. - 134 c.
7. Alexander G. Garganeev Principles of Electric Power Generation Based on the Self-Excited Electrical Machines Using the Perspectives of the Automatic Control Theory [Text] / Alexander G.Garganeev, Dmitry A. Padalko // Proceedings of the 14th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2013, Erlagol (Altai), Russia, July 1-5, 2013. - Novosibirsk: NSTU Printing Office, 2013. - P. 319-321.
8. AI Bertinov Aircraft Design dc electrical machines. / AI Bertini GA Riznik - Oborongiz: State defense industry publication, 1958. - 423 p.
9. Padalko DA // Smart grids: Proceedings of the III International Youth Forum, 28 September - 2 October 2015 in Tomsk 3 v. / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU). - 2015. - T. 2. -252-255 p.

Поступило в редакцию 15.02.2016  
Received 15 February 2016