

Корохова Елена Вячеславна – Южный федеральный университет; e-mail: alen_ko@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 10, ауд. 505; тел.: 88632696991; кафедра системного анализа и управления; к.т.н.; доцент.

Шабаршина Ирина Сергеевна – e-mail: kaf_sau@mail.ru; кафедра системного анализа и управления; к.ф.-м.н.; доцент.

Петракова Анастасия Вадимовна – студентка.

Санина Алена Сергеевна – студентка.

Korohova Elena Viacheslavna – Southern Federal University; e-mail: alen_ko@mail.ru; 10, Milchakova street room 505, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +78632696991; the department of systems analysis and management; cand. of eng. sc.; associate professor.

Shabarshina Irina Sergeevna – e-mail: kaf_sau@mail.ru; the department of systems analysis and management; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Petrakova Anastasia Vadimovna – student.

Sanina Alena Sergeevna – student.

УДК 621.314.1

В.В. Корохов, Е.В. Корохова, А.А. Дьяченко, А.П. Постникова
АНАЛИЗ И ВЫБОР ВАРИАНТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Повышение эффективности проведения опытно-конструкторских работ требует применения современных методов моделирования на начальных этапах работы. В статье рассмотрены два варианта преобразователя постоянного тока – составной частью химического источника тока, предназначенного для электропитания аппаратуры космических аппаратов, которая характеризуется высокой мощностью энергопотребления. Традиционное выполнение разработки преобразователя тока в два этапа – эскизное и рабочее проектирование – требует значительных временных, финансовых и материальных ресурсов, при этом нет гарантии достижения положительных результатов испытаний разработанного устройства. Поэтому в работе предложен способ решения задачи выбора конструкции преобразователя постоянного тока с помощью имитационного моделирования. Такой подход позволяет значительно сократить этап эскизного проектирования или вовсе исключить его. Имитационное моделирование с применением современного пакета Multisim позволяет, используя встроенные базы стандартных электронных компонентов, а также путем задания параметров нестандартных узлов, разрабатывать электрические принципиальные схемы преобразователей и осуществлять анализ их работы без изготовления электродействующих макетов и определения их характеристик и свойств с помощью контрольно-проверочной аппаратуры. Данный программный пакет обеспечивает реализацию и проверку правильности работы предлагаемых алгоритмов функционирования узлов преобразователя. Для облегчения анализа результаты наглядно представлены в виде графиков изменения электрических параметров разрабатываемого устройства во времени. Таким образом, имитационное моделирование значительно уменьшает количество ошибок при проектировании, позволяет легко подготовить несколько вариантов конструкции преобразователя снизить затраты на макетирование и изготовление опытных образцов устройства, максимально сократить объем конструкторской документации и расчетов на начальном этапе разработки. Полученные с помощью имитационного моделирования технические характеристики преобразователя, помогут принять решение о продолжении разработки варианта устройства, наиболее полно отвечающего предъявляемым требованиям.

Имитационное моделирование; преобразователь постоянного тока; принятие решения.

V.V. Korohov, E.V. Korohova, A.A. Dyachenko, A.P. Postnikova

ANALYSIS AND CASE SELECTION OF THE SYSTEM TO CONTROL THE CONVECTOR OF THE CHEMICAL CURRENT SOURCE USING SIMULATIONS

Improving the efficiency of the development work requires application of modern modeling methods at the initial stages of the project. Two options of the direct current convector, that is a composite part of the chemical current source, designed to supply equipment of the spacecrafts, which characterize high power consumption, are considered in the article. The traditional implementation of the transformer design is carried out into two stages - schematic and detailed designs – and requires significant time, financial and material resources, which may not guarantee the achievement of positive test results of the developed device. Consequently, in the following paper a method of solving the problem of choosing the design of DC-DC Converter using simulation technique is presented. Such approach allows obtaining the significant time reduction at the stage of the conceptual design or even eliminating it. Simulation, based of the modern package, namely Multisim, enables to develop basic circuit diagrams of converters and to analyze their work without producing of electrically active models and identifying their characteristics and properties using control and test equipment. This package uses built-in databases of standard electronic components and operates by selecting the parameters for non-standard units. The presented software package provides realisation and verifies accuracy of the proposed algorithms of the convector units functioning. To facilitate the analysis, the results are presented as graphs of the electrical parameter responses of the device in time. Thus, simulation may significantly diminish the number of errors in the design, simplify the design of the few options for the transducer structure, decrease the cost of modeling and production of the device prototypes, minimize the volume of the design documentations and calculations at the initial stage of the development. Technical specifications of the convector, obtained by simulation, will help to make decisions about the developments of the device structure that better fits the requirements.

Simulation; a DC-DC converter; decision making.

Традиционно для электропитания большинства аппаратуры космических аппаратов (КА) используется комплекс, состоящий из солнечной батареи и аккумулятора. Это возможно при условии наличия возобновляемого источника энергии (наличие солнечного излучения) и небольшого потребления электроэнергии аппаратурой КА. Для энергоснабжения подобных потребителей могут служить первичные химические источники тока постоянной готовности [1, 2].

Однако существует и такой класс аппаратуры КА, который характеризуется коротким по времени, но мощным энергопотреблением, когда нет времени на заряд аккумулятора, или источник энергии (солнечная батарея) вовсе отсутствует. Примером такого потребителя могут являться электродвигатели рулевых машин посадочного аппарата [3, 4]. Режим работы электродвигателей происходит короткое время, но сопровождается огромными импульсами пускового тока при включении двигателя или его реверсе. Работа химических источников характеризуется наличием провалов напряжения при подключении или резком изменении нагрузки из-за наличия значительного внутреннего сопротивления, явлений поляризации электродов и индуктивности рулонных химических источников тока. Это может привести к отключению аппаратуры при напряжении питания ниже допустимых пределов [1]. Таким образом, актуальной является задача создания источника тока, который бы при минимальных массогабаритных характеристиках обеспечивал надежное электропитание специфических потребителей.

Одним из способов обеспечения требуемого уровня напряжения даже при значительных по величине импульсах тока потребления является увеличение емкости химического источника тока. Такой подход приводит к его удорожанию, и это более важно, к значительному росту массы, что увеличивает массу КА, соответственно, снижая массу полезного груза.

Другим способом обеспечения требуемых параметров энергопотребления является разработка химического источника тока, оборудованного устройством, позволяющим вырабатывать и накапливать энергию в достаточном для выполнения задачи количестве.

Так как токопотребление электродвигателя при его многократном включении представляет собой очередность импульсов пускового тока [5] амплитудой до 210 А и тока потребления величиной около 18 А во время вращения двигателя, а также в периоды остановки двигателя, то источник тока должен включать в себя устройство, которое способно выдавать требуемую мощность при поддержании напряжения в заданных пределах от 27 до 33 В. Такой режим работы источника тока может обеспечить устройство, состоящей из DC/DC-преобразователя и конденсатора.

В [3, 6, 7, 8] предложено использовать выходное устройство источника тока, построенное на основе обратноходового преобразователя, общая схема которого представлена на рис. 1.

Конденсатор здесь выполняет роль накопителя электроэнергии, работа которого благодаря небольшому внутреннему сопротивлению, отсутствию поляризационных явлений и индуктивных явлений характеризуется отсутствием провалов напряжения при резком увеличении нагрузки. Однако, чтобы запастись достаточное количество энергии, размеры и масса конденсатора также могут быть неприемлемыми.

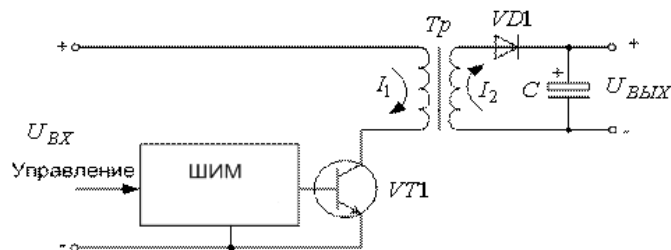


Рис. 1. Общая схема обратноходового преобразователя

DC/DC-преобразователь служит для пополнения потраченной во время пускового импульса энергии после пуска двигателя или в отсутствии тока при его отключении.

Одной из задач разработки источника тока для требуемых условий эксплуатации является построение системы управления DC/DC-преобразователем. Она может быть реализована несколькими способами, при этом принцип работы будет практически одинаковым, отличаться будут только функциональные возможности. Рассмотрим два варианта реализации системы управления DC/DC преобразователем. Первый - на базе микросхемы, второй - на основе микроконтроллера.

Наиболее простые обратноходовые преобразователи напряжения могут быть собраны с использованием микросхем серии TDA4605 [9, 10, 11]. Микросхема проста в использовании, обладает малым количеством выводов, и имеет отечественные аналоги. Основные функциональные узлы этой микросхемы [12] показаны на рис. 2.

Схема детектора понижения напряжения имеет управляющий вывод 3 (Input for Primary Voltage Monitoring). При подаче на этот вывод напряжения более 1 В разрешается работа узлов микросхемы. Максимальное значение напряжения на этом выводе не должно превышать (6...7) В. Возможность отключения источника питания замыканием этого вывода на общий провод схемы используется для дистанционного управления включением-выключением устройства.

Схема стабилизации напряжения состоит из усилителя сигнала ошибки и перегрузки, стопового компаратора и логической схемы. Сигнал обратной связи, информирующий схему об уровне напряжения на нагрузке, подается на вывод 1 (Information Input Concerning Secondary Voltage). Схема стабилизации вырабатывает импульсы с регулируемой скважностью, которые усиливаются по току выходным каскадом с ограничителем тока и подаются на выход микросхемы через вывод 5 (Output). Ток через этот вывод ограничен значением 1,5 А, напряжение – величиной, составляющей не более 70 % от напряжения питания микросхемы.

Схема формирования пилообразного напряжения состоит из внешней частото задающей RC-цепи, подключаемой к выводу 2 (Information Input Redarding the Primary Current), стартового генератора импульсов, блока опорных напряжений, детектора нуля сигнала.

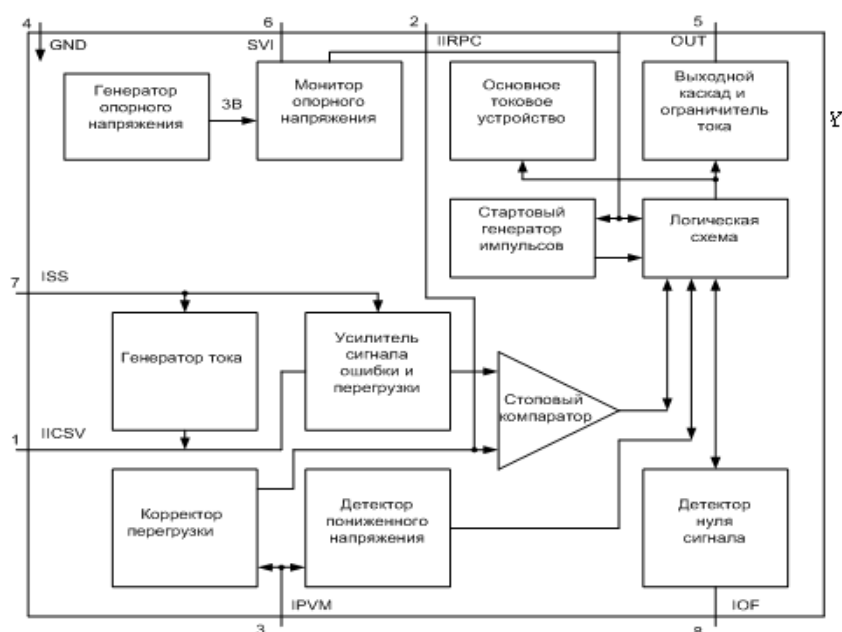


Рис. 2. Функциональные узлы микросхемы TDA4605

Схема питания и защиты от короткого замыкания вторичной обмотки также реализована в составе микросхемы. Режим короткого замыкания (КЗ) не опасен для силового транзистора обратного преобразователя, поскольку фазы накачки энергии и передачи ее в нагрузку разнесены во времени. Однако энергия в режиме короткого замыкания будет рассеиваться на малом сопротивлении вторичной обмотки и выпрямительном диоде, что приведет к их разогреву. Чтобы исключить режим КЗ, в состав микросхемы был введен блок защиты от короткого замыкания. Рассмотрим принцип работы блока.

Питание микросхемы осуществляется через вывод 6 (Supply Voltage Input), и если напряжение на этом выводе падает ниже 7,25 В, микросхема переходит в режим импульсного включения с периодом, равным приблизительно 1 с. Длительность этого периода зависит от номиналов элементов (конденсатора и резистора), подключенных к названному выводу. Поскольку микросхема питается от дополнительной обмотки трансформатора, короткое замыкание силовой обмотки мгновенно отражается на напряжении, питающей микросхему. Максимально допустимое значение напряжения питания микросхемы составляет 16,5 В.

Используя DC-DC-преобразователь на базе микроконтроллера [3, 13, 14], можно получить высокий коэффициент полезного действия и большую частоту преобразования. Большая частота преобразования не только положительно скажется на стоимости внешних пассивных компонентов, таких как катушки индуктивности и конденсаторы, что снизит общую стоимость решения, но и с ростом частоты преобразования позволит сократить площадь, занимаемую электронными компонентами на плате.

Тем не менее, может быть выгоднее использовать контроллер с внешним ключом. Это могут быть недорогие приложения, где требуется управление мощностью выдаваемого питания. Постоянная борьба за повышение коэффициента полезного действия DC/DC-преобразователей и более полное использование заряда батарей питания вызывает необходимость поиска новых схемных решений для реализации устройств электроснабжения специальных устройств. Структурная схема DC-DC конвертера с микропроцессорным управлением [3, 13, 14], представлена на рис. 3.

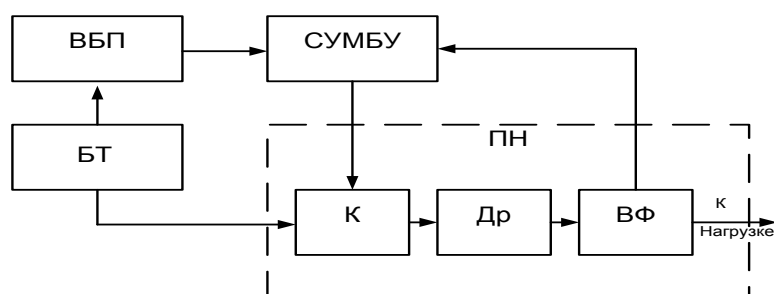


Рис. 3. Структурная схема DC/DC преобразователя с микропроцессорной системой управления

Основой силовой части устройства служит преобразователь постоянного напряжения в регулируемое постоянное напряжение, который построен по принципу ШИМ – инвертора. Вторичный блок питания (ВБП) предназначен для питания схем управления. Система управления МБУ (СУМБУ) служит для управления силовыми ключами, на основе ШИМ – контроллера, а также для контроля и регулирования выходного тока. Преобразователь напряжения (ПН) – одноконтурный обратного хода. Силовые ключи (К) – предназначены для коммутации первичной цепи. Дроссель (Др) – служит для преобразования напряжения. Выходной фильтр (ВФ) – подавляет коммутационные шумы и обеспечивает накопление необходимой энергии.

Микроконтроллер должен решать следующие основные задачи [3, 13]:

- ◆ считывание значения тока;
- ◆ диагностика;
- ◆ регулирование по отклонению;
- ◆ вывод на индикацию: перегрузка, перегрев, нет нагрузки, поломка;

Для управления устройством необходимо инициализировать порты микроконтроллера и широтно-импульсный модулятор. Нужно учитывать, что в процессе работы окружающие условия могут изменяться (нагрев элементов, колебания входного напряжения), поэтому необходима организация обратной связи. Для чего необходимо определять выходное напряжение и ток. Результат измерения сохраняется для вычисления отклонения текущего напряжения от заданного.

Для построения программного обеспечения системы управления разработан алгоритм работы системы управления [15, 16], который представлен на рис. 4.

Оценку выбранных решений, результатов расчетов параметров электрических компонентов и схем, правильность работы алгоритма устройства можно провести еще на стадии эскизного проектирования с помощью имитационного моделирования [17].

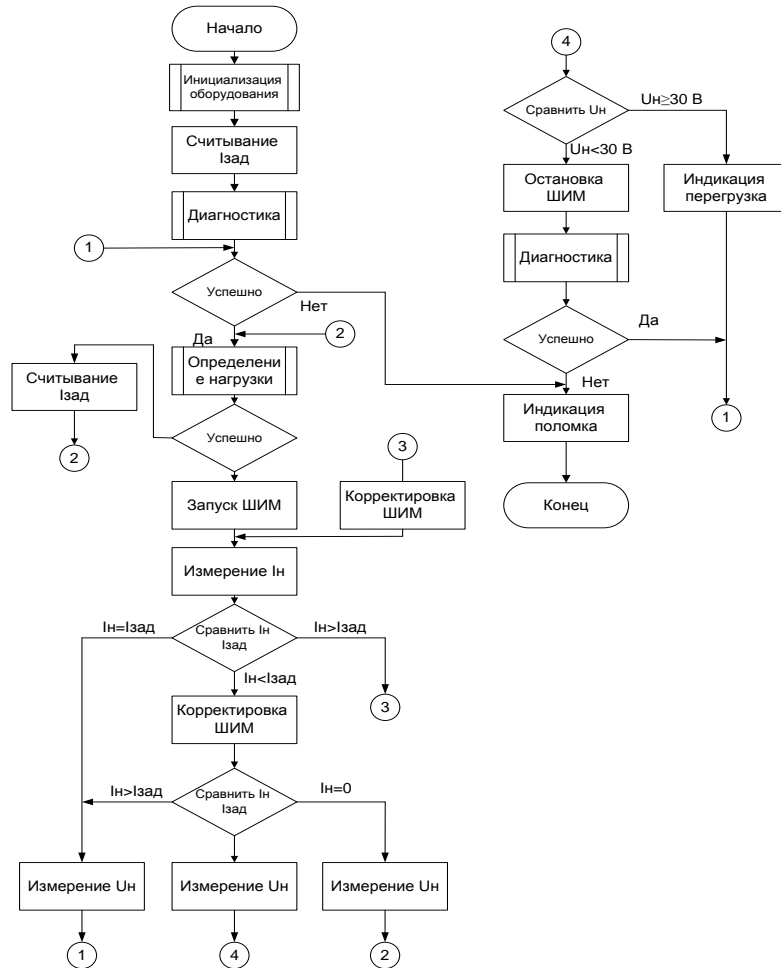


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы СУ

Разработка имитационной модели системы позволяет лучше понять реальную систему, использовать модель для анализа переходных процессов: определить длительность периода, рассчитать настройки и регулировки, рассмотреть режимы практической эксплуатации реальной системы, модель можно использовать в качестве средства обучения персонала работе с реальной системой.

На рис. 5, 6 изображены соответственно осциллограммы работы DC/DC преобразователя с системой управления на базе микросхемы TDA4605 и с системой управления на базе микроконтроллера PIC16C620A [18].

Анализ результатов имитационного моделирования [19–25] показал, что качество электроэнергии химического источника тока с DC-DC преобразователем на базе микроконтроллера существенно выше чем у предыдущего варианта, а именно: провал напряжения составляет всего 1 В.

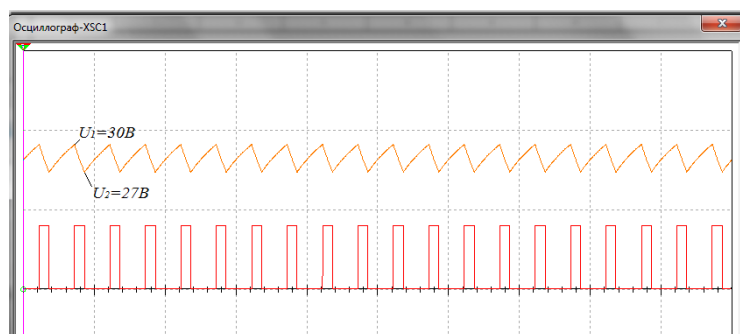


Рис. 5. Форма сигнала напряжения и тока при работе DC/DC преобразователя с системой управления на базе микросхемы TDA4605, U_1 и U_2 – пределы колебаний выходного напряжения

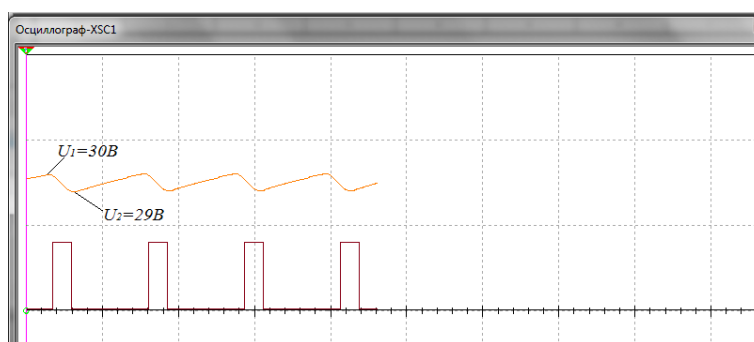


Рис. 8. Форма сигнала напряжения и тока при работе DC/DC преобразователя с системой управления на базе микроконтроллера PIC16C620A

Особенность системы управления DC/DC преобразователем на базе микроконтроллера, позволяющей получить высокое качество энергии, заключается в том, что процесс выработки управляющего сигнала начинается гораздо раньше, чем в системе управления на микросхеме с жесткой логикой.

Однако решение о применении того или иного варианта системы управления DC/DC преобразователем должно приниматься на основе заданных требований. Следует принимать во внимание не только получаемые характеристики DC/DC преобразователя, но и материальную и финансовую обеспеченность производства, а также показатели надежности предлагаемых вариантов.

Таким образом, использование имитационного моделирования позволяет на стадии эскизного проектирования предложить несколько вариантов решения поставленной задачи – разработки DC/DC преобразователя, оценить его электрические характеристики и сформулировать предложения по применению лучшего варианта в составе химического источника тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плеваков М.С. и др. Батареи и системы электроснабжения межорбитального космического буксира «Фрегат» // Космонавтика и ракетостроение. Вестник НПО им. С.А. Лавоочкина. – 2014. – № 1. – С. 84-88.
2. Bagotsky V.S. Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors. – N.-Y.: Wiley, 2015. – 400 p.

3. *Золотухина М.В.* Моделирование и разработка системы управления DC/DC преобразователя химического источника тока: 220700: защ. в 2013 г. Маг. дисс. [Эл. ресурс]. – Режим дост.: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/914.pdf> – Загл. с экрана. Дата обращения 15.03.2015.
4. *Жаркова В.В.* Исследования аэродинамических характеристик возвращаемого аппарата на посадочном режиме и воздействия струй на грунт [Электронный ресурс]. – http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_energia.pdf – статья в интернете.
5. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
6. *Корохов В.В., Корохова Е.В., Секунова О.Н.* Система управления преобразователем напряжения химического источника тока // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 190-197.
7. *Лачин В.И., Савелов Н.С.* Электроника: учебное пособие. – 6-е издание, переработанное и дополненное. – Новочеркасск: Феникс, 2007. – 704 с.
8. *Рама Редди С.* Основы силовой электроники. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
9. *Розанов Ю.К.* Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
10. *Окснер Э.С.* Мощные полевые транзисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1985. – 288 с.
11. *Kazimierczuk Marian K.* Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters. – N.-Y.: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 808 p.
12. Сервисная документация, схемные решения, программы, радиокомпоненты, электроника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ddrservice.info/f0z/Integrated-circuits/T/tda/4/tda4605.pdf>, свободный (дата обращения: 15.03.2015).
13. *Костров Б.В., Ручкин В.Н.* Микропроцессорные системы и микроконтроллеры. – М.: ТехБук, 2007. – 320 с.
14. *Калабеков Б.А.* Цифровые устройства и микропроцессорные системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 336 с.
15. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
16. *Пылькин А.Н. и др.* Информатика и программирование: Алгоритмизация и программирование: Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования. – М.: Academia-2012. – 336 с.
17. *Петухов О.А. и др.* Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2008. – 288 с.
18. Microchip Technology Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010137> свободный. (Дата обращения: 28.02.2015).
19. *Shaffer R.* Fundamentals of Power Electronics with MATLAB. – Boston, MA: Charles River Media, 2007. – 400 p.
20. *Лазарев Ю.Ф.* Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие. – Киев: НТУУ "КПИ", 2003. – 424 с.
21. *Аверилл М. Лоу., Кельтон В. Дэвид.* Имитационное моделирование. – Изд-во: Питер, Издат. группа BHV, 2004. – 848 с.
22. *Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазия Л.В.* Моделирование элементов электромеханических систем. – М.: Энергия, 1966.
23. *Дэбни Дж.Б., Харман Т.Л.* Секреты мастерства. Simulink 3: Пер. с англ. М.Л. Симонова. – М.: БИНОМ, 2003. – 403 с.
24. *Лоу А.М., Кельтон В.Д.* Имитационное моделирование. – СПб.: Питер; Киев: BHV, 2004. – 847 с.
25. *Sheldon M. Ross.* Simulatoin. – Academic Press. – 3d ed., 2002.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Корохов Владимир Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: kaf_sau@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10, ауд. 505; тел.: 88632696991; кафедра системного анализа и управления; к.т.н.; доцент.

Корохова Елена Вячеславна – e-mail: alen_ko@mail.ru; кафедра системного анализа и управления; к.т.н.; доцент.

Дьяченко Анастасия Вадимовна – e-mail: kaf_sau@mail.ru; студентка.

Постникова Анастасия Павловна – студентка.

Korohov Vladimir Vasil'evich – Southern Federal University; e-mail: kaf_sau@mail.ru; 10, Milchakova street, room 505, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +78632696991; the department of systems analysis and management; cand. of eng. sc.; associate professor.

Korohova Elena Viacheslavna – e-mail: alen_ko@mail.ru; the department of systems analysis and management; cand. of eng. sc.; associate professor.

Dyachenko Anastasia Vadimovna – e-mail: kaf_sau@mail.ru; student.

Postnikova Anastasia Pavlovna – student.