

ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ

УДК 004.94: 621.311

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. М. Сажнёв, профессор кафедры «Радиотехнические устройства» СибГУТИ, к.т.н.; epus201@sibsutis.ru

Л. Г. Роголина, профессор кафедры «Радиотехнические устройства» СибГУТИ, д.т.н.; epus206@sibsutis.ru

Решается задача оптимизации топологии системы бесперебойного электропитания постоянного тока с использованием трехмерного имитационного моделирования в среде MATLAB. Приведены результаты исследования системы электропитания в режиме короткого замыкания со стороны нагрузки. Выбрано основное оборудование системы, комплектующие электрической сети и автоматы защиты с учетом переходных режимов. Получена трехмерная модель с размещением оборудования системы электропитания в производственных помещениях при расположении аккумуляторов на стеллажах.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, система электропитания, сети постоянного тока, трехмерное моделирование.

Введение. В настоящее время в системах бесперебойного электропитания используют герметичные аккумуляторы (ГА). Их срок службы во многом определяется температурой окружающей среды — самым значительным фактором из всех внешних воздействий. На процессы старения ГА наибольшее влияние оказывает повышенная температура, которая ускоряет все химические реакции (в 2–4 раза на каждые 10 °C) и, в конечном итоге, приводит к выходу аккумулятора из строя. На рис. 1 изображено изменение срока службы в зависимости от температуры окружающей среды. Превышение температуры на 10 °C сокращает срок службы почти в два раза [1].

На срок службы ГА существенное воздействие оказывает и режим эксплуатации: время, режим и глубина разряда, режим заряда, длительность паузы между зарядом и разрядом при непрерывной цикличности, периоды эксплуатации и хранения. Выпрямительные устройства, используемые для заряда ГА, должны предусматривать температурную компенсацию напряжения «плавающего заряда». Изменение его уровня напряжения обеспечивается кусочно-линейной аппроксимацией кривой (рис. 2) с несколькими ступенями (2–5). Понижение на-

пряжения «плавающего заряда» как и понижение температуры ведут к саморазряду и уменьшению фактической емкости ГА.

Использование зарядных устройств с температурной компенсацией — самый предпочтительный вариант, продлевающий срок службы батареи. Однако зарядный выпрямитель

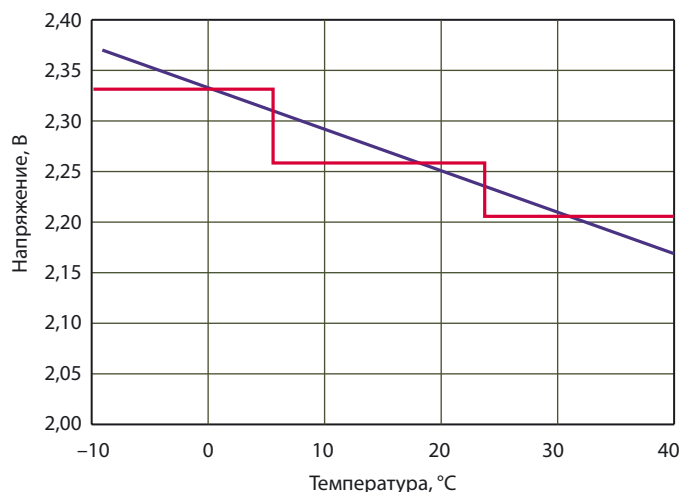


Рис. 2. Зависимость напряжения «плавающего заряда» от температуры

является дорогостоящим оборудованием, поэтому экономичнее поддерживать температуру 20 °C в производственных помещениях с ГА, что требует расчета и выбора системы вентиляции. Согласно [2], ГА могут устанавливаться в общем взрыво- и пожаробезопасном помещении, поскольку аккумуляторы с внутренней рекомбинацией газа или снабженные пробками рекомбинации не относятся к категории взрывоопасных и не требуют применения приточно-вытяжной вентиляции.

Помещения для аккумуляторных батарей (АБ) должны быть такими, чтобы естественной вентиляции было достаточно, а скорость притока воздуха в вентиляционных отверстиях составляла не менее 0,1 м/с. При этом, если свободный объем воздуха помещения АБ более чем в 2,5 раза превышает количество (объем) свежего воздуха для циркуляции $Q = 0,05nI$, м³/час, где n — количество элементов АБ, а I — зарядный ток, то места притока и оттока могут находиться на одной стороне помещения. Это необходимо учитывать при проектировании электрической сети постоянного тока. Возникает задача оценки массогабаритных размеров оборудования с целью экономии производственных помещений при сохранении показателей качества питающих напряжений.

Кроме того, импульсное напряжение после снятия короткого замыкания (КЗ) в цепи нагрузки не должно превышать 40% от номинального выходного напряжения, а допустимые потери напряжения в электрической сети, включая потери в устройствах защиты и коммутации, не должны быть больше 4% от номинального значения выходного напряжения [2, 3].

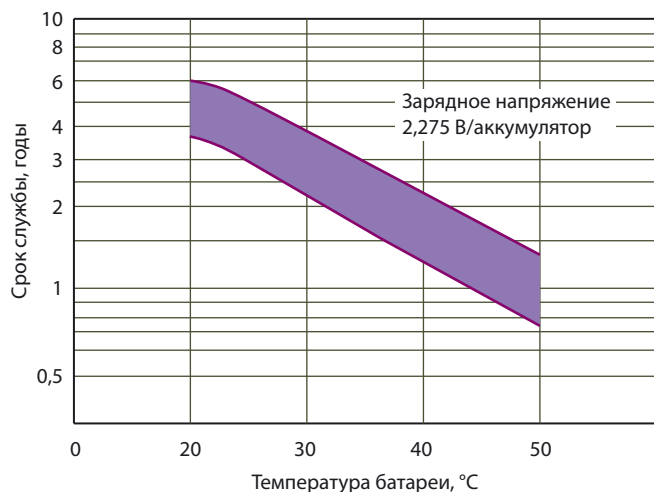


Рис. 1. Зависимость срока службы ГА от температуры при работе в буферном режиме

На уровень перенапряжений оказывают влияние и распределенные индуктивности электрической сети. Традиционная методика расчета параметров электрической сети постоянного тока ограничивает значения тока и индуктивности в режиме КЗ, которые не должны превышать, соответственно, 1000 А и 10^{-4} Гн [2, 4]. Имитационное трехмерное моделирование режима КЗ на этапах проектирования позволит выбрать типовое оборудование и изделия для монтажа электрической сети при минимизации площадей производственных помещений, уровня кондуктивных помех и уменьшить временные затраты на проектирование.

Постановка задачи. Объектом синтеза электрической сети постоянного тока служат проводящие элементы (кабели, шины), соединяющие между собой отобранные элементы системы бесперебойного электропитания, количество и типы распределительных устройств, батарейные шкафы, контейнеры, стеллажи для размещения ГА, соединительные, межрядные и межэтажные перемычки, а также системы вентиляции при недостаточности естественной циркуляции воздуха. Чаще всего это происходит при удаленном размещении ГА.

Выбор структуры построения электрической сети определяется архитектурой системы бесперебойного электропитания и базируется на точных расчетах. В настоящее время широко используются три структурные схемы электрической сети постоянного тока — радиальная, магистральная и смешанная [4]. Для размещения радиальной схемы необходимо большое пространство, несколько групп ГА без систем вентиляции. Такие схемы не обладают гибкостью при реконструкции и требуют больших капитальных затрат при монтаже. Магистральные схемы применяются при нагрузках, равномерно распределенных по площадям производственных помещений. Для размещения ГА необходимо отдельное производственное помещение с приточно-вытяжной системой вентиляции. Смешанные схемы электрических сетей сочетают элементы как радиальных, так и магистральных схем.

Последовательно соединенные ГА располагаются в батарейных шкафах, контейнерах или на стеллажах. При использовании многоэтажных стеллажей с многорядным расположением ГА возникает необходимость в правильном подборе соединительных, межрядных и межэтажных перемычек. Для выполнения чертежа стеллажа и схемы расположения на нем ГА необходимо сделать много расчетов. При удаленном размещении элементов батареи увеличивается длина кабеля, приводящая к возрастанию уровня перенапряжения в режиме КЗ, что, в свою очередь, требует правильного выбора автоматов защиты и оборудования для обеспечения вентиляции. Все это говорит о многовариантности решения рассматриваемой задачи синтеза.

В статье предлагается автоматизированное трехмерное проектирование электрической сети постоянного тока с применением имитационного моделирования.

Алгоритм автоматизированного проектирования электрической сети постоянного тока. В настоящее время используются различные инструментальные средства для создания трехмерных объектов (3DMax, AutoCad, SolidWorks и т.д.). Практическое применение таких пакетов для автоматизации процесса проектирования не всегда удобно из-за проблем, связанных с импортированием готовых графических объектов в разрабатываемые программные средства в виду их несовместимости.

Наиболее приемлемы для разработки графических приложений инструментальные средства пакета прикладных про-

грамм Virtual Reality Toolbox среды MATLAB-Simulink. Кроме того, MATLAB-Simulink дает возможность моделировать переходные процессы при различных воздействиях в электротехнических системах, к которым относятся системы бесперебойного электропитания. Существующие пакеты программ, входящие в состав MATLAB, позволяют создавать имитационные и интерактивные трехмерные модели для проведения многогранного анализа характеристик и пространственного размещения оборудования [5, 6].

Ниже рассматривается сценарно-управляемая технология проектирования посредством пакета MATLAB. Для реализации такого подхода к проектированию разработан программный блок, написанный на языке Си. Он задает маршрут и отвечает за подключение функциональных элементов при проведении анализа, что существенно сокращает временные затраты на создание общей схемы (рис. 3).

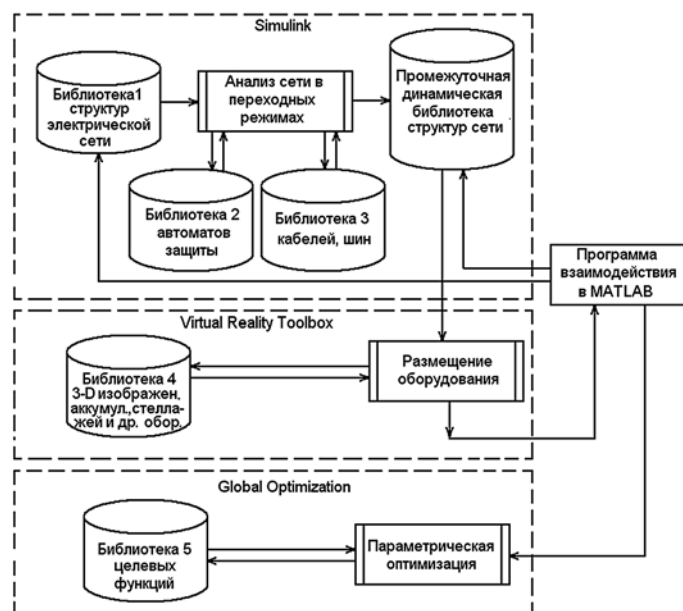


Рис. 3. Схема взаимодействия модулей при выполнении анализа

Для выполнения анализа в динамических режимах работы электрической сети постоянного тока разработаны имитационные модели в среде Simulink (рис. 4), где в параметры моделей вводятся индуктивные и омические сопротивления потерь, отобранных по току и напряжению, кабелей и шин из Библиотеки 3. Сопротивления потерь корректируются путем передачи данных через промежуточную библиотеку в среду Virtual Reality Toolbox. По результатам расчета переходных процессов для отобранных вариантов осуществляется автоматический выбор автоматов защиты в точках подключения нагрузок из Библиотеки 2.

Для пространственного размещения оборудования системы бесперебойного электропитания (рис. 5) используется Библиотека 4, в которой представлены чертежи 3-D моделей различных типов аккумуляторов, выпрямительных устройств, стеллажей и другого промышленного типового оборудования. После выбора отдельных блоков в соответствии с техническими характеристиками осуществляется выбор стеллажей и размещения оборудования по геометрическим размерам. В результате формируется виртуальная модель в Virtual Reality Toolbox среды MATLAB-Simulink (рис. 5) и таблица с основными данными.

Перед началом процесса проектирования сценарий, управляющий тестовой схемой, настраивает рабочую сре-

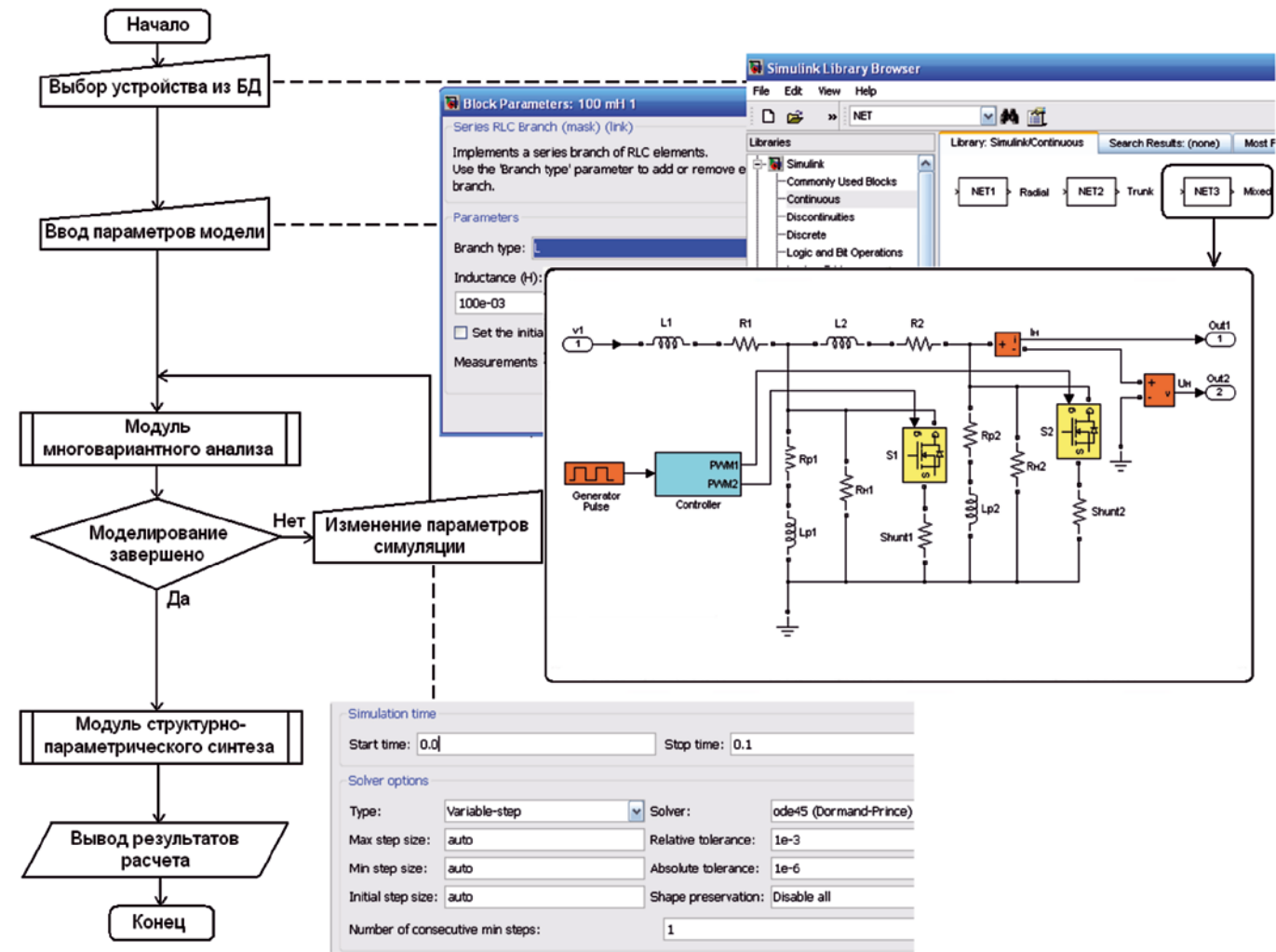


Рис. 4. Расчет переходных режимов по моделям электрической сети из Библиотеки 3

ду, подключая необходимую библиотеку, и задает начальные значения параметров. Исходными данными для расчета являются: параметры первичных источников электрической энергии, пространственные координаты размещения первичных источников энергии, пространственные координаты размещения коммутационных устройств и всех потребителей электроэнергии, геометрическая конфигурация монтажного пространства и допустимые области размещения оборудования. Вариации количества коммутационных устройств и их пространственного размещения, а также точки присоединения потребителей и прокладки проводов определяют соответственно многовариантность решения рассматриваемой задачи.

Однозначность решения может быть достигнута только путем оптимизационной постановки задачи синтеза. В качестве критериев оптимальности выбираются: минимальные потери, уровень перенапряжения в динамических режимах, расход кабеля и площадь, выделяемая под оборудование. Тогда целевая функция будет представлять сумму составляющих отдельных участков сети. Соединительные провода (силовые кабели, шинопроводы и т.п.) характеризуются многими факторами, например, маркой провода, длиной и сечением, количеством проводов в электросоединениях, количеством резервных линий питания и т.д. Однако из множества характеристик, с точки зрения топологии сети, наиболее важной является длина линий.

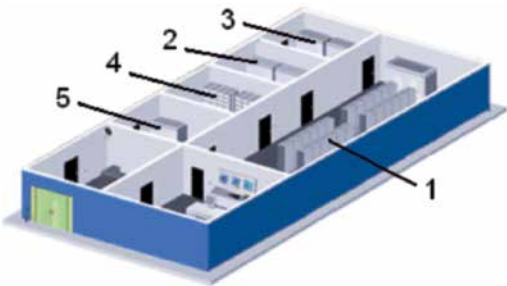


Рис. 5. Пространственное размещение оборудования

Спецификация оборудования

Позиция	Наименование	Тип	Кол-во, шт
1	Аккумуляторная батарея	POWER Safer, 2V1770	24
2, 3	Выпрямительные устройства	Eltek, Flatpack2 Cabinetized, 10U	4
4	Аккумуляторная батарея	POWER Safer, 6V105	16
5	Автономный инвертор	Eltek, MBI	1

При подключении Библиотеки 3 кабелей и шин выполняется минимизация целевой функции (1)

$$F_{\text{ПР}}^i\{L, S, C, G, \Delta U, l\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где L — индуктивность кабеля (шины); S — площадь поперечного сечения; C — стоимость изделия; G — вес изделия; ΔU — падение напряжения; l — длина кабеля (шины). Параметры целевой функции (1) зависят от типа кабеля (шины), определяемого структурой электрической сети и типом аккумуляторов.

При подключении Библиотеки 4 3-D изображений аккумуляторов, стеллажей и другого оборудования выполняется минимизация целевой функции (2)

$$F_{\text{ОБ}}^j\{V, C, G\} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где V — объем оборудования; C — стоимость; G — вес оборудования.

Поиск локальных экстремумов целевой функции F_s при заданных ограничениях производится в соответствии с выражением:

$$F_s = \min \left[\left(\min \sum_{k=1}^p F_{\text{ОБ}}^k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{\text{ПР}}^i \right) \right], \quad (3)$$

где n — число распределительных устройств; m — количество типов кабелей (шин) участков, присоединенных к n -му распределительному устройству; p — число блоков оборудования системы электропитания; $F_{\text{ПР}}^k, F_{\text{ОБ}}^k$ — составляющие целевой функции (3); s — количество структур электрической сети. Процесс выбора искомых решений является двухэтапным. Для определения F по уравнению (3) с учетом граничных условий сначала выбирается множество узловых точек, а затем производится выбор длин соединений между ними.

При оптимизации отобранных структур электрической сети из Библиотеки 1 выполняется минимизация целевой функции (4), т.е. осуществляется поиск глобального экстремума посредством обращения к Библиотеке 5

$$F_s\{I_{\text{пот}}, \eta^{-1}, \lambda, T_{\text{сл}}^{-1}\} \rightarrow \min, \quad (4)$$

включающей критерии оценки качества преобразования электрической энергии (потребляемый ток $I_{\text{пот}}$, коэффициент полезного действия η) и надежности (интенсивность отказов λ , срок службы $T_{\text{сл}}$).

Разработанный алгоритм позволяет всесторонне исследовать различные структуры электрической сети и пространственное размещение оборудования систем электропитания. При этом процесс оптимизации занимает относительно небольшое время, что существенно сокращает общие временные затраты на проектирование.

Пример проектирования электрической сети. Для подтверждения эффективности предложенного метода было выполнено автоматизированное проектирование электрической сети для буферной системы электропитания со следующими исходными данными: первичный источник — однофазная сеть с напряжением 220 В, частотой 50 Гц; суммарная мощность потребления — 2 кВА; время автономной работы — 10 ч; напряжение питания в цепи постоянного тока — 48 В. Производственные помещения: для аккумуляторов площадью 12 м² (4×3 м), высота помещения $h=3,5$ м; для преобразователей площадью 36 м² (9×4 м), высота помещения $h=3,5$ м; для коммутационного оборудования 8,25 м² (2,5×3,3 м), высота помещения $h=3,5$ м; для потребителей (две комнаты) общей площадью 41,08 м² (первая комната 6,5×3,8 м, вторая — 3,9×4,2 м), высота помещения $h=3,5$ м. Расстояние от преобразовательной до распределительных устройств — 40 м, от потребителей

до распределительных устройств — 49 м и до аккумуляторного помещения — 60 м.

Согласно [2], должны выполняться требования к геометрической конфигурации монтажного пространства и допустимой области размещения оборудования: при установке аккумуляторов проход между рядами должен быть не менее 0,8 м; преобразователи должны быть удалены от стен на расстояние не менее 1,5 м.

В результате проведения структурно-параметрической оптимизации отобранных вариантов электрической сети в переходных режимах установившееся отклонение напряжения от номинального составляет +6,2/-5,4 В; глубина пониженного напряжения (провала) — менее 11%; импульсное перенапряжение — менее 32%. Интенсивность отказа системы электропитания составляет $7,4 \cdot 10^{-6}$. Электрическая сеть построена по радиально-магистральной схеме с автоматами защиты серии DPX, время срабатывания которых не превышает 1,8 с.

Закключение. На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что трехмерное моделирование позволяет не только оптимально разместить оборудование в производственных помещениях, но и оптимизировать эффективность воздушных потоков и тем самым максимально повысить охлаждающую способность. Разработанный алгоритм позволяет обеспечить минимальные расстояния для удаленности оборудования от стен, а также необходимую ширину проходов.

Анализ физических процессов, проведенный имитационным моделированием в режиме КЗ со стороны нагрузки, дает возможность не только изучить динамику в любой точке электрической сети, но и повысить точность выбора автоматов защиты. Это позволит избежать неоправданного удлинения соединительных линий и сэкономить дорогостоящие материалы при построении сети. Предложенное в работе имитационное моделирование соответствует современной методологии автоматизированного проектирования электротехнических устройств и оптимизации на этапах проектирования, что повышает их надежность и помехоустойчивость систем электропитания в целом.

Таким образом, автоматизация процесса проектирования системы электропитания путем оптимизации позволяет достичь наилучших показателей надежности, а также снизить временные затраты на проведение трудоемких расчетов по их оценке. Использование базовых моделей в разработке помогает учесть не только статические, но и динамические параметры в нестационарных режимах с учетом 3-D изображений, обеспечит надежное функционирование системы электропитания при эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы. Справочник. — СПб.: Химиздат, 2005. — 264 с.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — М.: ЗАО Энергосервис, 2002. — 608 с.
3. ГОСТ 45.183–2001. Установки электропитания аппаратуры электросвязи стационарные. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2000. — 23 с.
4. Сажнев А. М., Рогулина Л. Г. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Сборник примеров и задач: Учебное пособие. — Новосибирск: ФГОБУ ВПО СибГУТИ, 2012. — 266 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. — СПб.: Корона принт, 2001. — 320 с.
6. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: специальный справочник. — СПб.: Питер, 2001. — 448 с.

Получено 29.04.14