

На правах рукописи

Фролкова Наталья Олеговна



**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ  
НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2011

Работа выполнена в филиале ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (Технический университет)» г. Смоленска.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Абраменкова Ирина Владимировна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Воронков Эдуард Николаевич

доктор технических наук, профессор  
Мурашёв Виктор Николаевич

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет  
МИЭТ

Защита диссертации состоится «26» апреля 2011 г. в аудитории К-102 в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.157.06 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

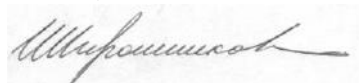
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

С текстом автореферата можно ознакомиться на официальном сайте Московского энергетического института

Автореферат разослан «25» марта 2011 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу 111250 Москва ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет МЭИ

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.157.06,  
д.т.н., профессор



Мирошникова И.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Преобразование солнечной энергии в электричество является наиболее перспективным и активно развиваемым направлением возобновляемой энергетики. Солнечная энергия широко доступна, обладает практически безграничными ресурсами, при ее фотоэлектрическом преобразовании не происходит загрязнения окружающей среды. Для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую используется явление фотоэффекта в солнечных элементах (СЭ) на основе структуры с *p-n* переходом. На сегодняшний день максимальная эффективность некоторых типов полупроводниковых СЭ составляет более 30 %.

Единичные фотоэлементы генерируют ограниченную мощность. Для получения требуемых энергетических характеристик элементы объединяют последовательно между собой в модули и последовательно-параллельным способом в батареи. Мощность модулей и батарей складывается из выходных мощностей отдельных СЭ. В зависимости от технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей, существуют различные виды солнечных батарей. Наиболее широко распространены кристаллические фотоэлектрические преобразователи, изготовленные из моно- или мультикристаллического кремния, а также тонкопленочные солнечные элементы на основе аморфного кремния, теллурида кадмия, арсенида галлия, фосфида индия и некоторых других соединений. На сегодняшний день доля кристаллических солнечных элементов составляет около 93 %, а тонкопленочных – около 7 %. Ведутся разработки по применению концентраторных и электрохимических солнечных элементов.

Первое практическое использование кремниевых солнечных батарей (СБ) для энергетических целей имело место в околоземном космическом пространстве. Солнечные батареи и сегодня остаются основным источником электроэнергии для космических аппаратов, поскольку необычные эксплуатационные условия (невесомость, глубокий вакуум, контрастные изменения температуры) не позволяют широко использовать в условиях космоса известные на Земле традиционные методы получения электричества. Работа в космосе предъявляет к СЭ очень жесткие и подчас противоречивые требования. Сокращение сроков разработки и улучшение эксплуатационных характеристик систем электроснабжения космических аппаратов выдвигает на первый план необходимость создания эффективных методов проектирования подобных систем, в частности, предсказания и анализа работы солнечных батарей под действием разнообразных факторов окружающего пространства в статическом и динамическом режимах нагрузки.

Темпы роста и планы развития наземной солнечной энергетики, намечаемые промышленно развитыми странами, впечатляют масштабностью. К 2031 г. в мире планируется иметь совокупную установленную мощность электрогенераторов на солнечной энергии 1700 ГВт (для сравнения: в 2004 г. – 1256 МВт). Если сегодня фотовольтаика занимает менее 1 % в общемировом балансе произведенной электроэнергии, то к 2040 г. эта доля должна возрасти до 30 %. В России наземная солнечная энергетика на текущий момент является активно развивающейся отраслью. Имеются проекты по созданию фотоэлектрических солнечных электростанций, развиваются технологии производства СЭ и СБ.

Широкое внедрение солнечной энергетики в космосе и на земле ставит перед проектировщиками проблему оценки эффективности работы фотоэлектрических систем (ФЭС). Необходимо иметь возможность предсказать мощность солнечных батарей под действием разнообразных факторов окружающей среды, сравнить эффективность использования СБ из различных материалов, оценить поведение фотоэлектрических преобразователей в различных режимах работы. Для эффективного использования фотоэлектрических генераторов необходимо знать точку максимальной мощности и обеспечить такой режим, чтобы отдаваемая мощность при изменении окружающих условий была наибольшей. При отработке ФЭС используют имитаторы солнечных батарей, позволяющие воспроизводить характеристики СБ под влиянием разнообразных внешних воздействий.

Предсказание поведения и воспроизведение характеристик СЭ и СБ осуществляется с помощью моделирования. По сравнению с экспериментом, математическое моделирование предоставляет более быстрый, гибкий и дешевый способ отработки ФЭС. Для воспроизведения характеристик СЭ и СБ чаще всего используются аналитические модели, которые строятся на базе эквивалентной электрической схемы и основного уравнения СЭ. Работы по моделированию характеристик СБ активно ведутся за рубежом, результаты исследований рассматриваются на регулярно проводимых конференциях по фотовольтаике. Вследствие перспективности внедрения солнечной энергетики вопрос моделирования СБ интересует и российских исследователей.

Известные аналитические модели позволяют воспроизводить изменение выходных характеристик СЭ и СБ под действием различных температур и уровней освещенности, но не учитывают других значимых факторов. Не принимаются во внимание неидеальность СЭ, конструктивные особенности батарей, необходимость воспроизведения характеристик СБ из различных материалов. Вместе с тем, для использования предлагаемых моделей требуется проведение дополнительных экспериментов, позволяющих определить их входные параметры.

**Целью** диссертационного исследования явилось создание модели солнечных батарей для фотоэлектрических систем и имитаторов СБ на базе доступных данных производителей с учетом комплексных воздействий, приводящих к изменению выходных характеристик батарей. Для построения модели необходимо было решить ряд **задач**:

1. Разработать алгоритм моделирования солнечных батарей из различных полупроводниковых материалов.

2. Обеспечить воспроизведение моделью характеристик СБ под действием различных уровней освещенности, учитывая спектральные характеристики СЭ и воздействие света различного спектрального состава. Предусмотреть в модели возможность затенения солнечной батареи и оценить влияние потерь солнечного излучения на энергетические характеристики СБ.

3. Предусмотреть возможность моделирования вольтамперной (ВАХ) и вольтваттной (ВВХ) характеристик солнечных батарей в допустимом диапазоне рабочих температур.

4. Обеспечить воспроизведение в модели изменений ВАХ и ВВХ СБ под влиянием ионизирующего излучения и учет разброса технологических параметров и старения СЭ.

5. Предусмотреть в модели возможность оценки емкости СБ для воспроизведения динамических режимов в нагрузке батарей.

#### **Объекты и методы исследований**

Объектом исследований явились солнечные элементы и батареи из различных полупроводниковых материалов. Методологическую основу диссертационной работы составляют общенаучные методы познания, такие как научная абстракция, анализ и синтез, системный и структурный подходы, а также математическое моделирование. В исследовании применялись методы математического анализа, предметно-логического и структурно-функционального анализа, методы визуального программирования. В ходе работы использованы пакеты программ моделирования DesignLab и Matlab Simulink.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработана оригинальная математическая модель солнечных батарей, позволяющая наглядно и обозримо провести моделирование набора свойств СБ. В моделировании предложен способ учета разброса технологических параметров СЭ и старения фотоэлементов. Модель обобщает конструктивные потери, а также потери падающего солнечного излучения. При проведении имитирования впервые имеется возможность оценки выходной емкости для анализа динамических режимов нагрузки СБ.

2. Выполнены расчеты и моделирование, позволяющие обеспечить воспроизведение характеристик СБ, собранных из различных комбинаций разнообразных полупроводниковых СЭ. Проведен систематический анализ конструктивных и технологических особенностей изготавливаемых солнечных батарей, результаты которого включены в созданную модель СБ.

3. Впервые показана возможность использования модели солнечных батарей в качестве основы построения интеллектуального имитатора СБ.

Полученные в процессе исследования результаты, разработанный теоретический и методологический аппарат вносят определенный вклад в изучение солнечных батарей, повышая эффективность их использования.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная модель адекватно воспроизводит характеристики СБ из разнообразных полупроводниковых материалов для различных уровней освещенности и различного спектрального состава солнечного излучения, а также влияние потерь солнечного излучения и затенения батарей на ВАХ и ВВХ СБ.

2. Созданная модель обеспечивает соответствие имитируемых выходных характеристик солнечных батарей в допустимом диапазоне рабочих температур, а также под влиянием ионизирующего излучения космического пространства характеристикам реальных СБ.

3. Модель адекватно воспроизводит ВАХ и ВВХ СБ с учетом разброса технологических параметров и старения батарей определенной конфигурации.

4. Созданная модель обеспечивает соответствие рассчитанной выходной емкости СБ реальным значениям.

#### **Практическая значимость**

В диссертационной работе показана полезность и целесообразность моделирования солнечных батарей для повышения эффективности их применения в наземных и космических ФЭС. На основе моделирования выполнено сравнение ВАХ и ВВХ целого ряда солнечных батарей, позволившее дать рекомендации по построению фотоэлектрических систем космического и наземного назначения. Представленные положения позволяют улучшить качественные результаты разработок при создании новых образцов и модернизации существующих ФЭС.

Содержащиеся в работе практические положения полезны при расчете энергетических параметров ФЭС, отработке алгоритмов захвата точки максимальной мощности, выработке конкретных предложений по применению СБ. Моделирование СБ позволяет согласовать динамические режимы работы преобразователей, входящих состав ФЭС. Реализованная модель является теоретической базой и подготовленным математическим инструментом для проведения исследований характеристик СБ и обработки их результатов.

Результаты выполненной работы используются в ООО НПО «Рубикон-Инновация», г. Смоленск, при построении интеллектуального имитатора солнечных батарей. Модель СБ в составе имитатора служит для воспроизведения ВАХ и ВВХ космических солнечных батарей из различных полупроводниковых материалов, оценки эффективности их применения, анализа деградации характеристик СБ с течением времени и определения площади проектируемых СБ для обеспечения требуемой мощности. Возможность моделирования выходной емкости солнечных батарей позволяет при помощи имитатора СБ выполнять исследования динамических режимов работы преобразующих и распределительных устройств системы электроснабжения. Имитатор, использующий универсальную модель солнечных батарей, позволяет проводить в автоматизированном режиме разносторонние испытания систем электропитания и бортовой аппаратуры космических аппаратов в ситуациях, максимально приближенных к реальным условиям.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались автором и обсуждались на 2-й и 6-й межрегиональных НТК студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика»; 12-й и 14-й МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»; X и XI Международных конференциях «Системы компьютерной математики и их приложения» СКМП-2009 и СКМП-2010; VIII-й и IX ВНТК «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ИТЭЭ-2009) и ВНТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ-2010); XIII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы» МКЭЭЭ-2010.

По теме диссертационного исследования получены диплом областного конкурса молодых ученых, приз Всероссийского смотра-конкурса «Эврика 2005», диплом регионального конкурса проектов для участия в IX Всероссийской выставке НТТМ-2009, приз регионального конкурса проектов и программ для участия в НТТМ-2010, диплом X Всероссийской выставки НТТМ-2010.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ (статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ - 1, статей в научных сборниках - 14).

**Личный вклад автора** заключается в участии в постановке целей и задач исследования, разработке алгоритмов моделирования, создании и тестировании модели. Автором предложена система управления интеллектуальным имитатором СБ. Обсуждение и анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Основные выводы по проведенной работе сформулированы автором.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, кратко охарактеризованы научная и практическая значимость результатов работы, их апробация, указаны теоретическая и методологическая основа исследования, приведены сведения о расположении материала по разделам работы.

**Первая глава** посвящена описанию солнечных батарей как объекта моделирования. Дано краткое пояснение работы полупроводниковых СЭ, показана идеализированная аналитическая модель фотоэлемента. Приведены физические характеристики структуры СЭ и электрические параметры, которые необходимо учитывать при создании модели СБ.

Рассмотрены кристаллические и тонкопленочные полупроводниковые материалы, из которых изготавливают СЭ. Приведены и проанализированы факторы, влияющие на эффективность и выходные характеристики солнечных батарей: интенсивность солнечного излучения и его спектральный состав, рабочая температура, ионизирующее излучение космического пространства, конструктивные особенности СБ. Представлены модели, применяемые для имитирования СБ, рассмотрены их достоинства и недостатки.

В **главе 2** показаны общие принципы построения и отладки математической модели солнечных батарей (рисунок 1). В качестве входных параметров исследуемых СЭ и СБ используются значения тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности и температурные коэффициенты, приведенные в информации производителей. Для исследуемых случаев эксплуатации солнечных батарей входными данными модели СБ также являются различные уровни освещенности и спектральный состав падающего излучения, затенение отдельных элементов, коэффициент потерь падающего излучения, характеристики полупроводникового материала СЭ и его паразитные параметры, рабочая температура СБ, потоки радиационного облучения на орбите, коэффициент потерь, учитывающий воздействие деструктивных факторов и старение СЭ, коэффициенты разброса технологических параметров, способ объединения СЭ в батарею. Выходные параметры модели СБ - максимальная мощность, к.п.д., коэффициент заполнения, ВАХ, ВВХ и зависимость выходной емкости СБ от рабочего напряжения.



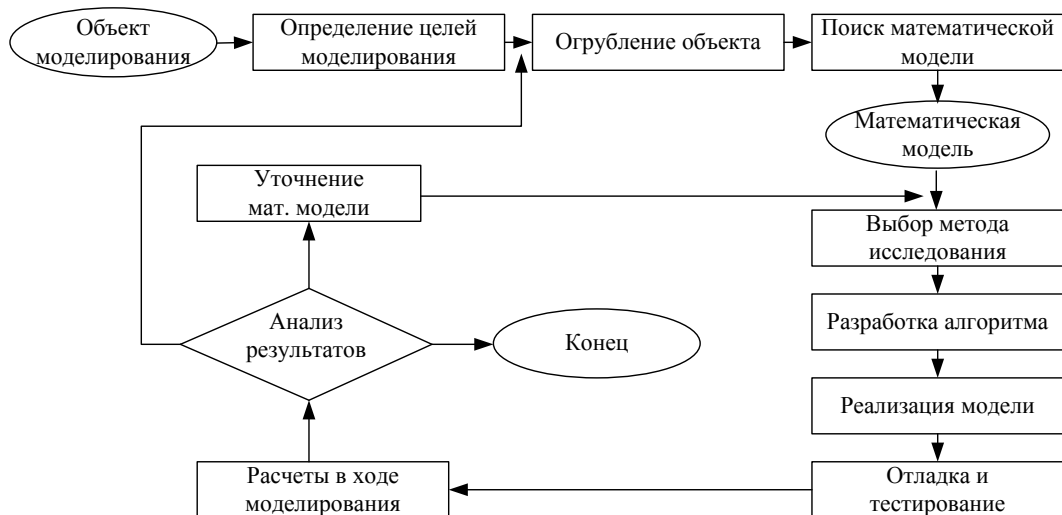


Рисунок 1 – Алгоритм построения модели СБ

Основой построения модели солнечных батарей является модель единичного фотоэлемента. Представлено обобщенное математическое описание СЭ и СБ, которое позволяет разработать алгоритм моделирования СБ и представить модель на одном из языков имитирования.

В главе 3 выполнено моделирование СЭ и СБ на языке PSpice. Задание на моделирование описывается текстовым способом. Обобщенная модель СЭ показана на рисунке 2. Источник тока  $I_{ph}$  представляет собой фототок, зависящий от интенсивности излучения, диод  $VD1$  описывает ток, протекающий через неидеальный (с коэффициентом неидеальности  $n$ )  $p-n$  переход, диод  $VD2$  учитывает рекомбинацию в области объемного заряда СЭ. В модель включены паразитные параметры структуры фотоэлемента - последовательное сопротивление  $R_s$  и параллельное сопротивление  $R_{sh}$ .

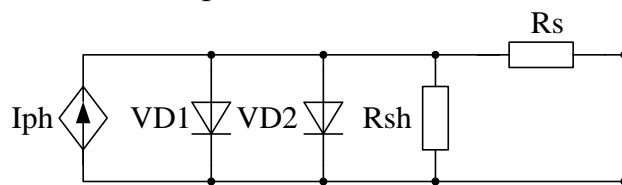


Рисунок 2– Обобщенная схема замещения СЭ

Для имитирования СЭ и СБ используют различные варианты аналитической модели фотоэлемента. Реализованы обобщенная модель СЭ и несколько упрощенных вариантов модели, проведен анализ результатов моделирования. Показано, что для фотоэлектрических применений шунтирующее сопротивление фотоэлементов считаем достаточно большим, а рекомбинацию в области объемного заряда пренебрежимо малой.

Представлено моделирование температурных характеристик СЭ на базе встроенной в PSpice модели диода. Такой способ имитирования температурных эффектов не учитывает изменение фототока при различных температурах.

Проведено моделирование СЭ для различных уровней ионизирующего космического излучения.

Представлена модель СБ и описаны различные случаи затенения батарей. Показана положительная роль шунтирующих диодов в СБ: они предохраняют работу батареи, когда один из элементов полностью затенен, но уменьшают выходное напряжение системы (рисунок 3). Анализ потерь мощности и деградации ВАХ СБ при затенениях является достаточно сложной задачей. Моделирование влияния теней произвольной формы на характеристики СБ дает возможность оценить потери мощности при различных вариантах затенения.

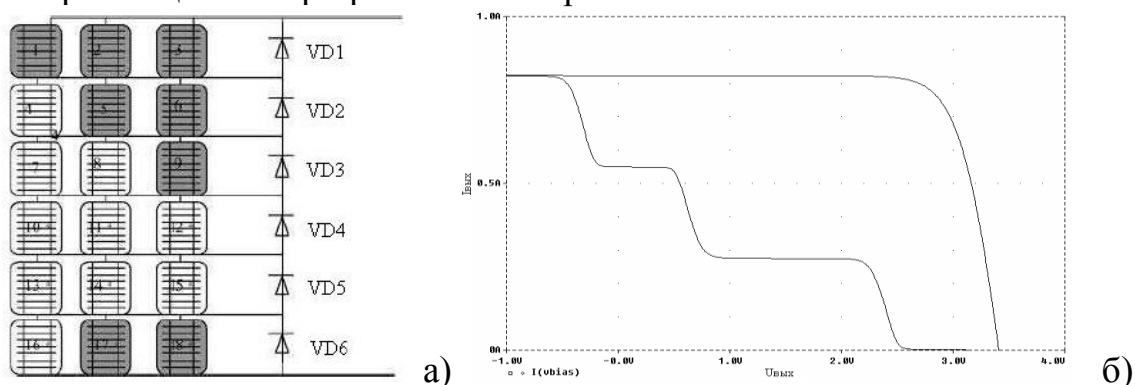


Рисунок 3 – Моделирование затенения СБ:

- а – СБ из 18 СЭ с затененными фотоэлементами и шунтирующими диодами
- б - сравнение ВАХ частично затененной и не затененной батареи

Удобство использования языка PSpice состоит в простоте описания случаев затенения СБ и шунтирующих диодов в конструкции батареи. Недостатки такого имитационного языка – громоздкость, необходимость корректировки исходных файлов для задания различных условий окружающей среды, необходимость сначала библиотечного, а затем схемного описания компонентов. Такой способ моделирования не позволяет легко переходить от единичного СЭ к СБ произвольной конфигурации. Для построения обобщенной модели СБ необходимо использовать другую имитационную среду.

В главе 4 описана модель СЭ и универсальная модель солнечных батарей в среде Matlab Simulink с использованием принципов визуального программирования. Солнечные батареи представляют собой последовательно-параллельную комбинацию СЭ. В основу имитирования солнечных батарей положена модель фотоэлемента, математическое описание которой приведено в диссертации. Даны зависимости фототока СЭ и обратного тока насыщения от температуры и освещенности, для вычисления которых используется информация производителей. В приведенные формулы включены энергия запрещенной зоны полупроводника и диодный коэффициент  $n$ , позволяющие проводить

моделирование СЭ из различных полупроводников. Дано соотношение, позволяющее найти последовательное сопротивление фотоэлемента.

В первом приближении зависимость плотности тока короткого замыкания от спектральной характеристики СЭ определяется с учетом спектрального распределения энергии солнечного излучения по длинам волн и спектральной характеристики фотоэлемента из данного полупроводникового материала. Чем больше точек спектральной характеристики исследуемого СЭ известно, тем выше точность моделирования выходных характеристик фотоэлементов.

**Воздействие ионизирующего излучения** космического пространства приводит к значительной деградации характеристик СЭ. Обычно известны коэффициенты деградации основных параметров СЭ под действием соответствующих флюенсов радиации. Эти данные вводятся в модель СЭ и позволяют построить ВАХ и ВВХ фотоэлемента в заданных условиях.

Полагаем, что солнечная батарея состоит из  $N_s$  последовательно объединенных,  $N_p$  параллельно объединенных фотоэлементов. Ток короткого замыкания батареи  $I_{sc}^M = N_p \cdot I_{sc}$ , напряжение холостого хода СБ  $V_{oc}^M = N_s \cdot V_{oc}$ , последовательное сопротивление  $R_s^M = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s$ .

Вольтамперная характеристик СБ описана формулой (1)

$$I^M = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \cdot \left( e^{\frac{q}{nkT} \left( \frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $I_s$  – обратный ток насыщения;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – рабочая температура;  
 $q$  – заряд электрона.

Для аналитического описания СБ справедливы зависимости фототока и обратного тока насыщения СЭ от температуры и освещенности.

Одним из важнейших параметров солнечных батарей является их **выходная емкость**, позволяющая воспроизводить поведение СБ в динамических условиях. Имеющиеся модели выходной емкости сложны для математического представления, их параметры не определены.

Известно, что выходная емкость СБ представляет собой сумму барьерной и диффузионной емкостей батареи. Барьерная и диффузионная емкости – функции тока, текущего через каждый СЭ. Значение этих емкостей постоянно меняется. Для стандартной конфигурации СБ диффузионная емкость может быть рассчитана согласно приближенной формуле (2).

$$C_d = 11838 \frac{I_{ph} - I / N_p}{T}, \quad (2)$$

Величину барьерной емкости полагаем равной  $C_t = 1,3$  мкФ.

Статические потери из-за **разброса технологических параметров** для кремниевых СБ составляют менее 1 %. Для тонкопленочных элементов такие показатели несколько выше (около 2 %). Вследствие старения потери могут увеличиться до 12 %.

При последовательном объединении СЭ общий ток элементов определяется величиной тока СЭ с худшими параметрами, при этом напряжение модуля представляет сумму напряжений отдельных элементов с присущим им разбросом параметров. При параллельном объединении нескольких модулей присутствует разброс параметров модулей по току. Для описания представленных эффектов предложен исполняемый .m-файл, в котором выполнен расчет СБ произвольной конфигурации при помощи команды формирования массива случайных величин в заданном интервале. Полученные результаты используются для воспроизведения ВАХ СБ. К области технологического разброса параметров относятся также различные значения последовательного сопротивления отдельных фотоэлементов.

Данные по надежности и **деградации характеристик** СБ с течением времени в информации производителей не приводятся. Ухудшение характеристик СБ с течением времени не имеет стихийного характера. Процесс старения проходит в две стадии: в течение первого года эксплуатации СБ подвергаются быстрой деградации характеристик (1-3 %), а далее следует медленное линейное старение (0,5-1 % в год). Для учета старения СЭ определяется время эксплуатации, конфигурация батареи и соответствующий коэффициент деградации.

Для оценки **потерь**, связанных с неравномерностью работы солнечных элементов, или для расчета выходных параметров частично освещенных солнечных батарей вводится коэффициент  $k_2$ . Он учитывает изменение плотности потока излучения, зависит от расстояния до Солнца, потерь в стеклянном покрытии и угла падения излучения. Для большинства кремниевых СЭ, использующихся в плоских космических и наземных батареях, его значение составляет от  $0 \leq k_2 \leq 2$  до  $0,5 \leq k_2 \leq 1,5$ .

**При частичном затенении** одиночного элемента или их группы снижение выходной мощности происходит вследствие уменьшения поступающей в элемент световой энергии и увеличения внутренних потерь энергии в неосвещенной части элемента. Общую активную площадь элемента обозначим  $A_t$ , её освещенную часть  $A_i$ , выходной ток короткого замыкания частично затененного элемента будет равен  $rI_{sc}$ , где  $r=A_i/A_t$ . В общем виде ВАХ СБ, состоящий из  $rN_p$  освещенных элементов и  $(1-r)N_p$  затененных СЭ, описывается формулой (3):

$$I(V) = I_{illum} + I_{dark}. \quad (3)$$

Ток освещенной части СБ определяется формулой (4):

$$I_{illum} = rk_2 N_p I_{ph} - rN_p I_0 (V_0 - \Delta V_1), \Delta V_1 = (1 - k_2) I_{sc} R_s. \quad (4)$$

Темновая составляющая тока, которая не зависит от коэффициента освещенности  $k_2$ , описывается формулой (5):

$$I_{dark} = -(1 - r) N_p I_0 (V_0 - \Delta V_1), \Delta V_1 = (1 - r) I_{sc} R_s. \quad (5)$$

Модели СЭ и СБ оформлены в виде библиотеки компонентов. Каждый из компонентов можно использовать для имитирования сложных фотоэлектрических систем.

В главе 5 проведено сравнение качественных и количественных результатов моделирования с теоретическими и практическими результатами изысканий отечественных и зарубежных исследователей.

Для верификации модели фотоэлемента используются кремниевый СЭ К4702 и СЭ GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge фирмы Spectrolab. Расчетные значения параметров СЭ соответствуют эталонным значениям с погрешностью менее 2%.

Последовательное сопротивление  $R_s$  зависит от технологии изготовления СЭ и сильно влияет на его характеристики (рисунок 4): при уменьшении  $R_s$  уменьшается коэффициент заполнения  $FF$  и максимальная мощность  $P_{max}$ .

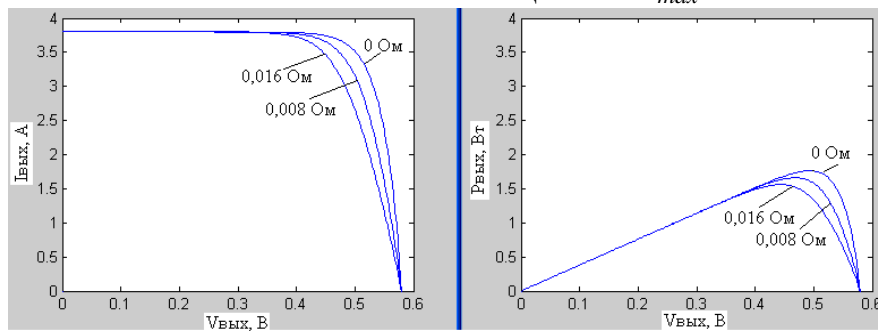


Рисунок 4 –ВАХ и ВВХ СЭ при различных значениях  $R_s$

При увеличении коэффициента  $n$  (рисунок 5), описывающего свойства полупроводникового материала,  $FF$  и  $P_{max}$  уменьшаются. Коэффициент  $n$  представляет собой степень идеальности диода в аналитической модели СЭ и определяется эмпирически, эту величину варьируют для уточнения формы ВАХ и расчетных данных модели. Используя различные значения коэффициента  $n$ , проводится моделирование СЭ из различных полупроводников.

Результаты моделирования влияния освещенности и температурных эффектов совпадают с теоретическими. Ионизирующее излучение (рисунок 6) уменьшает значения тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и максимальной мощности СЭ GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge.

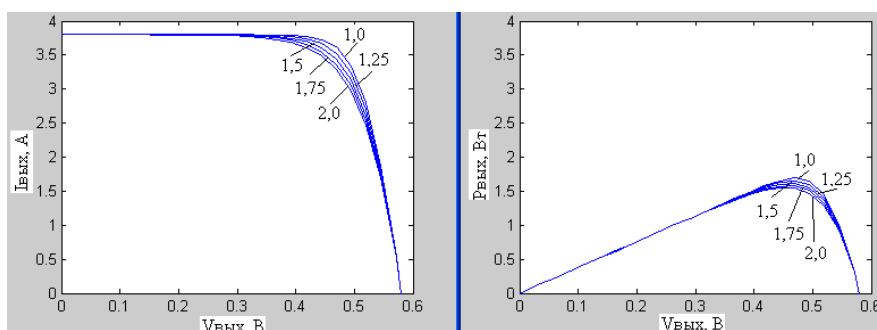


Рисунок 5 – ВАХ и ВВХ СЭ при различных значениях  $n$

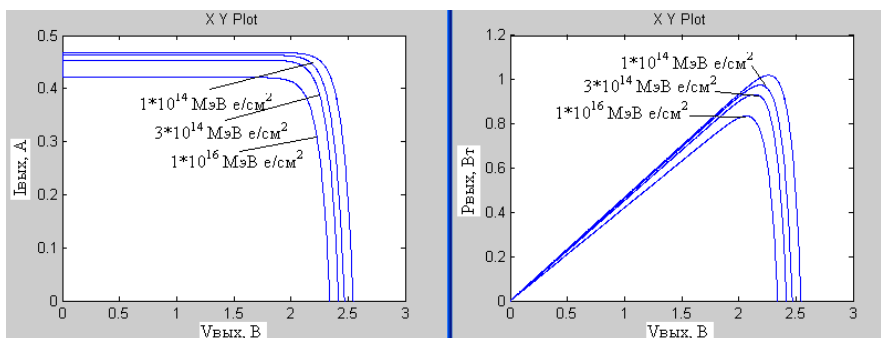


Рисунок 6 – Выходные характеристики GaInP<sub>2</sub>/GaAs/Ge СЭ без облучения и под действием радиационного облучения  $1 \cdot 10^{14}$ ,  $3 \cdot 10^{14}$ ,  $1 \cdot 10^{16}$  МэВ электрон/см<sup>2</sup>

Для верификации модели СБ рассмотрим несколько коммерческих модулей из различных материалов. ВАХ и ВВХ модуля ST40 фирмы Shell Solar, изготовленного на базе CIS-элементов, представлены на рисунке 7. Для вычисления координат точки максимальной мощности и сравнения заданных и полученных в ходе имитирования характеристик предложен .m-файл. Влияние освещенности на выходные характеристики модуля Suntech170W на основе монокристаллических кремниевых СЭ показано на рисунке 8. Результаты моделирования ВАХ и ВВХ модуля HIT215N, изготовленного из монокристаллического кремния с тонкой пленкой аморфного кремния, под действием различных температур представлено на рисунке 9.

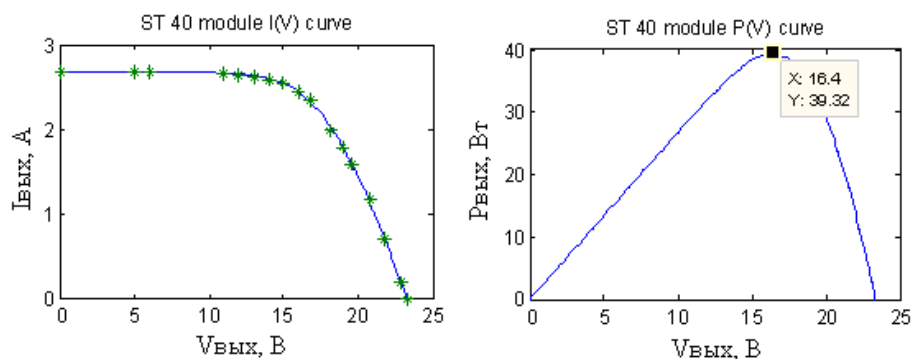


Рисунок 7 – ВАХ и ВВХ модуля ST40

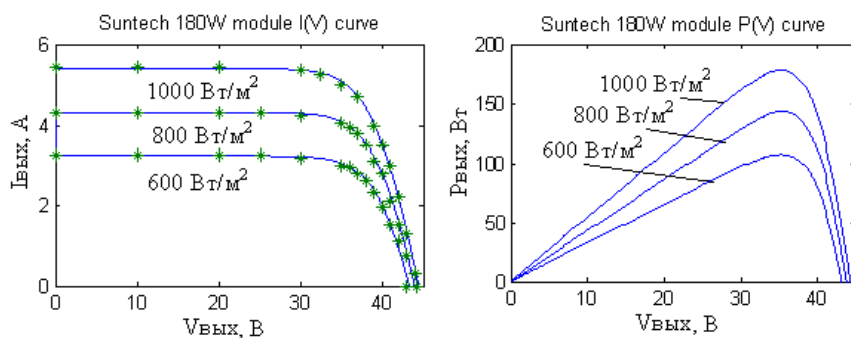


Рисунок 8 – ВАХ и ВВХ модуля Suntech170W под действием различных уровней освещенности

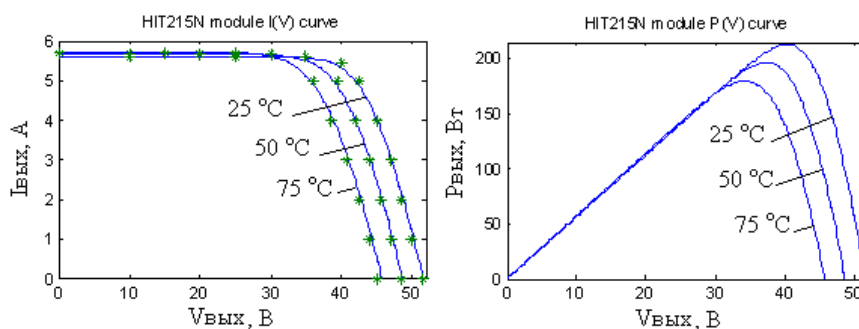


Рисунок 9 – Моделирование влияния различных температур на выходные характеристики модуля HIT215N

Анализ выходных характеристик в стандартных условиях, а также при различных уровнях освещенности и температурах, показал соответствие данных моделирования теоретическим и имеющимся экспериментальным значениям. Погрешность результатов моделирования не превысила 6%. Погрешность расчета последовательного сопротивления была оценена с использованием известных данных для модуля SM 50 фирмы Siemens и составила 6 %.

Моделирование выходной емкости показано на примере модуля MSX50 из поликристаллического кремния (рисунке 10). Порядок величины выходной емкости и форма зависимости  $C(V)$  соответствуют ожидаемым данным.

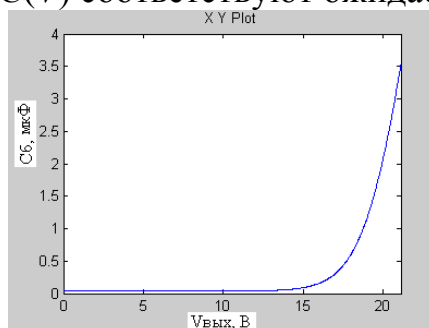


Рисунок 10 – Зависимость  $C(V)$  модуля MSX50

Для имитирования влияния разброса технологических параметров была исследована солнечная батарея конфигурации  $N_s=128, N_p=6$  СЭ K4702 (рисунке 11). Изменение ВАХ и ВВХ наблюдается вследствие того, что СЭ, объединенные в

батареи последовательно-параллельным способом, не работают в собственных точках максимальной мощности. Напряжение при последовательном объединении СЭ представляет сумму напряжений фотоэлементов с разбросом параметров 5%. Аналогичные рассуждения справедливы для токов объединенных параллельно СЭ.

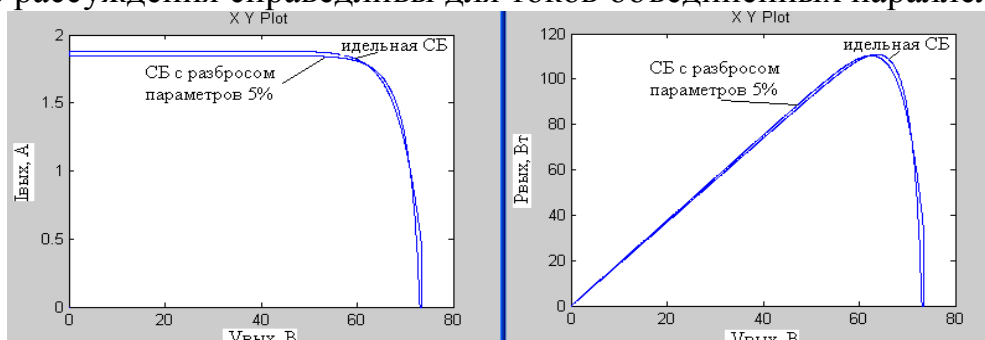


Рисунок 11 - Моделирование СБ с идеальными параметрами и при технологическом разбросе параметров 5%

Деградацию выходных характеристик СБ, состоящей из двух модулей MSX50 через год, 7 лет и 10 лет относительно идеальных ВАХ и ВВХ показаны на рисунке 12. В течение первого года происходит достаточно сильная деградация характеристик, которая с течением времени стабилизируется.

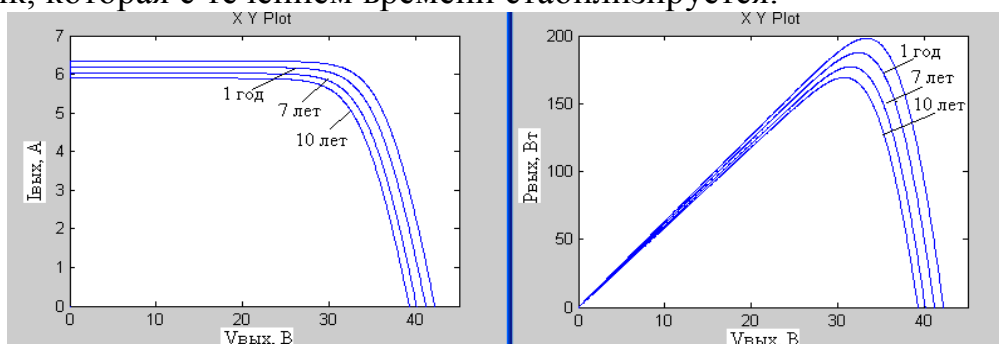


Рисунок 12 – Деградация ВАХ и ВВХ СБ через год, 7 и 10 лет относительно идеальных выходных характеристик

Уменьшение плотности потока излучения вследствие различных причин (туман, пыль) ведет к значительному уменьшению тока короткого замыкания и мощности, отдаваемой батареей (рисунок 13).

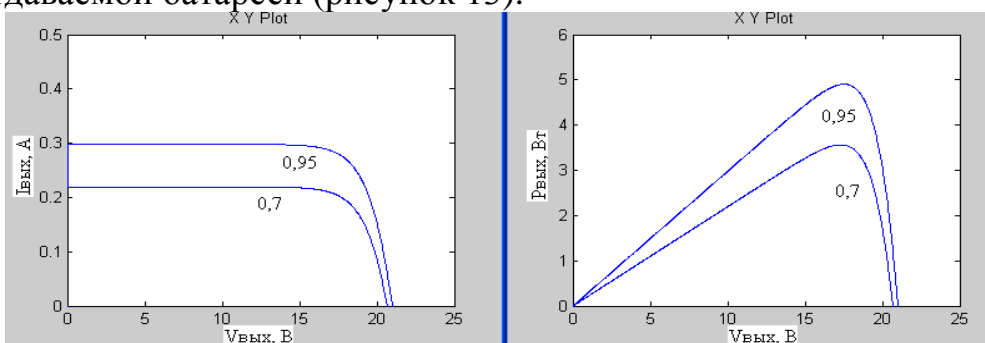


Рисунок 13– Моделирование влияния потерь мощности излучения на ВАХ и ВВХ при  $k_2=0,7$  и  $k_2=0,95$



При помощи соответствующего значения коэффициента  $k_2$  можно учесть факторы, влияющие на количество излучения, достигающего активной поверхности СЭ. Моделирование различных уровней затенения СБ дает наименьшую погрешность для случая затенения равных частей активной площади элементов.

Математическая модель описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения. В ходе моделирования было произведено тестирование и верификация результатов имитирования СБ. Изменения выходных характеристик и расчетных параметров солнечных элементов и батарей согласуются с известными теоретическими и практическими результатами. Ожидаемая точность математической модели СБ оценочно составляет 10 % с учетом погрешности входных данных и погрешности математических вычислений. Для точного определения погрешности модели требуется проведение дополнительных экспериментов и работа с базой данных измеренных ВАХ и ВВХ.

Созданная модель адекватна, поскольку соответствует исследуемому объекту относительно выбранной системы его свойств. Модель обладает свойствами продуктивности, наглядности и соответствует поставленным целям исследования.

Показано практическое применение модели СБ при проектировании наземных и космических ФЭС. Сфера использования фотоэлектрических преобразователей быстро расширяется. Установочная мощность систем колеблется в диапазоне от нескольких ватт до нескольких мегаватт в зависимости от назначения. Модель СБ позволяет оценить энергетические возможности ФЭС при различных условиях окружающей среды с учетом конструктивных и технологических особенностей батарей. Модель СБ применима при решении задач наземной отработки систем электропитания космических аппаратов. Представленная модель используется для построения интеллектуального имитатора СБ с компьютерным управлением. Интеллектуальный имитатор способен не только воспроизводить ВАХ батарей, но и оценивать изменение их характеристик при различных воздействиях, приближая тем самым испытания к реальным условиям эксплуатации энергосистемы космических аппаратов.

**В заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований.

**В приложениях** дано описание моделей СЭ и СБ на языке PSpice и в среде Matlab Simulink, а также приведены характеристики солнечных элементов и солнечных модулей, использованных для верификации модели.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Развита универсальная модель солнечных батарей, в которой в качестве входных параметров используется известные данные производителей. Впервые в модели предусмотрена возможность имитирования солнечных батарей из различных полупроводниковых материалов с учетом следующих комплексных воздействий: различных уровней освещенности и температур, потерь падающего солнечного излучения и затенения СБ, радиационного облучения, конструктивных особенностей солнечных батарей, разброса технологических параметров и деградации характеристик СБ с течением времени, выходной емкости солнечных батарей.
2. Выполнен анализ конструктивных и технологических особенностей различных полупроводниковых солнечных батарей. Результаты анализа включены в математическое описание характеристик СБ.
3. Разработана библиотека моделей солнечных элементов и батарей, позволяющая осуществлять исследования фотоэлектрических генераторов различного назначения. При переходе от языка имитационного моделирования PSpice к среде имитирования Matlab Simulink развит параметрический сервис моделей, обеспечена гибкая реализация с возможностью проверки данных моделирования и обеспечен простой способ внесения изменений.
4. Проведено сравнение ВАХ и ВВХ ряда солнечных батарей с использованием модели СБ. Моделирование солнечных батарей различных конфигураций позволяет определить оптимальное количество солнечных элементов в батарее для конкретной задачи с учетом изменения характеристик батареи под действием факторов окружающей среды с течением времени.
5. Впервые предложено использование универсальной модели солнечных батарей в качестве основы построения интеллектуального имитатора СБ, позволяющего проводить наземную отработку систем электроснабжения космических аппаратов. Применение предложенной модели обеспечивает воспроизведение выходных характеристик СБ в течение всего срока активного существования космических аппаратов.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *1. Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ*

1. Фролкова, Н.О. Микропроцессорная система управления формированием выходных характеристик солнечной батареи / И.В.Абраменкова, О.А.Фролков, Н.О.Фролкова, А.О.Ширяев // Приборы и системы. Управление, контроль диагностика.-2008.- №1.- С. 8-10

### *2. Публикации в других изданиях*

2. Фролкова, Н.О. Особенности проектирования систем питания для космических аппаратов / А.М.Дьяченко, О.А.Фролков, Н.О.Фролкова // Сборник научных трудов «Информационные технологии и электроника в образовании, науке и управлении», Смоленск: «Русич», 2003. С. 124-126

3. Фролкова, Н.О. Имитатор солнечной батареи / М.Н.Ковнерев, Н.О.Фролкова // Материалы Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2005».- 2005.- С. 67-70

4. Фролкова, Н.О. Моделирование регулируемого выпрямителя для имитатора солнечной батареи / Н.О.Фролкова //Тезисы докладов II межрегиональной научно – технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика».- 2005.- том 2. С. 56-57

5. Фролкова, Н.О. Методы формирования внешней характеристики имитатора солнечной батареи / Н.О.Фролкова // 12 международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика».- 2006.- том 1.- С. 288-289.

6. Фролкова, Н.О. Система управления имитатором солнечной батареи. / Н.О.Фролкова // Информационные технологии, энергетика и экономика 2 межрегиональная научно-техническая конференция студентов и аспирантов.- Смоленск.- 2006.- том 2.- С. 208-212.

7. Фролкова, Н.О. Компьютерное моделирование вольтамперных характеристик солнечных батарей / И.В.Абраменкова, Н.О.Фролкова // Тезисы докладов XIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов.- 2008.- С.381-382.

8. Фролкова, Н.О. Моделирование последовательного и параллельного сопротивления в структуре реального солнечного элемента / И.В.Абраменкова,

Н.О.Фролкина, О.А.Фролков, // Материалы X Международной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения» СКМП, 2009. С. 3-5.

9. Фролкина, Н.О. Моделирование влияния температуры на выходную характеристику солнечных элементов / Н.О.Фролкина, О.А.Фролков // Материалы докладов 6-й межрегиональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика», 2009 том 2, С.80-83.

10. Фролкина, Н.О. Моделирование ВАХ батареи солнечных элементов / Н.О.Фролкина, О.А.Фролков // Материалы VIII-й Всероссийская научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем», 2009.- С. 94-96.

11. Фролкина, Н.О. Обобщенная модель солнечного элемента в среде Matlab Simulink / Н.О.Фролкина, О.А.Фролков // Материалы XI Международной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения», СКМП-2010. С.70-72.

12. Фролкина, Н.О. Имитатор солнечных батарей с импульсно-линейной структурой / Н.О.Фролкина, О.А.Фролков. // Материалы ВНТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», 2010. С.57-58

13. Фролкина, Н.О. Разработка аналогово-цифровой системы управления комбинированным импульсным преобразователем / А.В. Нестеров, С.А. Тютюнник, Н.О. Фролкина, О.А. Фролков. // Материалы ВНТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ-2010) С. 277-279

14. Фролкина, Н.О. Обратногоходовой преобразователь с двухконтурным управлением / Н.О. Фролкина, О.А. Фролков, А.О. Ширяев // Материалы ВНТК «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ-2010). С. 279-281

15. Frolova, N.O. Modeling different types of PV modules / N.O.Frolova, O.A.Frolov // 13<sup>th</sup> International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. ICEEE-2010.- p. 152.

(Фролкина Н.О. Моделирование солнечных батарей различных типов / Н.О. Фролкина, О.А. Фролков // 13 Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, материалы и компоненты» 2010 г.)