

На правах рукописи



Саврасов Фёдор Витальевич

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С
ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжения промышленных предприятий» Энергетического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Борис Владимирович Лукутин

Официальные оппоненты: Юрий Александрович Шиняков, доктор
технических наук, профессор, директор
НИИ космических технологий, г. Томск

Анатолий Федорович Лекарёв,
кандидат технических наук, ведущий
научный сотрудник ОАО «НПЦ
«Полус», г. Томск

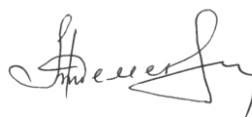
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Новосибирский
государственный технический
университет»

Защита состоится «17» декабря 2013 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

**Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.269.11,
кандидат технических наук:**



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Актуальность данной работы связана с тем, что на 70% территории России отсутствует централизованное электроснабжение. На этой территории проживают порядка 20 млн. человек. В зонах с централизованным электроснабжением часто возникает необходимость повысить надёжность электроснабжения отдельных потребителей путём введения в систему автономного энергоисточника в качестве резерва.

Высокие транспортные издержки и устойчивый рост цен на моторное топливо определяют высокие тарифы на производимую в децентрализованных системах электроснабжения электроэнергию.

Реальным способом повышения энергетической эффективности автономных дизельных систем электроснабжения является включение в их состав установок возобновляемой энергетики, среди которых наиболее универсальными являются фотоэлектрические системы.

Исследование и оптимизация энергоэффективности фотоэлектрических систем (ФЭС) и гибридных систем электроснабжения на их основе представляет актуальную задачу, решению которой посвящены работы многих российских и зарубежных учёных: Д.С. Стребкова, П.П. Безруких, Б.В. Лукутина, О.С. Попеля, Л. Брауна, Д. Крисвелла, С. Наяра, Р. Лопеса, Д. Попандополуса, М. Махмуда, и др.

Однако, сложность процессов энергопреобразования в гибридных энергоустановках, совершенствование их характеристик и расширение масштабов практического применения возобновляемой энергетики требуют продолжения исследований в указанном направлении.

Таким образом, диссертационные исследования, посвящённые повышению энергоэффективности автономных электротехнических комплексов с использованием фотоэлектрических систем, своевременны и направлены на решение актуальной хозяйственной задачи.

Объектом исследования в данной работе были выбраны автономные системы электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей энергии и дизельных электростанций (ДЭС).

Предметом исследования являются структурные схемы, элементы конструкций и алгоритмы взаимодействия компонентов солнечно-дизельного электротехнического комплекса автономного электроснабжения.

Целью работы является повышение энергоэффективности автономных систем электроснабжения на основе солнечных и комбинированных солнечно-дизельных электростанций.

Для реализации поставленной цели решены **следующие задачи**.

1. Выполнено технико-экономическое обоснование использования ФЭС в автономной энергетике (на примере Томской области).

2. Разработаны и исследованы новые конструкции оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей с целью увеличения выработки электроэнергии.
3. Разработаны рекомендации по построению гибридных систем автономного электроснабжения, создаваемых на основе ФЭС и дизельных электростанций.
4. Разработаны имитационные модели энергопреобразования в гибридных автономных системах электроснабжения для исследования взаимодействия компонентов систем с целью повышения энергоэффективности комплекса.
5. Разработаны и реализованы в виде компьютерных программ алгоритмы, согласующие взаимодействие компонентов энергетического оборудования солнечно-дизельной автономной системы электроснабжения.

Методы исследований. В ходе работы использовались методы физического и математического моделирования с применением Matlab, методы параметрической оптимизации, методы математической статистики.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждена актами практического внедрения, результатами экспериментальных исследований, корректностью принятых допущений.

Научная новизна. В результате проведенных исследований получены следующие новые научные результаты:

1. Предложены критерии и алгоритмы выявления целесообразности и определения эффективности внедрения фотоэлектрических систем в автономные комплексы электроснабжения удалённых потребителей на основе дизельных электростанций.
2. Разработаны новые технологические решения, позволяющие улучшить энергетическую эффективность фотоэлектрических преобразователей в составе электротехнических комплексов автономного электропитания.
3. Разработаны алгоритмы эффективного управления гибридными автономными системами электроснабжения, содержащими фотоэлектрические преобразователи, с целью экономии топлива и моторесурса дизельной электростанции.

Практическая ценность результатов работы.

1. Разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять имитационное моделирование и определение рациональных параметров фотоэлектрических систем, входящих в состав гибридных комплексов электроснабжения, с целью экономии топливных ресурсов и снижения стоимости генерируемой электроэнергии.
2. С использованием запатентованных конструкций фотоэлектрических устройств, изготовлен и введен в эксплуатацию ряд мобильных электростанций, отличающихся повышенной энергоэффективностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

3. Исследованы и адаптированы модели компонентов автономных систем электроснабжения для имитации процессов преобразования энергии в гибридных энергетических комплексах.
4. Впервые для Томской области проведён анализ энергетического и экономического баланса гибридной системы электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей и дизель-генераторов, и показана экономическая целесообразность практического внедрения таких систем.

Реализация результатов работы.

Разработанные конструкции фотоэлектрических устройств в настоящее время используются в автономных источниках электроэнергии контрольно-измерительной и телеметрической аппаратуры широкого назначения для нужд ОАО «РЖД», ЗАО «Сургутнефтеавтоматика», в качестве зарядных устройств для мобильных средств связи и ноутбуков.

Предлагаемые методики по определению эффективности использования фотоэлектрических систем применены при проектировании гибридных ветро-солнечных электротехнических комплексов для нужд ОАО «НИИПП», г. Томск, Института неразрушающего контроля НИ ТПУ, г. Томск, комбинированной системы электропитания зданий в пос. Жатай, Якутия.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы эффективного управления гибридными автономными системами электроснабжения, использующими в своем составе фотоэлектрические преобразователи, накопительные устройства и дизель-генераторы, повышающие энергоэффективность гибридной системы.
2. Предложенный ряд конструкций мобильно-стационарных фотоэлектрических устройств, позволяющих повысить выработку электроэнергии в составе солнечно-дизельных электростанций.
3. Методика оптимизации состава и режимов работы автономного солнечно-дизельного комплекса электроснабжения, позволяющая экономить мото- и топливные ресурсы дизельной электростанции.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на пяти всероссийских и международных конференциях: Всероссийская научная конференция, г. Астрахань, апрель 2010 г.; 7-я Международная научно-техническая конференция ГНУ ВИЭСХ, г. Москва, май 2010 г.; Международная конференция с элементами научной школы для молодежи, г. Астрахань, декабрь 2010 г.; Межвузовская научно-методическая конференция, г. Омск, сентябрь 2011 г.; 27-я Международная конференция по фотовольтаике и солнечной энергии, г. Гамбург, сентябрь 2012 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 5 в изданиях, рекомендуемых ВАК. Получен 1 патент РФ на полезную модель и 1 патент РФ на изобретение.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников,

перечня сокращений, четырёх приложений, содержит 10 таблиц и 47 иллюстраций. Общий объем составляет 132 страницы основного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследований, их научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе проведён анализ возможностей повышения энергоэффективности электроснабжения удалённых объектов путём применения автономных систем электроснабжения (АСЭ) на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Наиболее универсальной для АСЭ, с точки зрения энергетического потенциала и возможности повсеместного использования, является солнечная энергетика.

Повышение энергоэффективности систем электроснабжения с фотоэлектростанциями возможно путём решения следующих задач:

- разработка и исследование конструкций и способов установки фотоэлектрических модулей, способных обеспечить эффективное преобразование солнечной энергии;
- определение оптимального энергобаланса в гибридных децентрализованных комплексах электроснабжения, использующих в своём составе ФЭС;
- разработка алгоритмов эффективной эксплуатации АСЭ с учётом устройств, входящих в состав комплекса;
- разработка методики оценки экономической и энергетической эффективности работы АСЭ на основе ФЭС.

Во второй главе исследуются особенности построения автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектростанций.

В Томской области электроснабжение изолированных районов осуществляется от локальных дизельных электростанций и дизель-генераторов, общее количество которых оценивается в 125 штук, а суммарная установленная мощность – 35...45 тыс. кВт. Стоимость электроэнергии в отдельных посёлках доходит до 56 руб. за кВт·ч и более. Годовая потребность в дизельном топливе для ДЭС Томской области составляет порядка 25 тыс. т (на сумму до 550 млн. руб.).

Высокая стоимость электроэнергии от ДЭС определяет более низкое удельное электропотребление на удалённых территориях по сравнению с централизованным электроснабжением.

При этом, объём электропотребления АСЭ может существенно различаться: от единиц и десятков кВт·ч в сутки для электроснабжения удалённых складских помещений и жилых домов до сотен кВт·ч в сутки для снабжения животноводческих и растениеводческих комплексов и посёлков.

Исходя из графиков электропотребления объектов, следует анализировать возможности внедряемых АСЭ на основе ФЭС по уровню генерируемой энергии, а также целесообразность и масштабы использования других энергоисточников для гарантированного удовлетворения нужд индивидуального потребителя.

Обобщая результаты ряда научных разработок и практических экспериментов отечественных и зарубежных исследователей, были выделены три основных варианта построения АСЭ, имеющих в своём составе ФЭС:

- солнечно-дизельные без аккумуляторной батареи;
- солнечно-дизельные с аккумуляторной батареей;
- с одним источником (ФЭС) и аккумуляторной батареей.

На рис. 1. представлена структурная схема варианта солнечно-дизельной АСЭ с устройством аккумулирования избыточно вырабатываемой электроэнергии. В ней используется Φ – совокупность фотоэлектрических модулей, преобразующих солнечную энергию в электричество для покрытия нагрузки H , и D – дизель-генератор, предназначенный для периодов, когда энергии недостаточно для потребителя. В состав данной АСЭ входит автоматически регулируемая балластная нагрузка (B), предназначенная для утилизации возможной избыточной мощности от Φ .

Преобразование напряжения Φ из постоянного в переменное осуществляется с помощью инвертора I . Для экономии моторесурса и дизельного топлива в системе предусмотрен коммутирующий элемент K , осуществляющий отключение D в периоды избыточной инсоляции, либо подключение, когда мощность, вырабатываемая Φ , недостаточна для покрытия нагрузки. Передача энергии от генерирующих источников осуществляется через распределительное устройство PY .

Аккумуляторная батарея AB предназначена для обеспечения бесперебойной работы электротехнического комплекса. Восстановление заряда аккумуляторов осуществляется за счёт накопления избытков электроэнергии, поступающей от Φ ; также подзарядка батареи, при необходимости, может осуществляться от источника D , что способствует увеличению коэффициента использования его мощности.

Для того чтобы не происходил перезаряд аккумуляторов от энергоисточников, в системе предусмотрены контроллер заряда от фотоэлектрической системы $KЗ$ и регулятор заряда от дизельной электростанции $PЗ$. Они предназначены для обеспечения оптимального процесса заряда AB с целью увеличения срока службы и эффективности её работы.

Если источник D является основным, то предполагается, что основное назначение Φ – поддержка стабильного уровня электроснабжения и экономия ресурсов D . В этом случае AB будет работать в буферном режиме с небольшой глубиной разряда, соответственно, её общая ёмкость может быть относительно небольшой. В случае, если АСЭ предполагается использовать в местах, где источник Φ является основным, а источник D – вспомогательным, AB будет

эксплуатироваться в циклическом режиме, вследствие чего её ёмкость необходимо увеличить. При этом следует учитывать, что совокупная ёмкость *АБ* может значительно изменяться, что, в конечном итоге, отразится на стоимости всей АСЭ в целом.

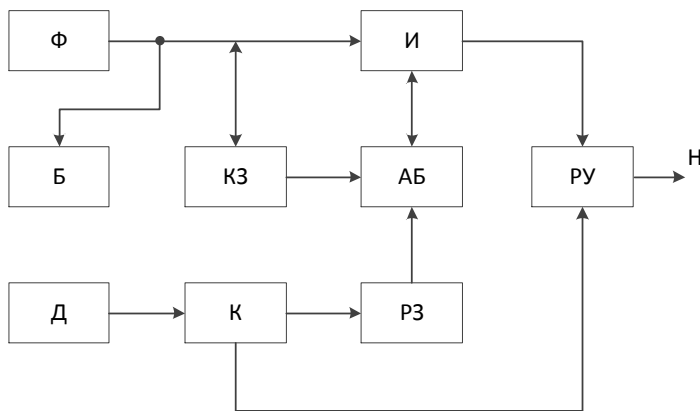


Рис. 1. Вариант построения АСЭ с накопителем энергии

Оптимальная эксплуатация комплекса зависит от достаточно большого количества факторов: ёмкости *АБ*, количества фотоэлектрических модулей, величины нагрузки потребителей в различное время суток, уровня солнечной инсоляции, и т.д. Эти факторы могут накладывать ограничения на эффективное функционирование АСЭ. Устранение этих ограничений

методом изменения установленных мощностей компонентов электротехнического комплекса может привести к снижению эффективности (как энергетической, так и экономической) всего комплекса в целом. Соответственно, необходимо определять рациональное соотношение установленных мощностей различных энергоисточников, входящих в АСЭ, для достижения максимальной экономической и энергетической эффективности электротехнического комплекса в целом.

В третьей главе исследуется возможность оптимизации несущих конструкций фотопреобразователей с целью увеличения выработки электроэнергии, а также оптимизации режимов работы АСЭ с фотоэлектростанциями.

Исследование ФЭС, обеспечивающих автоматический поворот фотоэлектрических модулей вслед за перемещением Солнца, показало, что на широте г. Томска привод системы слежения должен охватывать диапазон от $+135^\circ$ до -135° относительно направления на юг, а выигрыш в эффективности солнечной батареи (СБ) при слежении за Солнцем составляет от 10 % , когда Солнце закрыто тучами, до 40 % при ясном солнечном свете.

Несмотря на очевидные достоинства систем слежения за Солнцем, они обладают рядом недостатков, среди которых основными являются:

- необходимость в электропитании компонентов привода слежения;
- сложность в настройке, а также возможные отказы в работе;
- техническая трудность в реализации;
- высокая стоимость (согласно сравнению цен на фотоэлектрические модули и системы слежения, последние удорожают ФЭС на 27...35 %).

Таким образом, была поставлена задача разработки конструкций, обеспечивающих оптимальное расположение модулей в течение светового дня в любой момент времени, и при этом лишённых вышеупомянутых недостатков.

В ходе решения этой задачи были разработаны следующие конструкции:

- фотоэлектрическое устройство на подвижной раме (рис. 2);
- фотоэлектрическое устройство складного типа (рис. 3).



Рис. 2. Фотоэлектрическое устройство на подвижной раме
(а – вид спереди, б – вид сзади)

Конструкция устройства на подвижной раме позволяет изменять угол ориентации фотоэлектрических модулей на Солнце. В оригинальном исполнении предусмотрено осуществление процесса ориентации вручную, при этом угол ориентации зависит от времени года и суток.

Для определения эффективности данной конструкции с целью выявления оптимального угла наклона для увеличения выработки энергии фотоэлектрическими преобразователями по сравнению с их стационарной ориентацией были проведены опытные измерения в натурных условиях.

В табл. 1 приведены среднемесячные значения выработанной солнечной энергии в кВт·ч для одинаковых по мощности батарей *СБ1* и *СБ2* (угол наклона первой менялся каждый день, вторая была установлена стационарно), значения $W_{СБ1}$ приведены при оптимальном угле наклона.

Как видно из приведённых данных, расположение фотоэлектрических панелей под оптимальным углом способно обеспечить существенный прирост

Таблица 1.

Выработка энергии тестируемыми батареями

Месяц	$W_{СБ2}$, кВт·ч	$W_{СБ1}$, кВт·ч	Разница, %	Угол наклона, град
январь	4,923	5,107	3,75	72
февраль	11,000	11,077	0,71	63
март	25,307	25,369	0,25	51
апрель	26,230	27,397	4,45	36
май	28,076	31,897	13,61	21
июнь	28,845	34,337	19,04	12
июль	51,306	59,526	16,02	18
август	26,653	28,614	7,36	30
сентябрь	22,345	22,671	1,46	45
октябрь	18,461	18,536	0,41	60
ноябрь	14,153	14,484	2,34	69
декабрь	4,231	4,432	4,76	75
Итого	261,528	283,448		

вырабатываемой электроэнергии.

Прототип складного фотоэлектрического устройства с переменным числом модулей (рис. 3) относится к фотоэлектрическим системам с несколькими панелями, содержащими электрически взаимосвязанные фотоэлектрические преобразователи для производства электрического тока, и предназначен для создания гибкой, удобной, надежной, прочной солнечной батареи произвольного размера и произвольной конфигурации в пространстве с оптимальным весом.

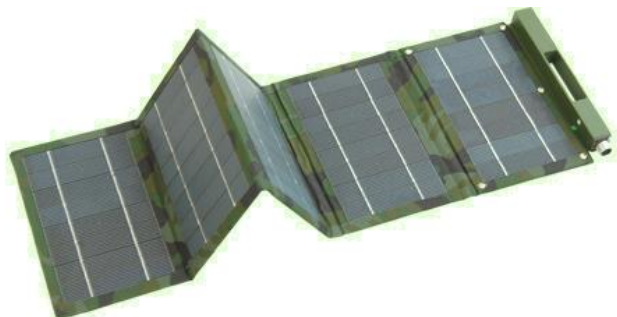


Рис. 3. Фотоэлектрическое устройство складного типа

При этом одновременно обеспечивается упрощение процесса сборки-разборки, быстрота ремонта, сокращение времени приведения солнечной батареи в рабочее состояние, снижение стоимости изготовления. Сложная пространственная геометрия солнечной батареи

необходима, например, при изготовлении источников питания для уличной рекламы, покрытия корпусов воздушных объектов, и т.п.

На основе предложенной полезной модели был изготовлен ряд устройств, в том числе экспериментальная СБ, состоящая из 5 модулей ФСМ-4-4. С использованием данной СБ были проведены исследования, целью которых являлась задача определения эффективности работы батареи в полевых условиях в зависимости от углов наклона различных её панелей к падающему световому потоку в разные периоды светлого времени суток.

Тестируемая батарея была развернута в с. Магадаево, в 13 км от г. Томска. Рабочая поверхность СБ была стационарно ориентирована на юг под углом 55° к поверхности Земли, при этом её модули были расположены каждый под своим углом (проекция итогового расположения граней модулей СБ показана на рис. 4, где числа 1...5 – порядковые номера модулей, точка А – крайнее левое положение СБ, точка В – крайнее правое положение СБ).

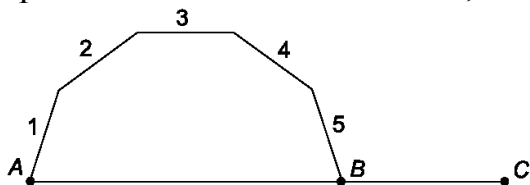


Рис. 4. Схематическое изображение ориентации экспериментальной батареи

Периодически, в различное время светового дня, проводились измерения мощности, вырабатываемой отдельными модулями развернутой СБ. В табл. 2 представлены результаты измерений.

Расчет выработки электроэнергии за день для данного расположения СБ составляет приблизительно 90 % от случая, когда батарея полностью развёрнута (либо используется плоская нераскладываемая конструкция).

Однако в случае полного раскладывания батареи происходит увеличение длины отрезка на плоскости, занимаемого поверхностью СБ. На рис. 4.

условное расположение СБ в полностью развёрнутом состоянии по отношению к экспериментальному обозначено отрезком АС. При жёстких ограничениях по длине плоская батарея выдаст всего 65 % энергии от случая, когда ограничений не имеется (отношение АВ к АС).

Таким образом, использование раскладных конструкций в условиях, когда поверхность, занимаемая СБ, имеет существенные ограничения по длине участка, занимаемого фотопреобразователями, позволит достичь большего объёма вырабатываемой электроэнергии.

Эффективное использование АСЭ на основе ФЭС предполагает разработку алгоритмов её работы, которые должны быть направлены на повышение энергоэффективности АСЭ. В данной работе предлагаются алгоритмы, описывающие функционирование АСЭ, варианты построения которых представлены во второй главе.

Алгоритмы строились на основе адаптации имитационных моделей элементов АСЭ для исследования возможностей повышения энергоэффективности солнечно-дизельного энергетического комплекса.

При переводе величины приходящей солнечной радиации с горизонтальной поверхности на наклонную использовалась величина суммарной солнечной радиации за сутки:

$$J_{\text{накл}}^{\text{сут}} = S_{\text{накл}}^{\text{сут}} + D_{\text{накл}}^{\text{сут}} + D_{\text{накл}}^{\text{сут}},$$

где $S_{\text{накл}}^{\text{сут}}$ — сумма прямой солнечной радиации на наклонную поверхность за сутки, Дж; $D_{\text{накл}}^{\text{сут}}$ — сумма солнечной радиации, рассеянной за сутки от небосвода на наклонную поверхность, Дж; $D_{\text{накл}}^{\text{сут}}$ — сумма солнечной радиации, рассеянной за сутки от земли на наклонную поверхность, Дж.

При разработке алгоритмов функционирования АСЭ используются следующие параметры системы: P_H — мощность нагрузки в текущий момент времени; P_ϕ — мощность, генерируемая СБ в текущий момент времени; P_d — мощность, которая требуется в текущий момент времени от дополнительного источника; P_{dx} — мощность дополнительного источника в режиме холостого хода; P_{AB} — мощность, которую аккумуляторная батарея должна отдать в

Таблица 2.

Расчётная и реальная дневная выработка энергии СФБ-150

Время суток, ч	Мощность, Вт				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
6	1,61	0,3	0,12	0,15	0,16
7	2,21	0,68	0,15	0,17	0,19
8	2,84	1,44	0,43	0,22	0,23
9	3,24	1,98	1,1	0,24	0,24
10	3,54	2,66	2,12	0,31	0,26
11	3,6	3,1	2,8	1,08	0,27
12	2,94	3,7	3,2	1,94	0,28
13	2,44	3,08	3,73	2,66	0,88
14	1,44	2,68	3,4	3,38	1,71
15	0,67	1,84	3,34	3,86	2,34
16	0,26	1,72	2,84	3,87	2,77
17	0,24	1,1	2,42	3,64	3,2
18	0,21	0,34	1,63	3,27	3,24
19	0,17	0,14	0,95	2,61	2,16
20	0,12	0,1	0,62	1,2	1,56
21	0,09	0,07	0,09	0,81	1,53

текущий момент времени; P_3 – мощность, необходимая для заряда AB в текущий момент времени; P_{3p} – реальная мощность, которую система может выделить для заряда либо подзарядки AB в текущий момент времени; P_B – мощность, рассеиваемая в текущий момент времени на балластном сопротивлении; K – состояние переключателя, отвечающего за подключение либо отключение дополнительного источника энергии, не являющегося ФЭС; T – величина временного периода, в течение которого переключатель K не может изменить своего состояния; T_{Π} – минимально возможный период времени с начала подключения дополнительного источника до момента его отключения; T_O – минимально возможный период времени с начала отключения дополнительного источника до момента его подключения.

Емкость аккумуляторной батареи в течение времени заряда t изменяется согласно следующей зависимости:

$$Q_3 = Q_o + \eta_3 \cdot I_3 \cdot t = Q_o + \eta_y \cdot I_y \cdot Q_n \cdot t$$

где I_3 – ток заряда, А; I_y – удельный ток заряда, А/(А·ч); Q_o , Q_n – остаточная и номинальная емкости АКБ, А·ч; η_3 – коэффициент отдачи АКБ по ёмкости. При традиционном гальваностатическом способе заряда рекомендуется выбирать ток заряда для свинцово-кислотных аккумуляторов исходя из удельного тока 0,05...0,1 А/(А·ч).

В табл. 3 приведены величины КПД AB , показывающие зависимость от отношения выходящего напряжения к входящему и мощности нагрузки. Под $P_{ном}$ в данном случае подразумевается номинальная мощность нагрузки для рассматриваемого случая.

Таблица 3.

Зависимость КПД аккумуляторной батареи от отношения выходного напряжения к входному и мощности нагрузки

Диапазон P_H	Значение КПД
$0,95P_{ном} \leq P_H \leq P_{ном}$	$\eta_{AB}(1) = -(U_{вых}/U_{вх})^3 + 2,26(U_{вых}/U_{вх})^2 - 1,52(U_{вых}/U_{вх}) + 1,22$
$0,85P_{ном} \leq P_H \leq 0,95P_{ном}$	$\eta_{AB}(0,9) = [\eta(1) + \eta(0,8)]/2$
...	...
$0,15P_{ном} \leq P_H \leq 0,25P_{ном}$	$\eta_{AB}(0,2) = -2,5(U_{вых}/U_{вх})^3 + 6,75(U_{вых}/U_{вх})^2 - 6(U_{вых}/U_{вх}) + 2,54$

На рис. 5 приведена блок-схема алгоритма работы для варианта построения гибридной автономной системы с аккумуляторной батареей, работающей в буферном режиме. Данный алгоритм предназначен для достижения максимальной экономии топлива ДЭС, а также оптимального использования ФЭС и аккумуляторной батареи, входящих в состав АСЭ.

Перспективным для исследования представляется вариант функционирования АСЭ с накопителем электроэнергии, при котором свинцовая аккумуляторная батарея эксплуатируется в циклическом режиме (например, в ночное время, когда расход электроэнергии небольшой и равномерный). Целью такой эксплуатации является использование избыточной мощности от ФЭС в периоды, когда таковая образуется, для заряда либо подзарядки накопителя, а также для экономии ресурсов ДЭС.

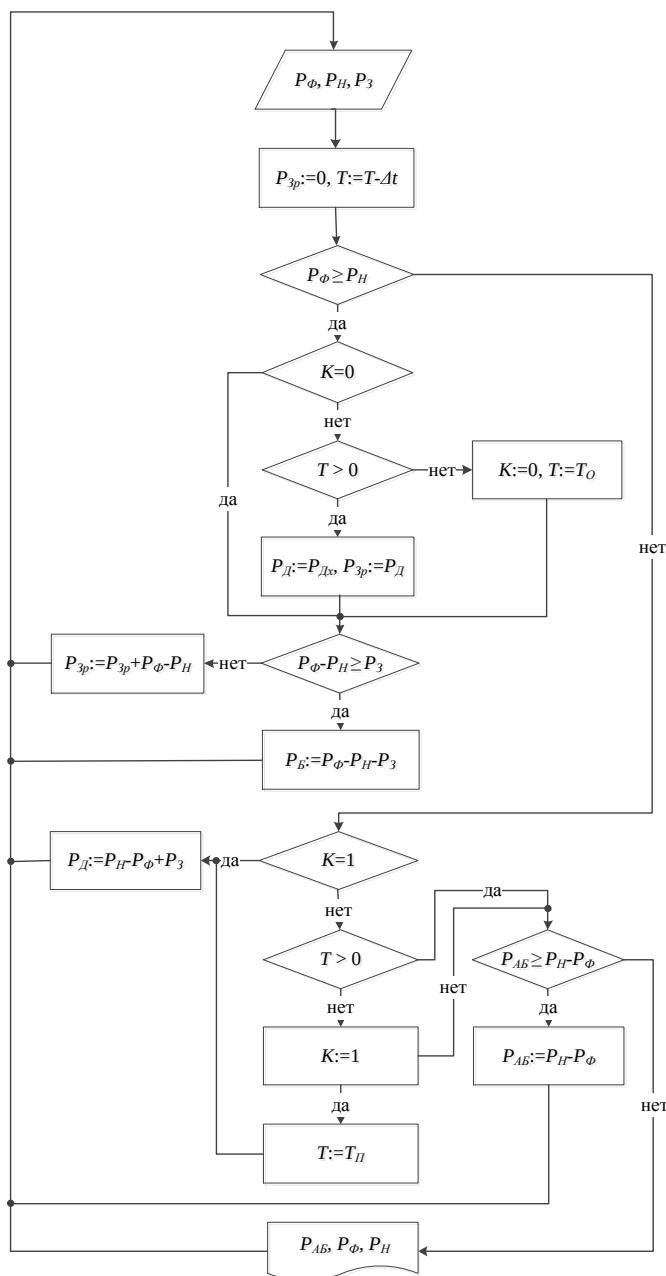


Рис. 5. Алгоритм работы АСЭ с аккумуляторной батареей, работающей в буферном режиме

Для оптимизации совместного потребления мощности от ФЭС и ДЭС, необходимой для заряда аккумуляторной батареи, следует использовать статистические данные уровня инсоляции за рассматриваемый период. Обладая данными сведениями, возможно рассчитать, в какой момент времени необходимо начинать процесс заряда, чтобы использование топливных ресурсов, а также аккумуляторной батареи было наиболее эффективным. Соответственно, возможно заранее подсчитать, сколько времени потребуется для восстановления ёмкости батареи и, на основании этого, определить количество энергии, необходимое для подзарядки в тот или иной момент времени. По этим данным определяется функция восстановления заряда по времени $P_3(t)$.

Необходимо учитывать, что при различных значениях глубины разряда накопителя, время заряда также изменяется. Таким образом, для каждого дня рассматриваемого периода должно быть определено

максимально позднее время начала заряда, при котором аккумуляторная батарея, учитывая глубину разряда, успеет зарядиться до максимума для очередного использования в циклическом режиме. Т.к. компенсация заряда должна происходить за счёт избыточной мощности, вырабатываемой ФЭС в этот день, то необходимо определить те значения функции $P_{\phi}(t)$, которые описывают динамику изменения уровня этой мощности. Фактически, эти значения в тот или иной момент времени в рассматриваемый день определяются разницей между текущим значением P_{ϕ} (с учётом инсоляции) и текущим значением P_H .

Соответственно, возникает задача разработки алгоритма определения оптимального момента начала заряда аккумуляторов от нескольких источников с учётом генерируемой ФЭС энергии для каждого дня за весь рассматриваемый период (год). Для этого необходим набор изначальных данных, с помощью которых будет определяться наиболее подходящий момент:

- $\mathbf{T}_{II} = \{T_{II11}, T_{II12}, \dots, T_{IIk1}, T_{IIk2}, \dots, T_{II n1}, T_{II n2}\}, k \in [1 \dots n]$ – матрица моментов времени начала и окончания выработки избыточной мощности от СБ за определённый день (для каждого дня периода значения будут разными); представляет собой набор паросочетаний вида «начало-конец» для каждого периода выработки избыточной мощности, соответственно, значение n определяется количеством таких паросочетаний; значения $\mathbf{T}_{II}$ должны быть упорядочены по возрастанию относительно шкалы суточного времени;
- t_{31}, t_{32} – базовое значение начального и конечного моментов времени заряда аккумуляторной батареи в рассматриваемый день; перед началом работы алгоритма, t_{31} равно наиболее позднему времени начала процесса заряда из возможных; величина t_{32} определяется как прибавление к значению t_{31} необходимого времени для заряда АБ;
- Δt_3 – значение временного интервала, на который будут изменяться базовые значения t_{31} и t_{32} в ходе выполнения алгоритма;
- S – количество энергии, которую накопитель получит от СБ с учётом имеющихся значений $\mathbf{T}_{II}, t_{31}$ и t_{32} ;
- $\mathbf{T}_3 = \{T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3j}, \dots, T_{3m}\}, j \in [1 \dots m]$ – вспомогательный динамически изменяющийся вектор временных моментов, на основании которого будет определяться S .

Алгоритм состоит из следующей последовательности действий.

1. S принимает нулевое значение, также удаляются все элементы из $\mathbf{T}_3$.
2. Формируется вектор $\mathbf{T}_3$. В него заносятся:
 - элементы матрицы $\mathbf{T}_{II}$, принадлежащие интервалу $[t_{31} \dots t_{32}]$;
 - значение t_{31} при условии, что оно попадает в какой-либо интервал $[T_{IIk1} \dots T_{IIk2}], k \in [1 \dots n]$;
 - значение t_{32} при условии, что оно попадает в какой-либо интервал $[T_{IIk1} \dots T_{IIk2}], k \in [1 \dots n]$;
 - все значения t , в которых $P_{\Phi II}(t)$ и $P_3(t)$ пересекаются.

После заполнения $\mathbf{T}_3$, элементы данного вектора упорядочиваются по возрастанию относительно шкалы суточного времени.

3. Для всех $j \in [1 \dots m-1]$ проверяется, существует-ли функция $P_{\Phi II}(t)$ на интервале $[T_{3j} \dots T_{3j+1}]$. Если да, тогда

$$S := S + \begin{cases} \int_{T_{3j}}^{T_{3j+1}} P_{\Phi II}(t), P_{\Phi II}\left(\frac{T_{3j} + T_{3j+1}}{2}\right) < P_3\left(\frac{T_{3j} + T_{3j+1}}{2}\right) \\ \int_{T_{3j}}^{T_{3j+1}} P_3(t), P_{\Phi II}\left(\frac{T_{3j} + T_{3j+1}}{2}\right) > P_3\left(\frac{T_{3j} + T_{3j+1}}{2}\right) \end{cases}$$

На самом деле, можно брать любое значение (не обязательно среднее) для выбранного диапазона – одна из функций на всём интервале будет принимать большее значение, нежели другая.

4. $t_{31} := t_{31} - \Delta t_3$, далее переход к п.1.

Алгоритм выполняется до тех пор, пока $t_{31} > t_{A2}$ (т.о., перебираются все возможные значения вплоть до момента окончания суточного цикла работы аккумуляторной батареи). Из найденных значений S выбирается наибольшее. Значение t_{31} , при котором достигается данная величина S , и будет искомым моментом.

В результате более эффективной эксплуатации $АБ$, может быть достигнут значительный уровень экономии топлива (до 14 %), необходимого для функционирования дополнительного источника, что повышает привлекательность использования данного варианта исполнения АСЭ с экономической точки зрения.

В четвёртой главе исследуются возможности практического использования фотоэлектрических систем в автономных комплексах электроснабжения Томской области с точки зрения снижения расхода дизельного топлива.

Приводится расчёт оптимального баланса вырабатываемой энергии от комбинированной АСЭ, в состав которой входит ФЭС и ДЭС. Данный расчёт осуществляется на примере типовых сезонных графиков электрических нагрузок для сельского дома, с использованием математических моделей, построенных на основании исследуемых вариантов исполнения АСЭ, описываемых во второй главе, и алгоритмов оптимального взаимодействия их компонентов, описанных в третьей главе.

Задачей моделирования баланса электроэнергии для выбранных населённых пунктов является параметрическая оптимизация компонентов гибридной системы электроснабжения.

Для описания и решения этой задачи вводятся следующие обозначения: F – тариф за электроэнергию от ДЭС, руб/кВт·ч; T_ϕ – срок службы СБ, лет; T_{II} – срок службы инвертора, лет; T_{AB} – срок службы аккумуляторной батареи, лет; A – количество фотоэлектрических модулей в системе, шт; C – стоимость электроэнергии, которую потребитель будет вынужден оплатить за весь предполагаемый срок службы АСЭ на основе ФЭС при электроснабжении только от ДЭС, руб; C_O – стоимость дополнительного оборудования и материалов, руб; C_ϕ – стоимость фотоэлектрического модуля, руб; C_{II} – стоимость инвертора, руб; C_{AB} – стоимость аккумуляторной батареи, руб; K_ϕ – КПД фотоэлектрического модуля, %; K_{II} – КПД инвертора, %; $L = \{L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n\}$ – вектор, содержащий величины электроэнергии, необходимой для покрытия потребительской нагрузки в те часы, когда возможно применение ФЭС, за весь срок службы фотоэлектрических модулей, выраженный в часах; $H = \{H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_n\}$ – вектор, содержащий величины инсоляции в те часы, когда возможно применение ФЭС, за весь срок службы фотоэлектрических модулей (при моделировании учитывается два вектора: тот, что содержит

значения для стационарно ориентированных панелей, и тот, что содержит значения для панелей, расположенных под оптимальным для данного времени года углом); $V=\{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m\}$ – вектор, содержащий величины электроэнергии, которые может выработать аккумуляторная батарея в периоды её циклической эксплуатации; m – общее количество таких периодов за весь срок службы АСЭ на основе ФЭС.

Целевой функцией для АСЭ, спроектированной на основе варианта построения без использования накопителя электроэнергии, является функция вида

$$f(A)=F \cdot \sum_{i=1}^n D_i(A) + C_{\Phi} \cdot A + \frac{T_{\Phi}}{T_H} \cdot C_H + C_O,$$

где

$$D_i(A)=\begin{cases} L_i - H_i \cdot A \cdot K_{\Phi} \cdot K_H, & L_i - H_i \cdot A \cdot K_{\Phi} \cdot K_H \geq 0 \\ 0, & L_i - H_i \cdot A \cdot K_{\Phi} \cdot K_H < 0 \end{cases}$$

Выражение $D_i(A)$ обозначает величину, необходимую для компенсации нехватки энергии, генерируемой ФЭС, энергией, которая может быть получена от другого источника (за каждый рассматриваемый час).

Фактически, задачей оптимизации в данном случае является нахождение такого количества фотоэлектрических модулей, при котором их включение в состав АСЭ позволит обеспечивать генерацию энергии, достаточной для покрытия потребительской нагрузки, либо обеспечивать экономию электроэнергии, вырабатываемой другим источником. При этом совокупная стоимость фотоэлектрической системы не должна превышать стоимость электроэнергии, которая могла-бы быть выработана только от дизель-генератора за весь рассматриваемый период ($f(A) \rightarrow \min$). В противном случае, внедрение АСЭ на основе фотоэлектрических преобразователей может оказаться экономически нецелесообразным.

Соответственно, величина параметра A в процессе моделирования варьируется от 1 до округлённого до целого значения выражения

$$\frac{F \cdot \sum_{i=1}^n L_i - \frac{T_{\Phi}}{T_H} \cdot C_H - C_O}{C_{\Phi}}.$$

При моделировании АСЭ, спроектированной по варианту построения с использованием накопителя электроэнергии (функционирование по алгоритму, блок-схема которого приведёна на рис. 5), в систему добавляется аккумуляторная батарея, работающая в буферном режиме. Соответственно, целевая функция в данном случае изменяется:

$$f(A)=F \cdot \sum_{i=1}^n D_i(A) + C_{\Phi} \cdot A + \frac{T_{\Phi}}{T_H} \cdot C_H + \frac{T_{\Phi}}{T_{AB}} \cdot C_{AB} + C_O;$$

величина A лежит в диапазоне

$$1 \leq A \leq \frac{F \cdot \sum_{i=1}^n L_i - \frac{T_{\Phi}}{T_H} \cdot C_H - \frac{T_{\Phi}}{T_{AB}} \cdot C_{AB} - C_O}{C_{\Phi}}$$

(правая часть неравенства должна быть округлена до целого). При этом определение $D_i(A)$ остаётся неизменным.

Перед тем, как исследовать вариант АСЭ, в котором АБ функционирует в циклическом режиме, необходимо скорректировать суточный график потребительской нагрузки с учётом энергии, необходимой для заряда аккумуляторной батареи, работающей в циклическом режиме. При этом следует учитывать КПД аккумуляторной батареи. Соответственно, стандартные значения L могут быть изменены.

Таким образом, для данного варианта построения АСЭ целевая функция имеет вид:

$$f(A) = F \cdot \left(\sum_{i=1}^n D_i(A) - \sum_{j=1}^m V_j \right) + C_\Phi \cdot A + \frac{T_\Phi}{T_H} \cdot C_H + \frac{T_\Phi}{T_{AB}} \cdot C_{AB} + C_o.$$

Области варьирования параметров A и $D_i(A)$ лежат в том-же диапазоне, что и для варианта исполнения АСЭ, функционирующего по алгоритму, блок-схема которого приведёна на рис. 5.

Достижимая экономическая эффективность от использования АСЭ на основе ФЭС (с количеством модулей A) по сравнению с АСЭ, в которых действует только ДЭС, для рассмотренных выше моделей описывается как

$$E_d = \frac{C - f(A)}{C} \cdot 100 \%$$

При этом величина тарифа F берётся на сегодняшний день; в дальнейшем, исходя из текущей и прогнозируемой ситуации в сфере электроснабжения, предполагается увеличение данного показателя, что приведёт к снижению срока окупаемости электротехнического комплекса с ФЭС и увеличению значения E_d .

Таким образом, применение ФЭС следует считать экономически оправданным в тех случаях, когда E_d имеет положительное значение.

Также при исследовании различных вариантов исполнения АСЭ представляют интерес:

- количество избыточной электроэнергии, выработанной фотоэлектрическими модулями с учётом покрытия всей необходимой потребителю нагрузки, за весь период эксплуатации ФЭС (обозначается как $W_{\Phi H}$);
- экономия моторесурса ДЭС E_M – выражается как отношение количества часов, когда подключение к дополнительному источнику не осуществляется, к количеству часов, в течение которых ДЭС необходимо функционировать.

На рис. 7 приводятся графики, на которых отображены результаты определения эффективности использования АСЭ.

Прерывистой линией отображены значения, полученные при расположении модулей под оптимальным углом. Сплошной линией отображены значения в случае, когда угол наклона модулей равен географической широте данной местности, и не меняется в процессе

эксплуатации. При отображении учитывались только положительные значения E_D .

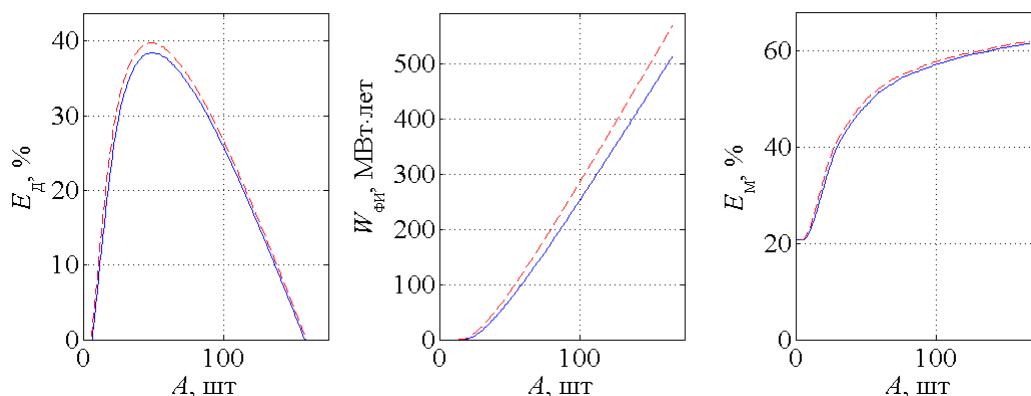


Рис. 7. Определение эффективности использования ФЭС для варианта построения АСЭ с АБ, функционирующей в циклическом режиме

В табл. 4 приводятся числовые значения вышеупомянутых характеристик, рассчитанных по разработанным компьютерным моделям. Значения $W_{\Phi И}$ и E_M приводятся для случая, когда E_D имеет максимальную величину. К ним добавлены значения стоимости электроэнергии F_S , при котором применение АСЭ на основе ФЭС в данных районах будет экономически целесообразным.

Таблица 4.

Результаты моделирования потенциальной эффективности АСЭ

Вариант построения АСЭ	E_D , %	$W_{\Phi И}$, МВт·лет	E_M , %	F_S , руб/кВт·ч
Нарым				
Без АБ	10,15/11,91	8,49/11,75	9,38/10,89	7,47
С АБ (буф. режим)	8,8/10,56	8,49/11,75	9,38/10,89	7,94
С АБ (цикл. режим)	-0,33	-13,96	-38,78	10,89
Суйга				
Без АБ	20,68/22,19	21,86/25,07	15,64/16,58	7,31
С АБ (буф. режим)	19,71/21,22	21,86/25,07	15,64/16,58	7,79
С АБ (цикл. режим)	14,56/16,26	25,09/31,1	42,19/42,84	11,15
Сосновка				
Без АБ	26,76/28,17	36,44/45,01	19,09/20,07	7,67
С АБ (буф. режим)	26,08/27,49	36,43/45,01	19,09/20,07	8,15
С АБ (цикл. режим)	25,94/27,46	46,85/53,39	44,93/45,3	11,67
Первопашинск				
Без АБ	34,73/35,99	59,94/67,34	23,39/24,02	7,29
С АБ (буф. режим)	34,18/35,44	59,94/67,33	23,39/24,02	7,76
С АБ (цикл. режим)	38,42/39,78	71,65/82,85	48,55/49,38	11,11
Макзыр				
Без АБ	44,25/45,3	109,82/126,51	28,48/29,82	7,47
С АБ (буф. режим)	43,93/44,99	109,82/126,51	28,48/29,82	7,96
С АБ (цикл. режим)	53,16/54,3	130,81/148,53	52,61/53,32	11,39

Дополнительно в процессе моделирования оценивалась эффективность алгоритма определения оптимального момента начала заряда аккумуляторной батареи. Результаты тестов, выполненные в программе Matlab, показывают, что экономия моторесурса ДЭС увеличивается на 10,8...13,5 %.

Учитывая универсальность подхода к оценке эффективности ФЭС, описанная выше методика может быть применима при проектировании любого АСЭ гибридного типа, в котором, кроме СБ, может присутствовать и другой источник электроэнергии.

Также в четвёртой главе приведён план программы перспективного внедрения фотоэлектрических систем в автономные энергетические комплексы Томской области.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложении приведены акты о внедрении результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проанализировано современное состояние российской электрогенерирующей отрасли. Показано, что для поддержания и улучшения электроснабжения территорий, не имеющих возможности подключения к сетям централизованного электроснабжения, необходимо внедрение возобновляемых источников энергии, среди которых одним из наиболее перспективным является солнечная энергия. В качестве примера региона для исследования выбрана Томская область.
2. Проанализированы и предложены основные варианты построения гибридных электротехнических комплексов на основе фотоэлектрических систем, пригодных для использования в условиях Томской области.
3. Разработаны прототипы конструкций фотоэлектрических устройств, предназначенные для повышения выработки электроэнергии, получаемой фотоэлектрическим преобразованием. Часть этих конструкций может быть использована в составе гибридных электростанций.
4. Предложены оригинальные алгоритмы автоматизированного управления автономными системами электроснабжения, позволяющие, в том числе, наиболее эффективно использовать генерируемую энергию для восстановления ёмкости накопителя электроэнергии.
5. Проведён анализ технико-экономических характеристик гибридных вариантов построения электротехнических комплексов на основе фото- и дизельных электростанций. По итогам установлено, что использование автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в ряде поселений ТО может дать значительный

экономический эффект, заключающийся в снижении себестоимости электроэнергии (в среднем – на 30 %), выработке дополнительной энергии (до 150 МВт·ч за весь срок службы ФЭС), экономии моторесурса ДЭС (до 50 %).

6. Проведён ряд испытаний разработанных конструкций ФЭС в различных условиях и режимах эксплуатации. Осуществлено практическое внедрение фотоэлектрических систем, созданных на основе предложенных конструкций: для питания аппаратуры подразделений МО и передвижных пунктов МЧС, для проведения научных экспериментов и обучения студентов Института неразрушающего контроля НИ ТПУ. В настоящее время осуществляется производство и реализация портативных фотоэлектростанций.
7. Предложена программа перспективного внедрения фотоэлектрических станций, создаваемых с использованием результатов работы, в системы автономного энергоснабжения, расположенные в удалённых поселениях Томской области, позволяющая достигнуть существенной экономии топливных ресурсов и повысить качество электроснабжения децентрализованных потребителей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Саврасов, Ф.В. Анализ эффективности кругового фотоэлектрического устройства в натуральных условиях / Ф.В. Саврасов, А.В. Юрченко, А.В. Охорзина // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 130-134.
2. Саврасов, Ф.В. Исследование эффективности работы солнечной батареи в полевых условиях / Ф.В. Саврасов, И.К. Ковалёв // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 165-168.
3. Саврасов, Ф.В. Варианты построения автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектрических устройств и алгоритмы их работы / Ф.В. Саврасов // Наукоедение [в печати].
4. Саврасов, Ф.В. Контроль эффективности работы фотоэлектрического устройства в натуральных условиях / Ф.В. Саврасов, А.В. Юрченко, М.В. Китаева // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 78-83.
5. Саврасов, Ф.В. Расчёт эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями на примере Томской области / Ф.В. Саврасов, Б.В. Лукутин // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322, № 6. – С. 17-21.

В других изданиях

6. Саврасов, Ф.В. Фотоэлектрические устройства и автономные источники электропитания на их основе / Ф.В. Саврасов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве:

материалы Всероссийской конференции ВИЭСХ. – Москва, 2010. – ч. 4. – С. 76-80.

7. Savrasov, F.V. Solar-Wind Power Complex for Small Settlements in Tomsk Region / F.V. Savrasov, A.V. Yurchenko // 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC): proceedings, Gamburg, September 25-28, 2012. – p. 4544-4546.
8. Саврасов, Ф.В. Аппаратно-программный комплекс для оптимизации энергопотребления от комбинированного автономного источника электроснабжения / Ф.В. Саврасов, Е.С. Судакова, А.С. Фадеев // Инноватика-2013: сборник материалов IX Всероссийской школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Томск, 23-26 Апреля 2013. – Томск: ТГУ, 2013. – Т. 1. – С. 153-156.
9. Саврасов, Ф.В. Применение возобновляемых источников энергии для питания измерительной аппаратуры и интеллектуальных датчиков / Ф.В. Саврасов // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы IV Научно-практической конференции, Томск, 15-17 Мая 2013. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 216-220.

Патенты

10. Пат. 2367852 Российская Федерация, МПК⁵¹ F 24 J 2/52. Солнечное фотоэлектрическое устройство / Саврасов Ф.В., Яук Э.Ф.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск. – № 2008105517/06; заявл. 12.02.2008; опубл. 20.09.2009.
11. Пат. 106444 Российская Федерация, МПК⁵¹ H 01 L 31/045. Раскладная солнечная батарея / Саврасов Ф.В., Яук Э.Ф., Мамченко Л.В.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск. – № 2011101321/28; заявл. 13.01.2011; опубл. 10.07.2011.

Личный вклад автора. Публикации [3, 6, 9] выполнены без соавторов. В публикациях [1, 2, 4] автору принадлежит анализ полученных в результате экспериментов данных (50 %). В публикации [5] автору принадлежит разработка математической модели расчёта энергобаланса (50 %), в публикации [7] – анализ способов реализации гибридного комплекса (50 %), в публикации [8] – обзор возможных аппаратно-программных реализаций комбинированного автономного источника электроснабжения (90 %). В патентах [10] и [11] автору принадлежит идея технической реализации устройств (50 %).