

На правах рукописи

Траоре Усман

Оптимизации структуры и элементной базы системы  
автономного энергоснабжения с использованием  
солнечной энергии (САЭС).

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы.

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2001

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы и сети» Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Научный руководитель  
Доктор технических наук, профессор

Орлов А.В.

Официальные оппоненты  
доктор технических наук, профессор

Гайтов Б.Х.

кандидат технических наук, доцент

Герасимов С.Е

Ведущая организация – Ассоциация развития технических и энергетических систем  
(АРТЭС)

Защита состоится «21» декабря 2001 г. в 10 часов на заседании диссертационного Совета К 212.229.02 при Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, С.-Петербург, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке университета.

Автореферат разослан «29» ноября \_\_\_\_\_ 2001

Ученый секретарь  
диссертационного Совета К 221.229.02  
д.т.н, профессор

Коротков Б.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы:**

Республика Мали – государство в западной Африке. Площадь страны 1240 тысячи квадратных километров, население – 10 миллионов человек.

Электроэнергетика Мали является динамично развивающейся отраслью промышленности и сельского хозяйства. Однако, надежность электрических систем страны невысока. Электрическое питание потребителей обеспечивается непостоянно, перерыв в питании возможен в любой момент. В стране также имеют место проблемы с электроснабжением труднодоступных районов, малонаселенных и не охваченных сетями энергетических систем.

Страна имеет большие гидроресурсы, 2 крупные реки (Нигер – и Сенегал). На них сооружены нескольких ГЭС, самая большая из которых имеет мощность около 200 Мвт. Однако эти мощности недостаточны и отсутствуют разветвленные системы электроснабжения. Для энергообеспечения периферийных потребителей в районах, удалённых от главной энергосистемы, необходимо сооружение протяженных ЛЭП от источника электроэнергии, а чтобы передавать по этим линиям энергию без больших потерь, надо применить высокие номинальные напряжения. Все это, при небольшой мощности разбросанных на большой территории потребителей, себя не окупает.

В условиях слабой и ненадежной системы электроснабжения Мали очень важным и перспективным является использование автономных систем электроснабжения на базе дизельных станций и нетрадиционных источников электроэнергии. Как правило, в этом случае инвестор или владелец (заказчик) создаваемых систем автономных электроснабжения (САЭ) сталкиваются с проблемами принципиального выбора способа энергообеспечения. Проблема особенно осложняется, если имеется возможность использовать природные ресурсы: ветер, солнце, микроГЭС, биогаз.

Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности для условия Мали наиболее перспективна, так как она может быть преобразована непосредственно в электроэнергию, холод или тепло.

Мали – страна пустынь и саванн, климат страны тропический континентальный, жаркий и сухой. Круглый год держатся высокие температуры - от 20-24 до 35 ° С. Так как с помощью абсорбционных установок, тепловая солнечная энергия (С-Э) может быть непосредственно превращена в холод, то в этих условиях рационально использовать солнечные установки для охлаждения воздуха в зданиях и сооружениях, хранения скоропортящихся продуктов, медицинских препаратов и т.п.

В принципе, расширение масштабов применения солнечных установок в Мали не только даст значительную экономию энергоресурсов, но и позволит не обострять экологическую ситуацию. Однако, в настоящее время не существует в законченном виде методик энерготехнологического аудита, которые бы

обеспечивали комплексную предварительную оценку вариантов энергообеспечения объектов и практически нет методик, позволяющий выбрать рациональный способ использования энергии солнца в САЭ.

Проблема расширения применения солнечных электрических и тепловых панелей в САЭ не однозначна и включает в себя целый ряд сложных вопросов, тесно связанных друг с другом.

Солнечные электрические панели (панели фотоэлементов) (СЭП) могут стать составной частью САЭ, обеспечивающей электроснабжение на трёхфазном переменном токе, только при формировании для них подсистемы, включающей аккумуляторы, инверторы, аппаратуру управления и коммутации и распределительную сеть. Весь этот комплекс стоит более 5000 \$ за 1 кВт мощности.

Эта подсистема с СЭП при переходе на электропитание от ДЭС (дизельная электрическая станция) представляет собой нелинейную нагрузку и может быть составной частью САЭ только при выполнении определённых требований. Комплекс „Выпрямитель-аккумулятор-инвертор” должен иметь потребляемую мощность по входу не более 30% мощности СГ(синхронный генератор) ДЭС чтобы не вызвать искажения синусоиды и не усложнять работу СГ. Кроме этого, выпрямитель этой системы должен иметь характеристики обеспечивающие его совместимость с другими потребителями САЭ.

Солнечные тепловые панели (СТП) относительно дешевы и очень эффективно преобразовывают энергию солнца в тепло, которое потом несложно аккумулировать и можно превращать в холод. СТП через аккумулятор тепловой энергии (бойлер) эффективно и не сложно включаются в общую систему получения тепловой энергии от ДЭС при утилизации тепла охлаждения ДЭС и выхлопных газов.

Однако, централизованная система получения тепла от ДЭС и СТП которая в этом случае наиболее эффективна, требует насосов, трубопроводных коммуникаций, вентилях, регуляторов и других элементов увеличивающих капитальные затраты и эксплуатационные расходы.

Децентрализованное применение СТП, дорого и для САЭ малоэффективно, так как в этом случае накопители тепловой энергии придётся ставить для каждой панели и их работу будет трудно согласовать с общей системой.

Таким образом, оптимизация структуры САЭ с использованием солнечных источников энергии (САЭС) требует комплексного подхода и, очевидно, должна производиться поэтапно.

На первом этапе, при принятии решения о инвестировании проекта необходимо определить, в принципе, составные части САЭС, количество и мощности устанавливаемого оборудования и общую структуру системы.

На втором этапе необходимо уточнить принципиальные вопросы совместной работы ДЭС и подсистем с солнечными и тепловыми панелями.

На третьем этапе целесообразно переходить к непосредственному проектированию подсистем генерирования, аккумулирования и распределения электрической и тепловой энергии.

Третий этап в настоящее время лучше всего освещён в технической литературе.

Первый и второй этапы не имеют хорошо разработанной и общепринятой методической базы. Особенно первый этап, который наиболее важен для окупаемости инвестиций.

Отсутствие общедоступной, понятной и убедительной для инвесторов методики оптимизации структуры САЭС и оценки её эффективности сдерживает распространение САЭС в Мали и в других странах.

Одному из путей решения этой проблемы посвящена эта диссертационная работа.

#### Цель диссертации:

Исследование проблем синтеза систем автономного энергообеспечения с дизельными электростанциями, солнечными, электрическими и тепловыми панелями и разработка методики оптимизации структуры и состава оборудования.

В соответствии с поставленной целью в диссертации рассматриваются следующие вопросы:

1. Анализ элементной базы и общих принципов синтеза структур САЭС.
2. Анализ типовых нагрузок автономных объектов энергообеспечения, характерных для Мали.
3. Разработка способов эффективного использования солнечных энергоисточников в сочетании с ДЭС.
4. Обоснование критерия для выбора оптимальной структуры САЭС.
5. Разработка методики синтеза оптимальной структуры САЭС.
6. Разработка алгоритма и программы расчётов на ПЭВМ оптимальной структуры САЭС.

Работа выполнена на кафедре „Электрические системы и сети” и кафедре „Энергосбережения и электрификации” в Санкт-Петербургском Государственном Техническом университете в соответствии с планами Государственного комитета Российской Федерации по высшему образованию.

#### Научная новизна работы:

- Использование эксергических методов для комплексного решения, задачи энерготехнологического аудита систем и объектов автономного энергообеспечения с использованием СЭП и СТП.
- Разработка алгоритма технико-экономической оптимизации объектов и систем автономного энергообеспечения с использованием СЭП и СТП.
- Разработка методики технико-экономической оптимизации структуры и элементной базы САЭС.
- Создание математической модели системы СЭП – АБ – инвертор – нагрузка.

#### Реализация выводов и рекомендаций работы:

Разработана методика энерготехнологического аудита, которая используется АОЗТ АРТЕС при проектировании и реконструкции объектов и систем автономного энергоснабжения. Результаты диссертационной работы используются при разработке технико-экономических обоснований САЭС в Республике Мали.

#### Положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся:

1. Принцип формирования структуры системы автономного энергообеспечения типового посёлка электроэнергией, теплом, горячей

водой и холодом от ДЭС, солнечных электрических и тепловых панелей.

2. Обоснование критериев и ограничений для комплексного анализа условий и способов построения структуры САЭС.

3. Методика синтеза оптимальной структуры САЭС.

4. Алгоритм и программа расчётов на ПЭВМ оптимальной структуры САЭС.

#### Апробация работы:

Основные результаты исследований и разработок прошли апробацию на семинарах кафедр „Энергосбережения и электрификации” и „Электрические системы и сети” СПбГТУ, на совещании в центре теплоэнергоэффективных технологий РАН при СПбВИТУ, на конференциях молодых учёных СПбГТУ и совместном семинаре Фолькецентра (Дания), АРТЭС и СПбВИТУ в Санкт-Петербурге в июле 2001г, на международной конференции в Фолькцентре Дания.

Публикации: По результатам работы опубликовано 3 печатных работы.

#### Структура и объем диссертации:

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, изложенные на 150 страницах. Содержит 58 рисунков, 30 таблиц, список литературы из 87 наименований. Общий объем работы 161 страница.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, цели и основные задачи диссертации.

В главе I рассматривается применимость солнечной энергии (СЭ) для использования в САЭ.

Как известно, САЭ предназначены для электроснабжения локальных объектов. При этом, для условий стран с жарким климатом САЭ будет включать в себя в качестве отдельно функционирующих или функционирующих как подсистемы:

- систему автономного электроснабжения (САЭ);
- систему теплоснабжения и горячего водоснабжения для бытовых и технических нужд (СТС);
- систему холодоснабжения (СХС) (централизованного для больших кондиционеров и холодильных камер и локального для бытовых нужд).

Сегодня основными источниками энергии в САЭ являются дизельные электростанции, а СТС и СХС получают энергию от САЭ.

Потребители энергии в САЭ делятся на промышленные и бытовые.

Промышленные потребители представляют собой, как правило, небольшие предприятия, использующие электроэнергию для освещения, холодоснабжения, горячего водоснабжения, привода производственных механизмов и электрообеспечения специальных технологий. Бытовые потребители используют электроэнергию, в основном, для электроосвещения, получения холода, водоснабжения, горячего водоснабжения и электропитания радиотелевизионных аппаратов.

Как правило, распределение энергии в САЭ осуществляется трехфазным переменным током со средневзвешенным  $\cos\varphi = 0,8$ . Если промышленные

потребители работают в одну смену, то график нагрузки в САЭ будет резкопеременным с пиком нагрузки в районе 8 – 9 часов утра. По этой причине в САЭ обычно энергоблок состоит из нескольких агрегатов, которые за счет параллельной работы обеспечивают близкое к оптимальному покрытие графика нагрузки. Для обеспечения теплом и горячей водой обычно используются электробойлеры (подогреватели воды) или специальные котлоагрегаты, в которых теплоноситель (вода) может подогреваться либо электричеством, либо специальной форсункой, сжигающей жидкое или газообразное топливо.

В последнее время все более популярными становятся принципы и технические решения по утилизации отбросного тепла энергетических установок (тепло охлаждения двигателя и тепло выхлопных газов). Таким образом, если в САЭ ввести устройство, использующее энергию солнца, то, очевидно, что солнечная энергия может быть направлена на производство электрической энергии, тепла и холода. Поэтому, количество и тип преобразователей солнечной энергии будут зависеть от потребности объекта в электроэнергии, тепловой энергии и в холоде. При этом, надо иметь в виду, что электроэнергия легко преобразуется в тепло и холод, а тепловая энергия может быть преобразована как в холод, так и в электроэнергию.

Выбор числа, типа и мощности солнечных преобразователей является комплексной технико-экономической задачей. Практическое решение такой задачи сводится к оптимизации по соответствующим критериям, представленной ниже, обобщенной структуры системы автономного энергообеспечения с солнечными преобразователями (САЭС) (Рис.1.), где:

1-С.Э.П.- Солнечно - электрические панели, 2- С.Т.П. - Солнечно-тепловые панели, 3-Коммутационные аппараты, 4-Инвертор, 5- А.Б.- Аккумуляторной батареи, 6- Электрические потребители 1-ой категории, 7- Электрические потребители 2-ой и 3-ой категории, 8- Потребители тепла, 9- Потребители холода, 10- Тепловой аккумулятор, 11-Система утилизации тепла, 12 -Автомат генератора, 13-Электрохолодильная установка, 14-Преобразователь тепла/холода, 15-Выпрямитель.

В представленной структуре выбираются элементы: 1, 5, 2, 15, 4, 10, 11, 13, 14. При этом необходимо иметь в виду что если вся система создается заново, то тогда еще выбирается и количество и мощность дизель-генератора ДГ дизельной электростанции (ДЭС).

Выбор всех этих элементов САЭС производится на основании технико-экономического анализа, в основе которого лежит принцип минимизации цены вырабатываемой энергии с учетом всех затрат (капитальных, эксплуатационных, процента по выплате кредита).

Как известно, СЭП прямого преобразования солнечного света в электроэнергию, представляют собой установленные на соответствующей плоской поверхности фотоэлементы. Стоимость такой СЭП будет зависеть от общей площади поверхности самих фотоэлементов. Удельные капитальные затраты на СЭП будут достаточно высокими и, в отличие от традиционных



энергоисточников (ДЭС), с увеличением требуемой мощности будут возрастать.

Для обеспечения нормального функционирования СЭП необходима аккумуляторная батарея (АБ). Без АБ СЭП не может обеспечить переменную нагрузку и бесперебойное электроснабжение в период отсутствия солнца (ночью и в пасмурную погоду). АБ обеспечивает аккумуляцию солнечной энергии и демпфирование изменения нагрузки. Без АБ не сможет нормально функционировать инвертор. Высокое внутреннее сопротивление СЭП при отсутствии АБ приведет к большим колебаниям напряжения на нагрузке при её изменении. Следовательно, затраты (капитальные и эксплуатационные) на АБ должны относиться к затратам на комплект СЭП.

Так как в САЭС распределение энергии осуществляется на переменном токе, то обязательно составной частью преобразования СЭ в электрическую будет инвертор, который также должен включаться в стоимость комплекта СЭП.

Очень важным для эффективного электроснабжения будет выбор оптимальной структуры системы. Проблема заключается в том, что в локальных системах нагрузка всегда резкопеременная, особенно при наличии промышленных потребителей, а это, соответственно, потребует либо выбора СЭП и АБ по пику нагрузки, либо создания автоматических управляемых систем адаптивной структуры.

Обобщённая структура САЭС будет адаптивной, если схема соединения и автоматической коммутации СЭП, АБ, инвертора, нагрузка и ДЭС обеспечивает работу каждого из них при изменении нагрузки в оптимальном режиме.

Для объектов, у которых большая часть энергии требуется в виде тепла и холода, (например, консервный завод по переработке сельскохозяйственной продукции) целесообразно солнечную энергию непосредственно преобразовать в тепло и холод. Для этого существует, как уже отмечалось, солнечные тепловые панели (коллекторы), где теплоноситель (вода) может быть нагрета до  $100^{\circ}$ , а также есть установки, в которых это тепло может быть прямо преобразовано в холод.

Основные проблемы оптимизации обобщенной структуры САЭС будут заключаться в следующем:

1. При круглосуточной потребности в тепле и холоде, необходим аккумулятор тепловой энергии (АТЭ), т.к. график нагрузки на СТС и СХС может оказаться неравномерным, а использование солнечной энергии возможно только в дневное время, и выработка электроэнергии может оказаться неравномерной.
2. Графики электрической и тепловой нагрузки могут не совпадать, и тогда может оказаться выгодным избыток электроэнергии от СЭП и ДЭС использовать для получения тепла и холода.
3. При значительной электрической нагрузке на ДЭС и потребности в тепловой энергии выгодно использование технических средств утилизации тепла охлаждения ДЭС и выхлопных газов.
4. Если без ДЭС не обойтись из-за значительной электрической нагрузки в ночное время, то необходимо обеспечить экономичный режим работы ДЭС, который возможен при нагрузке на ДЭС (70-80)% от номинальной.

Всё перечисленное выше говорит о том, что структура САЭС может быть экономически и технически оправдана только тогда, когда на основе энерготехнологического аудита объекта, получены достоверные данные о его нагрузках и их режимах функционирования. После этого может быть разработана структура энергобаланса в САЭС и выполнены оптимизационные расчеты по составу и основным параметрам оборудования.

Глава II посвящена источникам энергии для систем автономных энергообеспечения с использованием энергии солнца (САЭС).

Дизельные или газотурбинные электростанции (ДЭС или ГТУ) являются неотъемлемой частью САЭ, используемых там, где электроснабжение от Государственной электросети должно быть продублировано или невозможно по условиям эксплуатации.

В системах автономного энергоснабжения с использованием энергии солнца (САЭС) ДЭС необходима, как источник энергии для ночного времени, плохой погоды, для заряда аккумуляторных батарей (АБ) и при аварии СЭП.

ДЭС могут также потребоваться в САЭС для покрытия пика нагрузки, а также по экономическим соображениям, когда нецелесообразно устанавливать СЭП на полную мощность потребителей.

Для САЭС очень важно чтобы ДЭС была многотопливной.

Для Мали и других стран Африки большой интерес для использования в САЭС могли бы представлять ДЭС, работающие на растительных маслах (рапсовое, маисовое, пальмовое) и на спиртах, получаемых в результате брожения и перегонки отходов сахарного производства.

Для стран Африки, где есть природный газ, большой интерес представляли бы ДЭС, работающие на газе. Для САЭС республики Мали представляют интерес ДЭС работающий на биогазе, получаемом из отходов животноводства.

Для САЭС, в составе которой имеются потребители тепла, целесообразно в контуре охлаждения иметь устройство утилизации отбросного тепла, а также использовать тепловую энергию выхлопных газов.

Для САЭС, где есть потребители холода, целесообразно в системах охлаждения ДЭС и в контуре выхлопных газов иметь устройство преобразования тепловой энергии в холод. Такие устройства разработаны и представляет собой абсорбционные системы, в которых тепло от контура охлаждения ДЭС и выхлопных газов может непосредственно преобразовано в холод.

Для Мали очень актуальным является непосредственно превращении отходящего тепла в холод.

Для того, чтобы объединить в одну систему энергообеспечения ДЭС, СЭП и СТП необходимо решить ряд проблем.

К техническим проблемам создания САЭС относятся:

1. Проблема электрофизической совместимости СП, АБ инвертора и нагрузки.
2. Проблема работы синхронного генератора (СГ) ДЭС совместно с выпрямительной - инверторной нагрузкой.
3. Проблема обеспечения качества электроэнергии в САЭС при динамических режимах (пуск потребителей соизмеримой мощности с ДЭС), и переходных режимах (при переключении потребителей с СЭП на ДЭС и обратно.)

4. Проблема нормализации гидравлических режимов в контурах СТС.

5. Оптимизация конструктивных решений по САЭС для обеспечения максимальной заводской готовности и соответственно быстрой сборки и ввода в эксплуатацию на месте применения.

Одна из главных – это проблема электрофизической совместимости СП, АБ инвертора и нагрузки:

Эта проблема может быть решена правильным выбором схемы соединения солнечных элементов, емкость АБ и схема подключения инвертора.

Поскольку использование фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) в инфраструктуре системы автономного электроснабжения наиболее эффективно в комплекте с накопителем энергии, в качестве которого чаще всего встречается аккумуляторная батарея (АБ), то, в диссертации уделено внимание построению математической модели системы ФЭП - АБ.

В модели приняты следующие допущения:

- СЭ не имеет повреждений;
- СЭ работают без частичного затемнения их воспринимающей поверхности.

Классическая эквивалентная схема ФЭП с сосредоточенными параметрами представлена на рис.2.

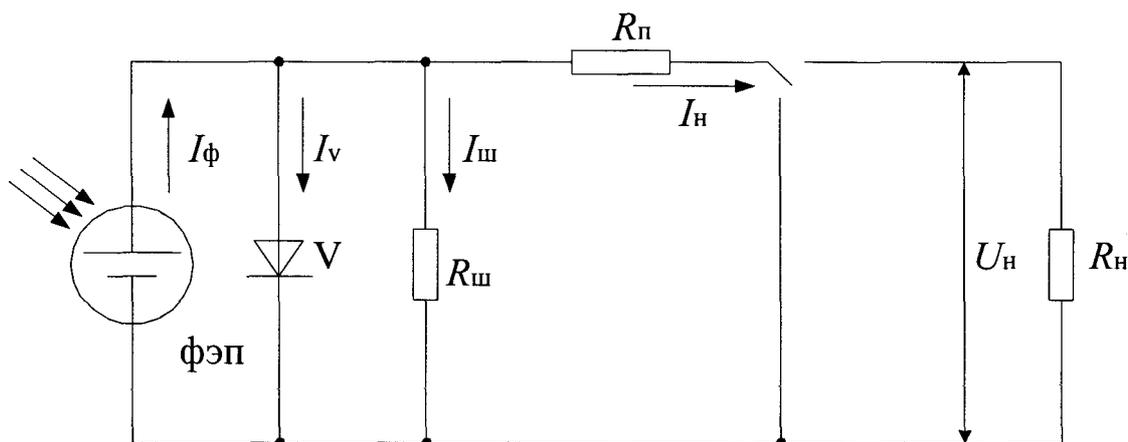


Рис.2. Эквивалентная схема включения ФЭП на нагрузку.

V - шунтирующий диод; R<sub>ш</sub> - шунтирующее сопротивление; R<sub>н</sub> - сопротивление нагрузки; R<sub>п</sub> - последовательное сопротивление ФЭП.

Уравнение токов для цепи ФЭП-R<sub>н</sub> с учетом шунтирующих диодов V с сопротивлением R<sub>ш</sub> и сопротивлением цепи R<sub>п</sub>:  $I_n = I_\phi - I_v - I_{ш}$ , (1)

где I<sub>н</sub> - ток нагрузки; I<sub>φ</sub> - фототок (ток батареи ФЭП); I<sub>v</sub> - ток, протекающий через шунтирующий диод; I<sub>ш</sub> - ток, протекающий через шунтирующее сопротивление.

Аналитическое выражение вольт-амперной характеристики ФЭП.

$$I_n = I_\phi - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(U_n + R_n I_n)}{kAT}\right] - 1 \right\} - \frac{U_n + R_n I_n}{R_{ш}}, \quad (2)$$

где I<sub>0</sub> - обратный ток насыщения; q - заряд электрона; U<sub>н</sub> и I<sub>н</sub> - напряжение и ток на нагрузке; k - постоянная Больцмана; A - параметр ВАХ ФЭП, называемый диодным фактором; T - абсолютная температура солнечного элемента.

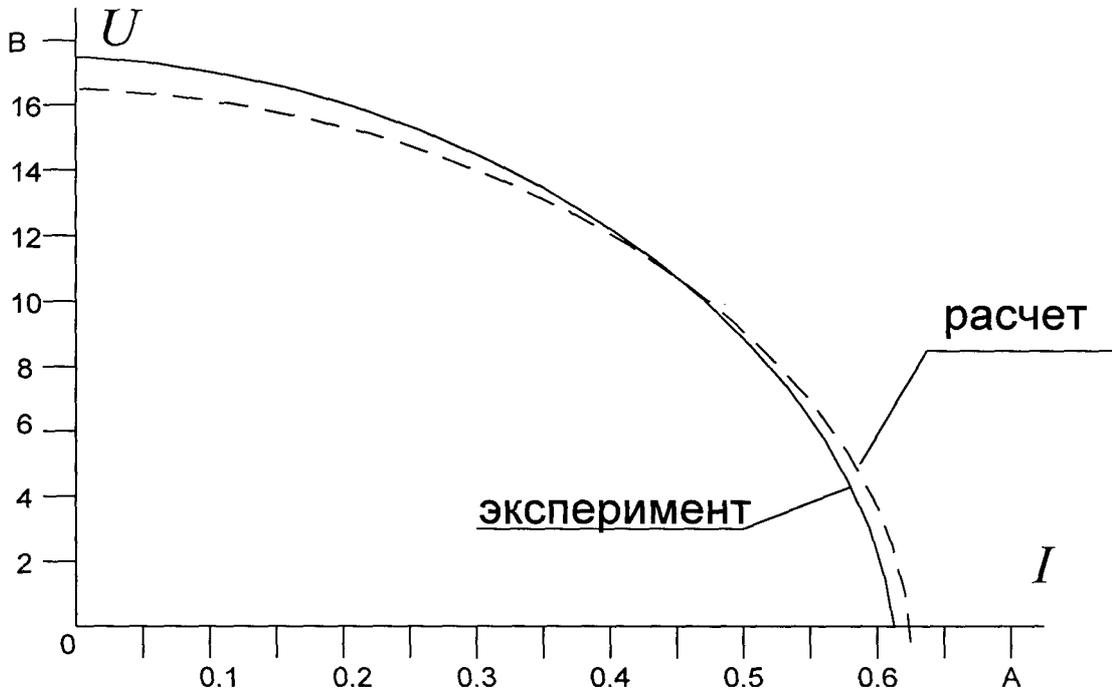


Рис.3. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи типа "Старт БС - 3"  
 На рис.3. (пунктирной линией) приведена рассчитанная по (2) вольт-амперная характеристика ФЭП.

Пятипараметрическую модель ВАХ ФЭП по (2) можно упростить до четырехпараметрической, если принять допущения о том, что  $R_{ш} = \infty$ , т.е. сопротивления всех шунтирующих цепей бесконечно. Тогда получим

$$I_H = I_{\phi} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(U_H + R_{п} I_H)}{kAT}\right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

а если уже к принятому допущению принять  $R_{п} = 0$ , то получим трехпараметрическую модель ВАХ ФЭП, имеющей вид

$$I_H = I_{\phi} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{qU_H}{kAT}\right] - 1 \right\}, \quad (4)$$

для пятипараметрической модели

$$I_{\phi} = \frac{I_{кз} (R_{ш} - R_{п})(\exp(qU_{xx} / kAT) - 1) - U_{xx}(\exp(qI_{кз}R_{п} / kAT) - 1)}{R_{ш}(\exp(qU_{xx} / kAT) - \exp(qI_{кз}R_{п} / kAT))}; \quad (5)$$

$$I_0 = \frac{I_{кз} (R_{ш} + R_{п}) - U_{xx}}{R_{ш}(\exp(qU_{xx} / kAT) - \exp(qI_{кз}R_{п} / kAT))}; \quad (6)$$

для четырехпараметрической модели

$$I_{\phi} = I_{кз} \frac{\exp(qU_{xx} / kAT) - 1}{\exp(qU_{xx} / kAT) - \exp(qI_{кз}R_{п} / kAT)}; \quad (7)$$

для трехпараметрической модели

$$I_{\phi} = I_{кз}; \quad (8)$$

$$I_0 = \frac{I_{кз}}{\exp(qU_{xx} / kAT)} ; \quad (9)$$

Таким образом, уравнение (2) или система двух уравнений (5) и (6) представляют собой наиболее общий вид математической модели ФЭП, отображающей физические основы работы солнечных элементов. Эта модель ФЭП легко стыкуется с моделью аккумуляторной батареи (АБ), обязательно присутствующей в комплекте с ФЭП в СЭС.

Для математического описания АБ учтем, что по своему принципу работы процессы, протекающие при заряде АБ обратны по своей природе тем, которые имеют место при разряде. Следовательно, в источнике тока, подвергающемся заряду, отрицательным электродом (катодом) является тот, который подвергается восстановлению, а положительным электродом (анодом)-электрод, на котором протекает реакция окисления. Таким образом, один и тот же электрод АБ может являться и анодом, и катодом в зависимости от того, подвергается ли источник заряду или разряду. Для математической модели АБ это означает, что процессы заряда и разряда батареи описываются одними и теми же уравнениями, имеющими противоположные знаки перед напряжением (током).

Для осуществления заряда АБ при условии  $U_3 = \text{const}$  напряжение источника питания должно удовлетворять условию  $U_{и} = U_3$ . При этом последовательно с АБ необходимо включать реостат небольшого сопротивления для ограничения зарядного тока в начальный (пусковой) период.

Полное внутреннее сопротивление АБ, как химического источника тока, равно:  $R_{в} = R_0 + R_{п} = R_0 + (E_{п} / I_3)$ , (10)

где  $R_{в}$ -полное внутреннее сопротивление АБ;  $R_0$  и  $R_{п}$ —омическое сопротивление и сопротивление поляризации АБ;  $E_{п}$ -ЭДС поляризации АБ;  $I_3$ -ток заряда(разряда) АБ.

Омическое сопротивление  $R_0$  в (10) представляет собой сумму сопротивлений электродов и электролита. Появление сопротивления поляризации  $R_{п}$  обусловлено изменением электродных потенциалов при прохождении тока, величина его зависит от тока, т.е. не подчиняется закону Ома.

Полное внутреннее сопротивление  $R_{в}$  при заряде и разряде АБ определяются зависимостями:

$$R_{вз} = \frac{U_3 - E}{I_3} ; \quad R_{вр} = \frac{E - U_p}{I_p} , \quad (11)$$

где  $R_{вз}$  и  $R_{вр}$  — полное внутреннее сопротивление при заряде и разряде;

$U_3$  и  $U_p$  - напряжение заряда и разряда АБ;  $I_3$  и  $I_p$  - токи заряда и разряда АБ;

$E$  - ЭДС на зажимах АБ при заряде (разряде).

Из второго уравнения (11) с учетом (10) следует

$$U_p = E - R_{вр}I_p = E - E_{п} - R_0I_p \quad (12)$$

т.е. при постоянстве разрядного тока  $I_p$  и температуры электролита разрядное напряжение АБ уменьшается во времени вследствие увеличения  $E_{п}$ .

При заряде АБ справедливо выражение

$$U_3 = E + R_{вз}I_3 = E + E_{п} - R_0I, \quad (13)$$

т.е. при постоянстве зарядного тока  $I_3$  и температуры электролита зарядное напряжение АБ увеличивается во времени вследствие увеличения  $E_{п}$ .

Достоинством математического описания системы ФЭП-АБ для случая заряда является хорошая непосредственная стыковка моделей ФЭП-АБ, т.к. выходное напряжение ФЭП является в то же самое время входным напряжением заряжаемой АБ.

Так, подставив значения тока нагрузки  $I_n$  ФЭП из (2) или (5) с учетом (6) в (13) получим математическую модель фотоэнергетического преобразователя, т.е. системы ФЭП-АБ.

Поэтому при использовании уравнений (2) и (5) для моделирования системы ФЭП-АБ следует иметь ввиду только ту часть тока  $I_n$  нагрузки ФЭП, которая идет на заряд АБ, т.е. справедливо равенство  $I_n = I_3$ . (14)

Если заряд АБ осуществляется при постоянстве зарядного напряжения, то справедливо равенство  $U_n = U_3$ . (15)

Подставив величины  $I_3$  и  $U_3$  из (14) и (15) в первое уравнение (11) с учетом (2), (5) и (6), получим

$$I_3 = I_n = I_{\phi} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_n - R_{п}I_n)}{kAT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_n - R_{п}I_n}{R_{ш}}, \quad (16)$$

откуда получим

$$E = U_n - R_3 \left[ I_{\phi} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_n - R_{п}I_n)}{kAT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_n - R_{п}I_n}{R_{ш}} \right]. \quad (17)$$

Система уравнений (14) - (17) представляет собой обобщенную математическую модель системы ФЭП - АБ при заряде последней. Адекватность модели ФЭП подтверждена его экспериментальной ВАХ (рис.4). Максимальное расхождение, как следует из рисунка, не превышает 10%.

Приведенная выше модель позволяет привести оптимизационные расчеты структуры „СП – АБ – Выпрямитель - Инвертор”.

В главе III разработаны принципы анализа энергетических потребностей объектов и формирования базы исходных данных САЭС. В качестве примера рассмотрен типовой посёлок в Мали, в котором есть следующие потребители: коттеджи, гостиница, супермаркет, ресторан, почта, школа, поликлиника и дискотека.

Разработана и продемонстрирована на этом примере методика энерготехнологического аудита, которая включает в себя специальную „Анкету потребителя” и последовательность обработки результатов анкетирования. Конечными итогами этой обработки должны быть графики: „Общего суточного потребления тепла”, „Общего суточного потребления электроэнергии”, „Общего приведенного потребления энергии при питании объекта от ДЭС”, „Интегральный график потребления энергии”, „Графики потребления энергии отдельными объектами”.

Эти графики являются исходными данными для последующей процедуры оптимизации структуры и состава САЭС.

Идея процедуры оптимизации заключается в следующем:

1. Сначала считая, что источник энергии один – ДЭС, определяем её мощность, величину капитальных и эксплуатационных затрат и приведенную стоимость 1кВт.ч. энергии ( $C_{уд}$ ).
2. Постепенно часть мощности ДЭС замещается солнечными и тепловыми панелями на отдельных объектах, при введении их в общую структуру САЭС, каждый раз подсчитывается  $C_{уд}$ . При этом, естественно, СЭП и СТП устанавливаются сначала на тех объектах, где совпадают графики нагрузок с активностью солнца, а затем на тех, где выгодно использовать аккумулированную энергию.

В главе IV разработан алгоритм и программа расчёта на ПЭВМ, позволяющие реализовать изложенную выше идею оптимизации САЭС. В основе оптимизации лежит принцип достижения минимальной приведенной удельной стоимости энергии  $C_{уд}$ .

$$C_{уд} = \frac{\sum Z_k * \frac{1}{T_0} + \sum Z_э + \Delta_t * \frac{1}{T_0}}{W_r} \quad (18)$$

где:

1.  $Z_k$ - общие капитальные затраты в год:

$$Z_k = Z_{k1} + Z_{k2} + Z_{k3} \quad (19), \text{ при этом:}$$

$Z_{k1}$  - капитальные затраты на ДЭС (дизельную станцию) в год,

$Z_{k2}$  - капитальные затраты для СЭП (солнечные электрические панели) в год,

$Z_{k3}$  - капитальные затраты для СТП (солнечные тепловые панели) в год.

2.  $T_0$  – заданный минимальный срок окупаемости (3 года).

3.  $Z_э$  – общие эксплуатационные затраты в год:

$$Z_э = Z_{э1} + Z_{э2} + Z_{э3} \quad (20), \text{ при этом:}$$

$Z_{э1}$  - эксплуатационные затраты по ДЭС в год,

$Z_{э2}$  - эксплуатационные затраты на СЭП в год,

$Z_{э3}$  - эксплуатационные затраты на СТП в год.

4.  $W_r$  – суммарное количество энергии, потребляемое объектом в год – определяется по графику нагрузки (Квт.час).

$$W_r = \int_0^{24} (P_f * dt) * T_r \quad (21),$$

Если есть сезонные изменения то:

$$W_r = \sum_{n1}^{n2} \int_0^{24} (P_{fi} * dt) * T_r \quad (22)$$

Используется формула дисконтирования по сложным ставкам:

$$\Delta_0 = \frac{\Delta_t}{(1+E)^t} = \Delta_t * (1+E)^{-t} \quad (23)$$

Алгоритм (рис.4), представлен в главе IV учитывает электрофизические и эксергические особенности ДЭС, СЭП и СТП путём введения ряда обоснованных ограничений и допущений, главными из которых являются:

1. Зона оптимальных нагрузок для ДЭС.
2. Зависимости удельных эффективных расходов топлива ДЭС от нагрузки.
3. Зоны электрофизической совместимости инверторной нагрузки с генератором ДЭС.
4. Зоны оптимальных режимов заряда и разряда аккумуляторных батарей СЭП.

Пример расчёта подтверждает, что Суд при замещении части мощности ДЭС на СЭП и СТП будет вначале возрасти, затем снижаться, затем снова расти. Вид этой кривой и точка минимума  $C_{уд}$  будут зависеть от суточных графиков потребления энергии отдельными объектами и общей структуры энергопотребления посёлка (деревни).

Оптимальной будет структура и её состав, когда  $C_{уд} = \min$ .

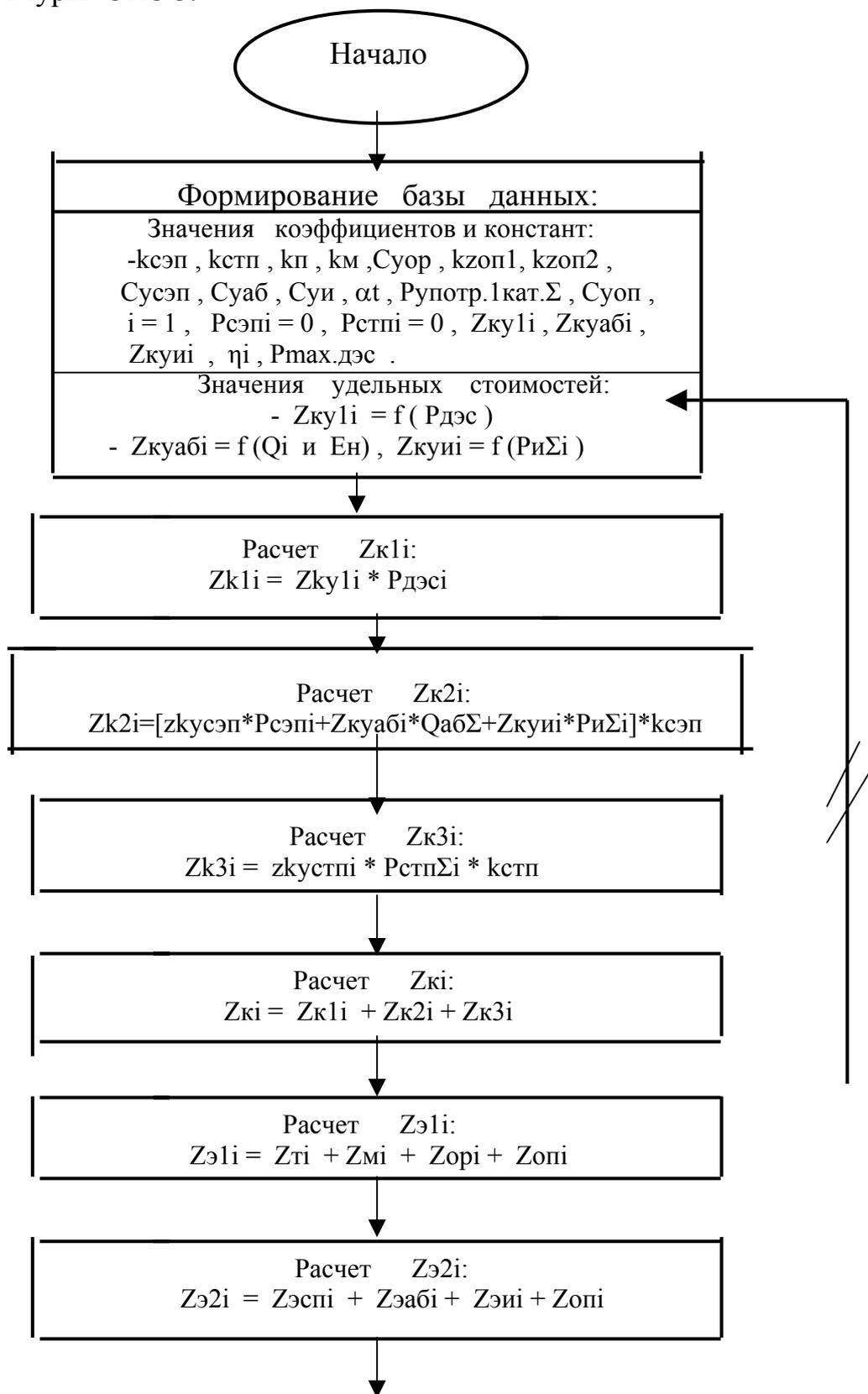
В главе V представлена программа оптимизационных расчетов структуры САЭС и пример расчета, в котором согласно принятой методики на основании энерготехнологического аудита посёлка сформирована база данных и осуществлен перебор вариантов структуры САЭС, в результате которого найдено оптимальное сочетание установленной мощности ДЭС, СЭП и СТП. Для рассматриваемого посёлка получилось что Суд. при питании посёлка только от ДЭС будет равно 0,2465\$/кВт. Если 11% мощности ДЭС заменит СЭП и 89% потребности посёлка в тепловой энергии обеспечивать от СТП то Суд. будет равно 0,1577\$/кВт.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Анализ современного состояния энергообеспечения локальных объектов в Республике Мали подтвердил актуальность научных разработок, посвященных использованию САЭС.
2. Выполненный энерготехнологический аудит и полученные данные о характерных нагрузках типовой деревни и их режимах функционирования могут быть использованы в условиях Республики Мали при проектировании систем энергоснабжения.
3. Разработанная автоматизированная обобщенная структура САЭС при использовании комбинированных систем автономного энергоснабжения промышленных и бытовых потребителей с использованием солнечной энергии может рассматриваться как база для организации и проведения подобных разработок не только в Республике Мали.
4. Подтверждены и техническая и экономическая целесообразность создания единой структуры САЭС с базовым источником – ДЭС и работающими в составе этой структуры СЭП и СТП.
5. Разработанные алгоритм и программа на ПЭВМ позволяют по заданной

конфигурации объекта выполнить оптимизационные расчеты, необходимые для выбора мощности ДЭС, солнечных электрических панелей (СЭП) и тепловых (СТП), чтобы среднегодовая приведенная удельная стоимость энергии объекта (Суд) была минимальна.

6. С помощью разработанного программного комплекса выполнены расчеты по оптимизации структуры САЭС.



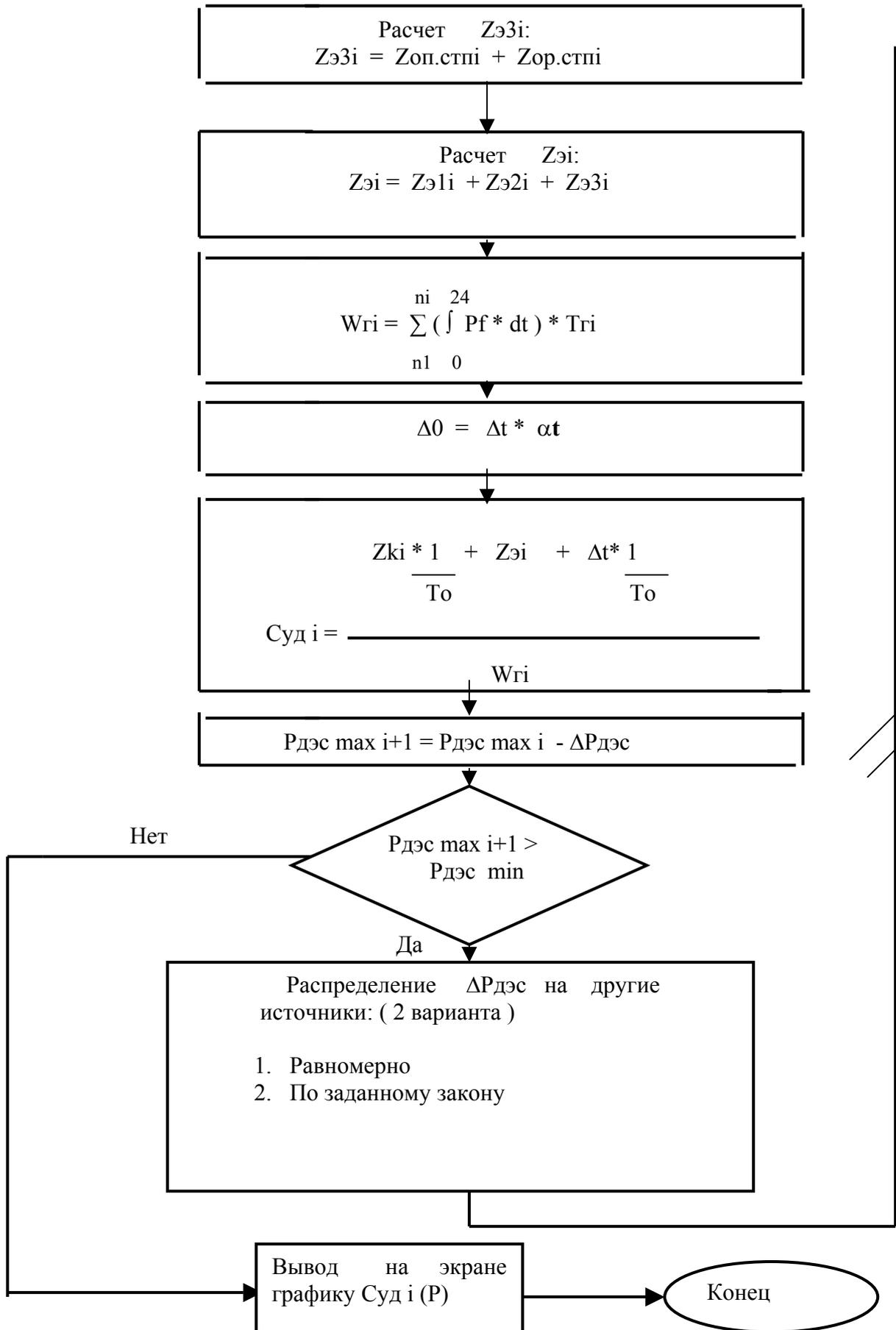


Рис.4.

Таким образом, в диссертации дано решение научной и практической проблемы совершенствования систем автономного энергоснабжения с ДЭС, СЭП и СТП.

Разработанную программу можно использовать в качестве советчика инженера при проектировании САЭС.

Основные положения диссертации отражены в публикациях:

1. Траоре Усман «Методика синтеза структур автономных систем энергообеспечения при использовании энергии солнца.» /Сборник докладов С-Петербургской Ассамблеи молодых ученых и специалистов 14 – 19 декабря 2000г, СПбГТУ.
2. Траоре Усман, Толмачев В.Н. «Комбинированные системы автономного энергоснабжения промышленных и бытовых потребителей с использованием солнечной энергии.» /Сборник докладов Международной научно-практической конференции 16 – 17 апреля 2001года - Санкт-Петербург.
3. Траоре Усман, Толмачев В.Н., Вессарт В. «Принципы рационального использования энергии солнца и ветра в системах автономного электроснабжения с ДЭС». Тезисы докладов Международной конференции по возобновляемым источникам энергии. Фолькцентр Дания 2001г.