

На правах рукописи

АРОНОВА ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ
АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ СОЛНЕЧНЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена на кафедре «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Грилихес Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор

Елистратов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Виссарионов Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент

Стеганов Геннадий Борисович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина)».

Защита состоится «6» апреля 2010 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, гидрокорпус II, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.17

доктор технических наук, профессор



Сидоренко Г.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Более 70 % территории России это районы децентрализованного или ненадежного централизованного энергоснабжения, где основными источниками электроэнергии являются автономные топливные электростанции. Альтернативой таким электростанциям могут выступать системы на основе солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ), преобразующих экологически чистый возобновляемый источник энергии (ВИЭ) – солнечное излучение (СИ). Возможность такой замены подтверждается оценкой потенциала солнечных ресурсов России. Среднегодовые суммы поступающего СИ во многих районах страны, в том числе и таких, где ощущается недостаток централизованного электроснабжения (например, Забайкалье), больше, чем на территориях Германии или Испании, где уже сейчас массово применяют солнечные установки.

Следует учитывать и мировые тенденции развития производства солнечных фотоэлектрических систем, которое начиная с 2000 г. растет в среднем на 30 – 40 % в год, достигнув в 2008 г. показателя в 7,1 ГВт (пик). Суммарные установленные мощности в 2008 г. превысили 14,7 ГВт (пик).

В настоящее время наиболее часто применяют неподвижные ориентированные на юг солнечные фотоэлектрические установки с кремниевыми солнечными элементами (СЭ), а также следящие установки с концентраторами СИ и многопереходными СЭ. Однако сегодня практически отсутствуют методы и подходы, позволяющие определять области и территории эффективного использования СФЭУ различных типов с учетом особенностей их функционирования в составе систем автономного электроснабжения (САЭС), которые могут включать другие возобновляемые источники энергии, например ветроэлектрическую установку (ВЭУ), а также дизельный или бензиновый двигатель-генератор (ДГ, БГ) и аккумуляторные батареи (АБ).

На сегодняшний день основные недостатки известных работ по моделированию и оптимизации параметров САЭС состоят в том, что в них не рассматриваются модели солнечных фотоэлектрических установок, позволяющие оценивать их выходные энергетические характеристики при изменении параметров СИ (плотности потока, спектрального состава) и температуры СЭ. Не в полной мере выявлены особенности совместной работы СФЭУ с остальными элементами системы, в частности не учитывается изменение КПД отдельных устройств в зависимости от мощности проходящих через них потоков энергии. При моделировании работы аккумуляторных батарей часто не рассматриваются такие факторы как влияние температуры окружающей среды, явления старения и саморазряда. Изложенное свидетельствует о необходимости развития моделей основных элементов САЭС, с учетом особенностей их совместной работы и зависимостей КПД от значений потоков энергии, циркулирующих в системе. Выбор соответствующих этим моделям методов оптимизации позволит устранить отмеченные недостатки и корректно определить области и территории перспективного применения в САЭС установок на основе ВИЭ.

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью обеспечения потребителей, неподключенных к центральной системе электроснабжения, экологически чистой и доступной энергией, вырабатываемой системами автономного электроснабжения на базе современных солнечных фотоэлектрических установок.

Целью диссертационной работы является разработка методики обоснования параметров систем автономного электроснабжения на базе солнечных фотоэлектрических установок, а также выбор областей их перспективного применения.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработана методика, позволяющая более точно рассчитывать поступление солнечного излучения на различно ориентированные поверхности фотоэлектрических установок.

2. Развита методика определения часовых значений скоростей ветра.
3. Разработана методика расчета суточных графиков электропотребления автономных жилых домов.
4. Предложены новые модели фотоэлектрических установок, учитывающие зависимость КПД солнечных элементов от изменения параметров солнечного излучения и температуры.
5. Предложена модель системы автономного электроснабжения, учитывающая функциональные параметры элементов САЭС, особенности взаимосвязи между ними и эффективность их работы от значений потоков энергии, циркулирующих в системе.
6. Разработаны методика, алгоритм и программа обоснования структурной схемы и параметров элементов систем автономного электроснабжения.
7. Проведена оптимизация параметров систем автономного электроснабжения и определены районы территории РФ для перспективного использования в САЭС установок на основе ВИЭ.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика, существенно повышающая точность расчета краткосрочных (часовых, минутных) значений плотности потока солнечного излучения, поступающего на различно ориентированные поверхности.
2. Разработаны новые модели функционирования СФЭУ, использующие зависимости КПД солнечных элементов от параметров солнечного излучения (плотности потока, спектрального состава) и температуры.
3. Разработаны программы для моделирования и оптимизации САЭС на основе СФЭУ и определены условия эффективного применения автономных систем.
4. Выполнено районирование территории РФ для перспективного использования в САЭС установок на основе ВИЭ.

Практическая ценность работы заключается в том, что в результате проведенных исследований:

1. Разработаны новые модели и инженерные методики оценки энергетических характеристик солнечных фотоэлектрических установок.

2. Созданы прикладные программы для ПВМ, позволяющие находить оптимальные структурные схемы и параметры элементов автономных систем.

3. Разработаны практические рекомендации по выбору структурных схем и параметров элементов САЭС для районов территории РФ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчета краткосрочных значений плотностей потоков солнечного излучения, поступающих на различно ориентированные поверхности.

2. Модели функционирования фотоэлектрических установок различных типов, учитывающие зависимость энергетической эффективности солнечных элементов от их температуры и параметров солнечного излучения.

3. Методика моделирования работы и оптимизации параметров элементов системы автономного электроснабжения.

Апробация работы

Основные положения диссертации доложены на семинарах кафедры «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика» СПбГПУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, на заседании Шестой научной молодежной школы «Возобновляемые источники энергии» (2008 г.), на неделе науки СПбГПУ (2006, 2007 г.). По результатам работы опубликовано 10 научных работ, выпущено 1 учебное пособие и сделаны доклады на 33^{ей} и 34^{ой} международной конференции специалистов по фотоэлектричеству (33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, May 11–16, 2008, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, PA June 7–12, 2009).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Она содержит 140 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 14 таблиц и список используемой литературы из 126 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы научные проблемы, цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту, дана оценка новизны и практической значимости полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

В первой главе дан анализ проблем, возникающих при электроснабжении автономных потребителей в России, показаны современные тенденции производства и применения солнечных фотоэлектрических установок, перспективность использования в системах автономного электроснабжения СФЭУ с концентраторами СИ и многопереходными СЭ. Обоснован рациональный состав САЭС, включающий, как правило, солнечную и ветровую энергоустановки, аккумуляторные батареи, а также резервный источник энергии – бензиновый двигатель-генератор.

Показано, что для корректного моделирования работы САЭС необходимы реальные часовые данные о потреблении электроэнергии, о поступлении СИ на различно ориентированные поверхности СФЭУ и об изменении скорости ветра в течение каждого дня года.

Проведен критический анализ доступных данных о радиационных режимах территорий, интегрально представленных в атласах (Атласы ветрового и солнечного климатов России), климатических справочниках (Научно-прикладной справочник по климату СССР) и в компьютерных базах (NASA SSE, WRDC, METEONORM). Выявлено, что в большинстве источников приведены осредненные дневные, месячные и годовые суммы СИ, поступающего на горизонтальную или следящую поверхности, которые должны быть пересчитаны в часовые значения с учетом заданной ориентации лучевоспринимающей поверхности СФЭУ. Приведена оценка точности двух основных методов пересчета наблюдаемых значений в часовые данные. Первый из них основан на использовании дневного профиля внеземного излучения (без атмосферы). Второй – на использовании дневного профиля, отражающего поступление СИ при чистом небе. Для получения часовых значений выбран

второй метод, который показал наилучшее совпадение расчетных и наблюдаемых данных.

Во второй главе диссертации проведен расчет и сопоставление оценок значений плотности потоков СИ по различным методикам (Атвотера, Берда, Перинна, Янга, Геймарда, Винтера, Икбола) для 50 географических пунктов на территории России. Выявлено, что наилучшее совпадение расчетных и наблюдаемых данных при чистом небе позволяет получать методика Берда. Для повышения точности расчетов автором добавлены коэффициенты коррекции, которые определялись на основе метода наименьших квадратов. Такая процедура позволила сократить погрешность расчета до 10 – 12 %.

Переход к реальным условиям облачности при расчете часовых значений плотности СИ выполнен в предположении, что среднедневной профиль поступления СИ при чистом небе аппроксимирует среднедневной профиль поступления СИ в реальных условиях:

$$E_{гор_i}^{прр} = E_{гор_i}^{пр} \cdot \frac{W_{гор_j}^{прн}}{W_{гор_j}^{пр}}; E_{гор_i}^{дифр} = E_{гор_i}^{диф} \cdot \frac{W_{гор_j}^{дифн}}{W_{гор_j}^{диф}}, \quad (1)$$

где $E_{гор_i}^{пр}$, $E_{гор_i}^{диф}$ и $E_{гор_i}^{прр}$, $E_{гор_i}^{дифр}$ – часовые значения плотности прямого, диффузного СИ при чистом небе и в реальных условиях; $W_{гор_j}^{прн}$, $W_{гор_j}^{пр}$ и $W_{гор_j}^{дифн}$, $W_{гор_j}^{диф}$ – наблюдаемые расчетные среднемесячные дневные суммы прямого и диффузного СИ, падающего на горизонтальную поверхность; i и j – номера расчетного часа и дня года.

На основании уточнения расчетных зависимостей автором предложена методика расчета поступления СИ на различно ориентированные поверхности и вычислены часовые значения плотности потока СИ, приходящего на следящие и неподвижные наклонные поверхности СФЭУ. Сопоставление наблюдаемых реальных часовых сумм СИ с расчетными значениями показало хорошую сходимость анализируемых данных, расхождения в основном не превышали 15 % для прямого СИ и 10 % для полного СИ (рис. 1).

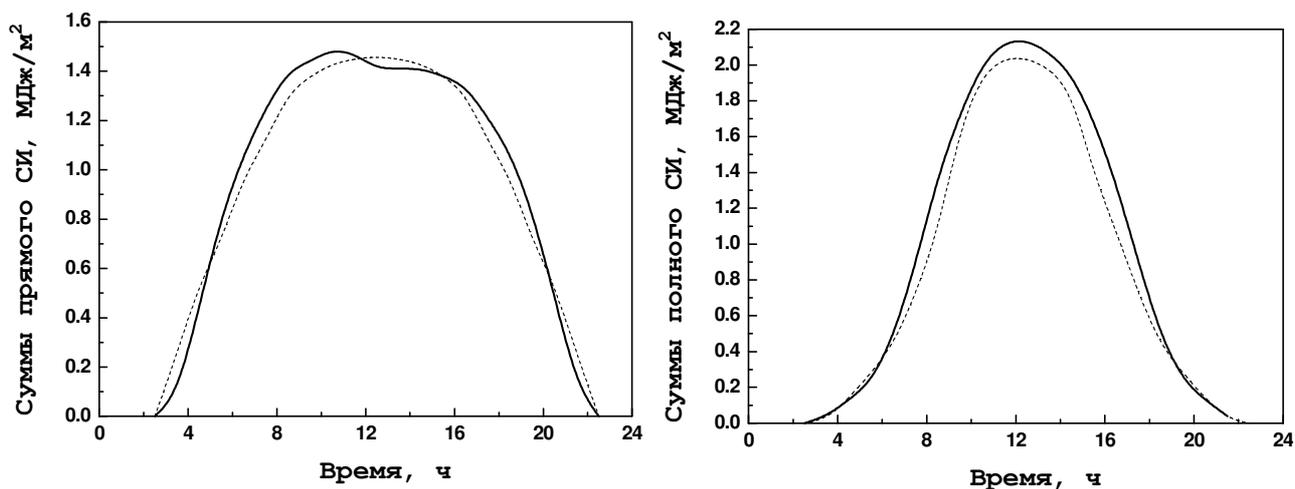


Рис. 1. Оценка поступления прямого СИ на следящую поверхность (слева), и полного СИ на наклонную поверхность (справа) для станции Воейково 17 июля: ---- расчетные значения; — значения, вычисленные по наблюдаемым данным

Для моделирования работы ветроэлектрической установки разработан алгоритм формирования часовых значений скорости ветра на основе функциональной зависимости:

$$u_{i,j} = f(u_j^{\text{ср.сут}}, \beta, \gamma, C_v), \quad (2)$$

где $u_j^{\text{ср.сут}}$ – наблюдаемые среднемесячные суточные значения скорости ветра, м/с; β, γ – параметры функции распределения Вейбулла-Гудрича; C_v – коэффициент вариации.

В третьей главе обоснована структурная схема и элементная база системы автономного электроснабжения (рис. 2). Предложена математическая модель САЭС, определены режимы работы её элементов, получены уравнения для потоков энергии, циркулирующих в системе при каждом режиме. Разработаны модели элементов САЭС, учитывающие изменение их КПД в зависимости от значений потоков энергии, циркулирующих в системе.

Моделирование работы *инвертора* типа OutBack VFX 3024E-CE осуществлено с учетом зависимости изменения его КПД от значений требуемой потребителю электроэнергии в каждый расчетный интервал времени i :

$$\eta_i^{\text{прям}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{F^{\text{ИНВ}} \cdot k} + \frac{k}{0.5 - k + \sqrt{0.25 - k}}}; \eta_i^{\text{ИНВ}} = \frac{\eta_i^{\text{прям}}}{1.23 - 0.23 \cdot \eta_i^{\text{прям}}}, \quad (3)$$

где $\eta_i^{\text{прям}}$ – КПД инвертора при преобразовании постоянного напряжения в переменное прямоугольное, о.е.; $\eta_i^{\text{ИНВ}}$ – КПД инвертора при преобразовании напряжения в переменное синусоидальное, о.е.; $F^{\text{ИНВ}}$ – показатель эффективности прибора; $k = 0,04 \cdot (P_i^{\text{ПОТР}} / P_{\text{НОМ}}^{\text{ИНВ}})$ – коэффициент, определяемый значением часового потребления электроэнергии, о.е.; $P_i^{\text{ПОТР}}$ – мощность электропотребления, Вт; $P_{\text{НОМ}}^{\text{ИНВ}}$ – номинальная мощность инвертора, Вт.

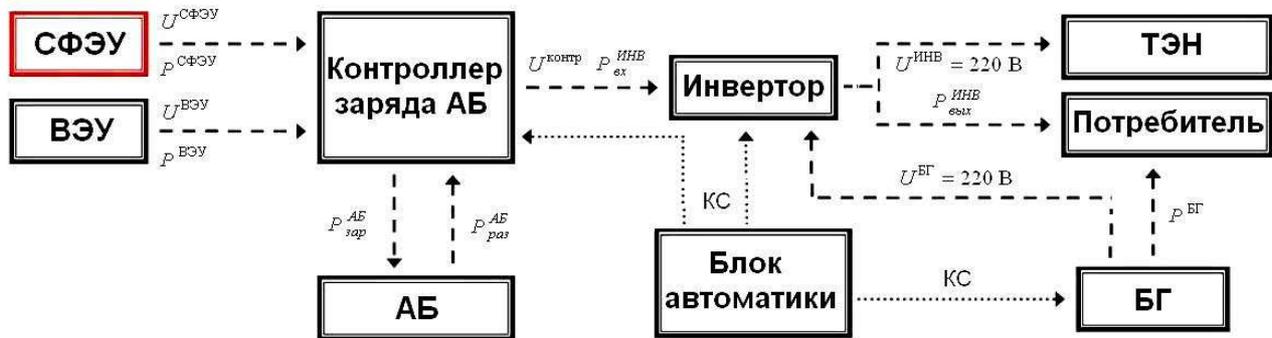


Рис. 2. Структурная схема системы автономного электроснабжения

Моделирование работы бензинового генератора в САЭС осуществлено с использованием регрессионных соотношений:

$$q_i^{\text{БГ}} = a_0 + a_1 \cdot \overline{P_i^{\text{БГ}}} + a_2 \cdot (\overline{P_i^{\text{БГ}}})^2; \eta_i^{\text{БГ}} = b_1 \cdot \overline{P_i^{\text{БГ}}} + b_2 \cdot (\overline{P_i^{\text{БГ}}})^2; \overline{P_i^{\text{БГ}}} = \frac{P_i^{\text{БГ}}}{P_{\text{НОМ}}^{\text{БГ}}}, \quad (4)$$

где $q_i^{\text{БГ}}$ – удельный расход топлива, л/кВт-ч; $\eta_i^{\text{БГ}}$ – КПД бензинового генератора; $\overline{P_i^{\text{БГ}}}$, $P_{\text{НОМ}}^{\text{БГ}}$ и $P_i^{\text{БГ}}$ – приведенное, номинальное и рабочее значение мощности бензинового генератора, Вт; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – регрессионные коэффициенты.

Регрессионные коэффициенты найдены по методу наименьших квадратов на примере БГ типа GEKO 2801 E-A/МНВА: $a_0 = 0,7919$, $a_1 = -1,069$, $a_2 = 0,6771$, $b_1 = 72,906$, $b_2 = -46,394$.

Разработана модель *аккумуляторной батареи*, в которой учитываются изменение температуры электролита, явления старения и саморазряда, а режим работы определяется степенью заряда АБ в каждый расчетный интервал i :

$$g_i = g_{i-1} \cdot (1 - \sigma_i) \pm \frac{I_i^{\text{АБ}} \cdot \Delta t \cdot \eta_i^{\text{АБ}}}{C_{\text{С}}^{\text{АБ}}}, \quad (5)$$

где g_i, g_{i-1} – степень заряда аккумуляторной батареи в расчетные интервалы $i, i-1$, о.е.; σ_i – коэффициент часового саморазряда АБ, %/час; $I_i^{\text{АБ}}$ – зарядный (разрядный) ток батареи, А; $\eta_i^{\text{АБ}}$ – КПД АБ, о.е.; $C_{\text{С}}^{\text{АБ}}$ – приведенное значение ёмкости АБ с учетом температуры электролита, А-ч.

Значения КПД аккумуляторной батареи при разряде принималось равным единице. При заряде КПД батареи определялось согласно выражению:

$$\eta_{\text{зар}_i}^{\text{АБ}} = 1 - \exp \left[\frac{k_1}{\frac{I_{\text{зар}_i}^{\text{АБ}}}{I_{10}} + k_2} \cdot (g_{i-1} - 1) \right], \quad (6)$$

где $I_{\text{зар}_i}^{\text{АБ}}$ – средний зарядный ток в промежутке времени i , А; I_{10} – $10^{\text{-ти}}$ часовой зарядный ток, А; $k_1 = 20,73, k_2 = 0,55$ – коэффициенты.

В четвертой главе диссертации выполнена комплексная оценка влияния эксплуатационных факторов (плотности потока и спектрального состава СИ, а также температуры СЭ) на энергетическую эффективность СФЭУ.

Проведено исследование изменения КПД многопереходных и кремниевых элементов от *спектрального состава и плотности потока солнечного излучения*, падающего на их поверхность при различной ориентации.

Расчет плотности фототока, генерируемого кремниевым элементом или отдельными переходами GaInP/GaAs/Ge многопереходного СЭ, осуществлялся по смоделированным программой SMARTS2 спектральным распределениям потока СИ для различных значений атмосферной массы (АМ). Отличительная особенность работы многопереходных СЭ в реальных условиях эксплуатации состоит в том, что изменение спектрального состава СИ в течение дня приводит

к изменению величин фототоков, генерируемых отдельными $p-n$ переходами многопереходного СЭ. В утренние и вечерние часы ($AMX > AM1,5$), когда в спектре превалирует красное излучение, многопереходный СЭ, оптимизированный для стандартных условий AM 1,5D, будет находиться в режиме ограничения током верхнего (первого) $p-n$ перехода. И наоборот в полуденные часы ($AMX < AM1,5$), когда в спектре основное синие излучение – в режиме ограничения током среднего (второго) $p-n$ перехода. Кремниевые же элементы практически не реагируют на изменение спектрального состава СИ.

Величина КПД СЭ для каждого значения атмосферной массы и соответствующего ему спектрального распределения потока СИ ($E_{\text{пад}}^{\text{AM}}$) находилась по формуле:

$$\eta_{\text{МН}}^{\text{СЭ}} = \frac{J_{\text{кз}} \cdot U_{\text{х.х}} \cdot F}{E_{\text{пад}}^{\text{AM}}}, \quad (7)$$

где $J_{\text{кз}}$ – плотность фототока, мА/см^2 (в случае многопереходного СЭ характеризует $p-n$ переход с наименьшим значением плотности фототока); $U_{\text{х.х}}$ – напряжение холостого хода СЭ, В; F – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики СЭ.

Оценка величины КПД СФЭУ с концентраторами СИ производилась на основе результатов измерений вольт-амперных характеристик отдельных многопереходных СЭ при кратности концентрирования излучения (отношение плотности потока СИ, падающего на СЭ, к плотности потока излучения, приходящего на линзовый концентратор) 500X и в предположении, что оптический КПД линзового концентратора составляет 80 %. Величины $U_{\text{х.х}}$ и F в первом приближении предполагались неизменными в силу их слабой зависимости от величины генерируемого СЭ фототока. КПД СЭ для стандартного солнечного спектра (AM 1.5D LAOD) составлял 32 % при 500X.

Расчетные зависимости изменения КПД СФЭУ с многопереходными СЭ и СФЭУ с кремниевыми СЭ в течение дня представлены на рис. 3. Анализ результатов показал незначительное изменение КПД СФЭУ с кремниевыми СЭ в зависимости от величины AM (3 относительных процента), которое не

учитывалось. Для СФЭУ с концентраторами СИ и многопереходными элементами сильная зависимость КПД СЭ от величины АМ (разница в течение дня может достигать до 50 относительных процентов) была учтена при моделировании работы установки. Для этого получено регрессионное уравнение, аппроксимирующее зависимость КПД СФЭУ с концентраторами СИ от величины атмосферной массы:

$$\eta_i^{\text{СФЭУ(сл)}} = \sum_{j=0}^6 \alpha_j \cdot M_i^j, \quad (8)$$

где M – значение АМ в час i ; α_j – коэффициенты регрессионной зависимости, равные $\alpha_0 = 12,9380035$, $\alpha_1 = 23,1739806$, $\alpha_2 = -16,3766884$, $\alpha_3 = 5,4062947$, $\alpha_4 = -0,9491641$, $\alpha_5 = 0,0844251$, $\alpha_6 = -0,0029855$, о.е.

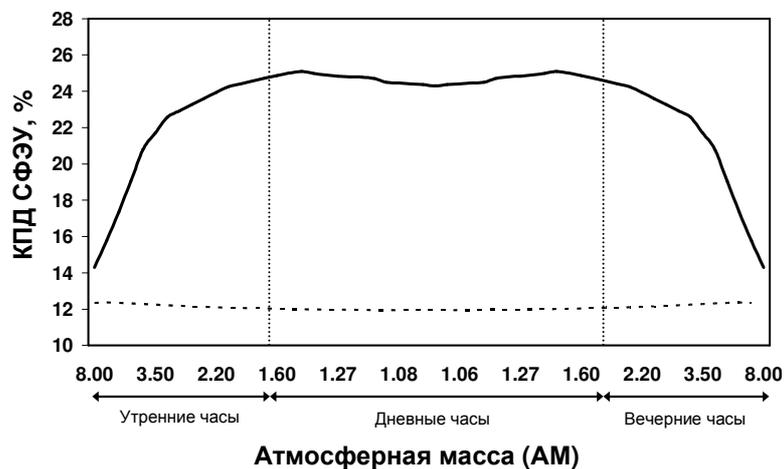


Рис. 3. Оценка изменения КПД СФЭУ: — с концентраторами СИ и многопереходными СЭ; ---- с плоскими модулями и кремниевыми СЭ

Разработаны математические модели расчета рабочей температуры многопереходного СЭ в модуле с концентраторами СИ и температуры кремниевого СЭ в плоском модуле с учетом зависимости КПД солнечных элементов от спектрального состава и плотности падающего излучения. Проведены расчеты изменения температуры и КПД СЭ для различных условий их функционирования. Значения температуры окружающей среды рассматривались в диапазоне от -25°C до $+55^{\circ}\text{C}$. Плотности полного СИ назначались в диапазоне $200 \text{ Вт/м}^2 - 1000 \text{ Вт/м}^2$, а величины скоростей ветра в диапазоне от $0 - 12 \text{ м/с}$. Начальные значения КПД СЭ принимались,

постоянными, измеренными при стандартных условиях. Расчеты выполнены для фотоэлектрического модуля, разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также для кремниевого модуля, фирмы «Солнечный ветер» г. Краснодар.

На рис. 4 приведены графики отражающие изменение температуры и КПД многопереходного и кремниевого СЭ в наилучших и наихудших из задаваемых условий работы. Результаты расчетов (рис. 4, слева) подтвердили более сильный нагрев элементов, функционирующих в модулях с концентраторами излучения, по сравнению с плоскими модулями для всех рассмотренных сочетаний метеорологических факторов. При этом, чем выше температура окружающей среды и больше плотность падающего СИ, тем меньше разница в итоговых температурах многопереходного и кремниевого СЭ.

Анализ изменения КПД элементов (рис. 4, справа) функционирующих в различных метеорологических условиях, показал колебания значений КПД кремниевых СЭ в диапазоне 11 – 20 % (AM 1.5G), многопереходных СЭ 28 – 35 % (AM 1.5D).

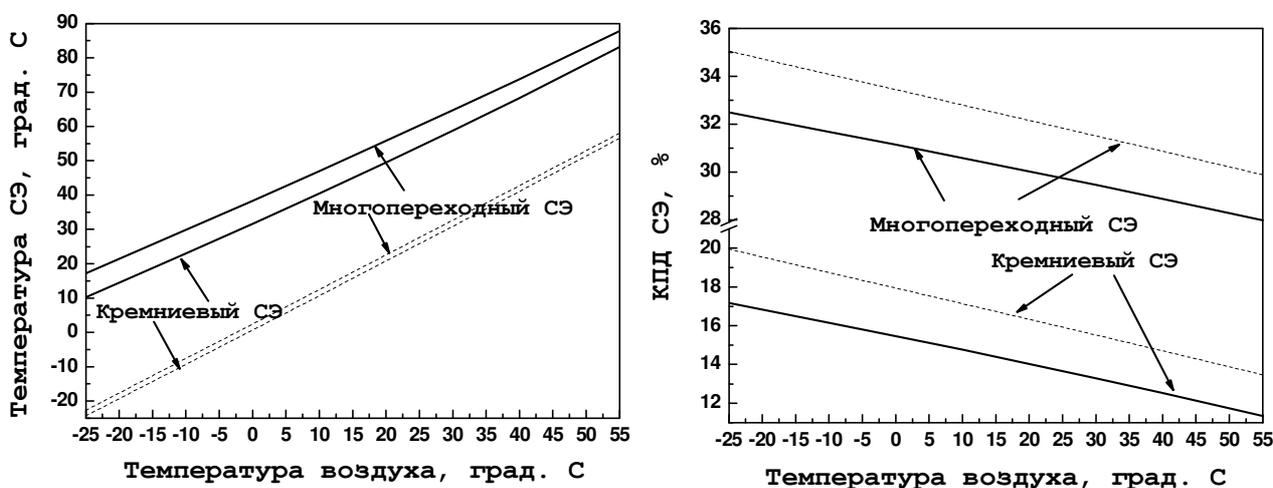


Рис. 4. Изменение температуры (слева) и КПД СЭ в плоском фотоэлектрическом модуле и модуле с концентраторами СИ (справа) в зависимости от плотности потока полного СИ и скорости ветра: — 1000 Вт/м² и 0 м/с; 200 Вт/м² и 12 м/с

В пятой главе диссертации разработаны методика и алгоритм моделирования работы и оптимизации системы автономного электроснабжения, представленной на рис. 2.

В качестве оптимизируемых параметров были приняты: площадь солнечной фотоэлектрической установки – $S^{\text{СФЭУ}}$, м²; тип солнечной фотоэлектрической установки – R ; количество аккумуляторных батарей – $n^{\text{АБ}}$, шт.; структурная схема системы автономного электроснабжения – T .

Под площадью СФЭУ понималась площадь её лучевоспринимающей поверхности, которая при расчетах задавалась кратной 1 м². При оптимизации рассматривались неподвижная, наклоненная под углом широты места СФЭУ с плоскими кремниевыми модулями ($R = 1$) и следящая за Солнцем установка с концентраторами СИ и многопереходными СЭ ($R = 2$).

Обоснование параметров САЭС проводилось для пяти видов структурных схем систем автономного электроснабжения, включающих следующие элементы: СФЭУ и БГ ($T = 1$); СФЭУ, АБ и БГ ($T = 2$); ВЭУ, АБ и БГ ($T = 3$); СФЭУ, ВЭУ, АБ и БГ ($T = 4$); БГ ($T = 5$).

Оптимальный вариант системы электроснабжения определялся на основе минимума целевой функции:

$$Z_{\Sigma}^{\text{САЭС}} = f(S^{\text{СФЭУ}}, n^{\text{АБ}}, R, T) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $Z_{\Sigma}^{\text{САЭС}}$ – суммарные затраты на систему автономного электроснабжения в течение всего планируемого периода эксплуатации, руб.

На выбранные параметры оптимизации накладывались ограничения:

$$S_{\min}^{\text{СФЭУ}} \leq S^{\text{СФЭУ}} \leq S_{\max}^{\text{СФЭУ}}; n_{\min}^{\text{АБ}} \leq n^{\text{АБ}} \leq n_{\max}^{\text{АБ}}, \quad (10)$$

где $S_{\min}^{\text{СФЭУ}} = 1$ м² и $n_{\min}^{\text{АБ}} = 1$ шт – минимальное значение площади СФЭУ и количества аккумуляторных батарей; $S_{\max}^{\text{СФЭУ}} = 100$ м² и $n_{\max}^{\text{АБ}} = 50$ шт – максимальное значение площади СФЭУ и количества аккумуляторных батарей.

Ежегодные издержки $I_t^{\text{САЭС}}$ на заработную плату, топливо, обслуживание и замену элементов системы определялись с учетом влияния инфляции r . Суммарные затраты на систему автономного электроснабжения рассчитывались как сумма капитальных вложений $K_{\Sigma}^{\text{САЭС}}$ и ежегодных

издержек за период функционирования САЭС, приведенных к нулевому году с использованием известной нормы дисконтирования d :

$$Z_{\Sigma}^{\text{САЭС}} = K_{\Sigma}^{\text{САЭС}} + \sum_{t=1}^{TP} \frac{I_t^{\text{САЭС}} \cdot (1+r)^t}{(1+d)^t}, \quad (11)$$

где t – номер расчетного года; TP – период эксплуатации САЭС, лет.

Предложен двухуровневый алгоритм обоснования структурной схемы и параметров элементов системы автономного электроснабжения:

– на первом уровне оптимизируются параметры элементов для каждой структурной схемы T путем реализации следующих этапов:

1. Моделирование работы элементов системы.

2. Определение параметров элементов системы, обеспечивающих график нагрузки потребителей. Такими параметрами являются: площадь СФЭУ, $S^{\text{СФЭУ}}$, число АБ, $n^{\text{АБ}}$, объем топлива, $m_{\text{трѐб}}^{\text{БГ год}}$, необходимый для работы БГ.

3. Расчет суммарных затрат (капитальные вложения и суммарные издержки) за планируемый срок службы системы электроснабжения как функции площади СФЭУ, количества АБ, времени работы и расхода топлива БГ.

4. Выбор сочетания параметров элементов системы, соответствующего минимальным суммарным затратам, для каждой анализируемой структурной схемы.

– на втором уровне оптимизируется тип структурной схемы САЭС по критерию минимума затрат на систему в течение всего периода эксплуатации.

Для реализации разработанной методики оптимизации параметров систем автономного электроснабжения разработано программное обеспечение в среде MATLAB, с использованием которого выполнены расчеты и определены оптимальные параметры САЭС для 50 географических пунктов на территории Российской Федерации.

На основе анализа полученных результатов сформулированы общие рекомендации по выбору параметров автономных систем для регионов с децентрализованным электроснабжением и выделены области перспективного применения в САЭС установок на основе ВИЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. На основе проведенного анализа существующих методик расчета поступления солнечного излучения на горизонтальную поверхность разработана уточненная методика определения **краткосрочных значений** плотности потока СИ, поступающего на различно ориентированные поверхности СФЭУ.

2. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование характеристик многопереходных и кремниевых солнечных элементов и на основе полученных результатов разработаны **новые** модели, учитывающие зависимость КПД установок с концентраторами СИ и многопереходными СЭ и установок с плоскими кремниевыми модулями от плотности потока, спектрального состава падающего излучения и от температуры элементов.

3. Разработана модель системы автономного электроснабжения на базе СФЭУ, учитывающая зависимости КПД её элементов от величин потоков энергии, циркулирующих в системе.

4. Разработана методика, алгоритм и предложены программы для моделирования работы и оптимизации структурной схемы и параметров элементов систем автономного электроснабжения на базе энергоустановок, использующих солнечную и ветровую энергию.

5. Сформулированы общие рекомендации по выбору параметров автономных систем для регионов с децентрализованным электроснабжением.

6. Наиболее перспективные территории РФ для использования солнечных и ветровых установок в составе САЭС Дальневосточный, Южный, Сибирский, Северо-Кавказский, Северо-Западный и Уральский федеральные округа.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Аронова, Е.С. Методика расчета реальной плотности солнечного излучения при проектировании фотоэлектрических энергоустановок. [Текст] / Е.С. Аронова, В.А. Грилихес // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб. – 2006. – № 6. – Т. 1. Естественные и технические науки – С. 62–66.
2. Aronova, E.S. On correct estimation of hourly power output of solar photovoltaic installations with MJ SC's and sunlight concentrators. [Text] / E.S. Aronova, V.A. Grilikhes, M.Z. Shvarts, N.H. Timoshina // Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, May 11-16. – 2008.
3. Аронова, Е.С. Сравнительный анализ энергетической эффективности солнечных фотоэлектрических установок различных типов. [Текст] / Е.С. Аронова, В.А. Грилихес // Гелиотехника. – 2008. – №2. – С. 10 – 17.
4. Аронова, Е.С. О влиянии реальных условий эксплуатации на энергетические характеристики солнечных фотоэлектрических установок различных типов. [Текст] / Е.С. Аронова, В.А. Грилихес, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц // Гелиотехника. – 2008. – №3. – С. 3 – 10.
5. Аронова, Е.С. Исследование систем автономного электроснабжения на базе солнечных фотоэлектрических установок с концентраторами излучения и многопереходными солнечными элементами. [Текст] / Е.С. Аронова // Возобновляемые источники энергии: материалы научной молодежной школы с международным участием – М.: Университетская книга, 2008. – Ч. I. – С. 34-40.
6. Аронова, Е.С. Оптимизация размещения фотоэлектрических установок с концентраторами излучения при проектировании солнечных электростанций. [Текст] / Е.С. Аронова, В.А. Грилихес, М.З. Шварц // Гелиотехника. – 2008. – №4. – С. 3 – 10.
7. Елистратов, В.В. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения: учебное пособие. [Текст] / В.В. Елистратов, В.А. Грилихес, Е.С. Аронова; под ред. В.В. Елистратова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 100 с.

8. Елистратов, В.В. Использование солнечных фотоэлектрических установок для сетевого и автономного электроснабжения. [Текст] / В.В. Елистратов, Е.С. Аронова, М.З. Шварц // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Экономические механизмы инновационной экономики», г. Санкт-Петербург 23-24 марта 2009 года. – С-Пб.: Изд-во НОУ МИЭП, 2009. – С. 5 – 11.

9. Aronova, E.S. The effect of temperature on the efficiency of concentrator PV modules with MJ SC. [Text] / E.S. Aronova, M.Z. Shvarts, A.A. Soluyanov // Proceeding of the 34th IEEE PVSC, Philadelphia, June 7-12. – 2009.

10. Аронова, Е.С. Технологии солнечной фотоэнергетики для электроснабжения потребителей. [Текст] / Е.С. Аронова, В.В. Елистратов // Гелиотехника – 2009. – №3. – С. 8 – 15.

11. Аронова, Е.С. Влияние метеорологических факторов на энергетические характеристики солнечных фотоэлектрических элементов. [Текст] / Е.С. Аронова, В.В. Елистратов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №3. – С. 79 – 83.