

Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Дмитриенко Виталий Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И
СОСТАВА ФОТО-ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
СЕВЕРНЫХ ПОСЕЛКОВ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
профессор Б.В. Лукутин

Томск –2018

Оглавление

Введение.....	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФОТОЭНЕРГЕТИКИ.....	10
1.1. Перспективы развития фотоэнергетики в мире и России	10
1.2. Децентрализованные системы электроснабжения в России	14
1.3. Распространенные расчетные комплексы и методы оптимизации децентрализованных систем электроснабжения.....	20
1.4. Преимущества и недостатки расчетных комплексов	30
1.5. Краткие выводы.....	32
2. АВТОНОМНЫЕ ФОТО-ДИЗЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	33
2.1. Варианты схем построения фото-дизельных электростанций	33
2.2. Факторы, определяющие технико-экономическую эффективность гибридной системы электроснабжения.....	36
2.2.1. Инсоляция и ее временное распределение	36
2.2.2. Объем и временное распределение необходимой энергии.....	40
2.2.3. Стоимость дизельного топлива и его влияние на себестоимость кВт*ч электрической энергии	46
2.3 Математическое моделирование элементов децентрализованных систем электроснабжения с фотоэлектрическими станциями	52
2.4 Краткие выводы.....	60
3. АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ГИБРИДНЫХ ФДЭС.....	61
3.1 Задачи и алгоритмы оптимизации структуры и состава фото-дизельных систем электроснабжения	61
3.2 Моделирование энергетического баланса фото-дизельной системы электроснабжения с непрерывной дизельной генерацией.....	68

3.3 Моделирование энергетического баланса гибридной системы, с возможностью отключения ДЭС	80
3.4 Краткие выводы.....	95
4. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ФОТО-ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	96
4.1 Оптимизация гибридных фото-дизельных электростанций с непрерывной дизельной генерацией в условиях северных широт Якутии	96
4.2 Влияние широты местности на оптимальный состав оборудования гибридных электростанций в условиях Якутии.....	114
4.3 Оптимизация гибридных фото-дизельных систем электроснабжения с отключаемой ДЭС	123
4.4 Краткие выводы.....	139
Заключение	140
Список литературы	142
Приложение 1	151

Введение

В настоящее время территория Российской Федерации включает огромное количество районов, не имеющих доступа к централизованному электроснабжению. В них входят, прежде всего, труднодоступные территории Сибири и Дальнего Востока. Около 130 подобных локаций общей установленной мощностью 210 МВт находятся в Республике Саха. Децентрализованные системы электроснабжения населенных пунктов обеспечиваются электрической энергией, как правило, с помощью применения дизель-генераторных установок (ДГУ) различных установленных мощностей. Объединение ДГУ образует дизельную электростанцию (ДЭС). Для обеспечения бесперебойной и продолжительной работы ДЭС необходимо снабжение станции дизельным топливом (ДТ). Доставка дизельного топлива в удаленные, труднодоступные районы с неразвитой инфраструктурой лимитирована сроками доступности водных путей и зимних автодорог, что имеет огромное влияние на стоимость ископаемых топливных ресурсов, цена которых повышается из года в год. Так, топливная составляющая в тарифе на электрическую энергию может достигать 50-80% от всех затрат.

Явно выраженными проблемами снабжения электрической энергией децентрализованных населенных пунктов являются:

1. Стоимость доставляемого дизельного топлива для ДЭС очень высока (постоянно растет), что приводит к высокой стоимости производимой электроэнергии.
2. Технологическая, территориальная изолированность и, как следствие, отсутствие какой-либо связи с центральной энергосистемой страны.
3. Оборудование эксплуатируется в тяжелых природно-климатических условиях, что становится причиной ускоренного износа электрических сетей и электрооборудования.

4. Значительный износ существующих дизельных электрических станций приводит к повышенному расходу дорогостоящего дизельного топлива, особенно в условиях значительной неравномерности графика нагрузки.

Одним из наиболее эффективных (частичных) решений подобных проблем, в местах обладающих достаточным уровнем солнечного излучения (к которым относится Якутия), является создание гибридных фото-дизельных электроэнергетических систем с использованием фотоэлектрических панелей (ФП), и современных автоматизированных дизельных электростанций. Российский и зарубежный опыт использования подобных систем показывает, что их использование позволяет успешно решать ряд задач [37, 40, 57]:

- ослабление зависимости удаленных населенных пунктов от дорогостоящего привозного топлива;
- частичное замещение выбывающих/реконструируемых мощностей;
- снижение тарифа на электрическую энергию, за счет уменьшения влияния топливной составляющей и отсутствия эксплуатационных затрат на обслуживание фотоэлектрической части комплекса;
- сокращение выбросов углекислого газа и других вредных, канцерогенных веществ, что улучшает экологическую обстановку места установки.

Подобные системы становятся актуальными ввиду, непрерывного роста цены на ДТ, в то время как цена на фотоэлектрические панели постоянно снижается.

Большое количество как российских, так и зарубежных ученых внесли значительный вклад в развитие направления возобновляемой энергетики в мире. Это такие ученые как: Безруких П.П., Воропай Н.И., Елистратов В.В., Николаев В.Г., Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Попель О.С., Соломин С.В., Bernal-Agustin Joze L., Carta J.A, Hina Fathima, Dekker J., Rodolfo Dufo-Lopez, Rauschenbach G., Ranjeva Minna, Salas V. и многие другие. В своих работах ученые предлагают различные подходы к учету непостоянного характера вырабатываемой энергии энергоисточниками на базе ВИЭ, приводят различные критерии их

экономической эффективности. Тем не менее, не смотря на большое количество работ, ряд научных задач связанных с оптимизацией структуры и состава оборудования гибридных фото-дизельных установок и режимов их работы остались не решенными, и требуют более глубокой проработки.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию этих вопросов.

Объект исследования. Децентрализованные гибридные фото-дизельные электростанции (ФДЭС), включающие в себя фотоэлектрическую и дизельную генерацию. Их функционирование рассматривается, в отдаленных труднодоступных поселках, северных территориях Якутии.

Предмет исследования. Техничко-экономические характеристики автономной гибридной ФДЭС – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), себестоимость производства кВт·ч электрической энергии и емкость аккумуляторных батарей (АКБ).

Цель работы. Создать инструмент, позволяющий оптимизировать установленную мощность составных частей гибридной ФДЭС. Получить рекомендации, по выбору схемного решения, состава оборудования и алгоритмов работы автономной гибридной электростанции, с целью достижения наилучших технико-экономических характеристик в условиях Крайнего севера.

Для реализации поставленных целей были реализованы **следующие задачи:**

1. Проанализированы факторы, определяющие технико-экономическую эффективность гибридной системы электроснабжения.
2. Сформированы математические модели элементов гибридной электростанции, и проведен анализ распространённых программных комплексов оптимизации гибридных систем.
3. Верифицирован программный комплекс PVsyst, на основе сравнения основных энергетических показателей реального объекта с расчетными.
4. Создан инструмент оптимизации установленных мощностей гибридных электростанций на основе программного продукта MS Excel,

математических моделей элементов ФДЭС и специализированного продукта для проектирования фотоэлектрических установок PVsyst.

5. Разработан алгоритм оптимизации состава гибридной электростанции с учетом требований к продлению срока службы основного генерирующего оборудования, устойчивости автономной ФДЭС.

6. Алгоритм протестирован, путем определения оптимальных установленных мощностей составных частей гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией, на примере п. Батагай.

7. Алгоритм протестирован, путем определения оптимальных технико-экономических характеристик гибридной ФДЭС с отключаемой ДЭС, на примере п. Юнкюр.

8. Получены рекомендации к выбору схемного решения ФДЭС, установленных мощностей ее составных частей, в зависимости от уровня нагрузки, широты местности в условиях Крайнего севера.

Научная новизна.

- Предложено понятие характерных суток, объединяющее уровень инсоляции, выработки электрической энергии, а также нагрузки для ограничения объема расчетов на разумном уровне, без потери информативности.
- Создана математическая модель оптимизации технико-экономических характеристик гибридной электрической станции с учетом распределения нагрузки на каждый дизельный агрегат, и генерацию фотоэлектрической станции (ФЭС) с учетом ограничивающих требований, предъявляемых к ним по условию устойчивости режимов работы.
- Получены рекомендации по выбору схемного решения, определению оптимальных установленных мощностей основного генерирующего оборудования в зависимости от уровня нагрузки и места установки

(широтный фактор) гибридных ФДЭС предназначенных к размещению в северных районах (на примере территории Якутии).

- Предложены алгоритмы определяющие последовательность действий, производимых для поиска оптимальных значений установленных мощностей генерирующего оборудования гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией и с отключаемой ДЭС.

Практическая ценность результатов работы. Методику расчета и оптимизации соотношения установленных мощностей фотоэлектрической и дизельной частей гибридного энергетического комплекса, полученную в ходе исследования, можно использовать при решении реальных задач проектирования подобных объектов, что подтверждается, актом внедрения АО «Сибирский ЭНТЦ» - институт «ТомскТЭП» от 10.09.2015г. Также методология поиска оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС используется в учебном процессе Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Это подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертационной работы в НИ ТПУ.

Личный вклад автора. Основные положения и результаты данной научной работы получены лично автором. Анализ полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

Апробация. Основные положения научной работы докладывались на всероссийских конференциях. XX, XXI Всероссийская научно-техническая конференция. Энергетика: эффективность, надежность, безопасность (Томск, 2014, 2015 гг.). Также на научно-технических советах отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики.

Публикации. Основные положения и результаты научной работы отражены в 7 публикациях. Из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, 1 статья в

издании, индексируемом базой данных РИНЦ, 2 статьи в сборниках докладов всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем. Диссертация, состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения и списка литературы. Общий объем работы составляет 153 страницы машинописного текста, включая 79 рисунков, 26 таблиц, списка использованной литературы из 72 наименований.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФОТОЭНЕРГЕТИКИ

1.1. Перспективы развития фотоэнергетики в мире и России

В настоящее время во всем мире наблюдается активное снижение цены на производство фотоэлектрических модулей и их комплектующих [9] (см. рис. 1).

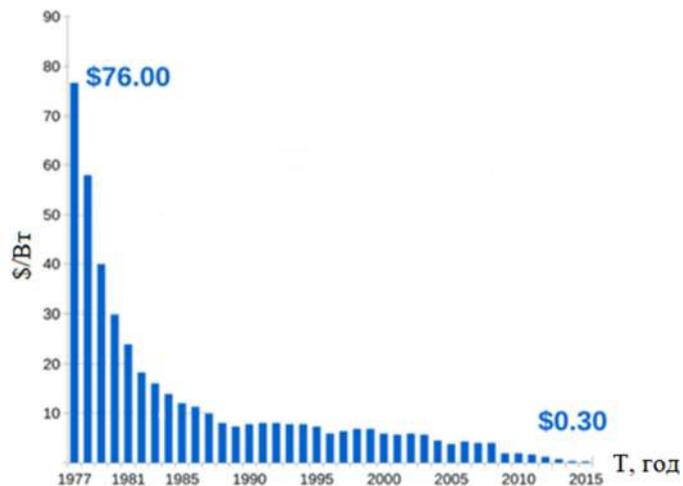


Рис.1 Динамика изменения цены на фотоэлектрические панели в мире

Солнечная энергетика занимает высокое конкурентное положение по отношению к другим видам ВИЭ, что подтверждается ежегодным приростом установленных мощностей фотоэлектростанций (см. рис.2) [9, 27].

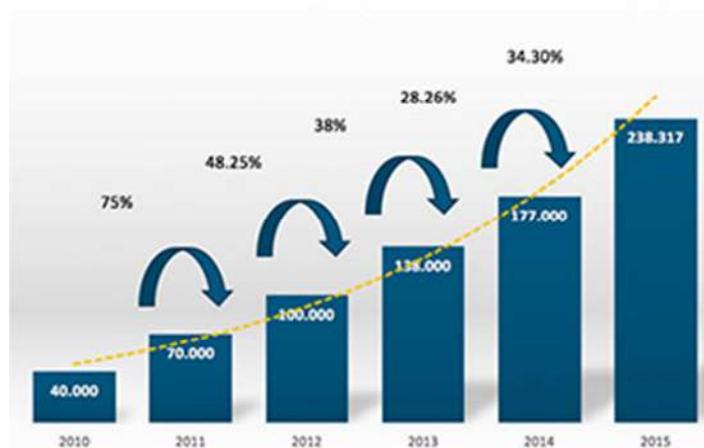


Рис.2 Динамика ввода мощностей на основе фотовольтаики в мире, ГВт

Значительное снижение цен на комплектующие для фотоэлектрических станций наблюдается в различных странах, где традиционно преобладает высокий спрос. К таким странам относятся Германия, Восточная Азия, Южная Азия, Северная Азия [9, 27].

Постоянное снижение цен на комплектующие для создания фотоэлектрических систем, стабильный рост вводимых мощностей на базе фотовольтаики, говорят о том, что фотоэнергетика имеет большие перспективы к развитию в мире и России в частности [36, 44].

В связи с бурно развивающимся рынком возобновляемой энергетики в мире, Россия не имеет возможности более игнорировать данный сектор экономики. Иначе занять лидирующие позиции, будет уже не возможно [1, 41].

В связи с этим Председателем Правительства Российской Федерации Д.А. Медведевым 28 мая 2013 года было введено постановление №449 **«О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности»** [30].

«Правительство Российской Федерации постановляет:

1. Определить в качестве механизма стимулирования использование возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности механизм продажи мощности квалифицированных генерирующих объектов, предусмотренных правилами рынка.
2. Утвердить прилагаемые: Правила определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии; изменения, которые вносятся в акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

На основании данного постановления Правительство РФ обязуется возместить расходы инвесторам на строительство сетевых генерирующих мощностей на основе ВИЭ.

Дополнительным условием постановления №449 является частичная локализации производства на территории РФ. Благодаря данному условию группой Ренова совместно с Роснано, был введен в эксплуатацию высокотехнологичный завод по производству тонкопленочных фотоэлектрических панелей «Хевел» в Новочебоксарске (рис. 3) [6].



Рис.3 Завод по производству тонкопленочных фотоэлектрических панелей «Хевел», производственной мощностью 130МВт в год

Согласно постановлению №449 правительство имеет амбициозные планы, к 2018 году планируется ввести порядка 850 МВт (см. Таблицу №1) мощностей на основе фотовольтаики. Общая доля ВИЭ в энергобалансе страны при соблюдении всех условий должна составить 4% к 2020 году. География размещения станций предполагаемых к строительству представлена на рисунке 4.

Таблица №1. Ввод мощностей по годам согласно постановлению №449

Год ввода	2014	2015	2016	2017	2018	Итого
Объем мощности, МВт	35,2	140	189	255	230	849,2



Рис. 4. Местоположение и установленная мощность ФЭС планируемых ввести в 2013-2014 годах по постановлению №449

Поддержка на оптовом рынке дала старт развитию солнечной энергетики в России. Дальнейшее развитие отрасли будет связано:

- С принятием мер поддержки на розничном рынке ($\approx 500 \div 1000$ МВт);
- С реализацией проектов гибридных энергоустановок (≈ 300 МВт);
- С достижением сетевого паритета в различных сегментах рынка [29, 44].

Нужно отметить, что принятое постановление дало существенный толчок к развитию солнечной энергетики не только на бумаге, но и в действительности. Так при поддержке правительства РФ по постановлению №449 в Алтае 5 сентября 2014 года была введена в эксплуатацию сетевая фотоэлектрическая станция Кош-Агач (рис.5), установленной мощностью 5 МВт. За период функционирования 05.09.14 – 09.10.14 выработка электрической энергии ФЭС составила 489,58 МВт*ч с учетом периодических отключений ФЭС на пуско-наладочные работы [44]. На сегодняшний день установленная мощность Кош-Агачской ФЭС доведена до 10 МВт.



Рис. 5. Фотоэлектрическая станция Кош-Агач (республика Алтай)

Помимо этого благодаря действиям правительства в эксплуатацию введены: Орская ФЭС (40 МВт), Бурибаевская ФЭС (20 МВт), Бугульчанская ФЭС (15 МВт), Волгоградская ФЭС (10 МВт) и т.д. Всего 19 крупных сетевых фотоэлектростанций. Суммарная установленная мощность всех солнечных электростанций ЕЭС России на 1 января 2017 года составляет 75,2 МВт.

1.2. Децентрализованные системы электроснабжения в России

Помимо развития централизованных фотоэлектрических станций, России требуется также развитие децентрализованных гибридных фото-дизельных станций. В России от централизованного электроснабжения отрезано порядка 70% территории страны, на которой проживает более 20 млн. человек (рис. 6) [22, 23]. В этих районах для электроснабжения в большинстве своём используются дизельные установки. Во многих районах стоимость вырабатываемой электроэнергии доходит до 50 руб. за кВт*ч и более [36].

При этом совокупный объем затрат на энергоснабжение всех потребителей 15 регионов Крайнего Севера равен 1,7 трлн руб. Тарифы на электроэнергию в 5–55 раз, а по тепловой в 3-17 раз выше средних по России. Доля расходов бюджета в оплате услуг энергоснабжающих организаций многих регионов Крайнего Севера превышает 30 %, а в ряде случаев – даже 60 % при среднем уровне по России

около 20 %. Размеры перекрестного субсидирования и убытки компаний, снабжающих энергией потребителей Крайнего Севера, превышают 40 млрд руб. Около половины этой суммы приходится на субсидирование потребителей территорий с децентрализованными системами энергоснабжения. Практически во всех регионах Крайнего Севера кратно превышены пороги экономической доступности энергии, что не позволяет экономике динамично развиваться. Для населенных пунктов с изолированными системами энергоснабжения отношение расходов на энергоснабжение к муниципальному продукту часто превышает 40 % [2].



Рис.6 Распределение энергоснабжения по территории России

ДЭС снабжают электрической энергией сельские населенные пункты, в которых в основном сосредоточены объекты агропромышленного комплекса (молочные фермы, крупнорогатый скот, оленеводство, коневодство, промысловая охота, пасеки и т.д.) [22]. Количество жителей в среднем составляет от нескольких десятков до трехсот-четырехсот человек. Хотя при этом существуют и крупные населенные пункты с численностью населения в несколько тысяч человек.

Децентрализованные системы требуют постоянного завоза дизельного топлива (каждый год) к труднодоступным удаленным населенным пунктам, это естественным образом сказывается на значительной стоимости произведенной электрической энергии руб/кВт*ч [12]. В некоторых районах Якутии, таких как Верхоянск, Батагай и другие северные поселки при доставке дизельного топлива применяется сложная схема двухгодичной перевозки речным путем, с выходом в Северный Ледовитый океан, с последующим спуском по водным артериям к месту назначения. Либо доставкой груза в зимний период автотранспортом по зимникам (см. рис.7) [9]. При этом доставка в обоих случаях существенно ограничена сложными климатическими условиями региона. Соответственно, стоимость выработанного кВт*ч электрической энергии в таких условиях, может достигать крайне высоких значений [13].



Рис.7 Доставка топлива и грузов до труднодоступных населенных пунктов

Как правило, генерирующие мощности децентрализованных поселков морально и физически устарели, что приводит к высокому удельному

потреблению дизельного топлива на производство энергии [71]. Это сказывается на величине общих эксплуатационных затрат на обслуживание дизельных станций. В таблице №2 для примера приведены значения показателей потребления дизельного топлива на производство электрической энергии в Ленском районе республики Саха [15, 17, 18].

Таблица №2. ТЭ показатели ДЭС Ленского района на 2013 г

Населенный пункт	Выработка электроэнергии, тыс. кВт ч	Расход дизельного топлива, т.у.т в год	Удельный расход дизельного топлива, г/кВт ч
с. Натора	299.9	153.24	502.3
с. Турукта	253	136.1	539.8
с. Хамра	307.5	153.1	497.8
с. Чамча	368.9	175.2	474.8
с. Толон	286.5	137.9	481.4
с. Алысардах	13.94	5.15	369.1
с. Иннялы	129.1	66.12	512.3

Приведённая ситуация заставляет региональное правительство рассматривать вопрос энергетической эффективности децентрализованных систем электроснабжения, использующих ДЭС и искать пути сокращения потребления дизельного топлива на производство энергии.

Развитие децентрализованных фото-дизельных систем в целом по России на данный момент идет без каких-либо законодательных актов. В связи, с чем в работу вступают региональные советы по энергоэффективности.

В Республике Саха (Якутия) был создан и принят закон о мерах поддержки возобновляемых источников энергии. На основании закона производителям энергии на основе ВИЭ гарантируется государственная поддержка, через предоставление различных льгот, а также инвестиций.

27.06.2013 было подписано соглашение ОАО «РАО Энергетические системы Востока» с Правительством Республики Саха (Якутия) о строительстве крупной гибридной фото-дизельной электростанции в поселке Батагай, Верхоянского

улуса. В результате соглашения данная станция введена в эксплуатацию 23 июня 2015 года в формате первой очереди установленной мощностью 1МВт. И на данный момент входит в книгу рекордов Гиннеса, как самая мощная гибридная электростанция за Северным Полярным кругом. [9].

Также за счет действий местного правительства Республики Саха (Якутия) за последнее время было введено значительное число небольших гибридных станций. Такие как: СЭС - 30 кВт в п. Ючегей Оймяконского улуса, СЭС – 60 кВт в п. Батамай Кобяйского улуса, СЭС – 20 кВт в п. Дулгалах Верхоянского улуса, СЭС – 20 кВт в п. Куду-Кюель Олекминского улуса, СЭС – 20 кВт в п. Кубергня Абыйского улуса, СЭС – 20 кВт в п. Тойон-Ары Хангаласского улуса, СЭС – Эйик Оленекского улуса и ряд других. При их строительстве было использовано инновационное оборудование немецкой фирмы SMA [32], разработанное специально для гибридных фото-дизельных станций.

Эксплуатация построенных гибридных фото-дизельных станций уже показала свою эффективность. И доказывает правильность развития направления гибридных станций [19, 52, 59, 60]. В связи с этим планируется увеличение подобных мощностей.

В значительной мере развитию децентрализованных систем поможет, если правительство Российской Федерации поддержит отрасль законодательно. Для развития этой мысли на международном форуме по возобновляемой энергетике REENFOR-2014 были озвучены рекомендации:

1. Решение о широкомасштабном применении децентрализованных возобновляемых источниках энергии (ДВИЭ) необходимо принять на уровне государства и обеспечить значительной государственной поддержкой, в том числе дотациями и мерами экономического стимулирования с учётом интересов производителей электрической и тепловой энергии, оборудования, а также потребителей.
2. Разработать и принять отдельный **федеральный закон "О децентрализованных и возобновляемых источниках энергии"**. В данном

Законе необходимо четко прописать и разграничить полномочия между муниципальными, региональными и федеральными органами власти по управлению ДВИЭ и определить права собственности на различные виды соответствующих энергетических ресурсов. Положения нового Закона необходимо привести в соответствие с новыми Федеральными Законами, с законодательством в области охраны окружающей среды и природопользования, а также с налоговым законодательством,

3. Рекомендовать Минэнерго России, Минэкономразвития России:

3.1. Разработать стратегию развития децентрализованной и возобновляемой энергетики обоснованную научно, а также государственную программу развития возобновляемых и децентрализованных источников энергии на местных видов топлива.

3.2. Выступить с инициативой перед Правительством РФ о создании государственного органа, ответственного за развитие децентрализованной и возобновляемой энергетики, и о создании государственного центра по испытаниям, разработке, сертификации оборудования и технологий децентрализованной и возобновляемой энергетики [35].

Обобщив выше представленную информацию можно обозначить явно выраженные проблемы снабжения электрической энергией децентрализованных населенных пунктов:

1. Стоимость доставляемого дизельного топлива для дизельных электрических станций очень высока и имеет неизменную тенденцию к росту, что приводит к высокой стоимости производимой электроэнергии за счет значительного влияния топливной составляющей в тарифе.
2. Технологическая, территориальная изолированность удаленных населенных пунктов от центральной энергосистемы страны, ставящая их в прямую зависимость от привозного дорогостоящего топлива.

3. Из-за тяжелых природно-климатических условий генерирующее оборудование имеет повышенную эксплуатацию, что становится причиной ускоренного износа электрических сетей и электрооборудования.
4. Отсутствие законодательных актов на уровне страны поддерживающих развитие децентрализованных гибридных фото-дизельных систем электроснабжения.
5. Отсутствие универсального программного комплекса, методологии позволяющих оптимизировать при строительстве установленные мощности составных частей гибридных солнечно-дизельных электрических станций, с целью получения наилучших технико-экономических характеристик.

Целью данной диссертации является работа над устранением или частичным решением выше перечисленных проблем. Разработка алгоритма оптимизации позволит создать инструмент позволяющий получать оптимальные технико-экономические показатели гибридных электрических станций предназначенных к строительству на территории Якутии. В свою очередь строительство гибридных электрических станций с оптимальными показателями позволит максимально эффективно использовать возможности фотоэлектрической составляющей, снижая себестоимость электрической энергии при этом до минимально возможных значений.

1.3. Распространенные расчетные комплексы и методы оптимизации децентрализованных систем электроснабжения

К нашему времени создано значительное количество методов, позволяющих достаточно успешно решать оптимизационные задачи. Для оптимизации в децентрализованных системах электроснабжения можно использовать следующие из них [16, 48, 55, 45, 53]:

- *Генетический/эволюционный алгоритм.* Разработан Джоном Холландом из Мичиганского университета в 1975 году. Суть метода заключается в

эвристическом алгоритме поиска, используемом для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.

- Метод роя частиц. Был доказан Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом в 1995. Метод численной оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции. Изначально предназначался для имитации социального поведения.
- Метод Гаусса-Зейделя / Метод покоординатного спуска. Разработан Филиппом Людвигом фон Сиделом уже более 150 лет назад в 1874 году. Известный как метод *покоординатного спуска*, является классическим итерационным методом для решения системы линейных уравнений. Представляет собой модификацию метода *Гаусса*, заключающуюся в том, что при вычислении очередного приближения используются ранее полученные координаты.

В работе при решении вопросов математического моделирования для поиска оптимальных значений, установленных мощностей составных частей гибридных фото-дизельных систем электроснабжения использован итерационный метод поиска – метод покоординатного спуска. Поскольку он является наиболее простым в реализации оптимизации, так как поиск экстремумов ведется в направлении осей координат и в процессе поиска изменяется только одна координата. Таким образом, многомерная задача сводится к одномерной.

Распространенные расчетные комплексы

На сегодняшний день существует немало программных комплексов позволяющих в той или иной мере производить моделирование и оптимизацию систем электроснабжения использующих в своем составе возобновляемые источники энергии [62, 66]. Наиболее распространенными являются следующие оптимизационные комплексы: HOMER – Hybrid optimization modeling software

(США), HOGA – Hybrid optimization by genesis algorithm (Испания), HYPORA – Hybrid power optimized for rural/remote areas (США), PVsyst (Швейцария) [31, 39].

HOMER

Программа, позволяет оптимизировать структуру гибридного энергетического комплекса построенного на базе разного рода возобновляемых энергоисточников. При этом программа позволяет определить оптимальные соотношения установленных мощностей принятого к расчету генерирующего оборудования. В расчетную модель могут входить элементы: ветроэлектрическая установка, фотоэлектрический преобразователь, дизель-электрическая установка, аккумуляторная батарея, микро-ГЭС, топливные элементы, электролизер, элементы хранения водорода, а также элементы тепловой нагрузки. Итоговыми критериями определения оптимального состава могут выступать капиталовложения, уровень потребления дизельного топлива, количество выбросов углекислого газа в атмосферу.

На рисунке 8 представлен интерфейс программного комплекса HOMER.

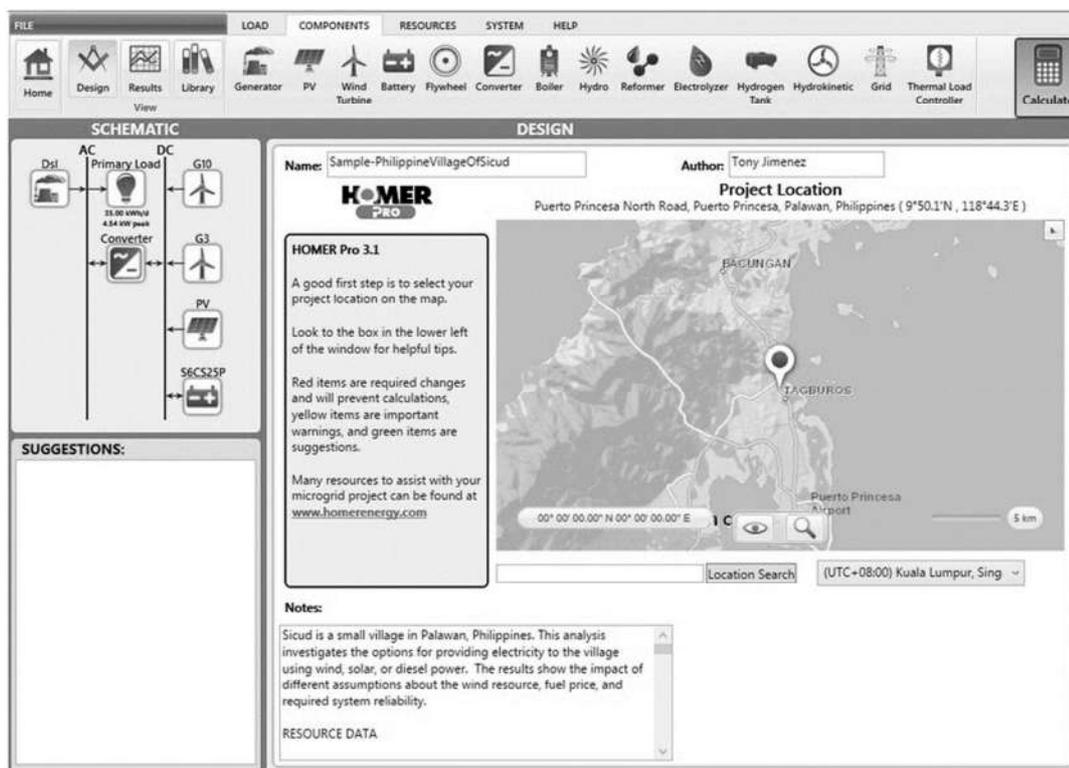


Рис.8 Интерфейс программного комплекса HOMER.

HOGA

Программный комплекс по своим функциям аналогичен приведённому выше. Позволяет производить моделирование и оптимизацию систем электроснабжения, построенных на базе ВИЭ и АКБ. Оптимальное соотношение установленных мощностей энергоисточников входящих в гибридный энергетический комплекс рассчитывается путем минимизации общих затрат системы на протяжении всего жизненного цикла основного оборудования. Дополнительной целевой функцией может являться количество выбросов углекислого газа в атмосферу. В расчетную модель могут входить элементы: ветроэлектрическая установка, фотоэлектрический преобразователь, дизель-электрическая установка, аккумуляторная батарея, микро-ГЭС, топливные элементы, электролизер и т.д.

На рисунке 9 представлен интерфейс оптимизационного комплекса HOGA

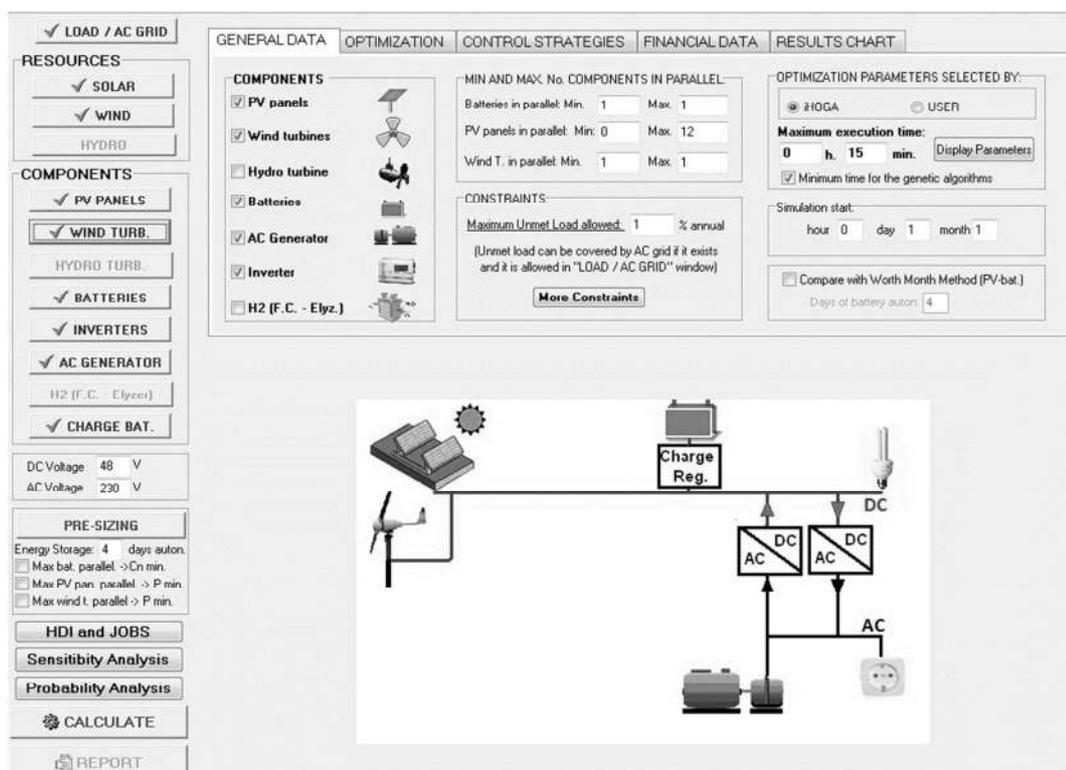


Рис.9 Интерфейс программного комплекса HOGA.

Программный комплекс HOGA активно используется в Европе и Британских островах.

HYPORA

Также как HOMER и HOGA, данный программный комплекс предназначен для структурной оптимизации систем электроснабжения удаленных областей с возможностью применения в своем составе фотоэлектрических панелей, ветроустановок, биоустановок и аккумуляторов. Итоговым критерием подобранного оптимального соотношения энергоисточников децентрализованной энергосистемы является стоимость произведённой энергии, выраженной в кВт*ч. Отличительной особенностью данного программного продукта является реализация открытого исходного кода в среде MS Excel, что дает доступ к модификации программы.

На рисунке 10 представлен интерфейс оптимизационного комплекса HYPORA

WIND		SOLAR		BIOMASS		ADDITIONAL PARAMETERS	
air density (kg/m3)	1.225	area per solar panel (m2)	1.63	cost of biomass facility (\$)	1000	proposed budget (\$)	50,000
rated wind speed (m/s)	15	module efficiency (decim	0.144	cost of biomass fuel (\$/tor	10	minimum % of time electricity	1
rated power (MW)	0.5	max power (W)	235	fuel conversion (kW/lb of f	0.0125	wind incentive (\$/kWh)	
		module price per panel (\$	500	max power (kW)	500	solar incentive (\$/KWh)	
hub height for wind speed data	100	inverter cost (\$)	1000			biomass incentive (\$/kWh)	
wind turbine height (m)	100	rate of interest (decimal)	0.015			wind incetive (%)	
blade radius (m)	19					solar incentive (%)	
swept area (m2)	1134.114948					biomass incentive (%)	
rate of interest (decimal)	0.06						
years for payment	20						
Cost of O&M (\$/kWh)	0.02						
Cost of Generator (\$/kW)	1000						
Cost of Turbine (\$/m^2)	1400						
Exponent for power law	0.142857143						
cut-in wind speed (m/s)	4						
cut-out wind speed (m/s)	25						

Рис.10 Интерфейс оптимизационного комплекса HYPORA

PVsyst

Программный продукт швейцарской разработки [39]. Данное ПО интересно тем, что это полностью готовое коммерческое предложение, с помощью которого можно осуществлять моделирование различных фотоэлектрических систем, таких как: соединенные с сетью системы, автономные (с аккумулярованием), насосные станции (см. рис. 11) с большой приближённой полученных данных к реальным значениям. При этом программный продукт имеет широкие возможности:

- Предварительный расчет (грубый) - предназначенный для быстрого информирования заказчика об основных параметрах будущей фотоэлектрической системы;
- Полный расчет – предназначенный для детального изучения основных параметров фотоэлектрической системы, с учетом большого числа влияющих на нее факторов;
- Встроенная база данных, в которой присутствует огромное количество инверторов, фотоэлектрических панелей, аккумуляторов различных производителей. База метеоданных;
- Различные дополнительные инструменты – определение оптимального угла наклона для конкретной местности, получение всевозможных данных, графиков.



Рис.11. Стартовое меню программного комплекса PVsyst

Важной отличительной особенностью программного комплекса PVsyst является возможность дополнения баз данных вручную. Можно дополнить ее, данными с любой метеостанции мира. PVsyst принимает данные с метеисточников NASA-SSE и Meteonorm. Meteonorm – обширная база метеоданных, включающая в себя информацию с 1200 метеостанций мира. Период исследования, которых составляет в среднем 10-30 лет. Для

приближенности данных к реальным значениям Meteorom интерполирует данные с 3х ближайших метеостанций расположенных рядом с исследуемой точкой. Если таковых не имеется, тогда берутся данные со спутника. Оба программных продукта имеют полноценное взаимодействие, благодаря которому чтобы добавить данные в PVsyst требуется лишь выбрать близлежащую станцию на карте рядом с исследуемой местностью (см. рис.12), но при этом обязательно необходим доступ к сети Интернет. Также доступен ручной ввод данных.

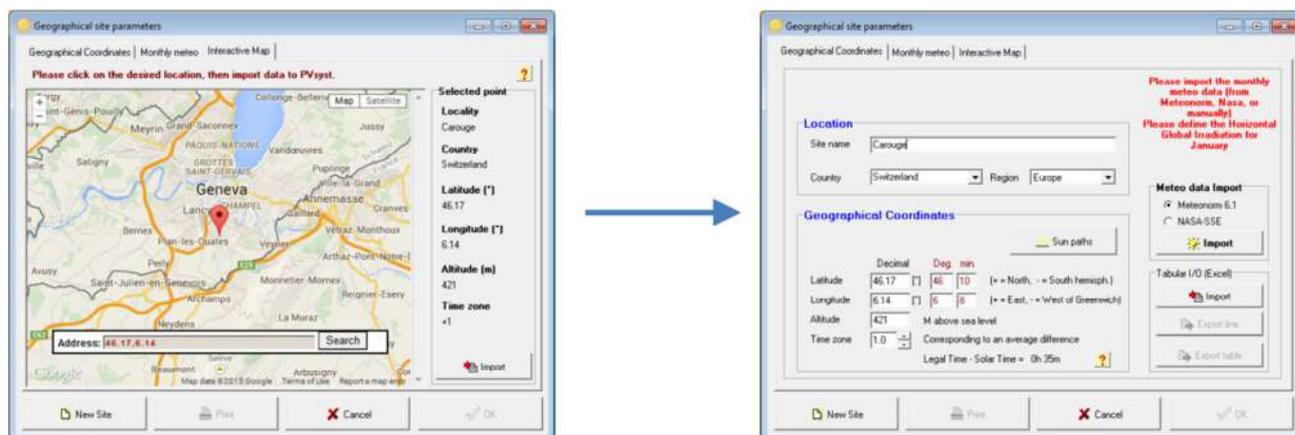


Рис.12. Меню ввода метео данных конкретной локации

Процесс моделирования фотоэлектрической системы начинается с выбора географической местности. С последующим выбором начальных параметров системы: угол наклона, азимут, тип крепления панелей. PVsyst дает возможность работать с различными типами креплений (см. рис.13):

- Фиксированный угол наклона;
- Несколько углов наклона;
- Сезонный угол наклона (Зима/Лето);
- Одноплоскостной треккер;
- Двухплоскостной треккер;

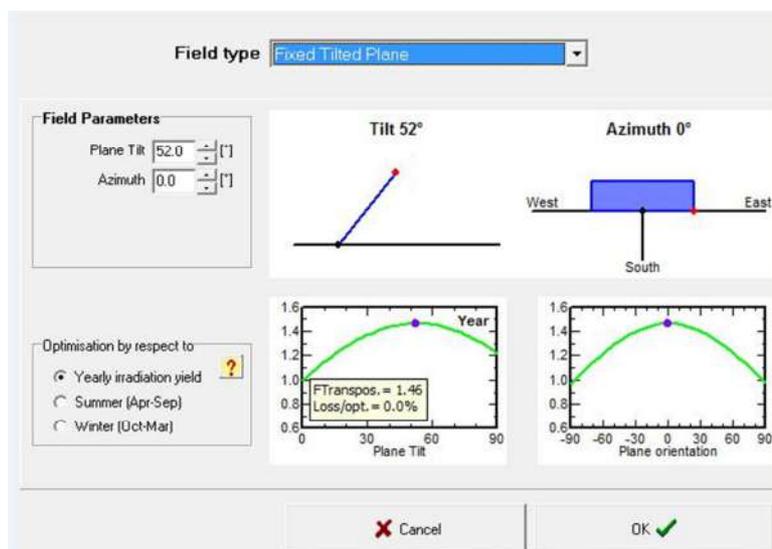


Рис.13 Меню выбора начальных параметров фотоэлектрического массива

После выбора начальных параметров, следующим этапом определяют тип, количество используемых панелей, инверторов конкретного производителя. При этом встроенный механизм всегда оповещает, если система собрана неверно. К примеру, выходное напряжение цепочки фотоэлектрических панелей может выходить за границы возможностей инвертора. Программа позволяет, если на то требуется необходимость учесть схему подключения цепочек панелей – сразу на инвертор, либо через суммирующие коробки (см. рис.14).

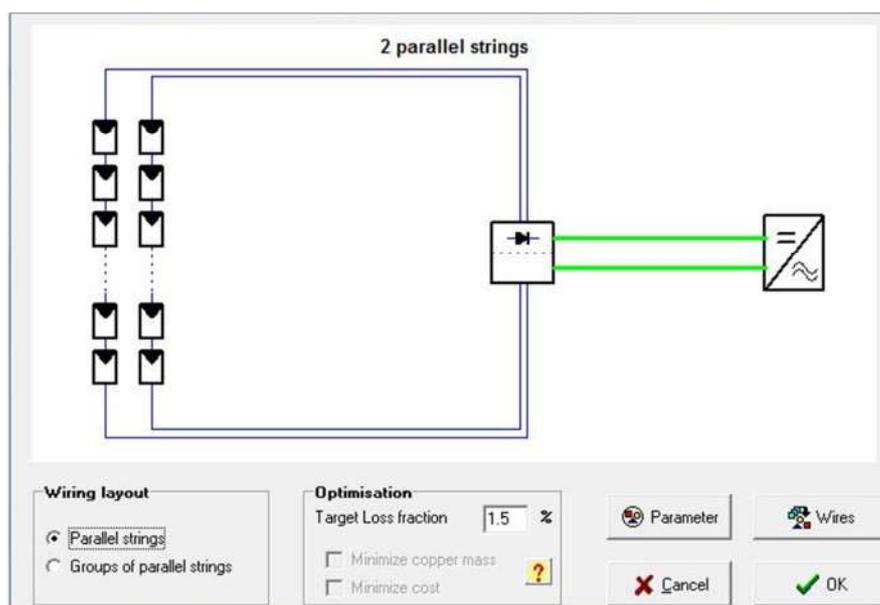


Рис.14 Меню выбора схемы подключения

Существует возможность заложить потери на длину проводника с выбором материала используемого кабеля, потери в трансформаторе, потери на недоступность системы и т.д.

В детальном расчете есть возможность учесть теневые потери в режиме 3D. При этом пользователем формируется фотоэлектрическое поле из необходимого количество панелей, с заданным расстоянием между рядами панелей, и требуемым углом наклона (см. рис.15). Возникающие потери при затенении фотоэлектрических панелей близлежащими объектами отображаются как в графическом виде (см. рис.16), так и в табличном.

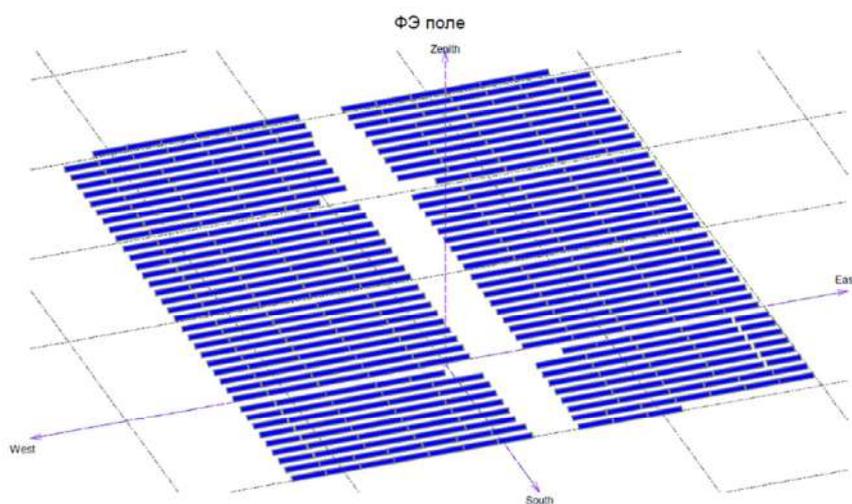


Рис.15 3D вид массива фотоэлектрических панелей

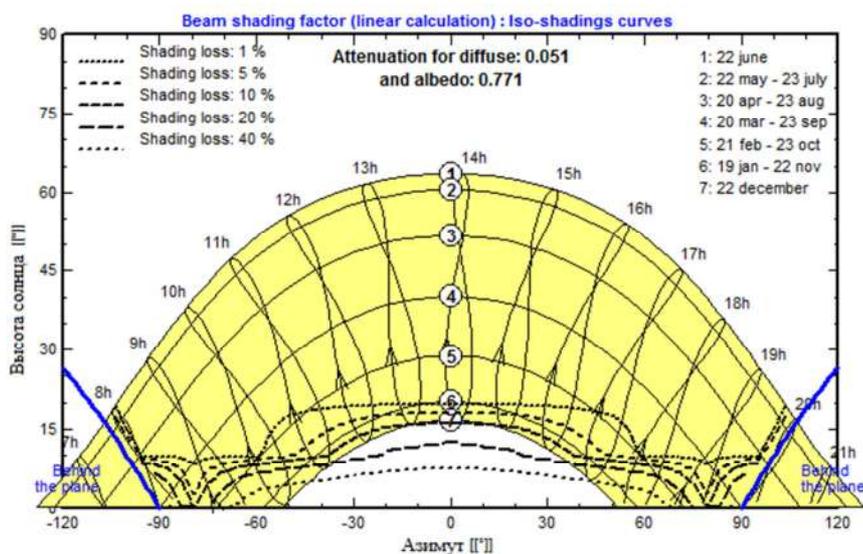


Рис.16 Отображение теневых потерь на графике высоты солнца по времени года

Еще одной важной особенностью данного расчетного комплекса является, то что по результатам расчета формируется диаграмма потерь (рис. 17), на основании которой можно увидеть реальные возможности станции, а также сколько от них остается в результате потерь на различные процессы.

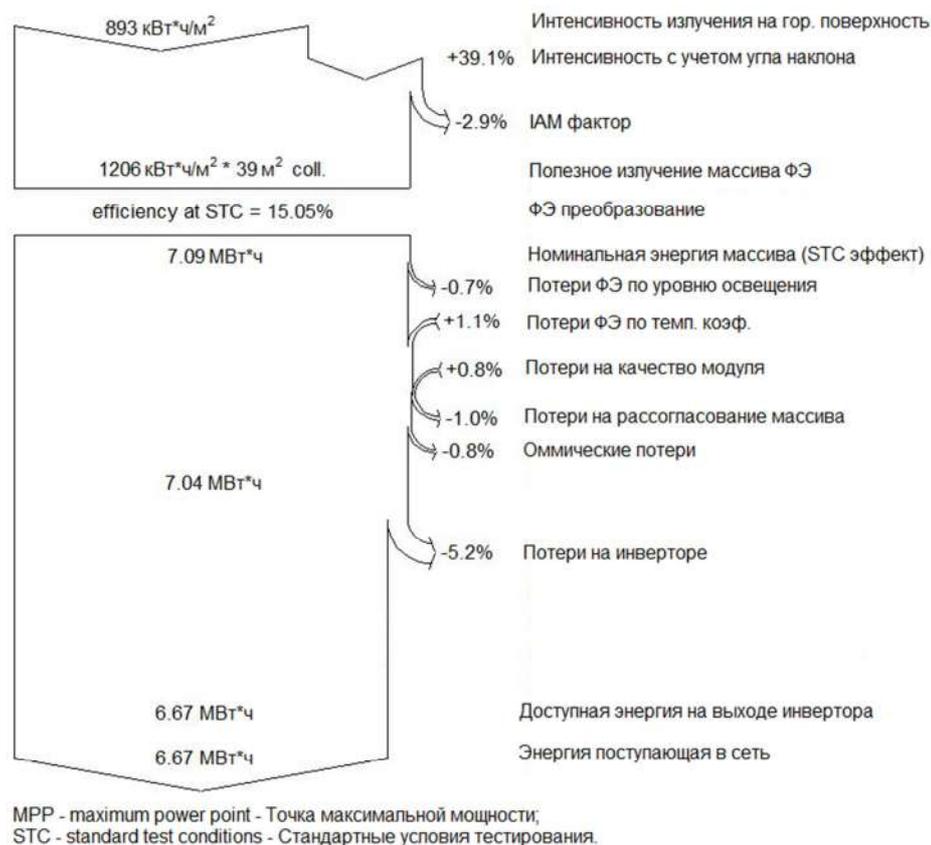


Рис.17 Диаграмма потерь

По результатам расчета формируется полноценный отчет с указанием всех параметров системы, основными таблицами данных, графическими зависимостями, диаграммой потерь. В случае заранее заложенной стоимости элементов системы, программа также отражает полную стоимость станции. Итоговый отчет может предоставляться заказчику, как готовый документ.

1.4. Преимущества и недостатки расчетных комплексов

Программные комплексы HOMER, HOGA, HYPORA призваны решать задачу оптимизации децентрализованных систем электроснабжения на базе ВИЭ, с выбором наиболее оптимального соотношения генерирующих мощностей, по тем или иным критериям. Программный комплекс PVsyst в свою очередь создан именно для проектирования фотоэлектрических систем. Все описанные расчетные комплексы имеют удобство интерфейса, что облегчает работу с ними и делает ее комфортной. В свободном доступе присутствуют демо-версии дающие шанс ознакомиться с возможностями программных комплексов. Это позволяет подобрать инструмент под конкретную задачу исследования.

К недостаткам расчетных комплексов HOMER, HOGA, HYPORA можно отнести следующее:

1. Использование в расчетах значений среднемесячной солнечной радиации.
2. Отсутствие корреляции между параметрами окружающей среды.
3. Применение среднегодовой нагрузки (HYPORA).
4. Отсутствие учета влияния температуры окружающей среды на вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэлектрических преобразователей, температуры.
5. Отсутствие учета потерь энергии в элементах трансформации, преобразования и передачи электроэнергии и достаточно подробного учета капиталовложений в эти элементы.
6. Отсутствие возможности (у пользователя) дополнять систему новыми элементами и изменять структуру децентрализованной системы электроснабжения.

В данной диссертационной работе для решения поставленных задач оптимизации использован расчётный инструмент PVsyst так как:

1. Предназначен не для оптимизации гибридных комплексов, а именно для проектирования фотоэлектрических систем, что обеспечивает все стороннюю проработку данного сегмента ВИЭ разработчиками.

2. В расчетах используются почасовые данные прихода солнечной радиации на поверхность земли, с косвенным учетом облачности, что обеспечивает высокую точность получаемых данных. И возможностью их адекватного приближения к реальным условиям эксплуатации оборудования в децентрализованных системах электроснабжения.
3. Имеет встроенный механизм учета большого количества различных потерь, что позволяет получить данные с приближением к реальным значениям.
4. Имеет встроенный механизм учета влияния температуры окружающей среды на вольт-амперные характеристики фотоэлектрических панелей (температурные коэффициенты).
5. Дает возможность дополнять базы данных новыми устройствами (инверторы, панели), а также локациями.
6. Встроенные инструменты позволяют определять оптимальные углы наклона массива фотоэлектрических панелей в зависимости от условий установки конструкции, и принятого к расчету рассматриваемого интервала времени.
7. Имеется инструмент, с помощью которого можно разместить массив фотопанелей в 3д, с целью выбора оптимального расстояния между рядами панелей, и оценки потерь выработки электрической энергии фотомассивом связанных с затенением.

Но в силу того что программный комплекс PVsyst в чистом виде не способен решить поставленные в диссертации задачи его использование в дальнейшем возможно лишь с доработкой полученных данных по выработке электрической энергии фотоэлектрической станцией различной установленной мощности. Итоговые данные дорабатываются в собственном расчетном комплексе, построенном на базе MS Excel способном производить оптимизацию гибридных ФДЭС.

1.5. Краткие выводы

1. Выполнен обзор нынешнего состояния и определены перспективы развития сетевой фотоэнергетики в России и мире. Рассмотрены децентрализованные системы электроснабжения России. Показано, что именно они наиболее актуальны сегодня для внедрения ВИЭ.

2. Рассмотрены наиболее распространённые программные комплексы оптимизации гибридных систем. Проанализированы их преимущества и недостатки.

3. На основе анализа распространённых программных комплексов оптимизации гибридных систем электроснабжения, программный комплекс PVsyst определен, как наилучший инструмент позволяющий определять показатели ФЭС наиболее детально.

4. Для оптимизации гибридных фото-дизельных электростанций программный комплекс PVsyst следует дополнить компьютерными моделями дизельной части гибридного энергетического комплекса.

2. АВТОНОМНЫЕ ФОТО-ДИЗЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1. Варианты схем построения фото-дизельных электростанций

Включение ФЭС в автономную электроэнергетическую систему возможно путем применения различных схемных решений. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются следующие конфигурации [24, 50]:

- Раздельная работа дизельной электростанции и фотоэлектростанции с накопителем электроэнергии (рис. 18, а);
- Работа ФЭС параллельно с локальной электрической сетью, образованной ДЭС (рис. 18,б);
- Гибридный вариант, предусматривающий возможность реализации раздельной и совместной работы ФЭС и дизельной электростанции (рис. 18, в).

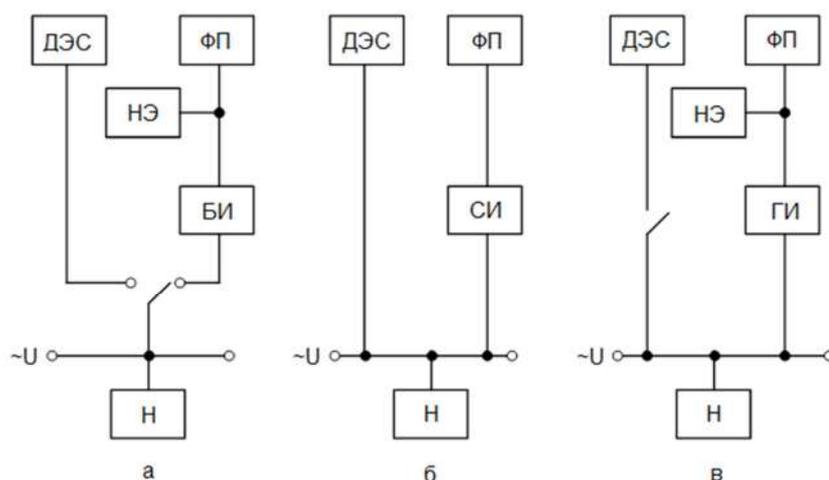


Рис.18 Схемы построения фотодизельных систем электроснабжения

На рисунке 18 обозначены: ФП – фотоэлектрические панели, НЭ – накопитель электрической энергии, Н – нагрузка, U – шина переменного тока, БИ – батарейный инвертор, СИ – сетевой инвертор, ГИ – гибридный инвертор.

Каждая схема имеет свои достоинства и недостатки. Раздельная работа ФЭС и ДЭС (рис. 18, а) обеспечивает максимальную экономию дизельного топлива, а также продлевает срок службы дизельных агрегатов, за счет компенсации пиков нагрузки энергией запасённой в накопителях. Установленная мощность ФЭС должна обеспечивать электроэнергией потребителей в светлое время суток, а также запасать ее избыток в накопитель, ДЭС в свою очередь должна обеспечивать потребителей в темное время суток, и параллельно заряжать аккумуляторные батареи при недостатке энергии для ее заряда от ФЭС. Значительные суточные и сезонные изменения интенсивности солнечного излучения вызывают необходимость ограничения времени генерации ФЭС, либо увеличения ее установленной мощности. И то и другое снижает коэффициент использования установленной мощности энергетического оборудования и негативно влияет на экономические характеристики фото-дизельной системы электроснабжения. Подобная схема построения применима для фото-дизельных энергетических комплексов средней мощности, как правило, ограниченной 100÷150 кВт. Ограничением является стоимость аккумулирующего оборудования, а также необходимая для накопителей инфраструктура.

Вариант параллельной работы ФЭС и ДЭС (рис.18, б) предусматривает постоянную работу ДЭС с замещением части дизельной генерации энергией производимой фотоэлектрической станцией. Достоинством данной схемы является возможность максимального использования установленной мощности ФЭС без использования накопителей электроэнергии, и как следствие подобное схемное построение станции является экономически выгодным в отношении капитальных затрат на строительство, по сравнению с другими вариантами. Недостатком является необходимость ограничения мощности сетевого инвертора ФЭС на уровне менее половины текущей мощности генерации дизельного энергетического комплекса. Таким образом, в дневное время, при максимальной мощности, приходится ограничивать мощность ФЭС относительно уровня потребления электроэнергии объектом электрификации. В результате уровень

замещения дизельной генерации невелик и обычно не превышает половины среднедневного потребления электроэнергии без учета максимумов нагрузки.

Не смотря на то, что схемное решение с непрерывной дизельной генерацией (параллельная работа ФЭС и ДЭС) как правило, имеет низкий процент замещения, на сегодняшний день оно является наиболее распространенной на территории Якутии [36]. В силу низких капитальных и эксплуатационных затрат. В Якутии расположено большое количество децентрализованных систем электроснабжение различной мощности (от десятков до тысяч кВт). Учитывая сложную логистику доставки груза, зачастую построение гибридных электростанций с возможностью аккумулирования энергии становится не целесообразным, особенно ввиду сезонной работы аккумуляторов в северных регионах (1,5 месячная полярная ночь и низкая солнечная активность в зимнее время) и необходимости поддержания особых условий для их работы.

Так же построение гибридных электрических станций с непрерывной дизельной генерацией оправдано, в случае когда строительство предусматривается в северных поселках где мощность нагрузки может достигать мегаваттных значений (крупные районные центры). Это обусловлено достижением предельных затрат на сооружение ФДЭС.

23 июня 2015 года в п. Батагай Верхоянского улуса, республики Саха (Якутия) была введена в работу фото-дизельная электростанция, построенная на схемном решении с непрерывной дизельной генерацией. Установленная мощность фотоэлектрической части данного комплекса составляет 1МВт (около 4000 фотоэлектрических панелей), дизельной 11МВт. Не смотря на незначительное замещение в процентном соотношении, наблюдается существенная экономия дизельного топлива - порядка 300 тонн в год.

Фото-дизельная система с гибридным инвертором (рис.20, в) позволяет более гибко сочетать достоинства и недостатки схем с батарейными и гибридными инверторами.

Выбор варианта построения фото-дизельной системы электроснабжения определяется сезонной и суточной инсоляцией, графиками электропотребления объекта электрификации [46, 47].

2.2. Факторы, определяющие технико-экономическую эффективность гибридной системы электроснабжения

2.2.1. Инсоляция и ее временное распределение

Важнейшим фактором для размещения фотоэлектрической станции является интенсивность солнечного излучения на поверхность земли в месте размещения, а также распределение этой интенсивности во времени. От этого зависит, эффективность ее работы и, соответственно, степень целесообразности использования фотоэнергетики в регионе [25].

На прошедшей в 2015 году конференции в Якутске «Развитие возобновляемой энергетики на дальнем востоке России», энергоснабжающей организацией ОАО «РАО ЭС Востока» была представлена программа развития проектов ВИЭ в децентрализованных федеральных областях (ДФО) [14]. В которой, в качестве наиболее перспективных районов строительства солнечно-дизельных электростанций определена практически вся территория республики Саха (Якутия). На данной территории планируется ввести в эксплуатацию порядка 132 объектов генерации на основе фотоэлектрического преобразования, совокупной установленной мощностью 43,1 МВт.

Исходя из соображений целесообразности размещения автономных гибридных фото-дизельных электростанций, в качестве объекта исследования выбрана территория с высокими показателями инсоляции и значительной долей автономной генерации – Республика Саха (Якутия). Во времена СССР велась активная деятельность по фиксации различных метеопараметров (солнечная радиация и солнечное сияние, температура воздуха и почвы, ветер и атмосферное

давление, влажность воздуха, осадки и снежный покров и т.д.) на всей территории нашей огромной страны. Эти данные в конечном итоге собраны и отражены в Научно-прикладных справочниках по климату СССР [20]. На рисунке 19 представлена карта метеорологических станций расположенных на территории Якутии.

Пользуясь многолетними метеоданными можно проанализировать возможности территории Якутии на предмет целесообразности установки гибридных фото-дизельных электростанций. В таблице №3 представлены значения истинного времени восхода и захода солнца населенных пунктов Якутии. При этом в таблице указаны пункты, начиная от самого южного – Алдан, 58.6° с.ш., до самого северного – Оленек, 68.5° с.ш.

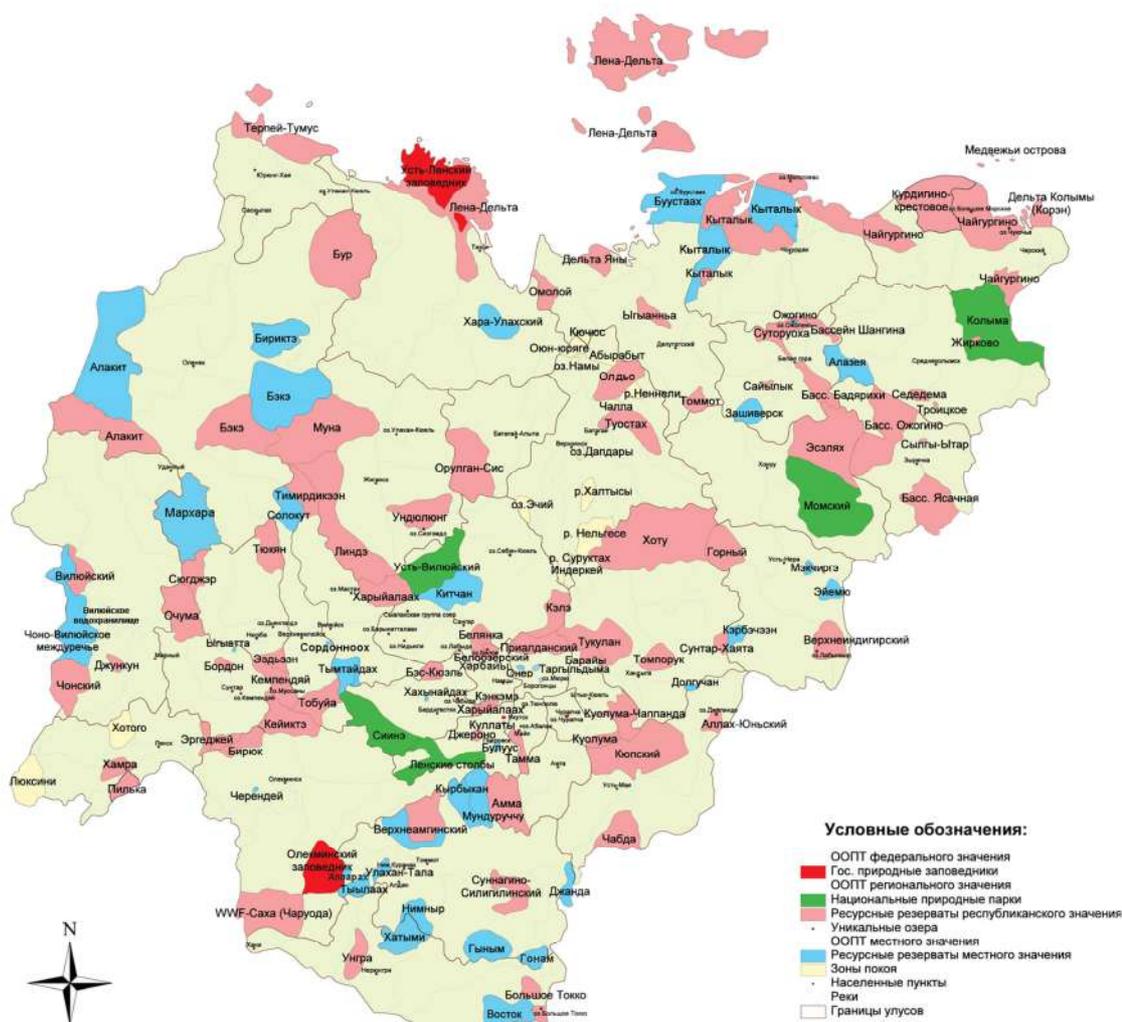


Рис.19 Карта метеорологических станций расположенных на территории Якутии

Таблица №3. Истинное время (ч:мин) восхода (В) и захода (З) солнца

Метеостанция	Восход/Заход	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Оленек	В	10:37	8:10	6:15	4:08	1:37	п.д.	п.д.	3:06	5:18	7:20	9:35	п.н.
	З	13:23	15:50	17:45	19:52	22:23	п.д.	п.д.	20:54	18:42	16:40	14:25	п.н.
Верхоянск	В	10:18	8:03	6:14	4:13	2:02	п.д.	п.д.	3:17	5:20	7:14	9:20	п.н.
	З	13:42	15:57	17:46	19:47	21:58	п.д.	п.д.	20:43	18:40	16:46	14:40	п.н.
Среднеколымск	В	10:16	8:03	6:13	4:14	2:03	п.д.	п.д.	3:17	5:20	7:14	9:19	п.н.
	З	13:44	15:57	17:47	19:46	21:57	п.д.	п.д.	20:43	18:40	16:47	14:41	п.н.
Усть-Мома	В	9:56	7:56	6:13	4:19	2:20	п.д.	п.д.	3:26	5:22	7:10	9:07	10:41
	З	14:04	16:04	17:47	19:41	21:40	п.д.	п.д.	20:34	18:38	16:50	14:53	13:19
Оймякон	В	9:10	7:40	6:11	4:34	3:00	1:47	2:17	3:49	5:27	7:01	8:36	9:41
	З	14:50	16:20	17:49	19:26	21:00	22:13	21:43	20:11	18:33	16:59	15:24	14:19
Чернышевский	В	9:07	7:38	6:11	4:34	3:02	1:52	2:21	3:51	5:27	7:00	8:34	9:37
	З	14:53	16:22	17:49	19:26	20:58	22:08	21:39	20:09	18:33	17:00	15:26	14:23
Якутск	В	8:57	7:34	6:10	4:38	3:12	2:10	2:35	3:57	5:29	6:57	8:25	9:23
	З	15:03	16:26	17:50	19:22	20:48	21:50	21:25	20:03	18:31	17:03	15:35	14:37
Алдан	В	8:30	7:21	6:09	4:49	3:37	2:50	3:08	4:13	5:32	6:49	8:05	8:50
	З	15:30	16:39	17:51	19:11	20:23	21:10	20:52	19:47	18:28	17:11	15:55	15:10

*п.д. – полярный день, п.н. – полярная ночь.

Производным значением от истинного времени восхода и захода является продолжительность светового дня. Данные по этой величине представлены в таблице №4.

Таблица №4. Продолжительность солнечного сияния

с.ш. °	в.д. °	Метеостанция	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
68,5	112,4	Оленек	2:46	7:40	11:30	15:44	20:46	23:59	23:59	17:48	13:24	9:20	4:50	0:00
67,6	133,4	Верхоянск	3:24	7:54	11:32	15:34	19:56	23:59	23:59	17:26	13:20	9:32	5:20	0:00
67,27	153,42	Среднеколымск	3:28	7:54	11:34	15:32	19:54	23:59	23:59	17:26	13:20	9:33	5:22	0:00
66,27	143,12	Усть-Мома	4:08	8:08	11:34	15:22	19:20	23:59	23:59	17:08	13:16	9:40	5:46	2:38
63,3	143,2	Оймякон	5:40	8:40	11:38	14:52	18:00	20:26	19:26	16:22	13:06	9:58	6:48	4:38
62,6	113,9	Чернышевский	5:46	8:44	11:38	14:52	17:56	20:16	19:18	16:18	13:06	10:00	6:52	4:46
62,2	129,8	Якутск	6:06	8:52	11:40	14:44	17:36	19:40	18:50	16:06	13:02	10:06	7:10	5:14
58,6	125,4	Алдан	7:00	9:18	11:42	14:22	16:46	18:20	17:44	15:34	12:56	10:22	7:50	6:20

Графическая зависимость продолжительности светового дня от времени года для двух граничных населенных пунктов Якутии представлена на рис.20.

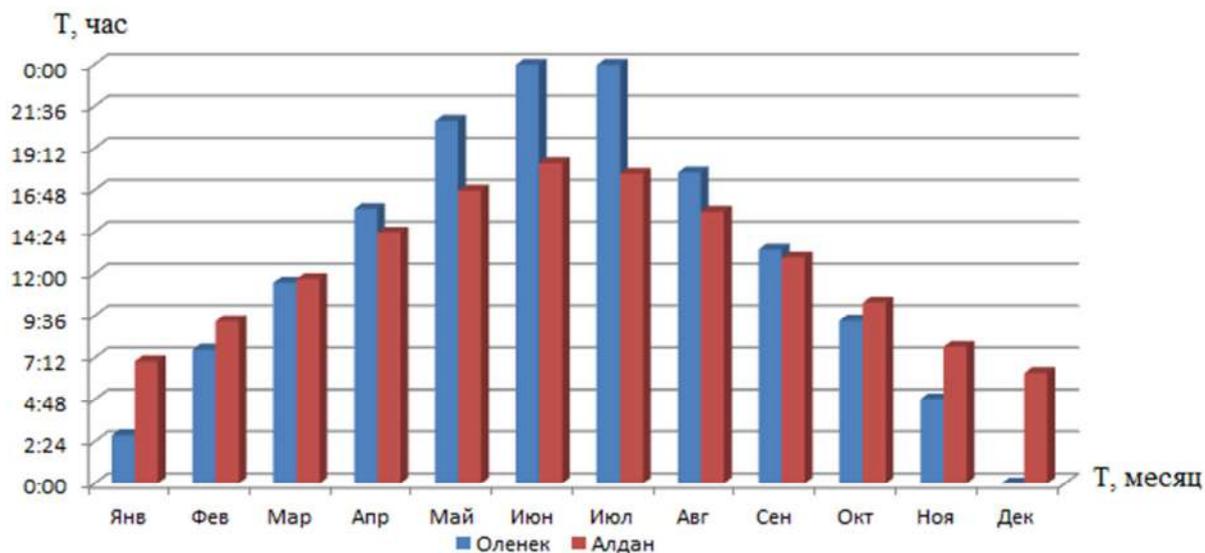


Рис.20 Продолжительность светового дня для двух граничных районов Якутии

Значения таблиц №3, 4 и графическая зависимость, представленная на рисунке 20 показывают, что от южных районов к северным, продолжительность светового дня изменяется значительно. Начиная с марта и заканчивая сентябрем, в северных районах наблюдается большая продолжительность светового дня, которая достигает пика в летние месяцы (июнь, июль), и выражается в виде явления называемого - полярный день. В это время солнце на небосводе присутствует постоянно. Данное явление является неоспоримым плюсом для более продуктивной работы гибридных ФДЭС по сравнению с иной местностью. С другой стороны высокая продолжительность светового дня летом, компенсируется его полным отсутствием в зимнее время (декабрь, январь) – полярная ночь. Поэтому, при выборе района размещения гибридной станции, следует учитывать данное положение, так как оно будет влиять на выбор оптимального фиксированного угла наклона фотоэлектрических панелей гибридной станции, а также на оптимальное значение установленной мощности ФЭС.

2.2.2. Объем и временное распределение необходимой энергии

Помимо продолжительности светового дня, одним из основных факторов для выбора места размещения систем электроснабжения на основе фотоэлектричества является уровень инсоляции на приемную поверхность – то есть количество энергии приходящей от солнца. В данной работе для анализа фактора уровня инсоляции был использован программный продукт PVsyst, описание которого представлено в параграфе 1.4.

Особый интерес ПО PVsyst вызывает детализация данных (инсоляция на горизонтальную поверхность, инсоляция на наклонную поверхность, выработка электрической энергии фотомассивом и т.д.) в разрезе дня. Из базы данных, используемой программой, можно получить детализированные данные за каждый час, конкретного дня отсчетного года. И после определенной обработки можно вычислить характерные сутки месяца по инсоляции, которые будут использованы при анализе работы всей гибридной системы электроснабжения.

Интегральный уровень инсоляции для рассматриваемого месяца для i -го часа характерных суток вычисляется по формуле [8]:

$$P_{ixc} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (2.2.1)$$

где, P_{ixc} – инсоляция на i -м часе характерных суток; P_{ij} – мощность инсоляции на приемную поверхность на i -м часе в j -й день месяца; n – количество дней в месяце; $i = (0 \div 23)$ час суток; $j = (1-n)$ – день месяца.

Суммарная энергия инсоляции за характерные сутки W_{xc} , месяца по формуле:

$$W_{xc} = \sum_{i=0}^{23} P_{ixc} \quad (2.2.2)$$

Месячная энергия W_M , соответственно:

$$W_M = n \cdot W_{xc} \quad (2.2.3)$$

Используя возможности программы, были вычислены характерные сутки летнего периода, в двух граничных районах Якутии: южный - Алдан (58.6° с.ш.) и

северный - Оленек (68.5° с.ш.). Проведен сравнительный анализ местоположений по двум параметрам – инсоляция на горизонтальную поверхность, Вт/м², и энергию вырабатываемую фотоэлектрическим массивом, Вт. В обоих случаях моделировалась система установленной мощностью 5 кВт, на основе поликристаллических панелей, с фиксированным углом установки панелей равным 52°. Результат сравнения представлен в таблице №5.

Таблица №5 Сравнительные данные п. Алдан, Оленек (характерные сутки)

Время	Алдан						Оленек					
	Инсоляция на горизонтальную поверхность, Вт/м ²			Энергия поставляемая в сеть, Вт			Инсоляция на горизонтальную поверхность, Вт/м ²			Энергия поставляемая в сеть, Вт		
	Июн.	Июл.	Авг.	Июн.	Июл.	Авг.	Июн.	Июл.	Авг.	Июн.	Июл.	Авг.
0:00	0	0	0	0	0	0	32	19	0	45	25	0
1:00	0	0	0	0	0	0	20	7	0	30	10	0
2:00	0	0	0	0	0	0	15	4	0	33	7	0
3:00	0	0	0	0	0	0	19	8	0	28	14	0
4:00	29	18	0	36	18	0	31	18	0	37	23	0
5:00	89	72	20	116	75	22	59	43	3	74	56	5
6:00	168	153	76	252	175	107	101	81	16	129	111	20
7:00	257	242	150	871	787	560	155	130	50	206	177	71
8:00	324	330	236	1467	1523	1190	223	199	97	465	383	170
9:00	408	425	289	2086	2242	1579	298	279	152	1252	1158	697
10:00	454	502	339	2413	2789	1894	363	340	218	1947	1834	1357
11:00	473	492	368	2570	2778	2104	362	397	282	2099	2409	1995
12:00	456	488	473	2458	2763	2341	396	454	347	2385	2914	2574
13:00	462	479	401	2494	2693	2289	421	469	359	2593	3089	2654
14:00	429	449	364	2410	2451	2044	434	478	376	2678	3147	2810
15:00	404	418	331	2050	2214	1789	437	456	363	2723	2969	2685
16:00	341	358	267	1566	1729	1364	439	431	327	2697	2753	2331
17:00	254	259	193	951	1011	833	407	404	294	2382	2467	2006
18:00	184	186	117	382	381	235	354	345	246	1838	1878	1529
19:00	100	94	48	135	116	62	279	288	175	1159	1238	841
20:00	36	31	5	34	29	8	221	219	111	531	481	240
21:00	5	1	0	7	1	0	164	153	61	234	167	80
22:00	0	0	0	0	0	0	108	87	22	146	97	24
23:00	0	0	0	0	0	0	62	41	5	79	43	5
Итого, кВт*ч (/м²)	4,8	5	3,6	22	24	19	5	5	4	26	28	22

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что в южном районе выше активность солнца в полуденные часы, но при этом, чем севернее, тем больше итоговое количество энергии падающей от солнца на горизонтальную поверхность (июнь, июль). Это объясняется тем, что летом (июнь, июль) в северных районах Якутии устанавливается полярный день, и солнце на небосводе присутствует 24 часа в сутки. За счет полярного дня, график выработки электрической энергии в северных районах более равномерен, чем в южных. Что говорит о том, что установленная мощность станции, мощность инверторов, аккумуляторов в Оленьке (и других районах аналогичных широт) может быть снижена при той же выработке электроэнергии относительно подобной станции установленной в южных широтах. Данные таблицы №5 отображены в графических зависимостях, представленных на рисунках 21÷24 соответственно.

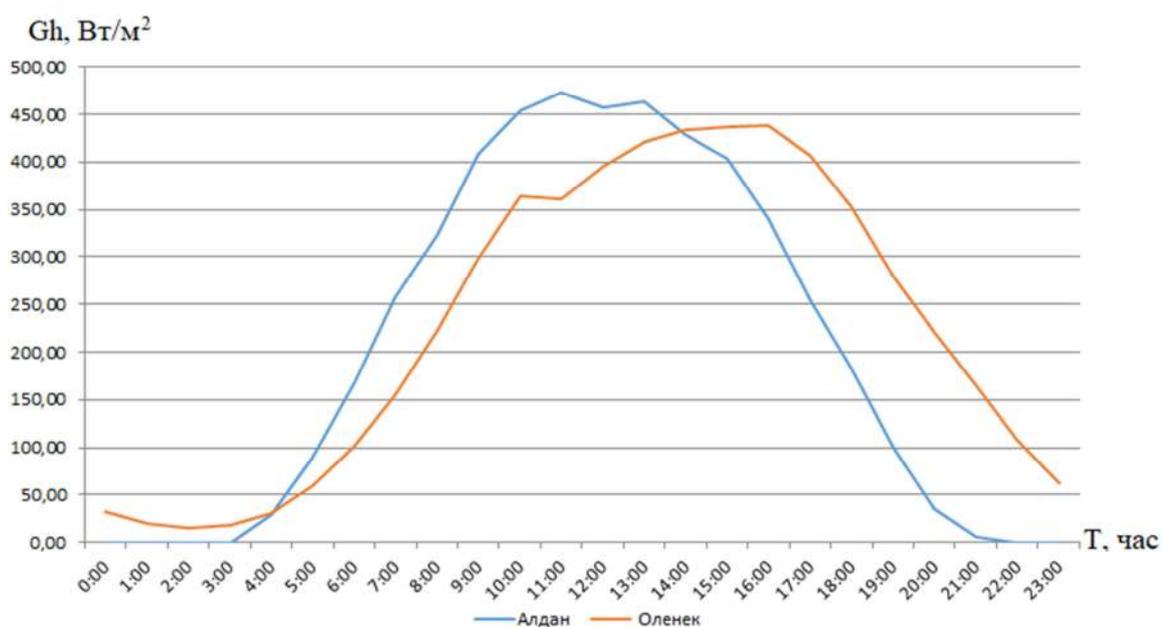


Рис.21 Инсоляция на горизонтальную поверхность в поселках Алдан, Оленек, Июнь (характерные сутки)

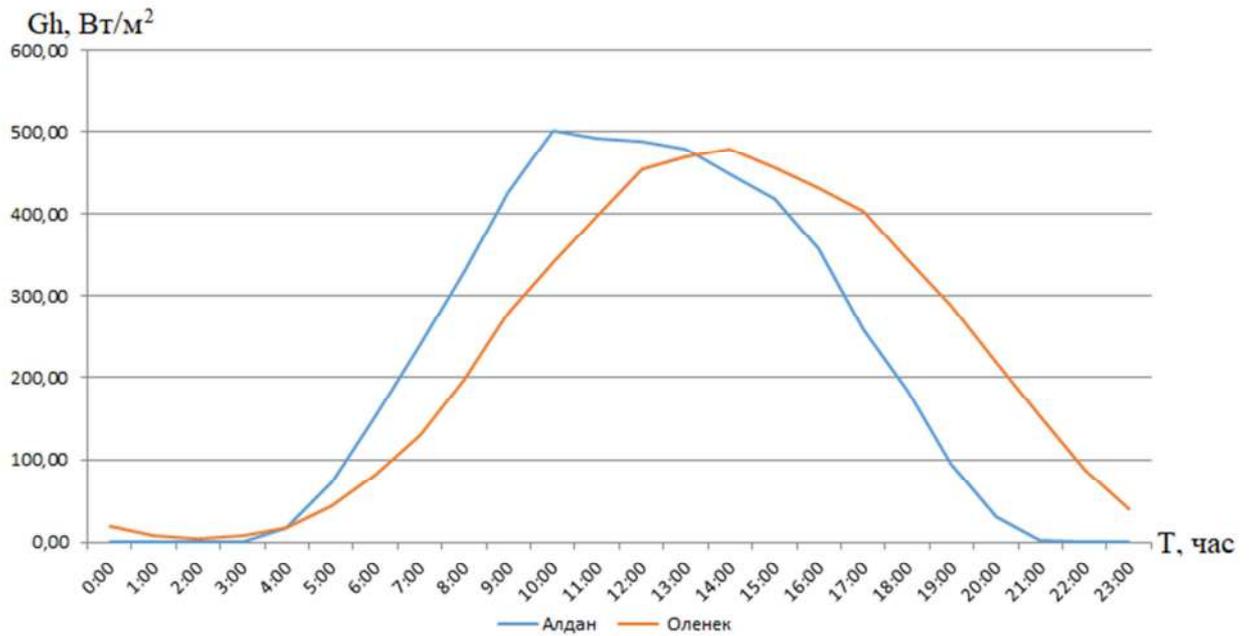


Рис.22 Инсоляция на горизонтальную поверхность в поселках Алдан, Оленок, Июль (характерные сутки)

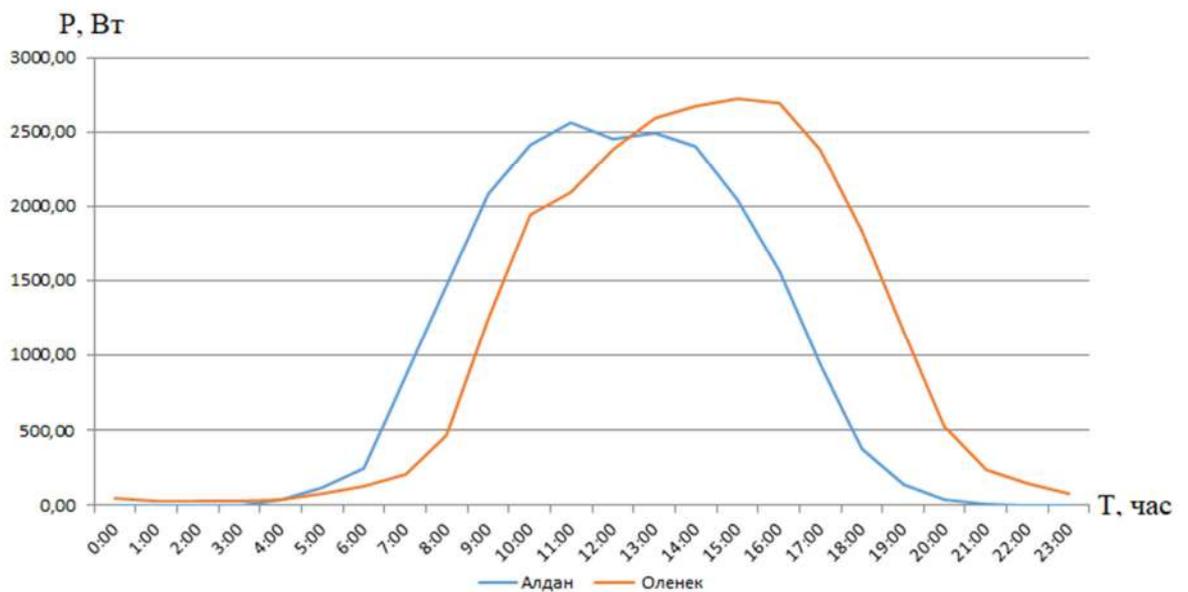


Рис.23 Выработка электрической энергии в поселках Алдан, Оленок (с учетом потерь в элементах системы), Июнь (характерные сутки)

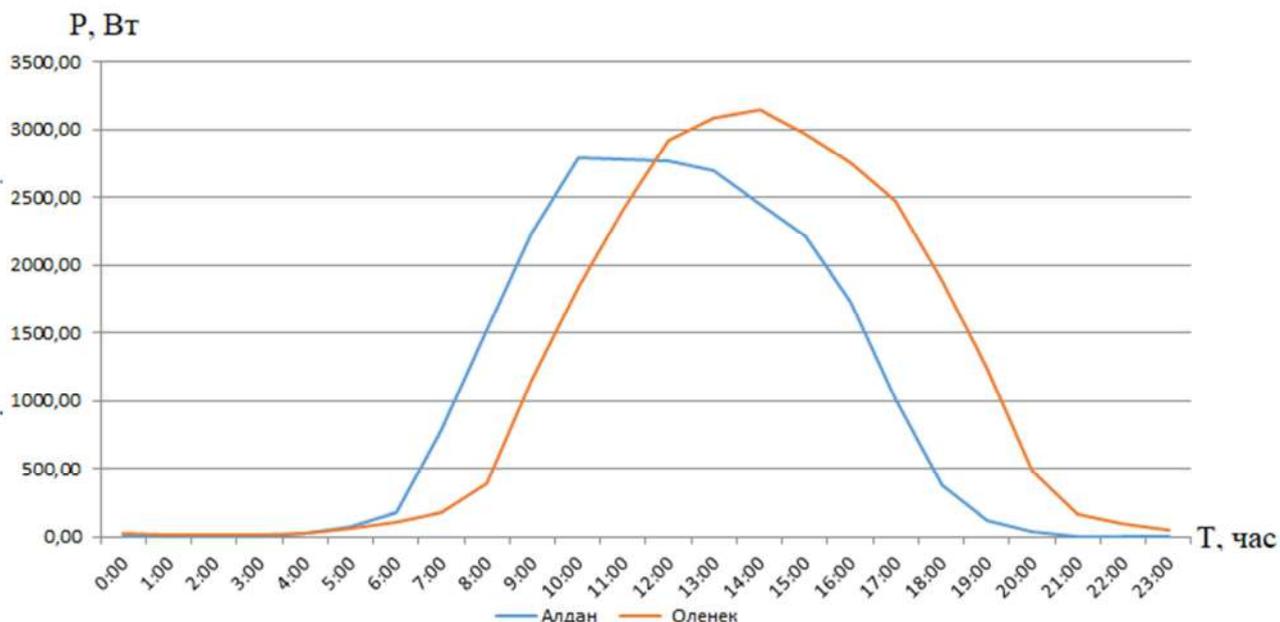


Рис.24 Выработка электрической энергии в поселках Алдан, Оленок (с учетом потерь в элементах системы), Июль (характерные сутки)

Сравнивая графики и табличные значения можно увидеть, что инсоляция в обеденные часы в Алдане немного выше чем, в Оленьке. Но, не смотря на это, пик выработки электрической энергии, там значительно ниже. Это объясняется выбором фиксированного угла наклона панелей, составляющего 52° , для обоих районов. Данный угол выбран не случайно, а путем использования встроенного инструмента в программный продукт PVsyst, который позволяет определить оптимальный угол наклона панелей для конкретной местности, в конкретный период года. В нашем случае для обеих станций периодом является целый год. Результат работы встроенного инструмента можно увидеть на рисунке 25 (для Алдана) и рисунке 26 (для Оленька). В случае поиска оптимальной установленной мощности станции для конкретной местности (населенный пункт), границы фактора распределения должны быть изменены для того, чтобы получить максимальное эффективное использование станции в требуемый период времени.

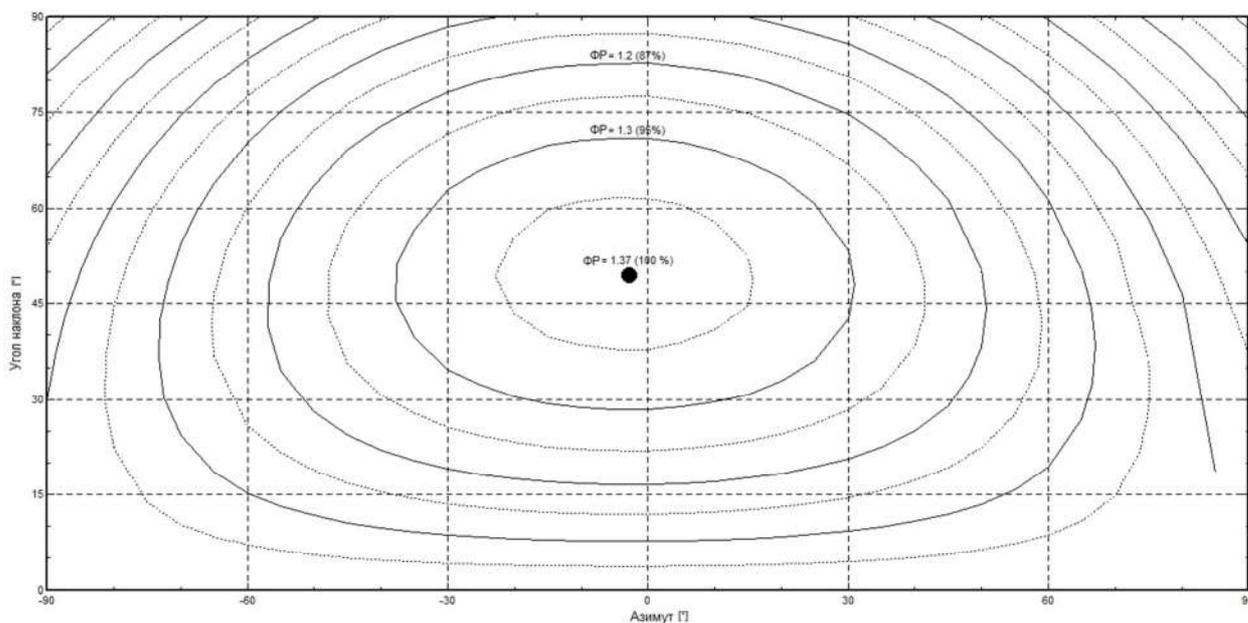


Рис.25 Определение оптимального (фиксированного) угла наклона панелей для п. Алдан. Период – год. Инсоляция на горизонтальную поверхность = $1009 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$

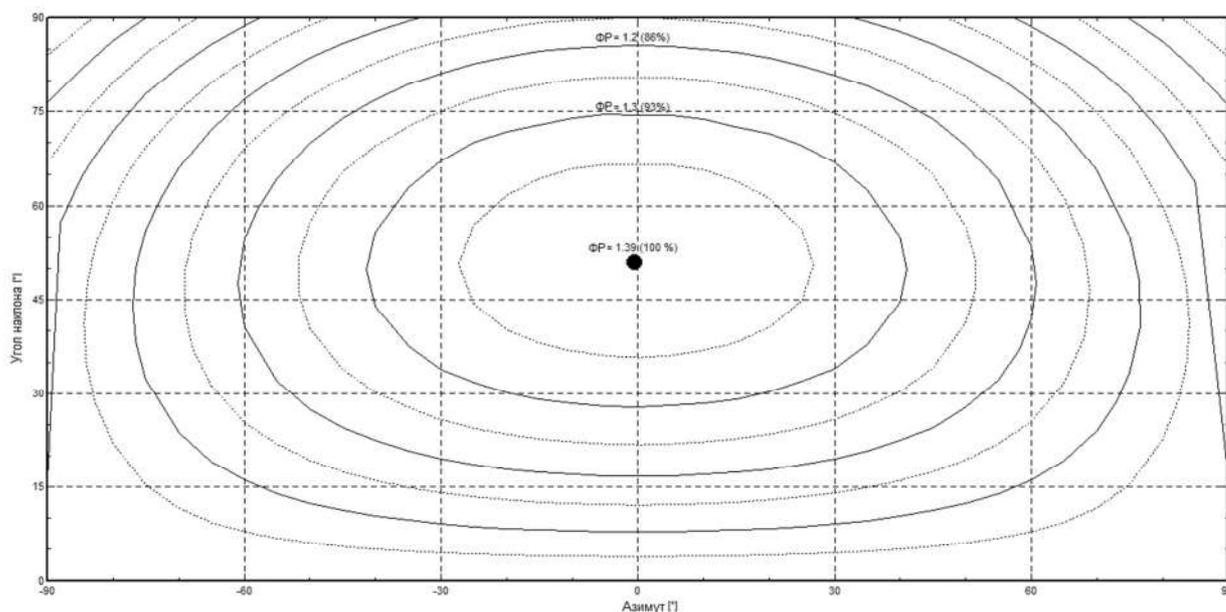


Рис.26 Определение оптимального (фиксированного) угла наклона панелей для п. Оленек. Период – год. Инсоляция на горизонтальную поверхность = $893 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$

Как правило, в северных районах Якутии зимний период года не интересен с точки зрения исследования эффективности работы фотоэлектрических станций, по причине низкой солнечной активности, и 1,5 месячной полярной ночи (декабрь, январь).

2.2.3. Стоимость дизельного топлива и его влияние на себестоимость кВт*ч электрической энергии

В настоящее время большое количество территорий Российской Федерации на которых проживают граждане нашей страны, не имеет доступа к централизованному электроснабжению. Их электроснабжение производится с помощью автономных дизельных электроустановок в составе дизельных электростанций. Для поддержания работоспособности дизельных электроустановок, требуется стабильное обеспечение станции дизельным топливом. Транспортировка топлива в удаленные районы со слабо развитой инфраструктурой ограничена климатическими характеристиками водных путей и зимних автодорог. Это естественным образом существенно отражается на конечной стоимости топливных ресурсов, цена которых и так постоянно растет. Динамика изменения цены на дизельное топливо по России представлена на рисунке 27 [28].



Рис. 27 Динамика розничных цен на дизельное топливо (руб./л) в России

Информация, представленная, на рисунке 27 отчетливо отражает неуклонный рост цен на дизельное топливо, от года к году. Учитывая протяженные границы территории Российской Федерации, итоговая цена на дизельное топливо в различных ее районах имеет различную стоимость (см. таблицу №6) [49, 42].

Таблица №6 Средние потребительские цены на бензин и дизельное топливо в субъектах Российской Федерации в ноябре 2017 г., руб/л.

	Бензин автомобильный	В том числе марки			Дизельное топливо
		АИ- 80	АИ- 92	АИ- 95	
Российская Федерация	38,52	34,74	37,43	40,47	39,34
Центральный федеральный округ	38,52	33,71	37,29	40,67	38,47
Северо-Западный федеральный округ	38,92	36,36	37,69	40,76	40,35
Южный федеральный округ	39,82	...	38,57	41,85	38,51
Северо-Кавказский федеральный округ	39,14	...	38	40,83	35,88
Приволжский федеральный округ	38	34,58	36,92	39,92	38,75
Уральский федеральный округ	37,53	33,7	36,44	39,31	40,22
Сибирский федеральный округ	37,53	31,91	36,68	39,24	40,04
Дальневосточный федеральный округ	40,96	35,81	40,71	42,72	44,4
Республика Саха (Якутия)	48,71	35,21	48,65	49,54	49,87

Высокая стоимость привозного дизельного топлива для ДЭС, и соответственно производимой электроэнергии является одной из первостепенных проблем, которая оказывает существенное влияние на качество электроснабжения удаленных районов, а также на бюджет государства, так как большая часть платы за электроэнергию покрывается за счет дотаций государства.

В условиях постоянного роста тарифов на энергоносители и, как следствие, роста цен на дизельное топливо, минимизация его использования является весьма актуальной задачей.

Так в п. Батагай (67°39'23 с.ш.) на нужды электроснабжения потребляется около 6000 тонн дизельного топлива в год. При этом вырабатывается 23200 тыс. кВт·ч электрической энергии. Примечательно, что в наиболее солнечный летний сезон потребность в электроэнергии в несколько раз меньше по сравнению с зимним энергопотреблением (см. таблицу №8). При постоянном росте цен на дизельное топливо (см. таблицу №7), производство электрической энергии постоянно увеличивается в цене. Тариф на электроэнергию в п. Батагай более чем на 60% определяется топливной составляющей. Поэтому основной целью строительства гибридных ФДЭС в удаленных, децентрализованных районах является снижение тарифа, за счет экономии привозного дорогостоящего ДТ.

Таблица №7. Цена дизельного топлива в п. Батагай

ДЭС п.Батагай	Цена топлива, руб/т без НДС						
	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.
ДТЗ	24 246	30 014	30 425	33 579	38 115	41 361	49961

Таблица №8. Показатели нагрузки ДЭС Батагай в 2012 г.

Выработанная электроэнергия	кВт*ч в год	23 525 558
Минимальная зимняя нагрузка	кВт	3275
Максимальная зимняя нагрузка	кВт	5186
Минимальная летняя нагрузка	кВт	907
Максимальная летняя нагрузка	кВт	2075

Как видно из представленной таблицы, в отчетном 2012 году потребность в электроэнергии характеризовалась широким диапазоном изменения значений. Такая ситуация характерна для большого числа населенных пунктов Якутии.

Анализируя данные таблицы №7 можно заметить, что всего за 6 лет стоимость дизельного топлива для такого удаленного поселка, как Батагай изменилась более чем в 2 раза. Это естественным образом отражается на постоянном росте цен на электрическую энергию. Ситуация осложняется тем, что в децентрализованных

областях, для нужд электроснабжения, как правило, используются дизельные агрегаты с отработанным моторесурсом, требующие капитального ремонта. У подобного оборудования потребление дизельного топлива (г/кВт·ч) на выработку электрической энергии может быть значительно больше, чем у новых современных машин. Это приводит к перерасходу топлива, и серьезно отражается на конечной стоимости электрической энергии, учитывая, что большая часть стоимости отпускаемой электроэнергии зависит от топливной составляющей, заложенной в тариф.

Вопрос экономической целесообразности играет важную роль в применении источников электрической энергии на основе фото-дизельной генерации, являясь главным фактором, из-за которого может быть приостановлена реализация проекта строительства подобного объекта [63, 64]. В связи с этим главным экономическим фактором влияющим на развитие проектов гибридных систем, становится стоимость кВт*ч производимой энергии.

Реализация проекта строительства гибридной солнечно-дизельной электростанции начинается с технико-экономического обоснования. Для того чтобы проект был реализован, требуется осуществить следующие шаги, каждый из которых требует финансовых вливаний [65]:

1. Технико-экономическое обоснование;
2. Проектирование;
3. Закупка оборудования и материала
4. Транспортировка;
5. Монтаж, установка;
6. Наладка;
7. Эксплуатация.

Выражение для общих капиталовложений на строительство гибридной фото-дизельной электростанции при этом будет иметь следующий вид:

$$K = K_{уст} + K_{пр} + K_{стр} \quad (2.2.4)$$

где, $K_{уст}$ – стоимость комплектного оборудования (руб);

$K_{пр}$ – стоимость проектных работ (руб);

$K_{стр}$ – стоимость строительных, монтажных и наладочных работ по установке электростанции (руб);

При этом цена фотоэлектрической части гибридной станции складывается из цен на фотоэлектрические модули, силовое оборудование (инвертор, трансформатор, коммутационные коробки), кабельную продукцию и опорные конструкции. Где самой дорогой частью являются модули, цена которых составляет около 70% от общей стоимости, комплектующих, около 10-15% цены составляет стоимость силового оборудования и оставшееся приходится на все остальное.

После ввода проекта в эксплуатацию, новая стоимость складывается из затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание объекта генерации. Выражение для общих годовых эксплуатационных затрат имеет вид:

$$C = C_{экс} + C_{рем} + C_{топ} + C_{д.топ} \quad (2.2.5)$$

где, $C_{экс}$ – годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения (руб);

$C_{рем}$ – годовые расходы на плановый ремонт (руб);

$C_{топ}$ – годовые расходы на топливо (руб);

$C_{д.топ}$ – годовые расходы на доставку топлива (руб).

В случае с фотоэлектрической системой, модули при нормальной работе не заменяются в течение всего срока службы (обозначено производителем как 25 лет, с понижением производительности до 80% от номинала). Инвертор заменяется единожды по истечению примерно 10 лет работы. В целом техническое обслуживание фотоэлектрических систем заключается в периодической чистке панелей от пыли и снега.

Продолжительность жизненного цикла дизельного генератора постоянного использования, как правило, варьируется от 23000 до 25000 моточасов (по инструкции производителей). В течение этого периода работы по техническому

обслуживанию включают в себя: долив и замену моторного масла, замена топливных и воздушных фильтров, замена хладагента, несколько плановых капитальных ремонтов и т.д.

Общие затраты на строительство гибридной станции это не только капитальные затраты на ее возведение, но их сумма с затратами на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Приведенные годовые затраты на 1 кВт установленной мощности гибридной системы электроснабжения определяются из выражения:

$$З = \frac{p_H \cdot K + C}{P} \quad (2.2.6)$$

где, P – установленная мощность объекта электроснабжения (кВт);

p_H – нормативный коэффициент рентабельности, определяемый по формуле:

$$p_H = \frac{1}{T} \quad (2.2.7)$$

где, T – экономический срок службы оборудования.

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии:

$$C_{эл} = \frac{p_H \cdot K + C}{W}, \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч} \quad (2.2.8)$$

где, W – общее количество электрической энергии, вырабатываемое электростанцией в течение года, кВт·ч.

При реализации проектов гибридных систем электроснабжения в удаленных децентрализованных районах следует уделять внимание не только технико-экономической составляющей обоснования, но также оценке социально-экологических критериев. Подчас количественная оценка социально-экологических критериев крайне затруднительна, поэтому при анализе производится только их качественная оценка, которая может служить в качестве дополнительного критерия при выборе наиболее рационального варианта электроснабжения автономного объекта [22].

Под социально-экономическими критериями понимается:

- Потенциальная угроза жизни людей;
- Наличие топливной составляющей;
- Отчуждение земли;
- Влияние на флору и фауну;
- Акустическое воздействие и вибрация;
- Электромагнитное излучение.

Все перечисленные критерии являются составляющими стоимости электрической энергии производимой энергетическими комплексами, работающими на органическом топливе. При этом затраты распределяются на все общество, но не включаются в тарифы за энергию [38].

Приближенные оценки прямых социальных затрат, связанных с вредным воздействием электростанций, включая болезни и снижение продолжительности жизни людей, оплату медицинского обслуживания, потери на производстве, снижение урожая, восстановление лесов и ремонт зданий в результате загрязнения воздуха, воды и почвы дают величину, добавляющую около 75% мировых цен на топливо и энергию [54].

2.3 Математическое моделирование элементов децентрализованных систем электроснабжения с фотоэлектрическими станциями

Гибридная ФДЭС в зависимости от схемы построения (см. параграф 2.1) может состоять из следующих компонентов:

- Фотоэлектрических преобразователей;
- Трансформаторов напряжения;
- Преобразователей электроэнергии (сетевой, батарейный инвертор);
- Линий электропередач;

- Аккумуляторных батарей;
- Дизель-генераторных установок;
- Нагрузки.

Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), инверторы.

В диссертационной работе моделирование фотоэлектрической части гибридной станции производится в программном продукте PVsyst. Для оценки адекватности итоговых данных фотоэлектрической системы была проведена проверка программного продукта PVsyst [8].

Для проведения эксперимента в качестве основы были взяты существующие данные годовой выработки электрической энергии (за 2012 г.) фотоэлектрической станцией п. Ючугей Оймьяконского улуса Республики Саха (Якутия) мощностью 20 кВт, полученные от местной электросетевой организации.

В качестве исходных данных по инсоляции для расчета использованы данные солнечного излучения близлежащей к поселку метеостанции Верхоянск. Производилось моделирование станции установленной мощностью 20 кВт на основе поликристаллических панелей, размещенных под углом 45° к горизонту, и ориентированных на юг (аналогично реальному объекту).

Данные имитационного моделирования фотопреобразования приведены в таблице №9, где для каждого месяца определены характерные сутки [8] с точки зрения интегральных значений инсоляции на основании формул 2.2.1÷2.2.3. Статистический подход к моделированию, заложенный в комплексе PVsyst, позволяет косвенно учесть реальную облачность и другие характеристики прозрачности атмосферы

Расчетная выработка электроэнергии ФЭС п. Ючугей на основе данных инсоляции для характерных суток за каждый месяц приведены в таблице №10. В таблицах №9 и №10 не приведены данные за декабрь в течение которого на рассматриваемой широте наблюдается полярная ночь.

Таблица №9. Инсоляция на горизонтальную поверхность

п. Ючугей (метеостанция Верхоянск), Инсоляция на горизонтальную поверхность (характерные сутки), Вт/м ²											
	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.
0:00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,54	19,26	9,97	0,00	0,00	0,00	0,00
1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,21	1,98	0,00	0,00	0,00	0,00
2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,45	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00
3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	18,48	6,11	0,00	0,00	0,00	0,00
4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,62	34,05	19,95	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,15	64,49	49,66	6,32	0,00	0,00	0,00
6:00	0,00	0,00	0,00	15,76	85,89	118,9	97,33	30,48	0,00	0,00	0,00
7:00	0,00	0,00	0,00	63,12	155,1	183	170,1	76,18	8,17	0,00	0,00
8:00	0,00	0,00	16,06	141,25	245,2	258,9	247,5	139,3	39,31	0,00	0,00
9:00	0,00	0,00	65,23	234,73	317,8	334,7	327,9	200	95,02	13,66	0,00
10:00	0,00	11,90	136,34	329,47	401	394,1	406,4	268,2	137,7	48,63	0,00
11:00	0,00	40,51	210,95	409,53	440,8	461,3	450,3	313,8	190,9	90,25	12,94
12:00	5,63	71,51	272,29	464,19	483,9	489,7	487,8	357,2	242,2	128,90	31,54
13:00	15,53	107,2	307,98	493,25	513,2	520	506,8	383,2	257,2	146,21	40,59
14:00	13,92	117,9	318,92	489,49	520,3	543,7	509,5	381,9	274,5	140,50	34,39
15:00	9,43	101,9	293,41	464,08	497,8	517,8	469,3	380,4	235,1	126,03	21,53
16:00	2,65	66,95	247,83	407,48	458,7	483,9	417,7	347,1	207,3	86,78	6,60
17:00	0,00	27,91	175,89	332,11	383,4	417,9	376,7	293,5	160,4	49,61	0,00
18:00	0,00	5,05	100,65	247,82	311,9	342,8	305,9	227,5	97,47	13,11	0,00
19:00	0,00	0,00	35,15	155,11	230,9	275,3	218,5	162,5	43,44	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	3,16	75,06	154,8	199,9	150,7	97,06	9,44	0,00	0,00
21:00	0,00	0,00	0,00	20,90	90,24	132,9	95,06	49,94	0,00	0,00	0,00
22:00	0,00	0,00	0,00	0,87	43,60	78,71	53,23	14,20	0,00	0,00	0,00
23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,51	41,26	25,17	0,32	0,00	0,00	0,00
Итого кВт*ч/ м² день	0,05	0,55	2,18	4,34	5,40	5,95	5,41	3,73	2,00	0,84	0,15

Таблица №10. Расчетная выработка электрической энергии ФЭС

п. Ючугей (метеостанция Верхоянск), Энергия выдаваемая в сеть (характерные сутки), Вт											
	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.
0:00	0	0	0	0	17	191	98	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	141	22	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	119	13	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	12	176	80	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	135	282	173	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	350	526	427	54	0	0	0
6:00	0	0	0	154	661	929	787	229	0	0	0
7:00	0	0	0	500	1008	1327	1211	547	57	0	0
8:00	0	0	295	2426	3778	3692	3287	1984	702	0	0
9:00	0	0	2697	6754	7054	6495	6356	4346	2978	456	0
10:00	0	727	7093	11232	10282	8748	9232	6804	4925	2852	0
11:00	0	2845	11393	14861	11987	11022	10979	8457	6982	5296	958
12:00	258	5954	14775	17093	13531	12045	12232	9927	8561	7106	3258
13:00	1493	8611	16538	18196	14454	12878	12729	10620	9184	8015	4372
14:00	1212	9505	17107	17872	14658	13617	12737	10642	9728	7975	3487
15:00	503	8358	15720	16899	13886	12828	11428	10524	8209	7219	1761
16:00	60	5613	13335	14544	12408	11549	9851	9389	7329	5020	310
17:00	0	2105	9254	11199	9614	9348	8400	7562	5591	2718	0
18:00	0	159	4852	7316	6836	6719	6029	5201	2961	538	0
19:00	0	0	1040	3104	3753	4164	3383	2794	817	0	0
20:00	0	0	40	546	1239	1475	1274	750	46	0	0
21:00	0	0	0	194	768	925	736	400	0	0	0
22:00	0	0	0	11	409	592	416	114	0	0	0
23:00	0	0	0	0	9	315	180	0	0	0	0
Итого кВт*ч/ день	3,53	43,88	114,14	142,90	126,85	120,10	112,06	90,34	68,07	47,19	14,15

Реальные ежемесячные данные выработки электрической энергии фотоэлектрической станцией в поселке Ючугей за 2012 г. в графическом виде представлены на рисунке 28.

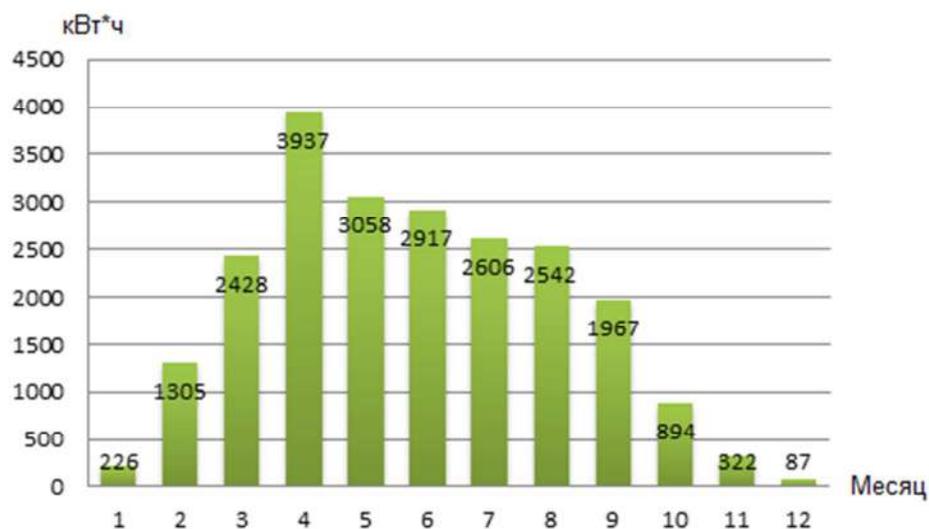


Рис.28 Реальные значения выработки ФЭС п. Ючугей (20 кВт)

Сравнение расчетных и фактических объемов выработки электроэнергии рассматриваемой фотоэлектростанции представлено в таблице №11.

Таблица №11. Сравнение выработки электрической энергии ФЭС

Месяц	Реальные значения	Расчетные PVsyst	Относительная разница между реальной выработкой, и расчетной, %
	Энергия массива, кВт·ч	Энергия массива, кВт·ч	
Январь	226	101	55
Февраль	1305	1135	13
Март	2428	3277	35
Апрель	3937	3953	0.4
Май	3058	3609	18
Июнь	2917	3285	13
Июль	2606	3154	21
Август	2542	2548	0.2
Сентябрь	1967	1862	5.3
Октябрь	894	1340	50
Ноябрь	322	389	21
Декабрь	87	0	-
Годовой	22289	24655	10.6

Расчеты проведены с помощью программного комплекса PVsyst с исходными данными, соответствующими реальным. В таблице №11 приведены объемы ежемесячной фактической выработки ФЭС п. Ючугей, расчетной выработки и

относительной разницы между фактическими и расчетными значениями генерируемой электроэнергии за каждый месяц (1):

$$\Delta W_i = \frac{|W_{\phi i} - W_{pi}|}{W_{\phi i}} \cdot 100\%, \quad (2.3.1)$$

где $W_{\phi i} - W_{pi}$ – фактическая и расчетная электроэнергия за i -месяц.

Тестирование программного комплекса PVsyst показало, что расчетная погрешность по годовой выработке составляет около 10%, что вполне приемлемо для оценки потенциала возобновляемых энергоисточников. Следует отметить, что данные о фактической выработке электроэнергии могут содержать ряд погрешностей технического характера для оценки, которых необходимы тщательно организованные наблюдения. В частности, объемы электроэнергии ФЭС автономной системы зависят не только от потенциальных возможностей фотопреобразователей, но и от уровня потребления или аккумуляирования генерируемой электроэнергии. Тем не менее, данные коммерческого учета ФЭС п. Ючугей могут рассматриваться, как критерий для сравнения с расчетными.

Аккумуляторные батареи (АКБ)

Нестационарный режим работы фотоэлектрических преобразователей оправдывает применение АКБ в децентрализованных СЭС малой мощности. Введение в состав ФДЭС аккумуляторных батарей приводит к значительному увеличению коэффициента использования установленной мощности станции (КИУМ). Это объясняется стабилизирующим эффектом, влияющим на рабочие параметры децентрализованных СЭС [68].

Математическая модель АКБ представляет собой [70]:

Доступная (запасенная) энергия в АКБ в конце интервала имеет выражение:

$$W_{AB}^K = W_{AB}^H + P_{ЭН} \cdot \Delta t \quad (2.3.2)$$

Где, W_{AB}^H – внутренняя энергия АКБ в начале интервала;

$P_{ЭН}$ – знакопеременная функция входной мощности ($P_{ЭН} > 0$ – заряд АКБ, $P_{ЭН} \leq 0$ – разряд АКБ);

Δt – продолжительность временного интервала.

$$W_{AB}^H = E_{AB}^H \cdot U_{AB}^H \quad (2.3.3)$$

Где, E_{AB}^H – емкость АКБ в начале интервала Δt ;

U_{AB}^H – напряжение АКБ;

Внутреннее сопротивление АКБ

$$R_{AB} = \frac{(U_{AB}^H)^2}{W_{AB}^H} \quad (2.3.4)$$

Приведенная модель позволяет определять основные эксплуатационные параметры АКБ.

Дизель-генераторные установки

Дизельная генераторная установка в зависимости от схемы построения гибридной станции является резервным, либо основным источником энергии. При проведении моделирования дизельной установки, в качестве исходных данных используются данные завода изготовителя, данные по существующим агрегатам, либо усредненные данные установок одинаковой мощности разных производителей. В расчетной модели потребление дизельного топлива установками определяется по выражению [66]:

$$B_{дэс} = \sum_{t=1}^{T=1200} \varphi_{дэс} \cdot W_{дэс} \quad (2.3.5)$$

где, $\varphi_{дэс}$ – среднее значение (расчетное) потребления топлива ДЭС на производство электрической энергии, г/кВт*ч;

$W_{дэс}$ - энергия выработанная дизельной составляющей ГС за отсчетный период времени.

Нагрузка

Графики потребления электрической энергии служат основной исходной информацией, отражающей характер нагрузки и ее изменение. Вид графика нагрузки зависит от значительного количества факторов: время года; вид деятельности потребителя; временная детализация (год, месяц, час) и т.д.

В данной диссертации в расчетах предполагается использование графиков нагрузки с частотой дискретизации один час, при этом для ограничения расчётов на разумном уровне (без потери точности вычислений) для каждого месяца нагрузки определяются характерные сутки по формулам 2.2.1÷2.2.3.

На рисунке 29 представлен суточный график нагрузки децентрализованной системы электроснабжения поселка Юнкюр, в январе и июле.

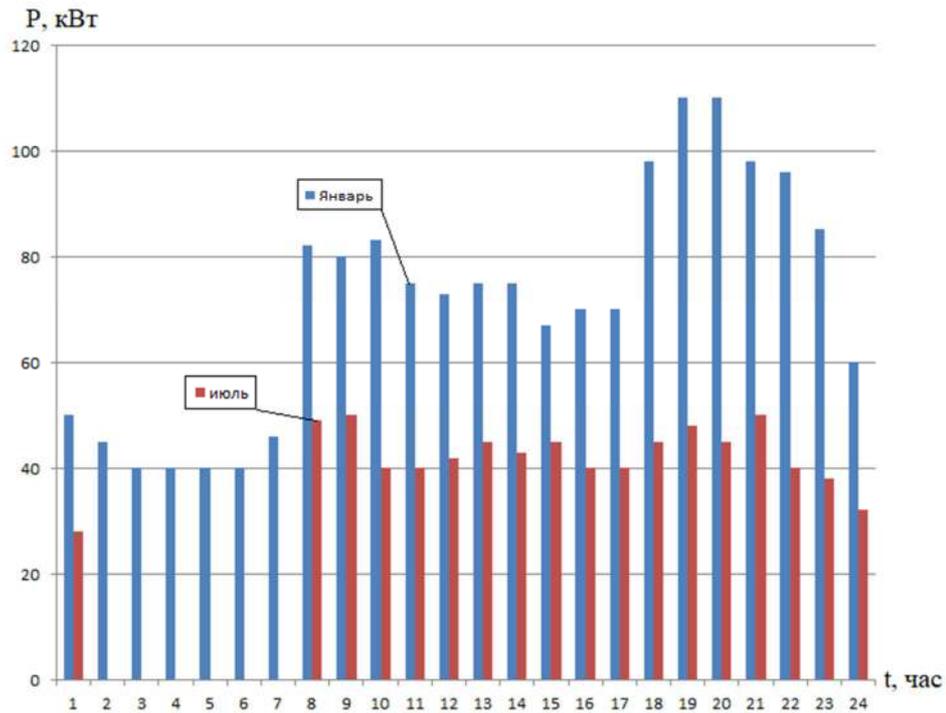


Рис. 29 График нагрузки п. Юнкюр, в январе и июле (характерные сутки)

Воздушные линии

Сечения проводников определяется исходя из нагрева при максимально возможном токе от энергоисточника - ФЭП. Выбирается наименьшее сечение из ряда стандартных значений, удовлетворяющее требованию нагрева.

2.4 Краткие выводы

1. Представлены варианты схем построения фото-дизельных электростанций. Описаны сферы их применения.
2. Проанализированы факторы, определяющие технико-экономическую эффективность строительства гибридных ФДЭС. Определено значительное влияние стоимости дизельного топлива на себестоимость производимой электрической энергии в децентрализованных областях. Стоимость топлива в Якутии имеет наибольшие значения по сравнению с другими территориями России, особенно если учитывать децентрализованные области.
3. Определено что территория Якутия обладает значительным уровнем инсоляции на всем ее протяжении. При этом в северных районах (начиная с 66° с.ш.) летом наблюдается полярный день, что увеличивает продуктивность ФДЭС в летнее время по сравнению с южными.
4. Предложено понятие характерных суток, объединяющее уровень инсоляции, выработки электрической энергии, а также нагрузки для ограничения объема расчетов на разумном уровне, без потери информативности.
5. Приведены математические модели элементов децентрализованных систем электроснабжения с фотоэлектрическими станциями, которые использованы в дальнейшем для поиска оптимальных значений установленных мощностей гибридных ФДЭС.
6. Для оценки адекватности итоговых данных фотоэлектрических систем проведена верификация программного комплекса PVsyst, на основе сравнения основных энергетических показателей реального объекта с расчетными. Выявлена возможность применения комплекса при расчетах, так как погрешность не превышает 10% в годовом разрезе.

3. АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ГИБРИДНЫХ ФДЭС

3.1 Задачи и алгоритмы оптимизации структуры и состава фото-дизельных систем электроснабжения

Одной из основных задач данной диссертационной работы является определение оптимальных соотношений установленных мощностей составных частей (дизельной и фотоэлектрической) гибридной электростанции, а также выбор схемного решения для ее построения.

Для определения оптимального соотношения установленных мощностей ФЭС и ДЭС требуется анализ факторов, влияющих на технико-экономические характеристики гибридной системы электроснабжения. В качестве целевых функций в данной работе определены: КИУМ и себестоимость производимой электроэнергии.

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности, энергетического оборудования. Определяется как отношение фактической выработки энергии к теоретической, по выражению:

$$\text{КИУМ} = \frac{W}{P_{\text{уст}} \cdot T}, \% \quad (3.1.1)$$

Где, W – Объем энергии произведенный составной частью гибридной электростанции (ФЭС, либо ДЭС), за отсчетный период времени, кВт*ч;

$P_{\text{уст}}$ – установленная мощность составной части гибридного комплекса, кВт;

T – отсчетный период времени, ч.

Себестоимость 1 кВт·ч электрической энергии – один из важнейших параметров отражающий экономическую целесообразность выбора мощности составных частей фото-дизельной станции. Определяется по формуле:

$$C_{\text{общ}} = \frac{p_{\text{н.дэс}} \cdot K_{\text{дэс}} + C_{\text{дэс}} + p_{\text{н.фэс}} \cdot K_{\text{фэс}} + p_{\text{н.акб}} \cdot K_{\text{акб}}}{W} \quad (3.1.2)$$

Где, $K_{ДЭС}$, $K_{ФЭС}$, $K_{АКБ}$ – капиталовложения на строительство гибридного комплекса состоящего из дизельной, фотоэлектрической электростанций и аккумуляторных батарей, руб. Определяются по формуле 2.2.4; В случае построения системы работающей параллельно с сетью образованной ДЭС (без АКБ) $K_{АКБ} = 0$.

$C_{ДЭС}$ – эксплуатационные затраты на обслуживание дизельной станции, определяемые по выражению 2.2.5. Эксплуатационные расходы на обслуживание фотоэлектрической части гибридной ФДЭС не учитываются, в силу их относительно малой величины. Эксплуатационные расходы на обслуживание хранилища аккумуляторных батарей также не учитываются, так как в расчетах рассматриваются системы с малым числом герметичных аккумуляторов практически не требующих обслуживания.

$R_{Н.ДЭС}$, $R_{Н.ФЭС}$, $R_{Н.АКБ}$ – коэффициенты рентабельности дизельной, фотоэлектрической электростанций и аккумуляторных батарей соответственно;

При определении коэффициента рентабельности дизельной электростанции экономический срок службы энергетического оборудования в расчетах принят равным 9 годам. Как правило, дизельные электростанции удаленных поселков являются единственным возможным источником электропитания, поэтому в их составе должны быть использованы дизельные генераторы с большим эксплуатационным ресурсом.

Количество моточасов, которое генератор способен выработать на протяжении срока службы является одним из основных принципов классификации данного типа устройств, по этому параметру они делятся на три группы [3].

1. Дизельные электрогенераторы резервного типа питания. Характеризуются установленным моторесурсом с лимитом 500 часов в год.
2. Устройства ограниченного постоянного использования. Эксплуатационный срок службы равен 13000-15000 моточасов, в зависимости от эксплуатационной нагрузки.
3. Дизель-генераторы постоянного использования. Эксплуатационный ресурс подобных агрегатов составляет 23000-25000 моточасов. После

отработанного эксплуатационного ресурса производится капитальный ремонт. За весь срок службы такие дизельные генераторы проходят 2-3 капитальных ремонта.

При определении коэффициента рентабельности фотоэлектрической части гибридного комплекса срок службы основного оборудования принят равным 30 годам. Практически все производители фотоэлектрических панелей гарантируют их работу в течение этого срока с учетом снижения мощности на 20% за 25 лет (см. рис. 30) [33].

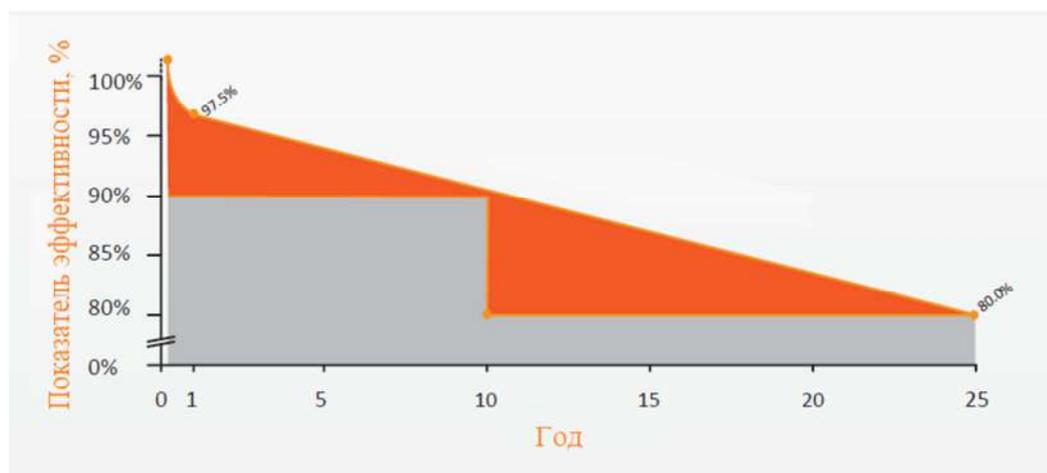


Рис.30 Зависимость снижения производительности ФЭП от времени

Срок службы аккумуляторных батарей во многом зависит от степени разряда, и количества циклов заряд/разряд. В расчетах максимальное значение разряда ограничено на уровне 50-60% от номинальной емкости. При подобном уровне разряда многие производители гарантируют работу батарей в течение 10 лет.

Расчет и оптимизация целевых функций осуществляется с использованием специализированного программного продукта для проектирования фотоэлектрических систем PVsyst и программного комплекса MS Excel на основе предложенных алгоритмов последовательности действий.

На рисунке 31 приведена блок-схема алгоритма, определяющая последовательность действий производимых для поиска оптимальных значений установленных мощностей генерирующего оборудования гибридной электрической станции с непрерывной дизельной генерацией.

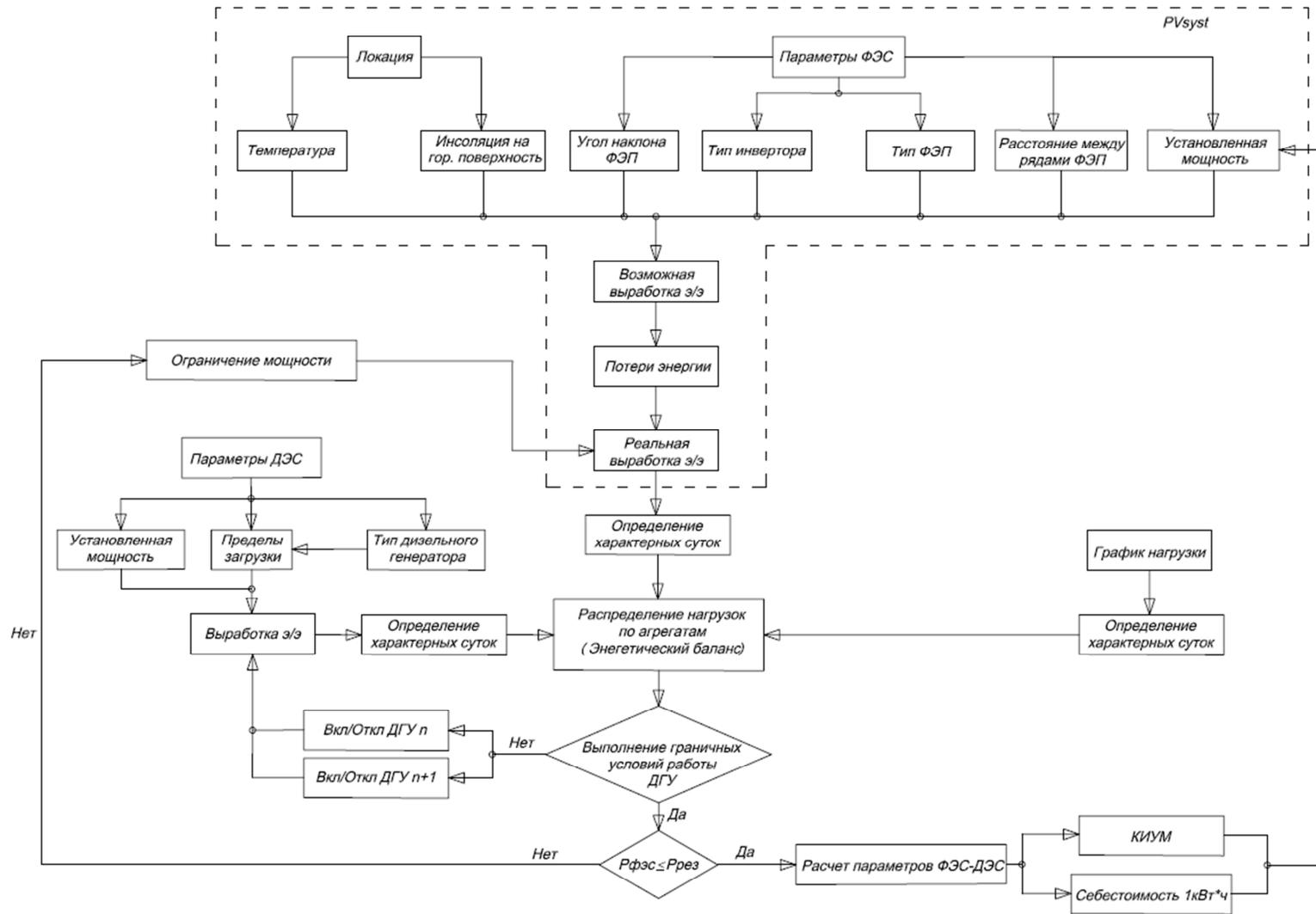


Рисунок 31. Блок схема ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией

Согласно алгоритму (см. рис. 31) в PVsyst заносятся данные фотоэлектрической части гибридной электростанции: количество ФЭП, угол наклона, тип, расстояние между рядами и т.д. На выходе оператор получает почасовые данные выработки электрической энергии от ФЭС, за вычетом потерь, которые далее импортируются в MS Excel, и усредняются до характерных суток каждого месяца. В программную среду MS Excel заносятся данные графика нагрузок исследуемой местности, которые также сводятся до характерных суток месяца. Добавляется информация о составе ДЭС и параметры дизельных агрегатов (установленная мощность, границы загрузки). Производится перераспределение нагрузки, между агрегатами исходя из соблюдения условий продления срока их службы (блок - граничные условия ДГУ) и обеспечения надежности работы системы ввиду влияния на энергетический баланс выработки электрической энергии фотоэлектрической составляющей станции. Уровень загрузки дизельной электростанции должен быть таким чтобы, в каждый момент времени остаточная мощность, которую она сможет принять на себя была больше мощности фотоэлектростанции (блок - $P_{\text{ФЭС}} \leq P_{\text{рез}}$). Если условия соблюдены, производится расчет значений целевых функций: КИУМ и себестоимость электроэнергии. Оптимумом при этом считается станция с максимальным значением КИУМ и минимальным значением себестоимости электроэнергии. Значения целевых функций анализируются оператором, и в случае необходимости исследование повторяется с измененной установленной мощностью ФЭС.

Данная блок-схема применима для исследования технико-экономических характеристик гибридных ФДЭС, не предусматривающих использования в своем составе аккумуляторных батарей. Как правило, это станции большой установленной мощности (сотни и тысячи кВт), когда применение АКБ нецелесообразно и влечет за собой не оправданное удорожание системы.

На рисунке 32 приведена блок-схема алгоритма, гибридной электрической станции с отдельной работой дизельной и фотоэлектрической частей.

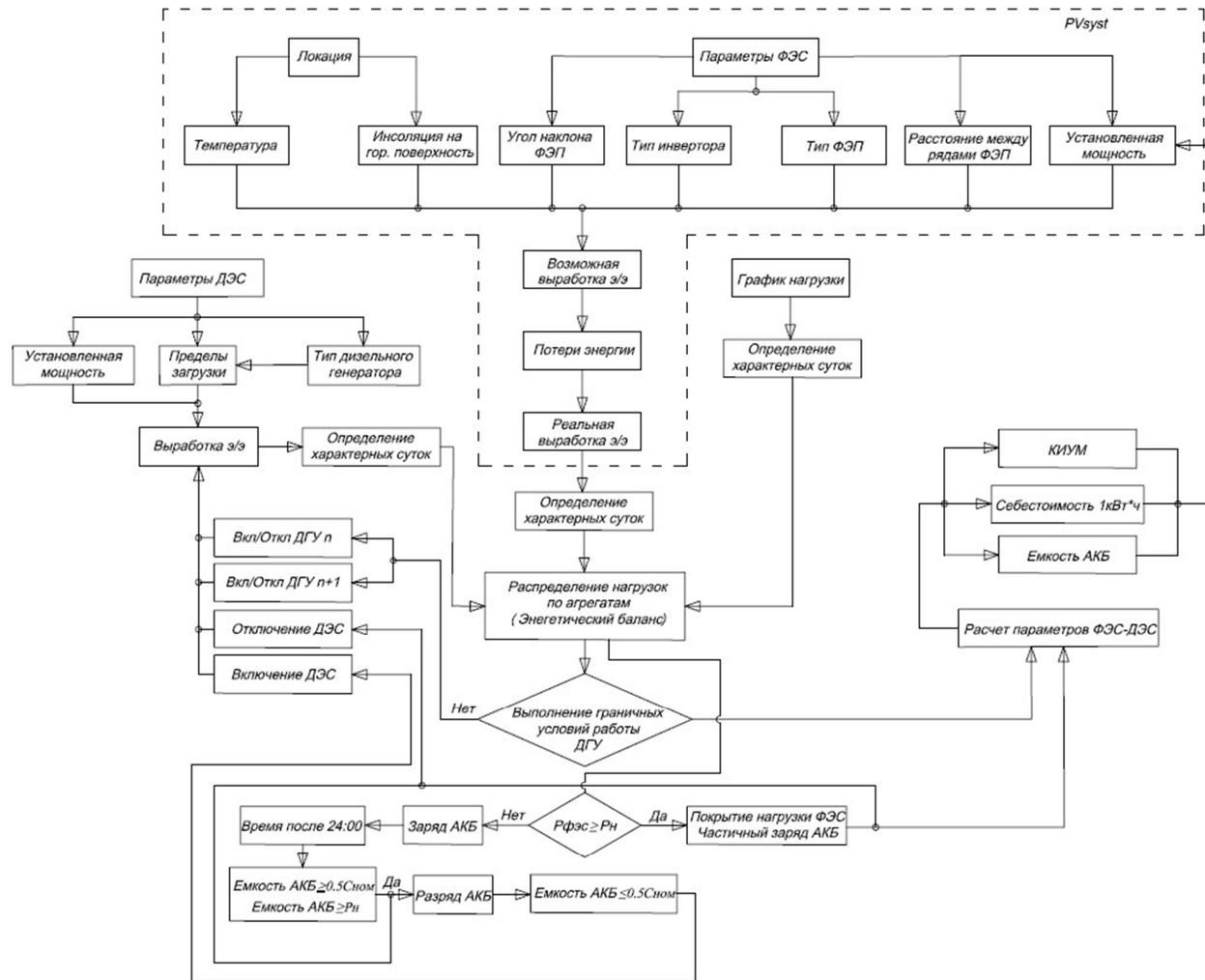


Рисунок 32. Блок схема ФДЭС предусматривающая отдельную работу ФЭС и ДЭС

В случае ФДЭС с отключаемой дизель-электрической станцией действия по оптимизации аналогичны алгоритму представленному на рисунке 31, с отличием в области распределения нагрузок по агрегатам (так как схема подразумевает отдельную работу фотоэлектрической и дизельной частей). В случае работы ДЭС производится перераспределение нагрузки, между агрегатами исходя из возможной степени их загрузки. В случае превышения вырабатываемой мощности ФЭС над требованиями нагрузки происходит отключение ДЭС, нагрузка покрывается за счет энергии произведенной фотоэлектрической составляющей гибридной системы электроснабжения, а энергия превышающая нужды нагрузки запасается в аккумулятор. При этом в случае, когда мощность ФЭС ниже требований нагрузки, вся вырабатываемая ФЭС энергия запасается в аккумулятор. По достижению заданного интервала времени при условии уровня заряда АКБ более 50% от номинальной емкости происходит отключение ДЭС и обеспечение нагрузки запасенной в АКБ энергией. Далее производится расчет значений целевых функций: номинальной емкости АКБ и себестоимости электроэнергии. Оптимумом при этом считается станция с минимальными значениями емкости АКБ, при минимальных значениях себестоимости. Значения целевых функций анализируются оператором, и в случае необходимости исследование повторяется с измененной установленной мощностью ФЭС.

Данная блок-схема применима для исследования технико-экономических характеристик гибридных электрических станций, с отдельной работой фотоэлектрической и дизельной составляющих с применением в своем составе аккумуляторных батарей. Как правило, это станции малой установленной мощности (до 120 кВт), когда применение АКБ оправдано, и не несет значительных эксплуатационных затрат.

3.2 Моделирование энергетического баланса фото-дизельной системы электроснабжения с непрерывной дизельной генерацией

Зависимый инвертор работает при наличии в его выходной цепи источника переменного напряжения, который задает его форму, частоту и величину напряжения. К этой сети подключены потребители переменного тока, и задача зависимого (от этой сети) инвертора сводится к поставке в нее недостающей или дополнительной активной мощности. На рисунке 33 представлена структурная схема гибридной электростанции с применением зависимого инвертора.

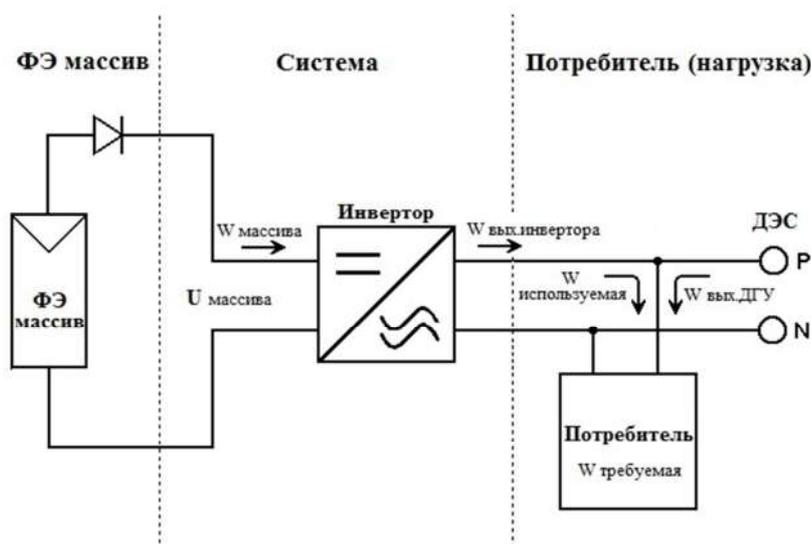


Рис.33 Структурная схема фотолэктростанции работающей параллельно с ДЭС
Системы автономного электроснабжения, построенные с применением инверторов ведомых сетью, характеризуются относительной простотой и, соответственно, дешёвизной исполнения.

Инвертор, ведомый сетью, формирует частоту и величину выходного напряжения на базе текущей частоты и напряжения электрической сети, к которой он подключён. Источник энергии, задающий частоту и напряжение в автономных системах электроснабжения, называют источником опорного сигнала. Как правило, этим источником является дизельная электростанция.

Стабильный источник опорного сигнала необходим для обеспечения требуемых ГОСТ параметров качества электроэнергии автономной системы электроснабжения в состав которой входит энергоисточник на базе зависимого инвертора.

Мощность непрерывной дизельной генерации должна быть, как правило, не менее 50-60% от текущей нагрузки для обеспечения стабильного значения частоты опорного сигнала [67, 69]. Снижение мощности постоянной дизельной генерации ниже этих значений вызывает опасность смещения опорной частоты сети при резких изменениях нагрузки относительно выходной частоты ведомых инверторов солнечной электростанции. Выходя в итоге за регламентируемые ГОСТ предельно допустимые значения.

В данном варианте построения фото-дизельной системы электроснабжения, ДЭС работает постоянно, обеспечивая резервную мощность системе и стабилизируя параметры частоты и напряжения в сети. Мощность ДЭС должна быть не менее максимальной мощности нагрузки, ожидаемой на текущий временной интервал.

Работа гибридной электростанции в текущий момент времени определяется балансом мощности ДЭС и ФЭС, нагрузкой, потерями мощности в элементах распределительной сети. Математическое описание выше представленного принципа распределения нагрузок по элементам гибридной системы имеет следующий вид:

$$P_{\text{ФЭС}} + P_{\text{ДЭС}} - \Sigma \Delta P - P_{\text{Н}} = 0 \quad (3.2.1)$$

Где $P_{\text{Н}}$ - нагрузка потребителя;

$P_{\text{ФЭС}}$ - мощность, вырабатываемая фотоэлектрической частью гибридной системы;

$P_{\text{ДЭС}}$ - мощность, вырабатываемая дизельными генераторами гибридной системы;

$\Sigma \Delta P$ - суммарные электрические потери ФЭС.

Суммарные электрические потери ФЭС складываются из многих показателей:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{TP} + \Delta P_{ИНВ} + \Delta P_{ФЭП} + \Delta P_{ВЛ} \quad (3.2.2)$$

Где ΔP_{TP} - электрические потери в трансформаторах;

$\Delta P_{ВЛ}$ - электрические потери в воздушных линиях;

$\Delta P_{ИНВ}$ - электрические потери в инверторах;

$\Delta P_{ФЭП}$ - электрические потери в фотоэлектрических панелях.

Электрические потери в трансформаторах определяются, как:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{XX} + \Delta P_{КЗ} \cdot \beta^2 \quad (3.2.3)$$

Где ΔP_{XX} - потери холостого хода трансформатора;

$\Delta P_{КЗ}$ - потери короткого замыкания трансформатора;

β - коэффициент загрузки трансформатора.

Электрические потери в воздушных линиях определяются как:

$$\Delta P_{ВЛ} = \frac{P^2}{U_{ВЛ}^2 \cdot r_{ВЛ} \cdot l_{ВЛ}} \quad (3.2.4)$$

Где $r_{ВЛ}$ - погонное сопротивление провода;

$l_{ВЛ}$ - протяжённость воздушной линии.

Электрические потери в инверторах $\Delta P_{ИНВ} = const$, при условии отсутствия превышения номинальной мощности на входе инвертора.

К суммарным электрическим потерям $\Delta P_{ФЭП}$ в фотоэлектрических панелях относятся:

- Теневые потери (затенение панелей при недостаточном расстоянии между рядами опорных конструкций);
- IAM фактор («модификатор угла падения» - соответствует уменьшению интенсивности излучения, действительно достигающего поверхности фотоэлементов, относительно облучения при нормальном падении из-за отражений, увеличивающихся с углом падения);
- Потери на загрязнение панелей;
- Потери фотоэлемента по уровню освещения;

- Потери фотоэлемента по температурному коэффициенту (зависит от способа монтажа модулей – навесы, крыши, фасад, свободное размещение);
- Потери на качество модуля (параметр, который выражает производительность реального модуля по отношению к спецификации производителя);
- Потери на рассогласование массива фотоэлектрических панелей (в массиве фотопанелей характеристики каждого модуля никогда не являются строго идентичными);
- Омические потери в проводниках;

Программный комплекс PVsyst учитывает все вышеописанные потери, происходящие в фотоэлектрических панелях при преобразовании электрической энергии, потери в инверторах, а также, при установке требуемых параметров моделирования, учитывает потери в трансформаторах (см. рис.34).

Одной из особенностей программного продукта PVsyst является, то что при необходимости также можно учесть значение потерь на ежегодную деградацию модулей, в долгосрочной перспективе. Особенно это актуально при расчете времени окупаемости гибридных ФДЭС.



Рисунок.34 Годовая диаграмма потерь энергии для ФЭС $P_{ФЭС.уст} = 1 \text{ МВт}$

На рисунке 33 представлена диаграмма потерь ФЭС установленной мощностью 1 МВт в условиях п. Батагай Верхоянского Улуса, Республики Саха (Якутия). Исходные метеоданные взяты по данным близлежащей метеостанции Верхоянск.

Интенсивность солнечного излучения на горизонтальную поверхность в данной местности равна $934 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год. При установке фотоэлектрических панелей под фиксированным углом 52° к горизонту, интенсивность солнечного излучения возрастает на 40,2%. С учетом IAM фактора, полезная интенсивность солнечного излучения на фотоэлектрический массив равна $1273 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год. КПД панелей при стандартных условиях тестирования (STC) равен 15,55%. При этом, стандартные условия тестирования: мощность освещения $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$, спектр АМ 1.5, температура 25°C . Температура в освещаемом модуле повышается пропорционально мощности освещения.

После проведенных расчетов энергия массива фотопанелей площадью 6511 м^2 равна $1289 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ в год, при принятых условиях. С учетом потерь массива на температурный коэффициент, качество модуля и других факторов, ожидаемая энергия массива при работе на точке отбора максимальной мощности будет равна $1243 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$. После учета потерь в инверторах (КПД инвертора, потери на переключение и т.д.) доступная энергия на выходе ФЭС, составит $1206 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$.

В рассматриваемой диаграмме (рис. 34) не представлены теневые потери и потери на загрязнение панелей, ввиду сложности их учета и относительно малых значениях.

Программный комплекс PVsyst ограничен режимами моделирования фотоэлектрических станций: сетевые и автономные (с аккумулярованием) и не имеет возможностей моделирования гибридных станций. При работе с энергетическими балансами автономной гибридной фото-дизельной электростанции, использование максимального значения доступной энергии на выходе инвертора часто, не целесообразно, ввиду ограничений мощности на соотношение ДЭС и ФЭС.

В связи с этим потребовалось создать инструмент, с помощью которого возможно моделирование энергетических балансов гибридной системы электроснабжения с максимальным эффективным использованием энергии ФЭС.

Далее приводится внутренний алгоритм работы рассматриваемой гибридной системы (отраженный на рис. 31) при минимальной стоимости производимой электроэнергии для одного среднестатистического года метеоисследований, с шагом равным одному часу, на примере реального (построенного) объекта – Фото-дизельная электростанция в п. Батагай Верхоянского Улуса, Республики Саха (Якутия). Установленная мощность фотоэлектрической части гибридной станции равна 1,5МВт. Расчеты проводятся при ожидаемом графике нагрузки потребителей, на основе реального зафиксированного почасового графика Батагайской ДЭС за 2012 год.

Основной задачей, решаемой для каждого конкретного часа («характерных суток»), является задача перераспределения нагрузок между электрогенерирующими установками гибридной системы, с учетом минимальной загрузки дизельной станции определяемой требованиями надежности системы.

Для решения вышеописанной задачи применяется следующая последовательность:

1. Для каждого часа среднестатистического года определяется потенциально возможная выработка электрической энергии фотоэлектрической станции с помощью программного продукта PVsyst.

2. С помощью встроенных возможностей программного комплекса PVsyst определяются потери активной мощности при передаче потенциально-возможной выработки ФЭП до потребителя.

3. Для ограничения объемов вычислений на разумном уровне, вводится понятие «характерных суток» для каждого месяца с интервалом дискретизации степени инсоляции в 1 час. Интегральный уровень инсоляции для рассматриваемого месяца для i -го часа характерных суток P_{ixc} вычисляется по формуле 2.2.1.

Суммарная энергия инсоляции за характерные сутки W_{xc} , месяца определяется по выражению 2.2.2. Месячная энергия W_M по формуле 2.2.3.

4. Для рационального распределения электрической энергии между элементами энергетической системы необходимо иметь информацию о составе оборудования исследуемой ДЭС, мощности оборудования и возможной степени его загрузки.

Машинный парк Батагайской ДЭС представляет собой 12 дизель-генераторов различной установленной мощности. Характеристики ДЭС приведены в таблице №12. По письму от эксплуатирующей организации (СахаЭнерго), возможный интервал загрузки дизельных генераторов расположен в диапазоне от 40 до 80% от их установленной мощности, ввиду того, что машины на сегодняшний день устарели, как морально, так и физически и выработали свой моторесурс на несколько раз.

Таблица №12. Характеристики ДЭС п. Батагай

№ п/п	Тип генератора	Мощность, кВт	Год выпуска
ДГ№1	СГДС 15-30-8УХЛ4	750	1990
ДГ№2	СГС 1370-750У3	1100	1973
ДГ№3	СГДС 15-30-8УХЛ4	1000	1991
ДГ№4	СГДС 15-30-8УХЛ4	750	1985
ДГ№5	СГС 1370-750У3	1100	1982
ДГ№6	СГС 1370-750У3	1100	1982
ДГ№7	СГС 1370-750У3	1100	1985
ДГ№8	СГС 1370-750У3	1100	-
ДГ№9	ГСД 1650-1000	1120	2006
ДГ№10	СГС 1370-750У3	1100	1984
ДГ№11	СГДС 15-30-8УХЛ4	750	1994
ДГ№12	ГС-100У2	100	1998

5. Производится непосредственное распределение графика нагрузки между электрогенерирующими установками гибридной системы. В работе это реализовано через программный комплекс MS Excel. В качестве примера на рисунке 35, представлено распределение энергии для мая.

			Май																										
40%, Pном	80%, Pном	Pном	Тип агрегата	Тип дизеля	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
300	600	750	АДЭ-750	8ЧН 26/26	2057	1971	1935	1868	1894	1935	1992	2104	2217	2303	2401	2396	2394	2368	2260	2231	2212	2166	2204	2202	2187	2204	2178	2104	
440	880	1100	4-26 ДГ	12ЧН 26/26	700	600	600	600	600	600	600	662	650	650	650	540	521	503	500	521	550	609	650	716	716	716	700	700	
400	800	1000	7Д100	10Д1А20.7/2х25,4																									
300	600	750	АДЭ-750	8ЧН 26/26																									
440	880	1100	4-26 ДГ	12ЧН 26/26																									
440	880	1100	4-26 ДГ	12ЧН 26/26	700	700	685	640	639	660	700	700	708	650	693	600	650	650	590	601	600	640	650	700	719	750	724	700	
440	880	1100	4-26 ДГ	12ЧН 26/26	656	671	650	628	650	662	666	700	709	698	600	605	589	538	500	500	532	550	650	700	700	707	722	700	
440	880	1100	4-26 ДГ	12ЧН 26/26																									
448	896	1120	7-36ДГ	8ЧН 26/26																									
440	880	1100	4-26 ДГ	12ЧН 26/26																									
300	600	750	АДЭ-750	8ЧН 26/26																									
40	80	100	ДЭУ-100	8Ч 13/14 (ЯМЗ-238)																									
Контрольная сумма					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Нагрузка на ДЭС, кВт					2056	1971	1935	1868	1889	1922	1966	2062	2067	1998	1943	1855	1779	1709	1593	1601	1653	1740	1909	2050	2135	2173	2162	2100	
Резерв, кВт					584	669	705	772	751	718	674	578	642	697	785	861	931	1047	1039	987	900	731	590	505	467	478	540		
Выработка солнца, кВт					1	0	0	0	5	13	26	42	150	304	457	540	615	659	667	630	559	426	295	152	52	31	16	5	
Избыток мощности ФЭС, кВт					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Фактическая мощность ФЭС, кВт					1	0	0	0	5	13	26	42	150	305	458	541	615	659	667	630	559	426	295	152	52	31	16	4	
Проверка условия (Ррез>Рфэс)					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Опорный сигнал, %					100	100	100	100	100	99	99	98	93	87	81	77	74	72	70	72	75	80	87	93	98	99	99	100	

Рисунок 35. Распределение энергии между элементами гибридной энергосистемы

В верхней части отражено значение графика нагрузки п. Батагай в каждый конкретный час характерных суток месяца. Значения нагрузки каждого часа, распределяются равномерно на несколько дизельных генераторов, по возможности обеспечивая их оптимальную загрузку, а также в баланс включается значения выработанной электрической энергии от фотоэлектрической части гибридной системы. При этом производится проверка двух граничных условий, от которых зависит работоспособность системы в целом:

- Резерв мощности работающих дизельных генераторов в каждый момент времени должен быть больше вырабатываемой мощности фотоэлектрической части гибридной системы электроснабжения.

Для этого производится расчет резерва мощности.

$$P_{PE3} = \sum_{j=1}^n P_{iД. max} - \sum_{j=1}^n P_{iД} \quad (3.2.5)$$

где, $P_{iД. max}$ – максимально возможная нагрузка на конкретном дизельном генераторе на i -м часе характерных суток;

$P_{iД}$ – фактическая нагрузка на конкретном дизельном генераторе на на i -м часе характерных суток;

n – количество работающих дизельных генераторов в i -й час характерных суток;

$i = (0 \div 23)$ час суток; $j = (1-n)$ – день месяца.

И полученный резерв мощности сравнивается с мощностью продуцируемой ФЭС.

Если $P_{ФЭС} \leq P_{PE3}$, то станция работает в устойчивом состоянии и вся энергия выработанная ФЭС идет на обеспечение нагрузки.

Если $P_{ФЭС} \geq P_{PE3}$, то станция переходит в неустойчивое (аварийное) состояние, и фактическая мощность $P_{ФЭС}$ должна быть ограничена на уровне равном P_{PE3} , либо необходим запуск дополнительного генератора увеличивающего значение P_{PE3} для выполнения условия перехода системы в устойчивое состояние.

- Фактическая загрузка каждого отдельно взятого работающего дизельного генератора должна лежать в установленных пределах, для продления их срока службы.

Для выполнения данного условия производится сравнение фактической загрузки каждого работающего дизельного генератора с ее рациональными пределами.

$$P_{iD.min} \leq P_{iD} \leq P_{iD.max} \quad (3.2.6)$$

В случае выхода фактической загрузки генератора за установленные пределы должно происходить перераспределение мощности между другими машинами. Либо запуск дополнительного агрегата.

6. Производится вычисление избытков вырабатываемой электрической энергии от фотоэлектрической части гибридной станции (в течение года), которые будут не востребованы. Избытки в целом ухудшают КИУМ гибридной ФДЭС.

$$P_{ИЗБ} = P_H - P_{ДЭС} - P_{ФЭС} \quad (3.2.7)$$

Если $P_{ИЗБ}$ равна нулю, тогда сумма генерации ДЭС и ФЭС полностью обеспечивает нужды нагрузки. Если же $P_{ИЗБ}$ имеет отрицательный знак, то часть генерируемой энергии ФЭС ввиду превышения требований нагрузки остаётся не востребованной и фактически не используется. Графически это представлено на рисунке 36.

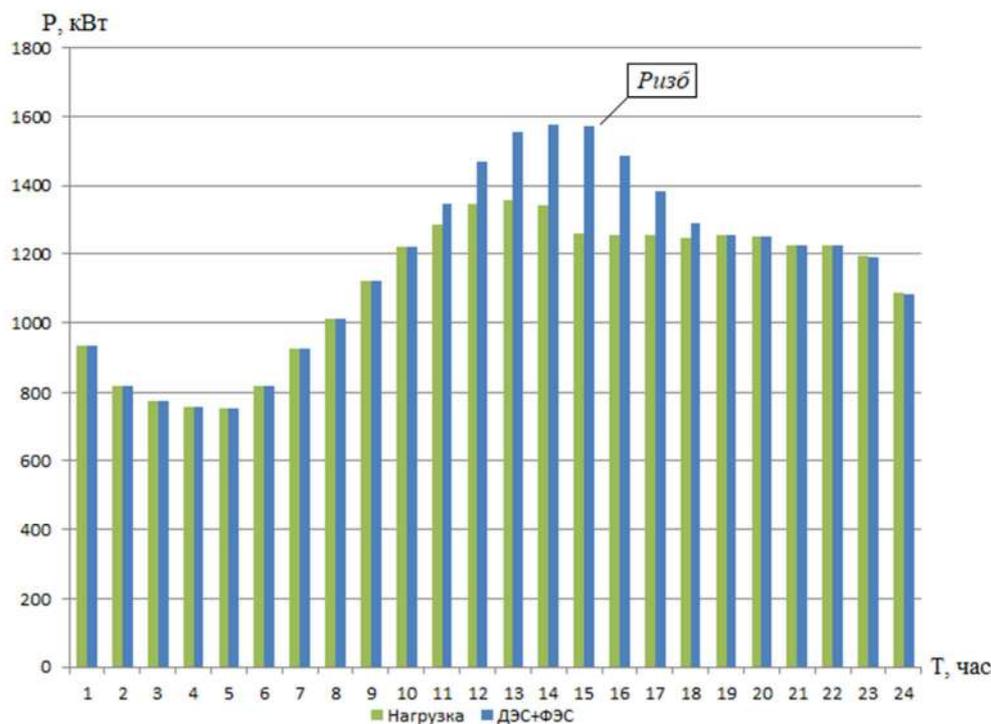


Рисунок 36. Поведение функции мощности $P_{ИЗБ}$ при $P_{ФЭС.уст} = 1,5$ МВт, июль.

7. Определяются фактические значения энергии выработанной фотоэлектрической частью системы за месяц с учетом вычета избытков.

$$W_{\text{ФЭС.факт}} = \sum_{i=0}^{23} (P_{\text{ФЭС}} - P_{\text{ИЗБ}}) \quad (3.2.8)$$

8. Определяются месячные значения суммарной энергии выработанной дизельной частью системы.

$$W_{\text{ДЭС}} = \sum_{i=0}^{23} P_{iД} \quad (3.2.9)$$

9. По суммарной генерируемой энергии ФЭС определяется общее количество топлива, которое можно сэкономить при построении гибридной фото-дизельной электростанции. На основании среднего значения расхода дизельного топлива на производство 1 кВт*ч электрической энергии местной дизельной станцией.

$$B_{\text{ФЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} \varphi_{\text{ДЭС}} \cdot W_{\text{ФЭС}} \quad (3.2.10)$$

10. По суммарной генерируемой мощности ДЭС определяется общий расход топлива для производства электрической энергии.

$$B_{\text{ДЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} \varphi_{\text{ДЭС}} \cdot W_{\text{ДЭС}} \quad (3.2.11)$$

где, $\varphi_{\text{ДЭС}}$ – среднее значение (расчетное) потребления топлива ДЭС на производство электрической энергии, г/кВт*ч;

$W_{\text{ДЭС}}$ - энергия выработанная дизельной составляющей гибридной электростанции за отчетный период времени.

11. Определяются значения КИУМ составных частей гибридной ФДЭС, и себестоимость кВт*ч производимой электрической энергии. Для примера конечные значения для ФЭС установленной мощностью 1,5 МВт сведены в таблицу №13.

$$\text{КИУМ}_{\text{ФЭС}} = \frac{W_{\text{ФЭС}}}{P_{\text{уст}} \cdot T}, \quad \text{КИУМ}_{\text{ДЭС}} = \frac{W_{\text{ДЭС}}}{P_{\text{уст}} \cdot T}, \quad (3.2.12)$$

Где, $W_{\text{ФЭС}}$, $W_{\text{ДЭС}}$ – Объем энергии произведенный составной частью гибридного комплекса, за отсчетный период времени, кВт*ч;

$P_{\text{уст}}$ – установленная мощность составной части гибридного комплекса, кВт;

T – отсчетный период времени, месяц.

Таблица №13 Общие показатели гибридной электростанции п. Батагай при установленной мощности ФЭС 1,5 МВт.

Месяц	$P_{\text{ФЭС}}$ (месяц), кВт*ч	$P_{\text{ИЗБ}}$ (месяц), кВт*ч	$P_{\text{ФЭС.факт}}$ (месяц), кВт*ч	Экономия топлива, тонна	КИУМ ФЭС, %	КИУМ ДЭС, %	Себестоимость 1 кВт*ч э/э
Январь	7909	0	7909	1,98	0,70	35,70	89,98
Февраль	89583	0	89583	22,40	8,82	30,76	51,94
Март	252976	0	252976	63,24	22,49	28,47	38,15
Апрель	296303	0	296303	74,08	27,22	20,65	32,25
Май	262622	0	262622	65,66	23,35	16,40	28,92
Июнь	234383	32251	202132	50,53	18,57	9,07	27,32
Июль	225034	41313	183721	45,93	16,33	7,88	26,10
Август	185977	12183	173794	43,45	15,45	10,64	24,79
Сентябрь	140640	0	140640	35,16	12,92	19,42	23,09
Октябрь	104525	0	104525	26,13	9,29	24,37	21,48
Ноябрь	31102	0	31102	7,78	2,86	27,88	20,13
Декабрь	0	0	0	0,00	0,00	32,81	18,91
Год	1831056	85748	1745307	436,3	13,17	22,00	18,91

12. По итогам цикла расчетов производится изменение значения установленной мощности ФЭС в ПО PVsyst, и последовательность повторяется. Оператор производит сравнение итоговых значений КИУМ и себестоимости полученные при различных установленных мощностях ФЭС, определяя оптимум. Оптимумом при этом считается станция с максимальным значением КИУМ ФЭС и минимальным значением себестоимости электроэнергии производимой гибридной системой электроснабжения.

3.3 Моделирование энергетического баланса гибридной системы, с возможностью отключения ДЭС

Автономный инвертор может работать при отсутствии на его выходе каких-либо источников переменного напряжения. При этом частота выходного напряжения автономного инвертора определяется частотой импульсов управления вентилями инвертора, а форма и величина выходного напряжения – характером, величиной нагрузки и его схемой.

В зависимости от сезонных изменений нагрузки и уровня инсоляции источником опорного сигнала для автономного инвертора может выступать заданный инвертор или группа инверторов ФЭС (Master Inverter or Master inverter of main cluster) [32, 72].

На рисунке 37 представлена структурная схема гибридной фото-дизельной электростанции с применением автономного (батарейного) инвертора и накопителей энергии (аккумуляторные батареи).

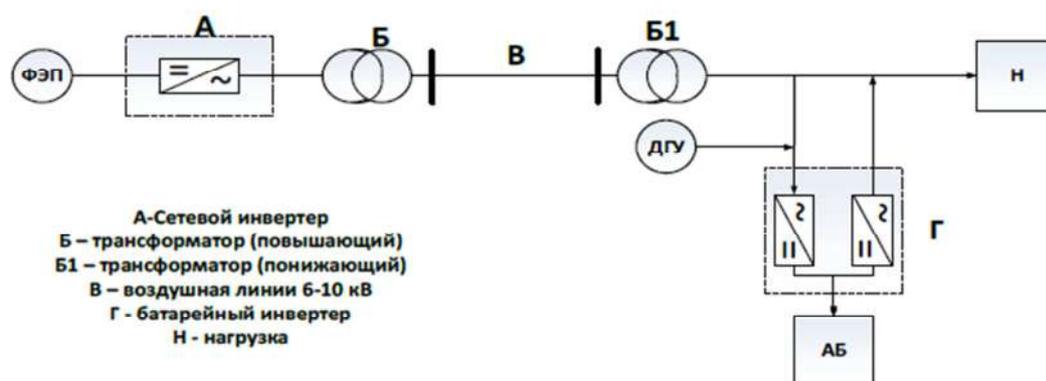


Рис. 37 Структурная схема гибридной электростанции, с использованием аккумулялирования электроэнергии

Работа гибридной системы в данном режиме возможна только при наличии резервного источника питания, способного незамедлительно взять на себя всю нагрузку потребителей. Данная необходимость вытекает из стохастического характера прихода солнечной радиации на земную поверхность вследствие

различных климатических явлений, а также в случае присутствия в системе потребителей с резкопеременным графиком нагрузки.

В качестве такого резервного источника могут выступать накопители энергии, наиболее распространенными из которых являются химические источники тока (аккумуляторные батареи). Применение ДЭС в качестве резервного источника в данном случае не рекомендуется из-за негативного влияния режимов холостого хода и малых нагрузок на дизельный двигатель.

Для достижения максимальной эффективности гибридной СЭС, построенной с применением автономного инвертора, предъявляются высокие требования по автоматизации ДЭС, настройке алгоритмов управления и согласования работы основного энергетического оборудования гибридной электростанции, квалификации обслуживающего персонала. Такие системы имеют более высокие капитальные инвестиционные затраты, более сложны в настройке и эксплуатации, чем системы с применением зависимых инверторов [58, 69].

При данной конфигурации гибридной системы, ДЭС работает периодически, обеспечивая мощность системе в момент ожидаемого значительного прироста нагрузки и тогда, когда энергии вырабатываемой фотоэлектрической частью станции не достаточно для покрытия нужд нагрузки.

Математическое описание выше представленного принципа распределения нагрузок по элементам гибридной системы имеет следующий вид:

$$P_{\text{ФЭС}} + P_{\text{ДЭС}} \pm P_{\text{АБ}} - \Sigma \Delta P - P_{\text{Н}} = 0 \quad (3.3.1)$$

Где $P_{\text{Н}}$ - нагрузка потребителя;

$P_{\text{ФЭС}}$ - мощность, вырабатываемая фотоэлектрической частью гибридной системы; $P_{\text{ДЭС}}$ - мощность, вырабатываемая дизельными генераторами гибридной системы; $P_{\text{АБ}}$ - мощность, вырабатываемая или потребляемая аккумуляторными батареями; $\Sigma \Delta P$ - суммарные электрические потери ФЭС.

Суммарные электрические потери ФЭС данной конфигурации складываются из следующих показателей:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{TP} + \Delta P_{ИНВ} + \Delta P_{ФЭП} + \Delta P_{ВЛ} + \Delta P_{АБ} \quad (3.3.2)$$

Где ΔP_{TP} - электрические потери в трансформаторах (см. формулу 3.2.3);

$\Delta P_{ВЛ}$ - электрические потери в воздушных линиях (см. формулу 3.2.4);

$\Delta P_{ИНВ}$ - электрические потери в инверторах;

$\Delta P_{ФЭП}$ - электрические потери в фотоэлектрических панелях (см. раздел 3.2);

$\Delta P_{АБ}$ - электрические потери в аккумуляторных батареях.

Электрические потери в инверторах $\Delta P_{ИНВ} = const$, при условии отсутствия превышения номинальной мощности на входе инвертора.

$$\Delta P_{АБ} = const \quad (3.3.3)$$

В условиях северных поселков Якутии работа данной конфигурации гибридной системы электроснабжения носит сезонный характер из-за низкой продолжительности светового дня и низкой степени инсоляции в зимнее время, а также наличия такого явления, как полярная ночь.

Для северных поселков в период полярной ночи из-за отсутствия солнечного излучения на поверхность земли, математическое описание принципа распределения нагрузок по элементам примет следующий вид:

$$P_{ДЭС} \pm P_{АБ} - \Sigma \Delta P - P_{Н} = 0 \quad (3.3.4)$$

В этот период времени заряд аккумуляторных батарей поддерживается исключительно за счет ДЭС. Аккумуляторные батареи могут использоваться для покрытия максимумов и минимумов нагрузки, тем самым выравнивая график нагрузки для ДЭС и продлевая срок службы дизельных агрегатов.

Далее приводится внутренний алгоритм работы (см. рис. 44) рассматриваемой компоновки гибридной СЭС для одного среднестатистического года метеонаблюдений, с шагом равным одному часу, на примере реального объекта – фото-дизельная электростанция в п. Юнкюр Верхоянского Улуса, Республики Саха (Якутия). В качестве источника метеоданных при расчетах взята ближайшая к п. Юнкюр метеостанция Верхоянск. Установленная мощность

фотоэлектрической части гибридной станции равна 70 кВт. Расчеты проводятся при ожидаемом графике нагрузки потребителей, на основе реального зафиксированного почасового графика Юнкюрской ДЭС за 2012 год. На рисунке 38 представлен почасовой график нагрузки Юнкюрской ДЭС за весенний период.

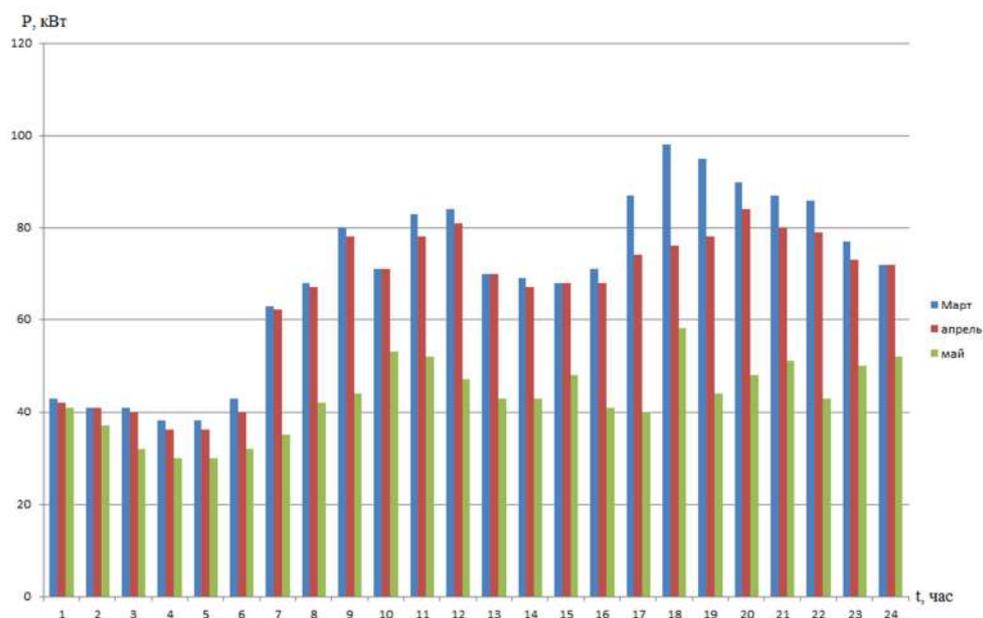


Рис.38 Суточный график нагрузки Юнкюрской ДЭС за 2012г (весенний период).

Основной задачей, решаемой для каждого конкретного часа («характерных суток»), является задача перераспределения нагрузок между электрогенерирующими установками гибридной системы.

Для решения вышеописанной задачи применяется следующая последовательность:

1. Для каждого часа среднестатистического года определяется потенциально возможная выработка электрической энергии фотоэлектрической станции с помощью программного продукта PVsyst.

2. С помощью встроенных возможностей программного комплекса PVsyst определяются потери активной мощности при передаче потенциально-возможной выработки ФЭП до потребителя (см. рис. 39).

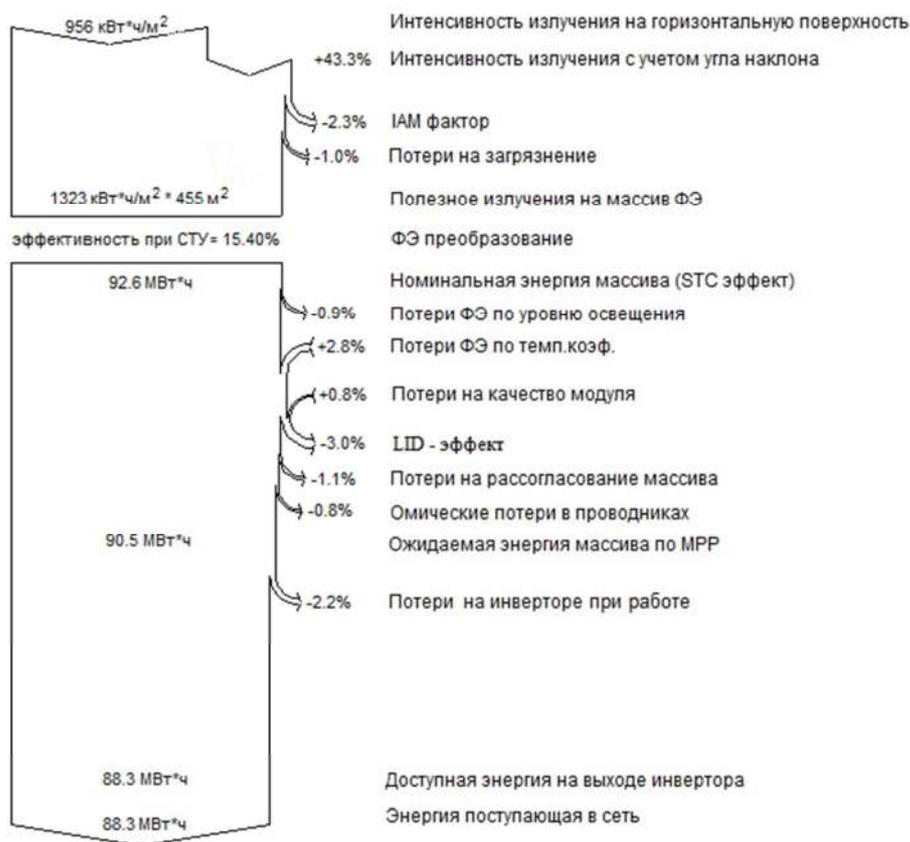


Рисунок 39. Диаграмма потерь ФЭС п. Юнкюр, $P_{\text{ФЭС,уст}} = 70 \text{ кВт}$.

3. Для ограничения объемов вычислений на разумном уровне, вводится понятие «характерных суток» для каждого месяца с интервалом дискретизации степени инсоляции в 1 час. Интегральный уровень инсоляции для рассматриваемого месяца для i -го часа характерных суток P_{ixc} вычисляется по формуле 2.2.1.

Суммарная энергия инсоляции за характерные сутки W_{xc} , месяца определяется по выражению 2.2.2. Месячная энергия W_M по формуле 2.2.3.

Расчетная выработка электроэнергии ФЭС п. Юнкюр на основе данных инсоляции для характерных суток за каждый месяц приведена в таблице №14.

Таблица №14. Расчетная выработка электрической энергии ФЭС в п. Юнкюр

п. Юнкюр (метеостанция Верхоянск). Установленная мощность ФЭС 70 кВт, угол наклона панелей 52°											
Энергия выдаваемая в сеть (характерные сутки), кВт											
	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	2	2	2	1	0	0	0
7:00	0	0	0	1	3	3	4	2	0	0	0
8:00	0	0	0	6	9	10	9	5	2	0	0
9:00	0	0	8	21	20	21	18	13	9	4	0
10:00	0	2	24	36	30	31	26	21	16	12	0
11:00	0	11	40	48	37	37	32	26	24	20	3
12:00	1	25	52	56	44	41	38	32	28	26	12
13:00	8	31	58	59	46	42	43	34	31	29	19
14:00	9	35	59	60	46	44	42	36	32	30	16
15:00	4	34	56	57	44	43	42	35	30	26	9
16:00	0	23	47	50	39	39	35	30	27	18	2
17:00	0	9	33	39	30	32	27	24	19	10	0
18:00	0	0	16	24	21	23	22	17	11	2	0
19:00	0	0	3	9	10	12	12	8	3	0	0
20:00	0	0	0	1	3	3	7	2	0	0	0
21:00	0	0	0	0	2	2	3	1	0	0	0
22:00	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
кВт*ч /день	22	171	394	469	388	392	363	286	231	176	61

В таблице №14 отсутствуют данные за декабрь в течение, которого на рассматриваемой широте наблюдается полярная ночь.

4. Производится вычисление мощности, которая идет на заряд аккумуляторных батарей в случае избытка вырабатываемой электрической энергии фотоэлектрической частью гибридной электростанции (на основе «характерных суток»).

$$P_3 = P_{ДЭС} + P_{ФЭС} - P_H \quad (3.3.5)$$

При этом следует учесть, что описываемое схемное решение гибридной ФДЭС предусматривает раздельную работу ДЭС и ФЭС. В случае, когда значение вырабатываемой мощности фотоэлектрической части гибридной электростанции ниже значений нагрузки $P_{\text{ФЭС}} < P_{\text{Н}}$, то вся энергии произведенная ФЭС запасается в аккумулятор, то есть $P_3 = P_{\text{ФЭС}}$. Нагрузка обеспечивается только за счет дизельной электростанции, то есть $P_{\text{ДЭС}} = P_{\text{Н}}$.

В случае, когда значение вырабатываемой мощности фотоэлектрической части гибридной электростанции больше значений нагрузки $P_{\text{ФЭС}} > P_{\text{Н}}$, то энергия произведенная ФЭС идет на обеспечение нужд нагрузки, а избыток вырабатываемой мощности запасается в аккумулятор, то есть $P_3 = P_{\text{ФЭС}} - P_{\text{Н}}$. Дизельная электростанция в этом случае отключается, т.е. $P_{\text{ДЭС}} = 0$.

Функция мощности P_3 является знакопеременной функцией. Если P_3 имеет положительный знак, то происходит заряд аккумуляторных батарей от энергии генерируемой ФЭС. Если отрицательный, то происходит разряд аккумуляторных батарей, обеспечивая нужды нагрузки (в случае достаточной емкости).

В период «полярной ночи» наблюдаемой на территории северных поселков Якутии значение мощности ФЭС стремится к нулю, соответственно это накладывает ограничение на работу гибридной системы электроснабжения, в виде ее сезонного использования.

Графически поведение функции мощности P_3 представлено на рисунке 40.

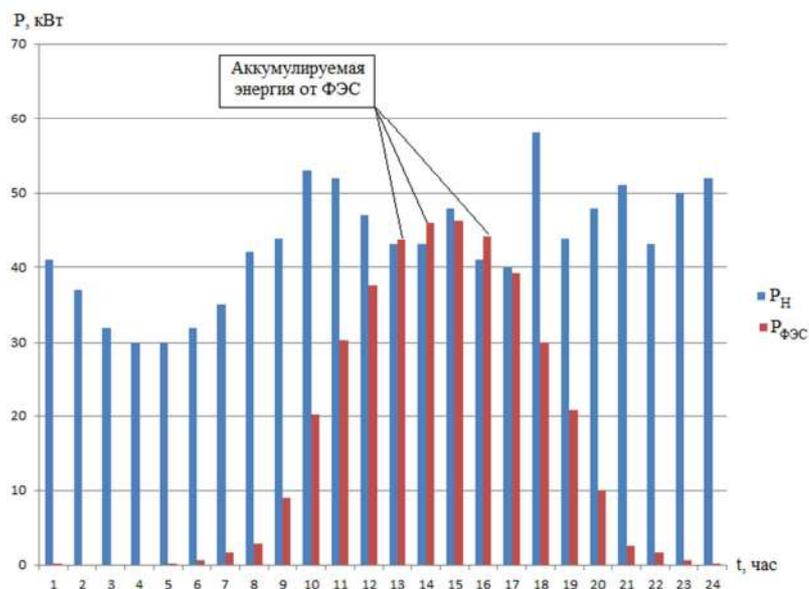


Рисунок 40. Поведение функции мощности P_3 . Характерные сутки (май)

5. Для рационального распределения электрической энергии между элементами энергетической системы необходимо иметь информацию о составе оборудования исследуемой ДЭС, мощности оборудования и возможной степени его загрузки. В нашем случае подобных данных для ДЭС п. Юнкюр мы не имеем. Поэтому состав оборудования принят на основании обеспечения резервирования ДЭС, которое достигается выполнением условия обеспечения максимума нагрузки ($P_{нагр.мах}$) при выходе из работы двух наиболее мощных генераторов. Исходя из этого, состав дизельной электростанции определяется по выражению:

$$\sum_{i=1}^n (P_i - 2P_{мах}) > P_{нагр.мах} \quad (3.3.6)$$

где, n – количество установленных агрегатов ДЭС;

$P_{мах}$ – агрегаты с наибольшей установленной мощностью;

P_i – агрегат с i -й установленной мощностью;

$P_{нагр}$ – максимальная мощность нагрузки.

Степень загрузки дизельных агрегатов при этом принята от 40 до 80% от установленной мощности, на основании примера Батагайской ДЭС в связи с общим положением степени износа генерирующего оборудования в децентрализованных районах Якутии (см. таблицу №15).

Таблица №15. Условно принятые характеристики Юнкюрской ДЭС

№ п/п	Мощность, кВт	Нижний предел допустимой нагрузки (40%), кВт	Верхний предел допустимой нагрузки (80%), кВт
ДГ№1	100	40	80
ДГ№2	80	32	64
ДГ№3	80	32	64
ДГ№4	100	40	80
ДГ№5	60	24	48

6. Производится непосредственное распределение графика нагрузки между электрогенерирующими установками гибридной системы. В данной диссертационной работе это реализовано через программный комплекс MS Excel. В качестве примера на рисунке 41, представлено распределение энергии гибридной электростанции установленной мощностью ФЭС 120 кВт в п. Юнкюр для апреля.

		Апрель																								
Предел работы ДГУ	ДГУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
40%, Pном	80%, Pном	Rном	42	41	40	36	36	40	62	67	78	71	78	81	70	67	68	68	74	76	78	84	80	79	73	72
40	80	100																								
32	64	80									40	41	43													
32	64	80																	42	43	49	45	49	41	42	
40	80	100																								
24	48	60								38	30	35							34	35	35	35	30	32	30	
Контрольная сумма			-42	-41	-40	-36	-36	-40	-62	-67	0	0	0	-81	-70	-67	-68	-68	-74	0	0	0	0	0	0	0
Резерв, кВт			0	0	0	0	0	0	0	0	34	41	34	0	0	0	0	0	0	36	34	28	32	33	39	40
Выработка солнца, кВт			0	0	0	0	0	0	0	2	12	38	62	82	95	101	101	95	83	64	40	16	3	1	0	0
Запасаемая энергия, кВт			-42	-41	-40	-36	-36	-40	-62	-65	12	38	62	1	25	34	33	27	9	64	40	16	3	1	0	0
Запасенная энергия, кВт			325	284	244	208	172	132	70	5	18	55	117	119	144	177	210	237	246	310	350	366	369	370	370	370
Pфэс>Pн			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Рис.41. Распределение энергии между элементами гибридной энергосистемы

В верхней части отражено значение графика нагрузки п. Юнкюр в каждый конкретный час характерных суток месяца. Значения нагрузки каждого часа, распределяются равномерно на дизельные генераторы, по возможности обеспечивая их оптимальную загрузку, либо на фотоэлектрическую часть гибридной системы электроснабжения и аккумуляторные батареи.

В частности на рисунке 40 с 1 до 8 часов можно наблюдать разряд аккумуляторных батарей (отрицательные значения запасаемой энергии), дизельная часть гибридной электростанции при этом отключена. С 9 до 11 часов наблюдается включение и работа ДЭС ввиду снижения емкости аккумуляторных батарей до предельно низкого значения, с 12 до 17

часов ДЭС снова отключается так как мощность производимая ФЭС начинает превышать значения нагрузки. При этом избыток вырабатываемой энергии начинает запасаться в АКБ (положительные значения запасаемой энергии). С 18 до 24 часов снова включается ДЭС, в связи со снижением выработки ФЭС до состояния $P_{\text{ФЭС}} < P_{\text{Н}}$ и вся вырабатываемая ФЭС энергия запасается в АКБ.

При этом доступная (запасенная) энергия в АКБ в конце интервала определяется по выражению 2.3.2, внутренняя энергия АКБ в начале интервала по выражению 2.3.3.

Фактическая загрузка каждого отдельно взятого работающего дизельного генератора так же, как и в предыдущем примере должна лежать в установленных пределах, для продления их срока службы. Для выполнения данного условия производится сравнение фактической загрузки каждого работающего дизельного генератора с его заданными пределами по выражению 3.2.6.

В случае выхода фактической загрузки генератора за установленные пределы должно происходить перераспределение мощности между другими машинами, либо заряд АКБ (в случае если имеется такая возможность), либо запуск дополнительного агрегата.

Для проверки правильности работы расчетного комплекса производится подсчет контрольной суммы мощностей всех энергоисточников и потребителей участвующих в энергетическом балансе. Контрольная сумма определяется по следующему соотношению:

$$\sum_{j=1}^n P_{iД} - P_{\text{Н}} = P_{\text{ФЭС}} \pm P_{\text{З}} \quad (3.3.7)$$

В случае работы ДЭС, так как предусмотрена отдельная работа составных частей гибридной солнечно-дизельной электростанции, контрольная сумма равна 0. В случае работы ФЭС контрольная сумма равна значению нагрузки (взятое по модулю).

7. Определяются месячные значения суммарной энергии выработанной фотоэлектрической частью системы. А затем суммарное значение за отсчетный период времени.

$$W_{\text{ФЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} P_{\text{ФЭП}}^t \cdot \Delta t \quad (3.3.8)$$

8. По общей генерируемой мощности ФЭС определяется общее количество топлива, которое можно сэкономить при построении гибридной системы с возможностью отключения ДЭС.

$$B_{\text{ФЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} \varphi_{\text{ДЭС}} \cdot W_{\text{ФЭС}} \quad (3.3.9)$$

9. Определяются суммарные значения энергии выработанной дизельной частью системы электроснабжения за отсчетный период времени.

$$W_{\text{ДЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} P_{\text{ДЭС}}^t \cdot \Delta t \quad (3.3.10)$$

10. По генерируемой мощности ДЭС определяется общий расход топлива для производства электрической энергии.

$$B_{\text{ДЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} \varphi_{\text{ДЭС}} \cdot W_{\text{ДЭС}} \quad (3.3.11)$$

где, $\varphi_{\text{ДЭС}}$ – среднее значение (расчетное) потребления топлива ДЭС на производство электрической энергии, г/кВт*ч;

$W_{\text{ДЭС}}$ - энергия выработанная дизельной составляющей гибридной системы за отсчетный период времени, кВт*ч.

11. По максимальному значению запасенной энергии определяется требуемая полная емкость АКБ (кВт*ч), исходя из уровня ограничения степени заряда на уровне 50-60% с целью продления срока их службы:

$$C_{\text{НОМ}} = \frac{W_{\text{АБ}} \cdot 100}{DOD} \quad (3.3.12)$$

где, DOD (*depth of discharge*) – глубина разряда аккумулятора.

12. Определяются значения стоимости составных частей гибридной солнечно-дизельной электростанции, и себестоимость кВт*ч производимой электрической энергии.

Вышеописанная последовательность несколько идеализирована, поскольку количество энергии запасаемой в аккумуляторных батареях будет зависеть от применяемого типа, принятой предельной степени разряда АКБ, температуры окружающей среды.

Так, при использовании свинцово-кислотных батарей их ресурс сильно зависит от температуры, а это означает, что требуются устройства для поддержания микроклимата. Наиболее благоприятной температурой для батареи считается температура 15-20 градусов Цельсия. Увеличение температуры на 10 градусов уменьшает ресурс батареи вдвое.

Значительное снижение температуры аккумуляторов ниже 10 градусов Цельсия ведет к недоиспользованию установленной ёмкости аккумуляторных батарей. Так при температуре 0°C эффективная ёмкость АКБ составит около 75% от номинальной, а при температуре -20°C не более 50%.

Для свинцово-кислотной АКБ характерна большая инерционность электрохимических реакций при зарядке, в связи, с чем она не может запасать мощные кратковременные зарядные токи. Кратковременное падение напряжения на входе в АКБ приводит к тому, что она перестает заряжаться и не может запасать энергию в низковольтном диапазоне. При превышении напряжения на входе АКБ происходит либо перезаряд батареи, либо зарядное устройство отключает ее [51, 56, 61].

Эксплуатация аккумуляторов при глубоком разряде приводит к необходимости их более частой замены и обслуживания и, соответственно, к удорожанию системы (см. рис.42).

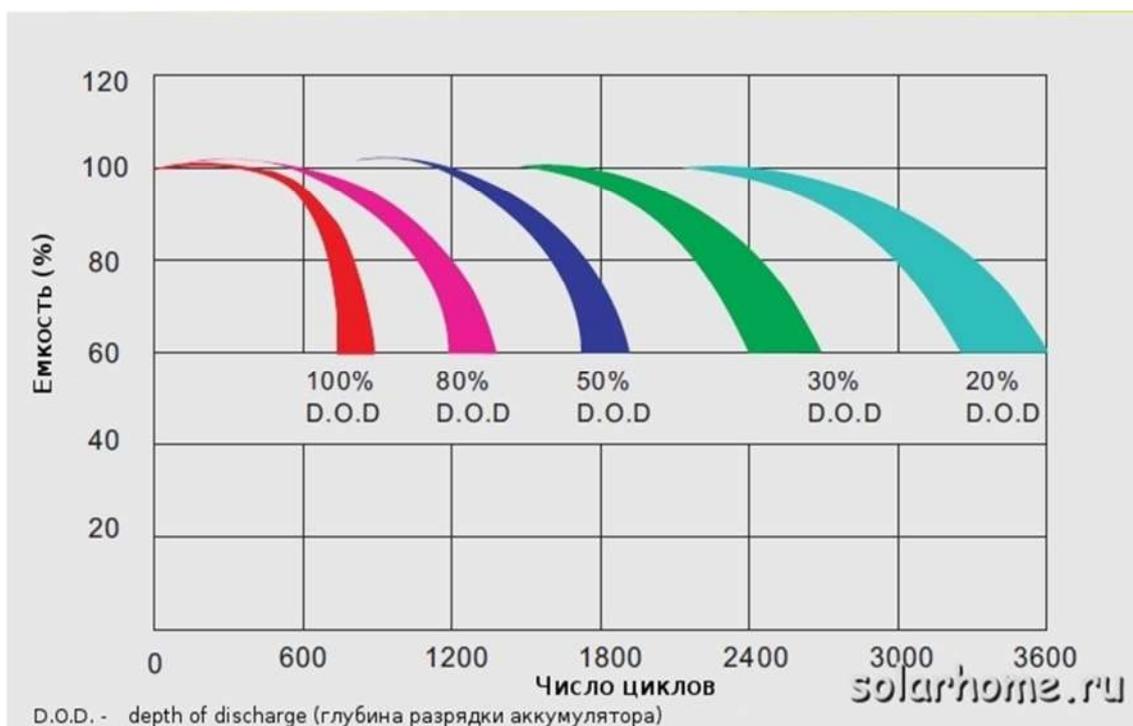


Рис.42 Срок службы герметичных свинцово-кислотных батарей (OPzV) в зависимости от глубины разряда

Глубину разряда свинцово-кислотных аккумуляторов стремятся ограничить на уровне 30÷50%, что достигается отключением нагрузки (снижением мощности) или использованием аккумуляторов большей емкости. Поэтому, для управления процессом зарядки и выбора оптимального режима в состав фотоэлектрической станции обязательно включают контроллеры заряда-разряда аккумуляторных батарей [4].

В настоящее время становятся доступны новые модели литий-ионных аккумуляторов, предназначенные, в том числе и для установки в автономных системах электроснабжения на основе ВИЭ.

Удельные характеристики литий-ионных аккумуляторов, в несколько раз превышают аналогичные показатели свинцово-кислотных аккумуляторов и хорошо характеризуют себя при работе на больших токах. Плотность запасаемой энергии выше в 3-5 раз по сравнению со свинцово-кислотными, повышенный

ресурс количества циклов заряд/разряд (>3000 при разряде не ниже 20%), способны быстро заряжаться и разряжаться и др. [21].

Литий–ионные аккумуляторы на данный момент являются одними из дорогих химических накопителей электроэнергии из доступных сегодня на рынке с учётом необходимой для работы электроники и систем усиленной пожарной безопасности (при нарушении температурного режима способны возгораться). При этом стоимость самих накопителей находится в одной ценовой категории с ценой свинцово-кислотных аккумуляторов.

Данный тип АКБ динамично развивается, снижается стоимость предлагаемых продуктов, улучшаются технико-экономические характеристики. Тем самым литий-ионные АКБ становятся наиболее перспективными для применения в автономных системах электроснабжения.

3.4 Краткие выводы

1. Представлены основные целевые функции на основании значений, которых осуществляется оптимизация установленных мощностей гибридных фото-дизельных систем электроснабжения.
2. Разработаны алгоритмы работы математической модели оптимизации, с учетом требований к продлению срока службы основного генерирующего оборудования, а также устойчивости фото-дизельной системы, отражающие последовательность действий, требуемых для определения оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС для различных схемных решений.
3. Расчетный комплекс PVsyst не решает в полной мере вопроса оптимизации гибридных ФДЭС, поскольку предназначен для проектирования только фотоэлектрических систем. В связи с этим создан инструмент оптимизации установленных мощностей составных частей гибридной электростанции на основе математических моделей элементов ФДЭС, и программного продукта MS Excel сопряженного с данными получаемыми из специализированного ПО PVsyst.
4. Представлена последовательность математического моделирования энергетического баланса гибридной системы электроснабжения с непрерывной дизельной генерацией и отключаемой ДЭС.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ФОТО-ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

4.1 Оптимизация гибридных фото-дизельных электростанций с непрерывной дизельной генерацией в условиях северных широт Якутии

Принцип оптимизации, описанный в параграфе 1.3, и основные выводы для гибридного энергетического комплекса с непрерывной дизельной генерацией представлены на примере гибридной станции в п. Батагай введенной в эксплуатацию в 2015 году.

Первой итерацией подбора оптимальной мощности, является определение мощности фотоэлектрической части гибридного комплекса при работе с существующей дизельной электростанцией. Так как изолированная система, это всегда система ограниченной мощности, то для того, чтобы определиться с начальной величиной установленной мощности фотоэлектростанции, требуется проанализировать величину нагрузки автономной системы электроснабжения. Показатели нагрузки в п. Батагай представлены в таблице №16

Таблица №16. Показатели нагрузки ДЭС Батагай в 2012 г.

Выработанная электроэнергия	кВт*ч в год	23 355 024
Минимальная зимняя нагрузка	кВт	3275
Максимальная зимняя нагрузка	кВт	5186
Минимальная летняя нагрузка	кВт	907
Максимальная летняя нагрузка	кВт	2075

Учитывая, что в зимние месяцы в заполярных районах наблюдается низкий уровень инсоляции, а также полярная ночь, установленная мощность дизельной

электростанции всегда должна быть выше возможной максимальной нагрузки, с обеспечением резервирования. Так установленная мощность существующей дизельной электростанции составляет 11 МВт.

Учитывая, что уровень инсоляции в этом заполярном районе в летние и зимние месяцы отличается более чем в 100 раз, при построении фото-дизельных электрических станций мегаваттного класса целесообразно использование параллельной работы ФЭС с сетью, образованной ДЭС [5, 7, 10]. В этом случае исключается необходимость в накопителях электрической энергии. Как следствие, могут быть получены приемлемые технико-экономические характеристики проекта.

Расчет показателей гибридной электростанции производится по алгоритму, представленному на рисунке 31. Для расчета показателей инсоляции в качестве исходных метеорологических данных была принята близлежащая к п. Батагай метеостанция Верхоянск. Угол наклона фотоэлектрических панелей фиксированный, и составляет 52° (оптимальный годовой), расстояние между рядами панелей 20 м, тип панелей - Yingli Solar YL255P-29b, 255 Вт и инверторов - SMA Sunny Tripower 20000 TLEE, 20 кВт. Приведенные параметры системы неизменны для всего процесса оптимизации. Установленная мощность ДЭС - 11 МВт, с ограничением загрузки каждого отдельного агрегата в диапазоне от 40 до 80% его номинальной мощности.

Изменяемым параметром является установленная мощность фотоэлектростанции, начиная с 1 МВт, определённой по минимальному значению летней нагрузки, из соображений полного использования энергетических возможностей станции.

Исследования проведены с интервалом дискретизации расчетов равным одному часу, для характерных суток каждого месяца.

Итерационный процесс организован по принципу человеко-машинного взаимодействия. На основании полученных значений КИУМ и себестоимости производимой электрической энергии, оператор принимает решение (с учетом дискретности оборудования ФЭС) о дальнейшей итерации, либо ее завершении.

Исходя из требований надежности, нагрузка поселка частично должна быть покрыта за счет электроэнергии вырабатываемой дизельной станцией с учетом загрузки отдельных дизель генераторных установок ДЭС. Такое условие следует из необходимости обеспечения устойчивой работы сетевых инверторов, и устойчивости системы гибридной электростанции в целом. Следует учесть, что необходимое значение мощности, производимой дизельной частью гибридной электростанции, не является статичным, оно постоянно меняется и зависит от многих факторов:

- Уровень мощности автономной системы электроснабжения в каждый момент времени;
- Сезон года;
- Установленная мощность ДЭС. Количество работающих дизельных генераторов и допустимые границы работы каждого отдельно взятого агрегата;
- Установленная мощность ФЭС, и значение выработки мощности фотоэлектрической частью комплекса в каждый момент времени.

Изменение уровня генерируемой мощности составных частей гибридной СЭС в течение характерных суток месяца (с частотой дискретизации в 1 час) в зависимости от вышеперечисленных факторов представлено на рисунках 43÷48.

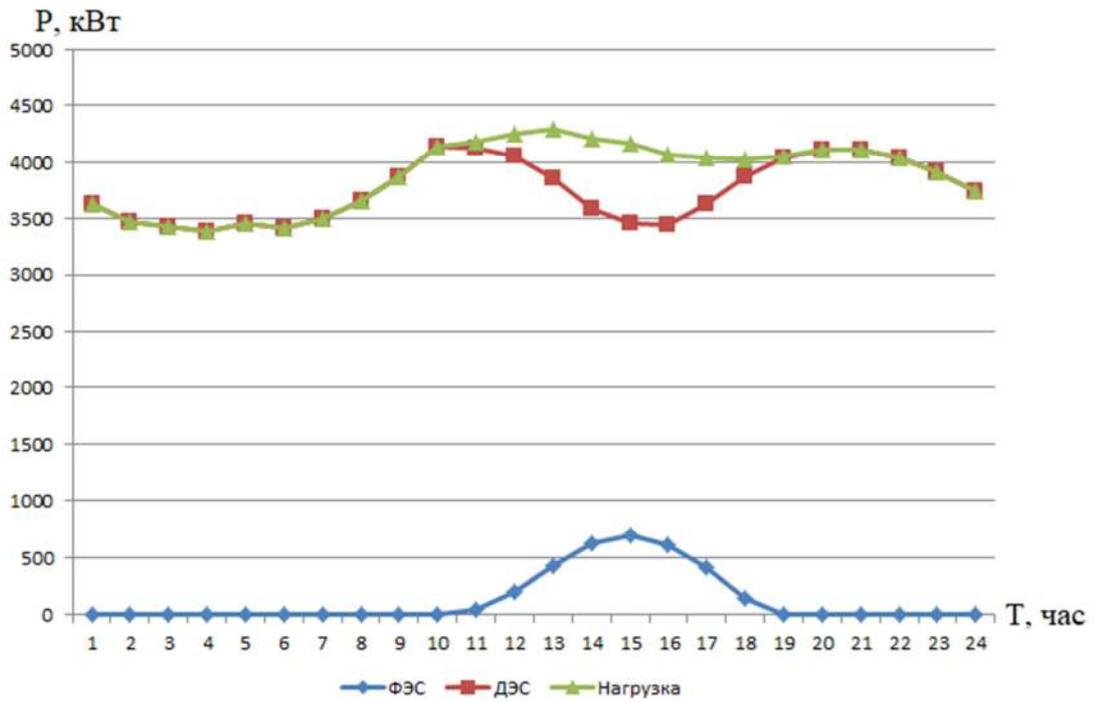


Рис.43 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 1,5 МВт. Февраль

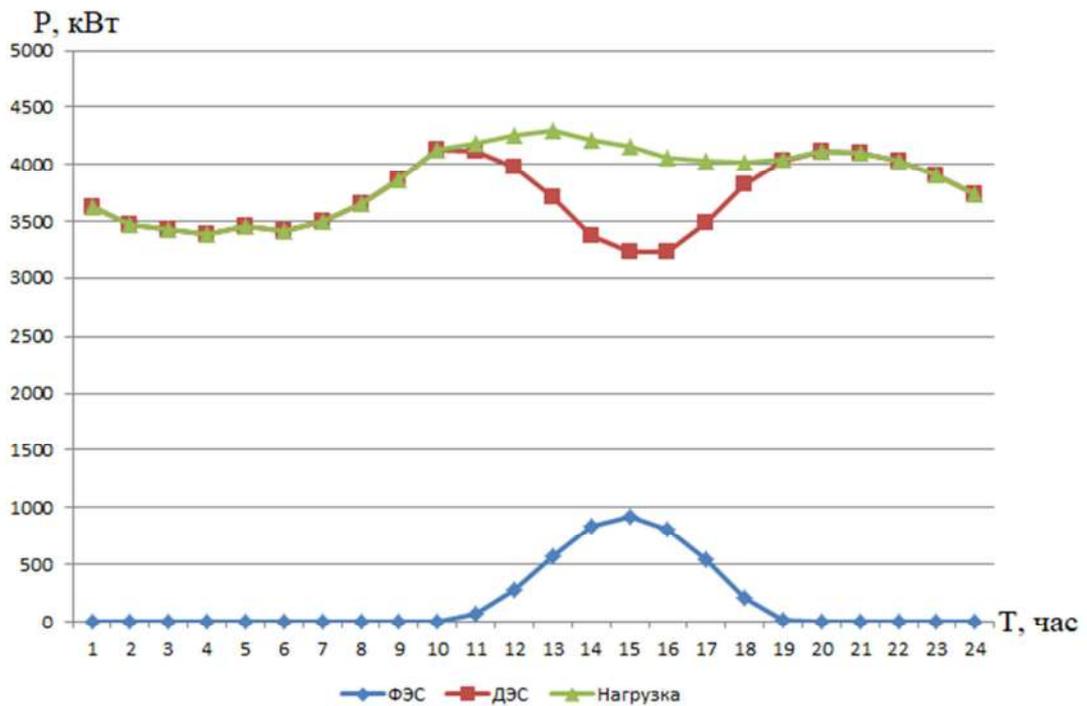


Рис.44 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 2 МВт. Февраль

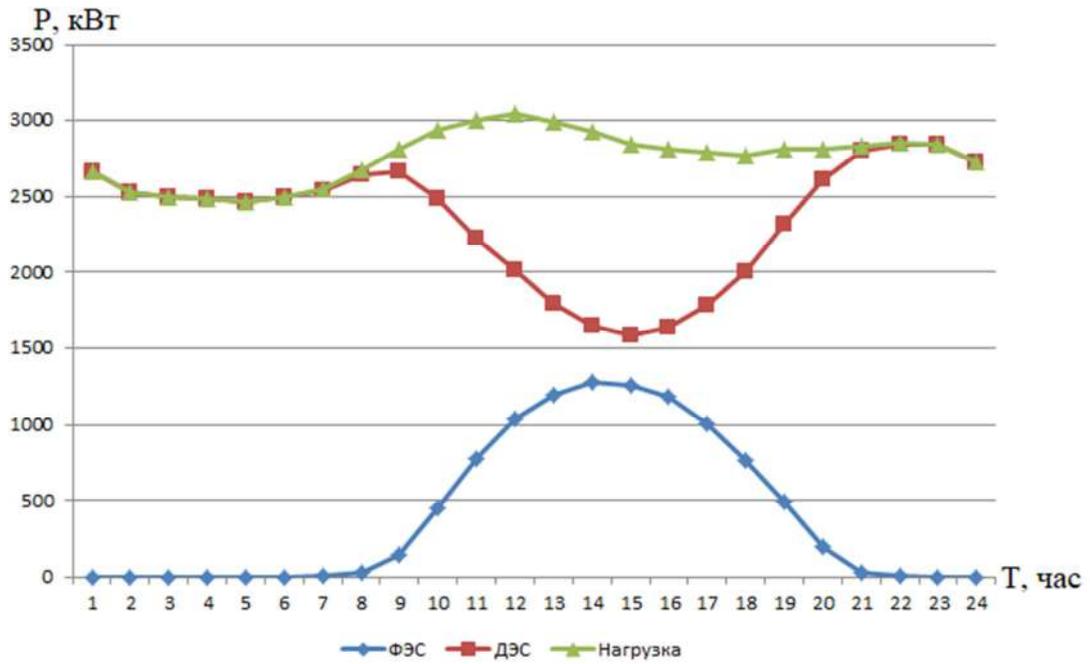


Рис.45 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 1,5 МВт. Апрель

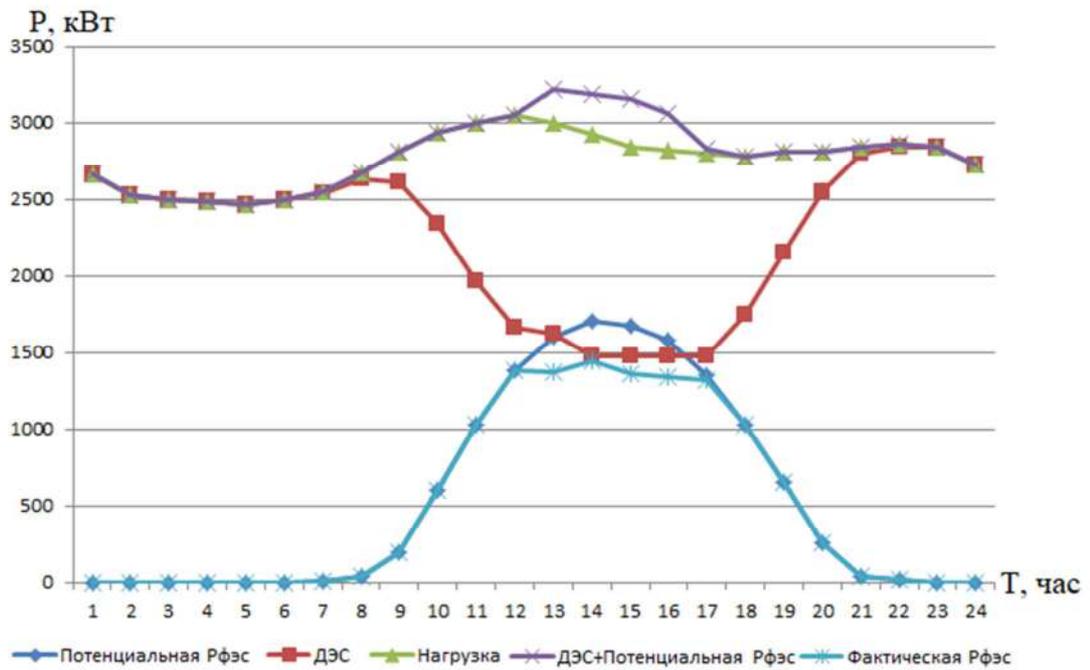


Рис.46 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 2 МВт. Апрель

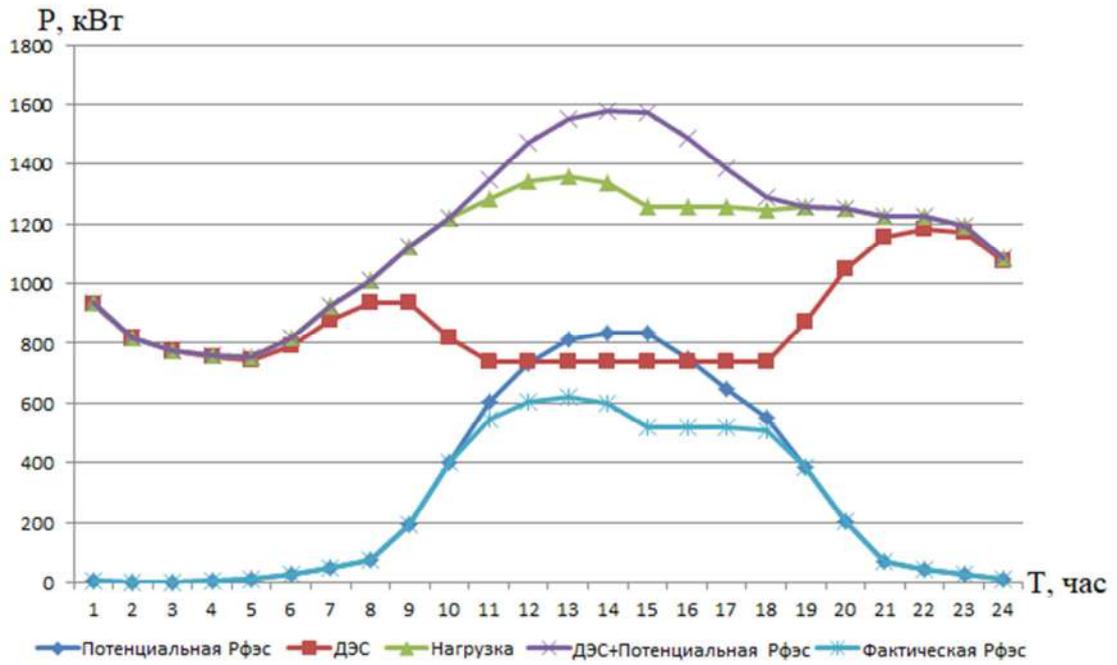


Рис.47 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 1,5 МВт. Июль

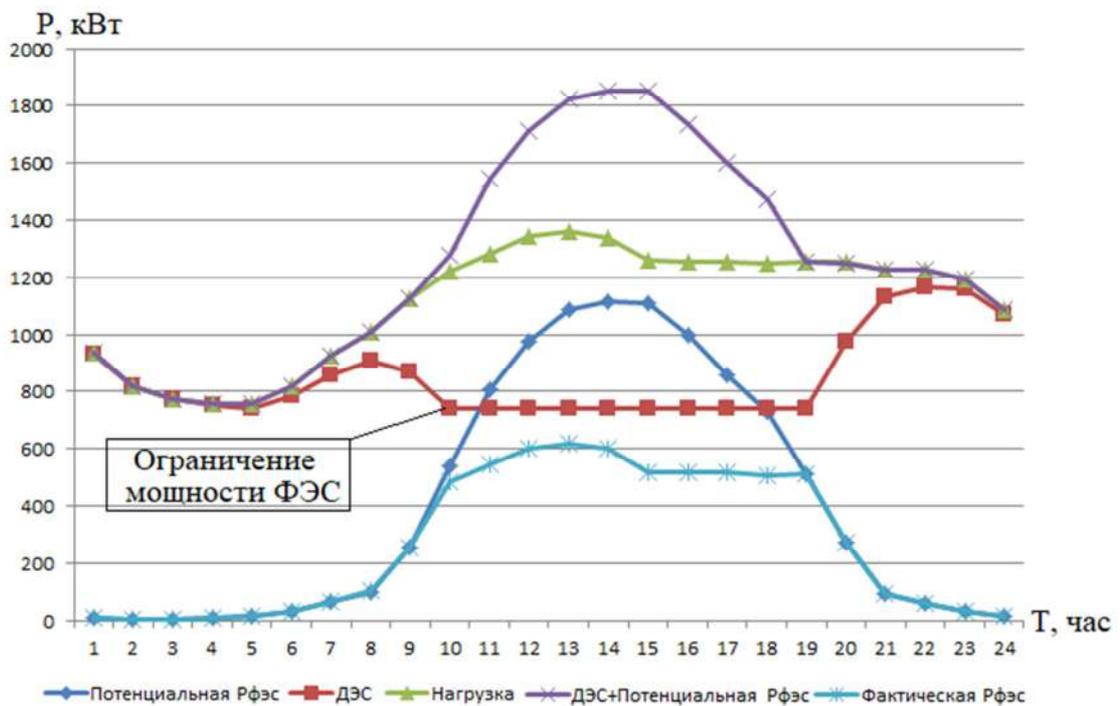


Рис.48 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 2 МВт. Июль

Анализируя зависимости, приведенные на рисунках 43, 44 можно заметить, что в зимний период времени изменение производимой мощности ДЭС соответствует изменению инсоляции, что в свою очередь говорит о полном потреблении энергии ФЭС нагрузкой. С увеличением установленной мощности ФЭС, выработка ДЭС уменьшается, это объясняется увеличением вырабатываемой энергии ФЭС с большей установленной мощностью.

Влияние выработки мощности ФЭС на изменение нагрузки на ДЭС в весенний и летний периоды времени (рис. 45÷48) увеличивается, что объясняется астрономическим изменением положения солнца на небосводе и увеличением продолжительности светового дня. Вместе с увеличением продолжительности светового дня естественным образом увеличивается и приход солнечной радиации на земную поверхность, обуславливая рост энергии производимой фотоэлектрической частью комплекса. Вместе, с тем от зимы к лету происходит снижение уровня нагрузки. На рисунке 49 представлена динамика изменения нагрузки в течение характерных суток в зависимости от времени года.

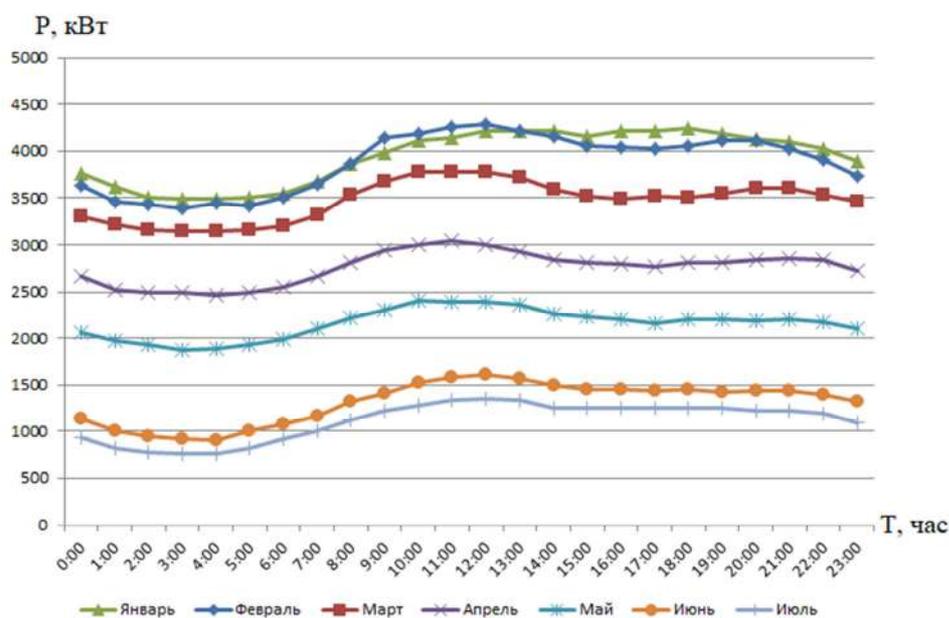


Рис.49 Изменение суточного графика нагрузки в зависимости от месяца года

Одновременный рост количества приходящей на земную поверхность солнечной радиации, и снижение уровня нагрузки, приводят к нарушению энергетического баланса и необходимости стабилизации системы. Это достигается регулированием мощности генерации ФЭС и поддержанием загрузки ДЭС в заданных пределах, обусловленных лимитированным диапазоном мощностей каждого отдельного дизельного генератора. Это наглядно показано на рисунках 47, 48, в виде ограничения фактической мощности ФЭС относительно потенциально возможной.

В идеальном случае вся доступная энергия гибридной электростанции должна потребляться нагрузкой, при этом суммарная энергия генерирующих источников будет повторять форму графика нагрузки (см. рис. 43÷45).

Превышение возможной выработки электроэнергии ФЭС над требованиями устойчивости гибридной электростанции при текущем уровне нагрузки автономной системы электроснабжения, в определенные временные интервалы ведет к необходимости ограничения мощности. Тем самым усугубляется недоиспользование установленной мощности фотоэлектрической части гибридной ФДЭС.

Это выражается в снижении коэффициента использования установленной мощности фотоэлектрической станции, изменение которого в течение характерных суток отражено на рисунках 50, 52, 54 для разных установленных мощностей ФЭС. Суточные изменения КИУМ дизельной части гибридной системы электроснабжения показаны на рис. 51, 53, 55.

Характерной особенностью зависимости КИУМ дизельных генераторов от времени суток является поддержание допустимой, по условиям устойчивости параллельной работы ДЭС и ФЭС, загрузки ДЭС в дневные, полуденные часы летних месяцев.

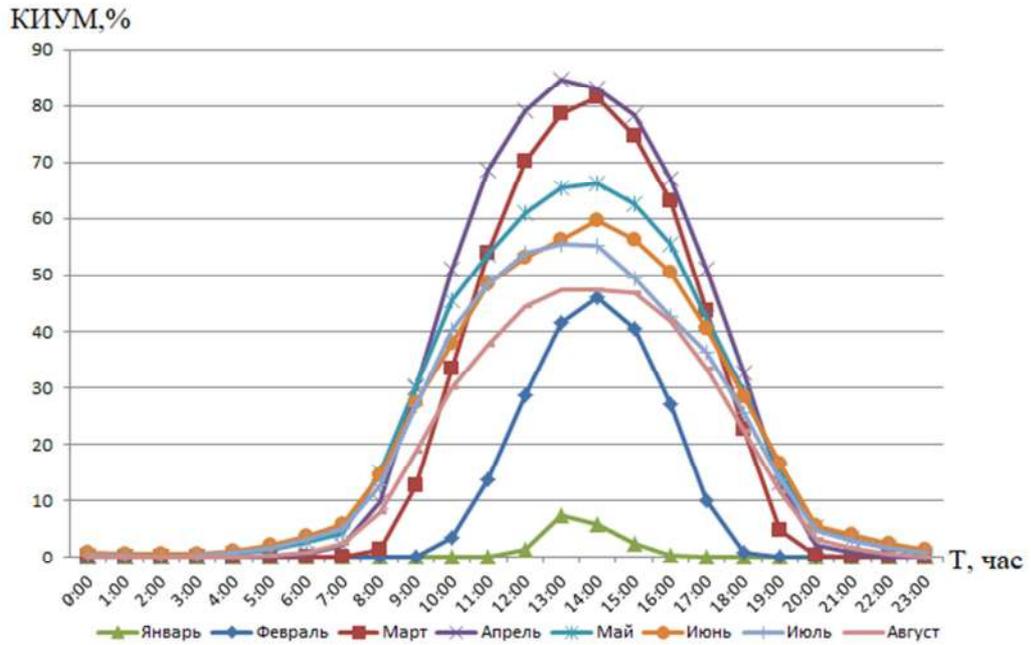


Рис.50 Изменение КИУМ ФЭС в течение характерных суток. $P_{\text{ФЭС,уст}}=1\text{МВт}$

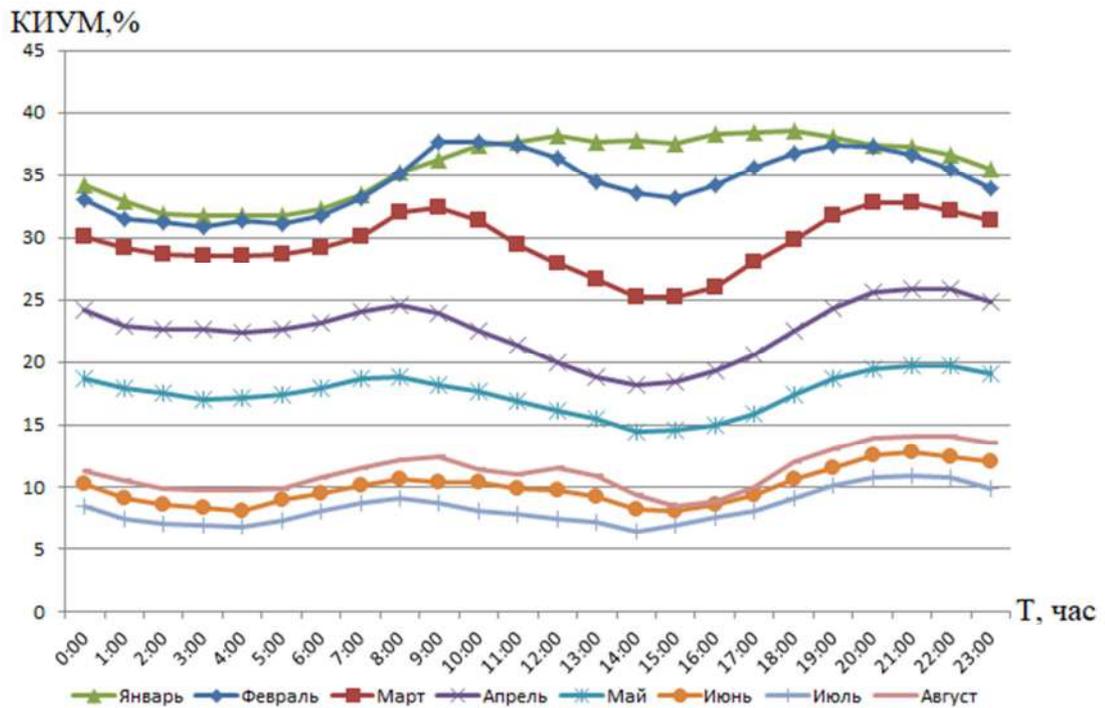


Рис.51 Изменение КИУМ ДЭС в течение характерных суток. $P_{\text{ФЭС,уст}}=1\text{МВт}$

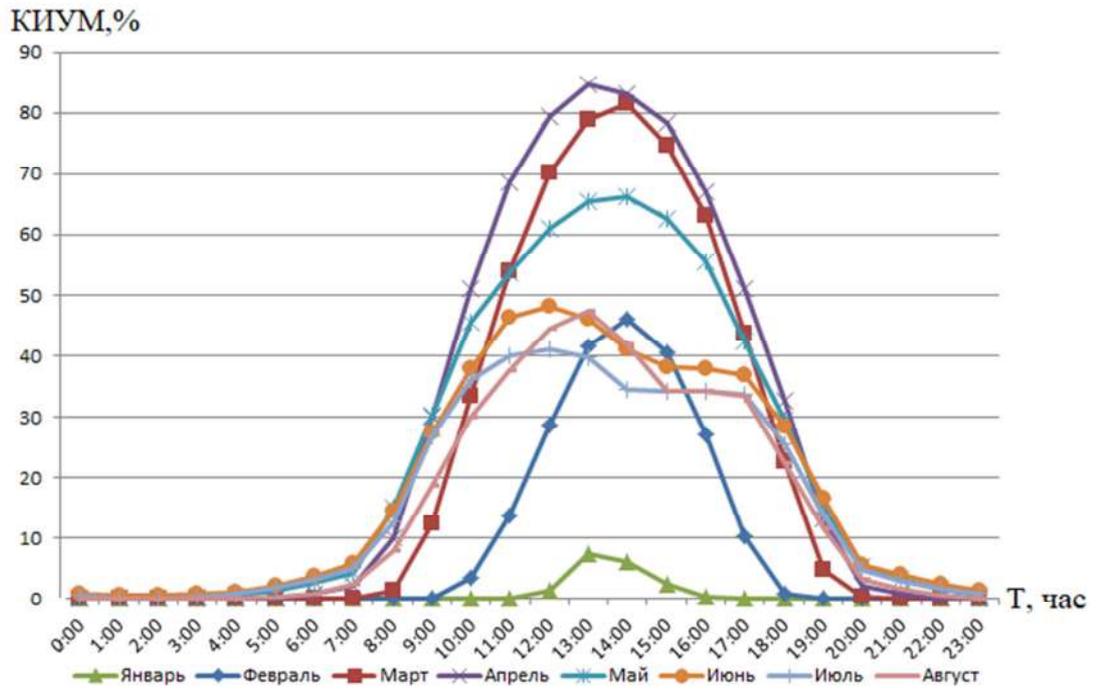


Рис.52 Изменение КИУМ ФЭС в течение характерных суток. $P_{ФЭС.уст} = 1,5$ МВт

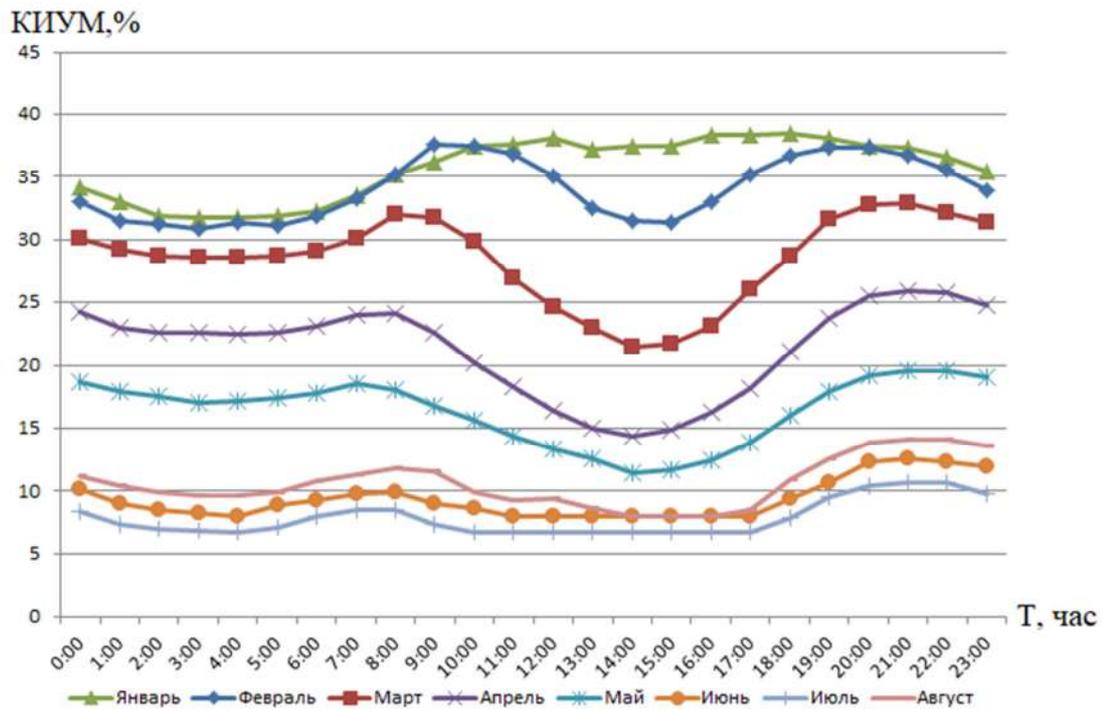


Рис.53 Изменение КИУМ ДЭС в течение характерных суток. $P_{ДЭС.уст} = 1,5$ МВт

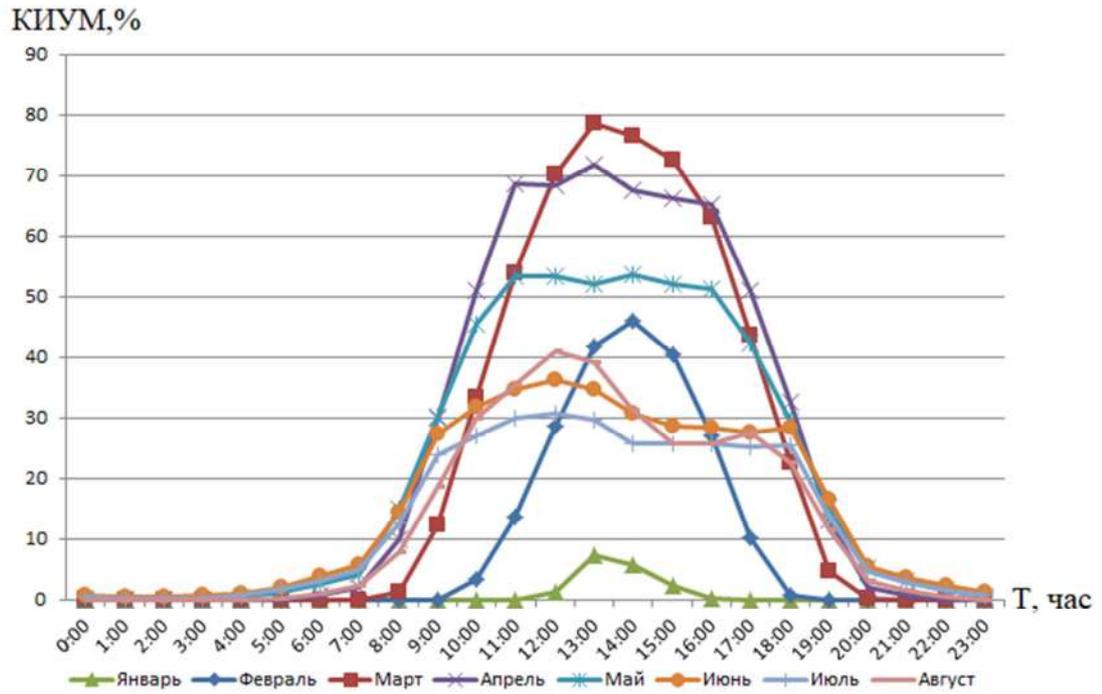


Рис.54 Изменение КИУМ ФЭС в течение характерных суток. $P_{ФЭС,уст} = 2$ МВт

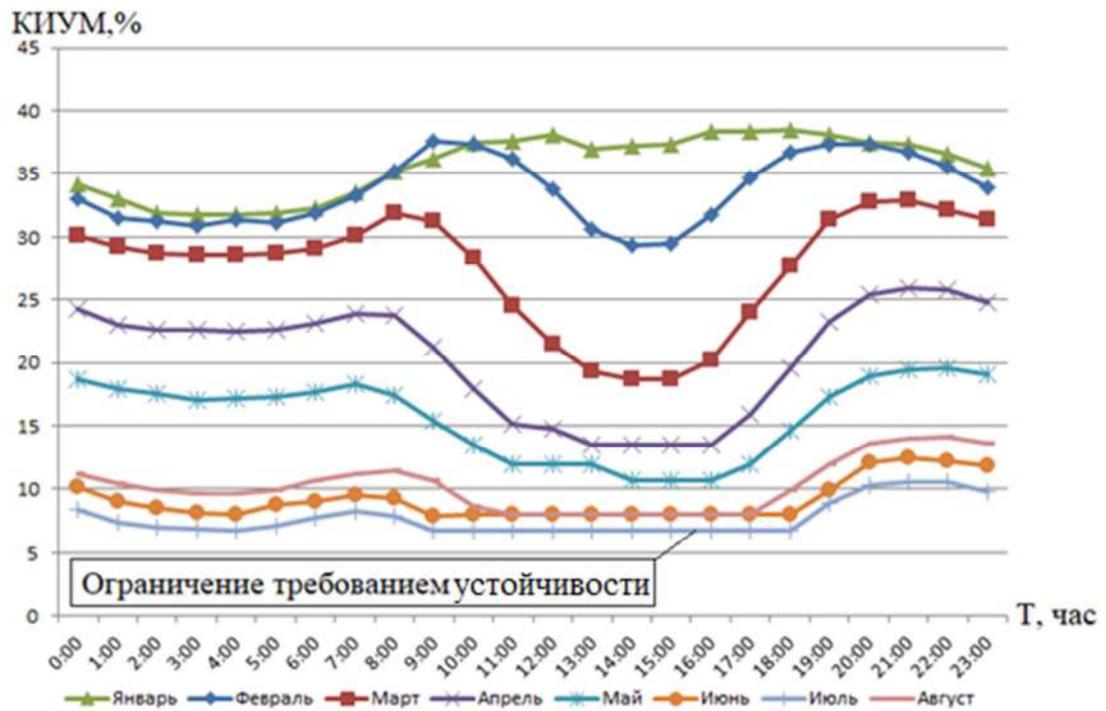


Рис.55 Изменение КИУМ ДЭС в течение характерных суток. $P_{ФЭС,уст} = 2$ МВт

Согласно представленному на рисунке 31 алгоритму, используя программный продукт для проектирования фотоэлектрических станций PVsyst, были определены основные энергетические показатели фотоэлектрической части гибридной системы электроснабжения различной мощности (начиная с 1МВт), работающей совместно с существующей ДЭС. Были определены значения требуемых целевых функций, приведены к месячным, годовым значениям и сведены в таблицу №17. Для расчета показателей в качестве исходных метеорологических данных была принята близлежащая к п. Батагай метеостанция Верхоянск.

Таблица №17. Основные показатели гибридных станций (годовые)

Мощность ФЭС	1 МВт			1,5 МВт			2 МВт		
	КИУМ ДЭС, %	КИУМ ФЭС, %	Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	КИУМ ДЭС, %	КИУМ ФЭС, %	Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	КИУМ ДЭС, %	КИУМ ФЭС, %	Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб
Январь	35,73	0,70	88,46	35,70	0,70	89,98	35,67	0,70	91,18
Феврал	31,12	8,82	51,19	30,76	8,82	51,94	30,39	8,82	52,53
Март	29,50	22,49	37,74	28,47	22,49	38,15	27,50	22,19	38,46
Апрель	21,85	27,22	32,01	20,65	27,22	32,25	19,83	25,01	32,43
Май	17,48	23,34	28,79	16,40	23,35	28,92	15,71	21,32	29,03
Июнь	9,63	21,53	27,23	9,07	18,57	27,32	8,84	15,25	27,41
Июль	8,29	20,00	26,04	7,88	16,33	26,10	7,71	13,17	26,17
Август	11,25	16,53	24,77	10,64	15,45	24,79	10,29	13,51	24,84
Сентяб	19,99	12,92	23,09	19,42	12,92	23,09	18,85	12,92	23,10
Октябр	24,79	9,29	21,51	24,37	9,29	21,48	23,94	9,29	21,48
Ноябрь	28,01	2,86	20,16	27,88	2,86	20,13	27,75	2,86	20,12
Декабр	32,81	0,00	18,93	32,81	0,00	18,91	32,81	0,00	18,90
Итого	22,54	13,81	18,93	22,00	13,17	18,91	21,61	12,09	18,90

На основании значений КИУМ представленных в таблице №17 были построены графические зависимости, показанные на рисунках 56, 57.

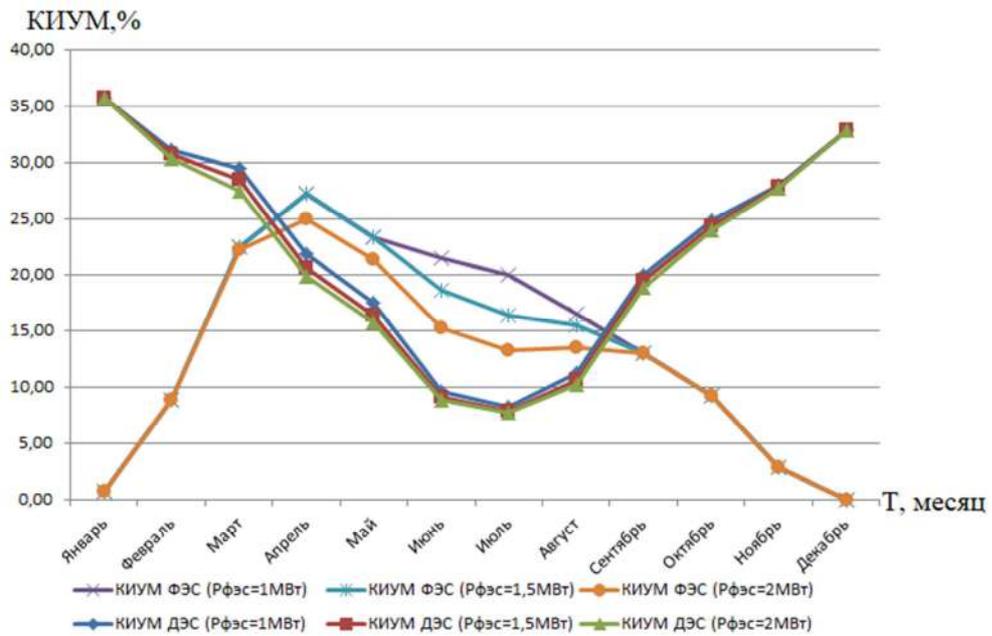


Рис.56 Изменение КИУМ гибридной электрической станции в течение года в зависимости от установленной мощности ФЭС

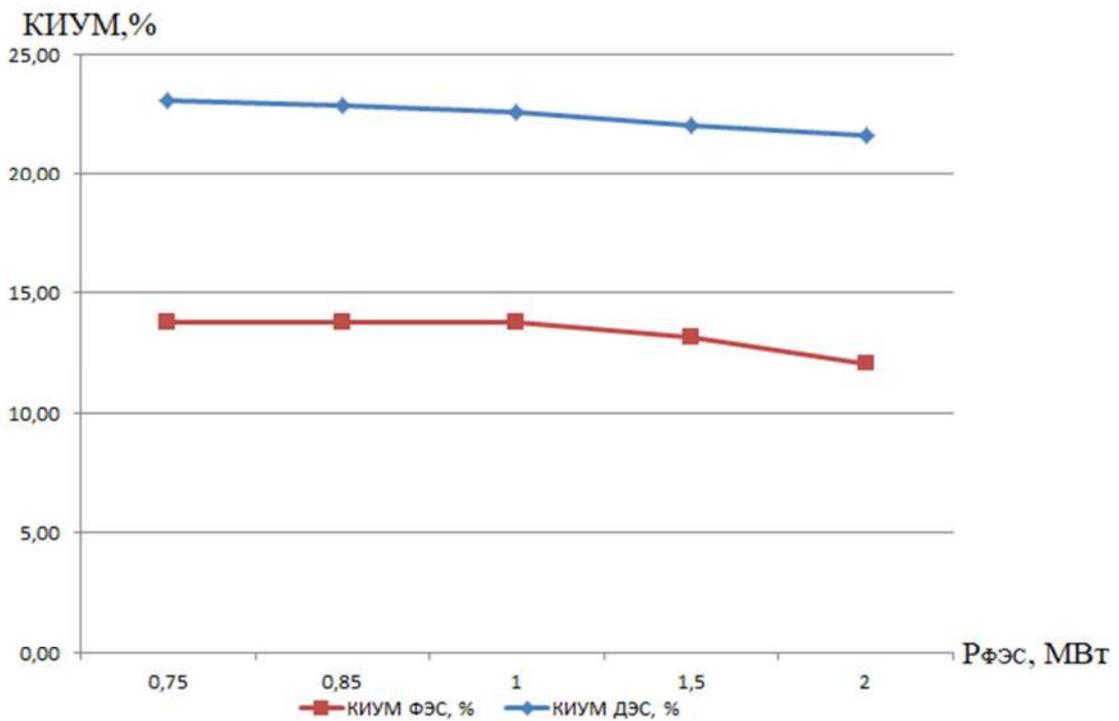


Рис.57 Годовое изменение КИУМ ФЭС и ДЭС гибридной электростанции в зависимости от установленной мощности ФЭС

Анализируя табличные данные, а также построенные графические зависимости, можно отметить, что с увеличением установленной мощности фотоэлектрической части гибридной электростанции увеличивается объём фотоэлектрической генерации. Соответственно увеличивается количество сэкономленного дизельного топлива, на производство электрической энергии в год, при этом происходит естественное снижение КИУМ дизельной электростанции за счет большего влияния фотоэлектрической станции на систему (см. рис. 56).

Тем не менее, не смотря на увеличение экономии топлива, с ростом установленной мощности фотоэлектрической части гибридного энергетического комплекса, в наиболее солнечные сезоны года наблюдается рост не востребованной энергии превышающей требования нагрузки. Как следствие, снижается коэффициент использования установленной мощности фотоэлектростанции. Так при установленной мощности фотоэлектрической станции 1МВт, КИУМ ФЭС находится в максимальных значениях в течение года, при увеличении мощности до 1,5 МВт, избытки электроэнергии появляются в летнее время в часы наибольшей активности солнца, и одновременного снижения нагрузки. При дальнейшем росте мощности ФЭС, избытки начинают появляться и в межсезонье: осень, весна. То есть увеличение мощности ФЭС выше 1МВт сопровождается падением значения КИУМ ФЭС, в разрезе дня, месяца и года. Снижение установленной мощности ФЭС ниже 1 МВт также не целесообразно, из-за ограничений по экономии топлива: количество сэкономленного топлива будет меньше, чем при мощности ФЭС 1 МВт, что естественным образом приведет к увеличению себестоимости производимой гибридной электрической станцией энергии. То есть установленная мощность ФЭС 1 МВт является точкой оптимума для рассматриваемого примера.

На основании расчетных значений себестоимости электроэнергии, представленных в таблице №17, была построена графическая зависимость, показанная на рисунке 58.

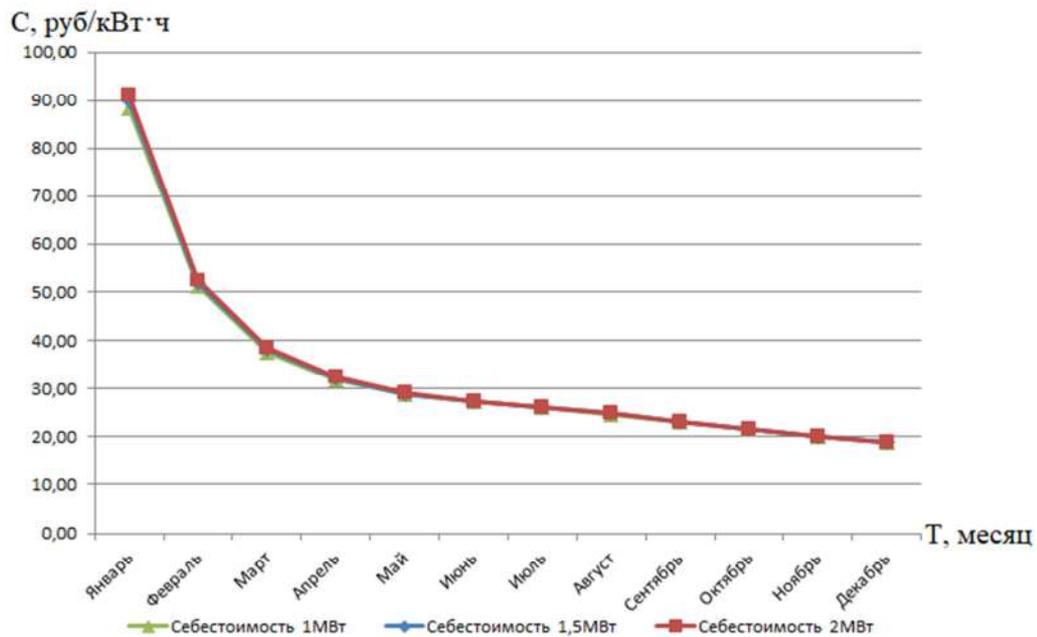


Рис.58 Годовое изменение себестоимости 1 кВт·ч с гибридной электростанции с накоплением при различных установленных мощностях ФЭС

Кривые себестоимости производства кВт·ч электрической энергии гибридной электрической станции с мощностями ФЭС 1÷2 МВт фактически накладываются друг на друга, то есть увеличение установленной мощности фотоэлектрической станции более 1 МВт практически не дает экономической выгоды (разница 1÷3 копейки). Большая мощность сопровождается ростом капитальных затрат, примерно компенсируемых экономией топлива.

Тем не менее, прирост доли мощности ФЭС возможен при модернизации дизельной электростанции.

Под модернизацией ДЭС подразумевается полная замена существующего оборудования на более современные, автоматизированные дизельные агрегаты

позволяющие управлять ими через контроллер, посредством различных датчиков [3], тем самым, исключая человеческий фактор и повышая надежность системы.

Прирост доли мощности ФЭС происходит за счет увеличения рабочего диапазона каждой отдельной дизель-генераторной установки. Современные автоматизированные дизель-генераторные установки большого числа производителей позволяют осуществить их длительную загрузку в диапазоне от 30% до 100%, без существенных негативных последствий [34].

В свою очередь это приводит к увеличению общего объема резервной мощности, ($P_{рез}$) которую могут обеспечить установки в каждый момент времени и соответственно к большему использованию потенциальных возможностей фотоэлектрической составляющей гибридной электрической станции, при сохранении устойчивости ее работы. За счет увеличения $P_{рез}$ появляется возможность снижения необходимого значения мощности производимой дизельной частью гибридной электрической станции, при этом происходит рост КИУМ ее фотоэлектрической части, снижение потребления дизельного топлива и, как следствие, себестоимости производства электрической энергии. Все это улучшает характеристики гибридного комплекса в целом.

Обеспечение резервирования ДЭС достигается выполнением условия обеспечения максимума нагрузки ($P_{нагр}$) при выходе из работы двух наиболее мощных генераторов выражению 3.3.6.

Для п. Батагай в случае модернизации требуется установить: дизельные агрегаты мощностью 1000 кВт – 6 шт., дизельные агрегаты мощностью 750 кВт – 3 шт. Общая установленная мощность ДЭС при этом составит 8250 кВт.

При указанной аварийной ситуации установленная мощность ДЭС составит 6250 кВт, что полностью отвечает требованиям надежного электроснабжения поселка.

Установка агрегатов различной установленной мощности требуется для обеспечения маневренности дизельной станции и создания возможности

поддержания необходимого значения мощности, при различных уровнях нагрузки с наилучшими технико-экономическими показателями гибридной электрической станции.

Сравнивая результаты исследования до и после замены состава дизельной части гибридной электрической станции констатируем существенное увеличение коэффициента использования установленной мощности фотоэлектрической станции за счет расширения рабочего диапазона дизель-электрических установок.

Также наблюдается существенная экономия топлива. Сравнительные значения гибридных комплексов до модернизации и после при различных установленных мощностях ФЭС представлены в таблице №18.

Таблица №18. Расчетные характеристики гибридных комплексов при различной мощности ФЭС

	Мощность ФЭС, МВт	0	1	1,5	2	2,5
Использованное топливо (за год), тонн	До модернизации ДЭС	5881	5544	5432	5349	5301
	После модернизации ДЭС	5176	4870	4754	4654	4580
Коэффициент использования ФЭС (годовой)	До модернизации ДЭС	0	1	0,89	0,8	0,72
	После модернизации ДЭС	0	1	0,96	0,9	0,84

Экономия топлива за счет частичного замещения генерации дизельных агрегатов, характеризуется уменьшением удельных расходов топлива на производство электрической энергии с 250 г/кВт*ч, до 222 г/кВт*ч. На основании значений таблицы №18 построены графические зависимости, представленные на рис.59 и рис.60 соответственно.

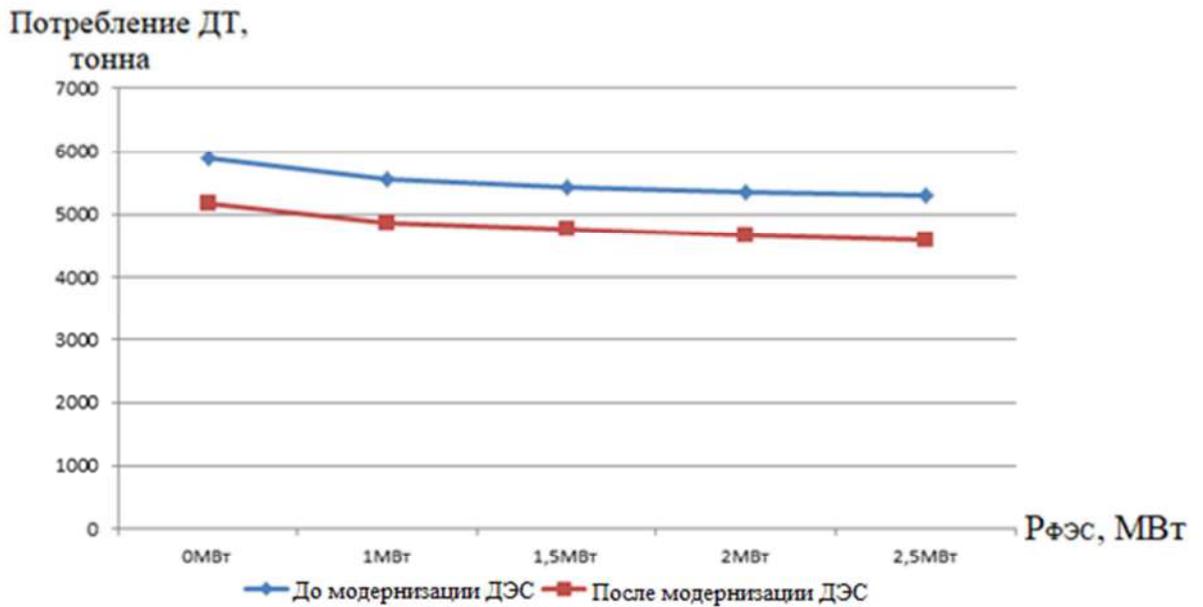


Рис. 59 График потребления дизельного топлива в год при различных установленных мощностях ФЭС

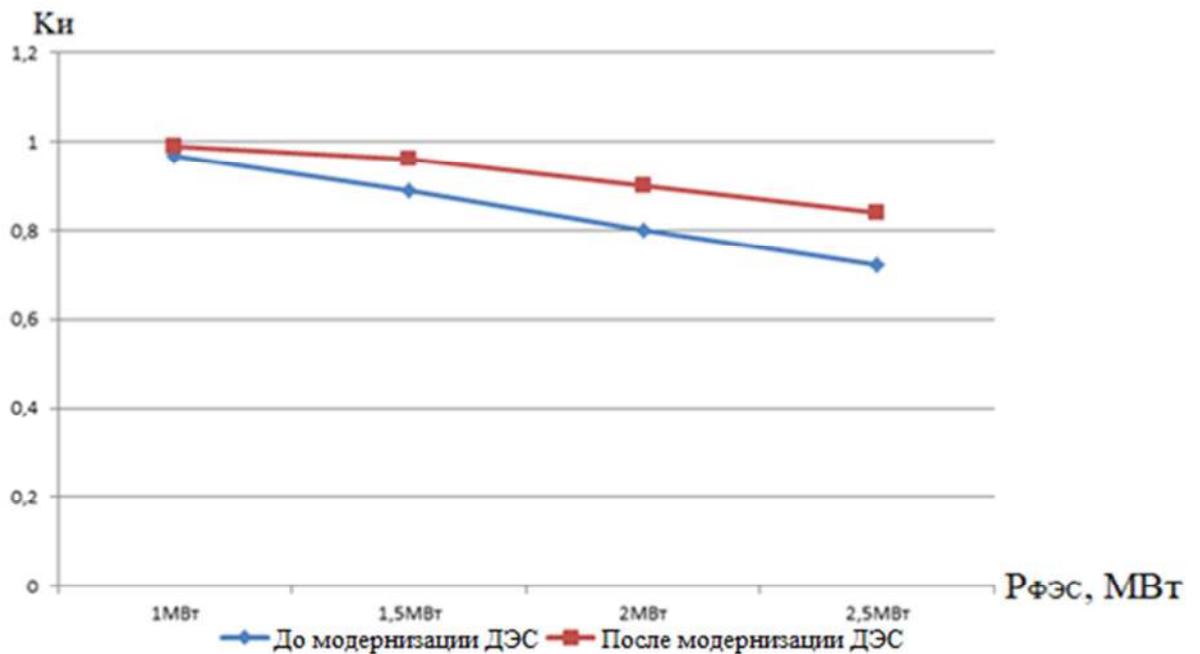


Рис.60 График изменения годового коэффициента использования возможностей ФЭС при различных ее установленных мощностях

При работе с модернизированной ДЭС целесообразно установленную мощность ФЭС увеличить до 2 МВт не смотря на недоиспользование части

энергии (при этом станция в летние месяцы теряет не более 25% солнечной энергии), так как помимо большего объема сэкономленного топлива, гибридная станция приобретает лучшие показатели по себестоимости производимой электрической энергии. Дальнейшее увеличение установленной мощности ФЭС не целесообразно из-за необходимости существенного снижения полезного использования вырабатываемой ею энергии в весенние и летние месяцы.

При построении гибридных электрических станций большой мощности на основе схемы с непрерывной дизельной генерацией для обеспечения лучших технико-экономических характеристик параметров рекомендуется производить модернизацию местных ДЭС. Так как это позволит сократить степень зависимости населенного пункта от привозного дизельного топлива. В виду сокращения потребления на производство кВт*ч электроэнергии новыми дизельными агрегатами, а также расширения диапазона их загрузки. Что повысит устойчивость системы и позволит более полно использовать возможности фотоэлектрической станции. Также модернизация позволит практически исключить человеческую ошибку при переключениях, за счет автоматизации работы составляющих гибридной электрической станции.

4.2 Влияние широты местности на оптимальный состав оборудования гибридных электростанций в условиях Якутии

Согласно данным представленным в параграфах 2.2.1 и 2.2.2 в южных районах Якутии среднегодовой приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность земли имеет большие значения по отношению к северным. В связи с этим проведено дополнительное исследование работы гибридной электростанции с непрерывной дизельной генерацией в условиях юга Якутии. Исследования проведены для фото-дизельной станции в районе города Алдан с координатами 58.6 с.ш., 125,4 в.д. Оптимизация целевых функций производится по алгоритму,

представленному на рисунке 31. Технические характеристики гибридной электростанции приняты аналогичными, как для п. Батагай. Изменяемым параметром является установленная мощность ФЭС.

В качестве исходных данных инсоляции приняты данные метеостанции расположенной в г. Алдан.

В южных районах Якутии отсутствуют явления полярного дня и ночи, которые явно выражены на северных территориях. В связи, с чем продолжительность светового дня летом значительно ниже, но вместе с тем зимой, осенью наблюдается приход больших объемов солнечной радиации, значительно превышающих северные территории (см. рис. 61).

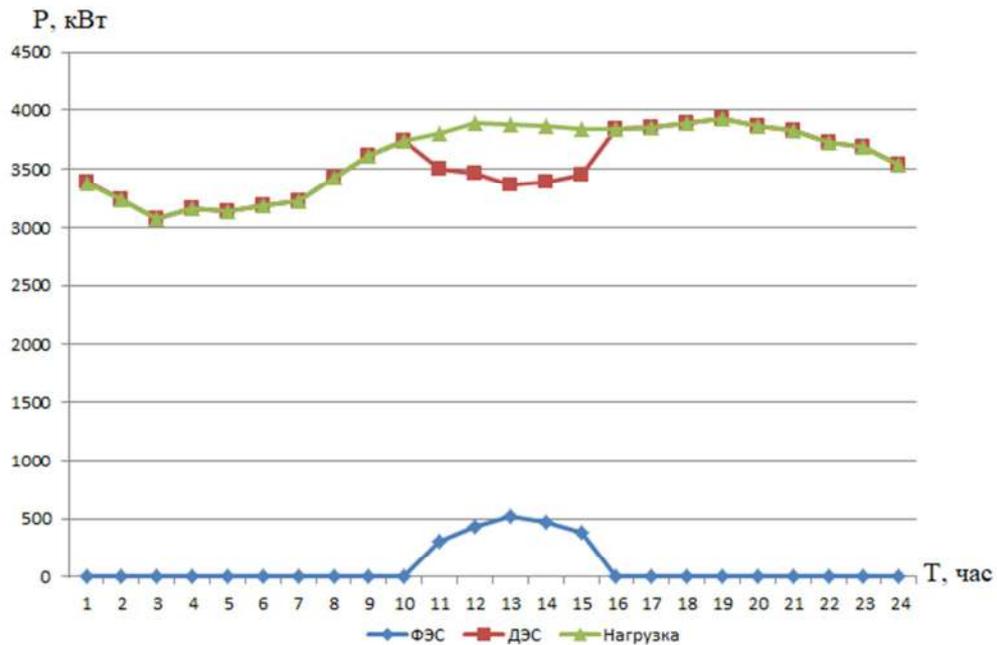


Рис. 61 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при установленной мощности ФЭС 1,5 МВт. Алдан, Декабрь

При прочих равных условиях большие значения инсоляции зимой и осенью влияют на увеличение значения КИУМ фотоэлектрической станции в эти периоды, так как вся произведенная энергия востребована значительным уровнем

нагрузки. Более короткая продолжительность дня летом, при оптимальном фиксированном угле наклона 52° , дает меньший прирост выработки энергии в часы наибольшей активности солнца относительно севера (при равной установленной мощности), что уменьшает появление избытков энергии. Все это оказывает положительное влияние на технико-экономические характеристики гибридной электростанции с непрерывной дизельной генерацией в целом, по сравнению с северными районами республики. Полученные в результате расчетов данные КИУМ фотоэлектрических частей гибридных станций, расположенных на широте местности г. Алдан и п. Батагай, представлены в таблице №19.

Таблица №19. Показатели КИУМ ФЭС гибридных станций

Мощность ФЭС	1 МВт			1,5 МВт			2 МВт		
	Алдан, КИУМ ФЭС, %	Батагай, КИУМ ФЭС, %	Алдан КИУМ/Б атагай КИУМ	Алдан, КИУМ ФЭС, %	Батагай, КИУМ ФЭС, %	Алдан КИУМ/Б атагай КИУМ	Алдан, КИУМ ФЭС, %	Батагай, КИУМ ФЭС, %	Алдан КИУМ/Б атагай КИУМ
Январь	9,99	0,70	14,27	9,86	0,70	14,09	9,86	0,70	14,09
Феврал	17,88	8,82	2,03	17,99	8,82	2,04	17,78	8,82	2,02
Март	20,62	22,49	0,92	20,73	22,49	0,92	20,13	22,19	0,91
Апрель	21,39	27,22	0,79	21,47	27,22	0,79	20,93	25,01	0,84
Май	19,61	23,34	0,84	19,66	23,35	0,84	19,31	21,32	0,91
Июнь	16,43	21,53	0,76	16,44	18,57	0,89	14,07	15,25	0,92
Июль	17,34	20,00	0,87	15,02	16,33	0,92	11,93	13,17	0,91
Август	14,57	16,53	0,88	14,57	15,45	0,94	13,52	13,51	1,00
Сентяб	15,05	12,92	1,16	15,61	12,92	1,21	15,41	12,92	1,19
Октябрь	11,97	9,29	1,29	11,86	9,29	1,28	11,71	9,29	1,26
Ноябрь	11,26	2,86	3,94	11,21	2,86	3,92	11,16	2,86	3,90
Декабр	5,83	0,00	-	5,86	0,00	-	5,86	0,00	-
Итого	15,16	13,81	1,10	15,02	13,17	1,14	14,30	12,09	1,18

Анализируя данные таблицы №19 можно заметить, что на широте г. Алдан годовое значение КИУМ ФЭС при росте установленной мощности ФЭС падает, не столь стремительно, как в северных широтах. Это объясняется тем, что прирост мощности дает основное увеличение выработки электрической энергии в

переходные и зимние периоды, когда уровень нагрузки достаточно высок. В связи с чем при росте установленной мощности ФЭС до 1,5 МВт избытки энергии наблюдаются только в июле, в то время как в северных широтах (п. Батагай), избыток присутствует уже во все летние месяцы. Это можно наглядно увидеть на графической зависимости месячных значений КИУМ (рис. 62) построенных на основании данных представленных в таблице №19.

На рисунке 63 представлена графическая зависимость, отражающая изменение годовых значений КИУМ ФЭС при росте установленной мощности фотоэлектрической части гибридной ФДЭС от северных территорий к южным.

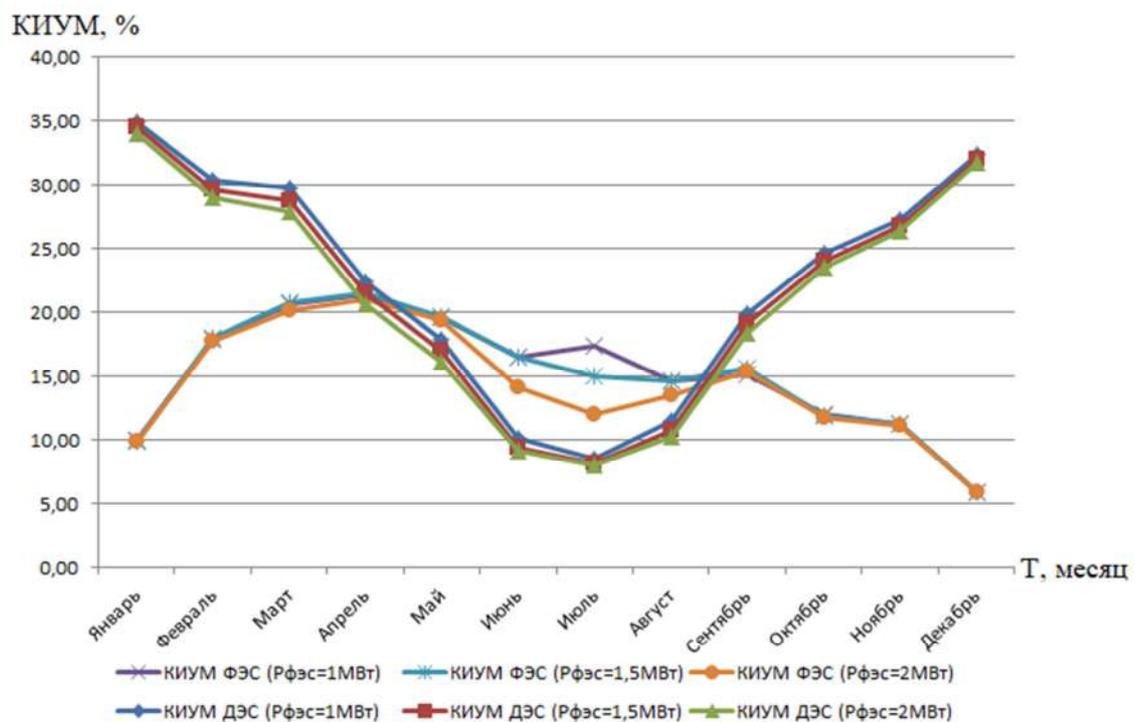


Рис.62 Изменение КИУМ гибридной электростанции в течение года при разных установленных мощностях ФЭС. Алдан

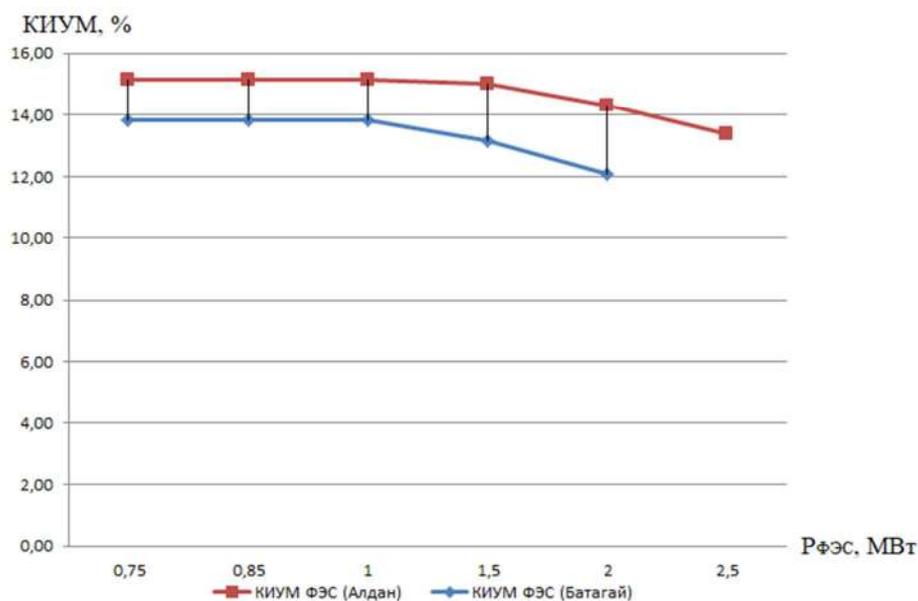


Рис.63 Годовое изменение КИУМ ФЭС гибридной электростанции при различных установленных мощностях на разных широтах Якутии

На основании выше представленных зависимостей можно сделать вывод – смещение места установки гибридной электрической станции от северных территорий к южным, дает увеличение среднегодового КИУМ ее фотоэлектрической части. За счет этого наблюдается смещение точки оптимальной установленной мощности фотоэлектрической части гибридного энергетического комплекса с увеличением в сторону южных районов.

Так при вышеописанных условиях для п. Батагай оптимальной с технической точки зрения являлась мощность в 1МВт, при смещении данного комплекса в широты г.Алдан оптимальную установленную мощность (на основании рис. 63) можно увеличить практически до 1,5МВт.

Изменение значений КИУМ в большую сторону, положительно отражается на изменении себестоимости энергии, производимой энергетическим комплексом. Сравнительные данные себестоимости северного и южного района с накоплением по месяцам приведены в таблице №20.

Таблица №20. Показатели себестоимости гибридных станций (с накоплением)

Мощность ФЭС	1 МВт		1,5 МВт		2 МВт	
	Алдан, Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	Батагай, Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	Алдан, Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	Батагай, Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	Алдан, Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб	Батагай, Себестоимость 1 кВт*ч э/э, руб
Январь	88,24	88,46	89,64	89,98	90,73	91,18
Февраль	50,97	51,19	51,61	51,94	52,08	52,53
Март	37,60	37,74	37,95	38,15	38,19	38,46
Апрель	31,94	32,01	32,14	32,25	32,27	32,43
Май	28,75	28,79	28,86	28,92	28,92	29,03
Июнь	27,22	27,23	27,28	27,32	27,32	27,41
Июль	26,04	26,04	26,07	26,10	26,10	26,17
Август	24,78	24,77	24,78	24,79	24,77	24,84
Сентябрь	23,10	23,09	23,05	23,09	23,02	23,10
Октябрь	21,50	21,51	21,44	21,48	21,39	21,48
Ноябрь	20,12	20,16	20,05	20,13	19,98	20,12
Декабрь	18,89	18,93	18,81	18,91	18,75	18,90
Итого	18,89	18,93	18,81	18,91	18,75	18,90

По данным годового значения себестоимости электрической энергии представленным в таблице №20 построена графическая зависимость представленная на рис. 64.

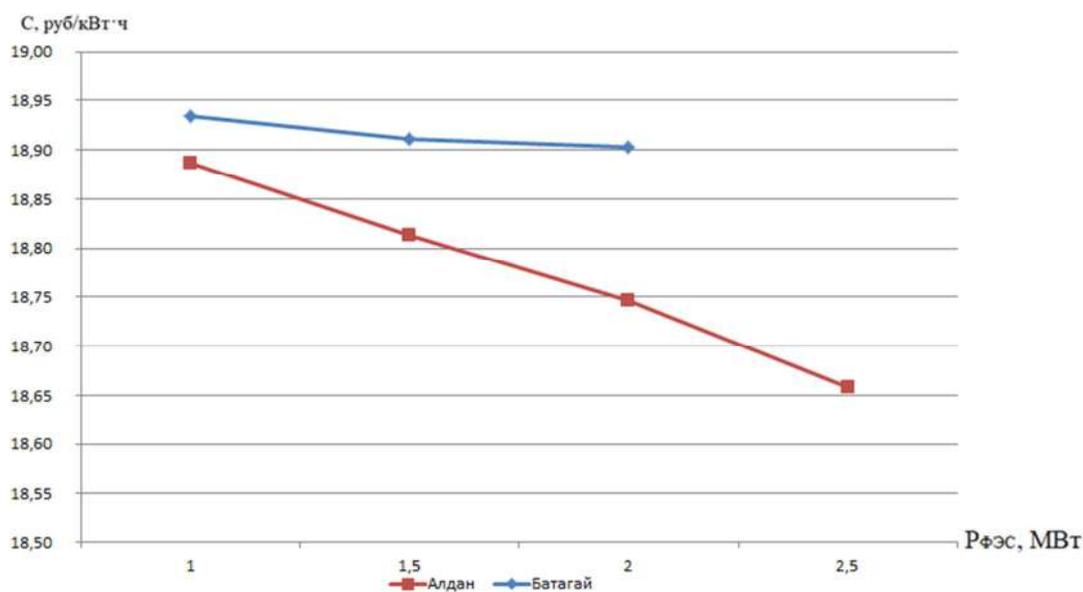


Рис. 64 Изменение себестоимости энергии гибридной электростанции при различных установленных мощностях ФЭС на разных широтах Якутии

В случае с северными районами, увеличение установленной мощности практически не дает изменения себестоимости производимой электрической энергии, из-за значительного падения КИУМ. В случае южных районов наблюдается некоторая динамика, составляющая удешевление производимой энергии на 6-7 копеек при увеличении мощности на 0,5МВт. Учитывая, что за год гибридный энергетический комплекс производит миллионы кВт*ч электрической энергии изменение себестоимости даже на подобные значения дает экономический результат. Так при увеличении мощности от 1 до 1,5 МВт ежегодная экономия за счет изменения себестоимости составит 1,72 млн. рублей при стоимости тонны топлива в 38000 рублей, при увеличении до 2 МВт экономия достигнет 3,28 млн. рублей и т.д. При этом каждое увеличение мощности сопровождается увеличением капитальных затрат на строительство станции.

При работе гибридной ФДЭС в п. Батагай с существующими дизельными агрегатами при $P_{ФЭС,уст} = 1\text{МВт}$ происходит замещение порядка 11,68% энергии производимой за счет сжигания дизельного топлива, энергией солнца. Это выражается в виде гистограммы представленной на рисунке 65.

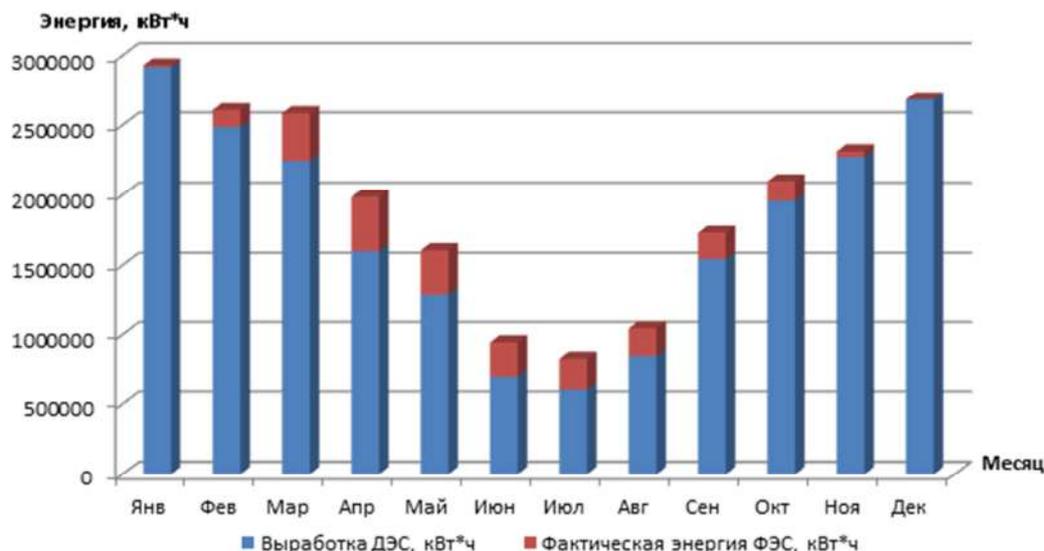


Рис.65 Гистограмма замещения мощности ДЭС при $P_{ФЭС,уст} = 1\text{МВт}$

При этом на период 2012 года себестоимость энергии дизельной электростанции составляла 21,39 рублей за кВт·ч. Снижение себестоимости при строительстве гибридного комплекса с установленной мощностью ФЭС 1МВт, составит 2,46 руб/ кВт·ч.

При этом в Якутии средний тариф на электрическую энергию в децентрализованных областях составляет 35÷36 руб/ кВт·ч, а в некоторых особо труднодоступных населенных пунктах величина тарифа достигает значений 600÷2000 руб/ кВт·ч [2, 22]. Одновременно вес топливной составляющей в тарифе варьируется от 76 до 87%.

Приняв среднее значение в 80% можно определить уровень затрат на топливо в тарифе, а также экономию на производство электрической энергии в различных локациях при условии ввода гибридного комплекса оптимальной мощности. Уровень замещения дизельной генерации принят в объеме п. Батагай. Данные сведены в таблицу №21.

Таблица №21 Данные экономии денежных средств при строительстве гибридных ФДЭС.

Стоимость тарифа, руб/кВт·ч	Часть топливной составляющей в тарифе, руб/кВт·ч	Капитальные затраты и обслуживание в тарифе, руб/кВт·ч	Стоимость тарифа при вводе гибридной ФДЭС, руб/кВт·ч	Экономия, руб/кВт·ч
35	28	7	31,73	3,27
40	32	8	36,26	3,74
50	40	10	45,33	4,67
100	80	20	90,66	9,34
200	160	40	181,31	18,69
300	240	60	271,97	28,03
500	400	100	453,28	46,72
800	640	160	725,25	74,75
1000	800	200	906,56	93,44
1500	1200	300	1359,84	140,16
1800	1440	360	1631,81	168,19
2000	1600	400	1813,12	186,88

На основании данных представленных в таблице №21 построена зависимость (рис. 6б) отражающая изменение экономии денежных средств при производстве электрической энергии, при строительстве гибридной системы электроснабжения в удалённых локациях.

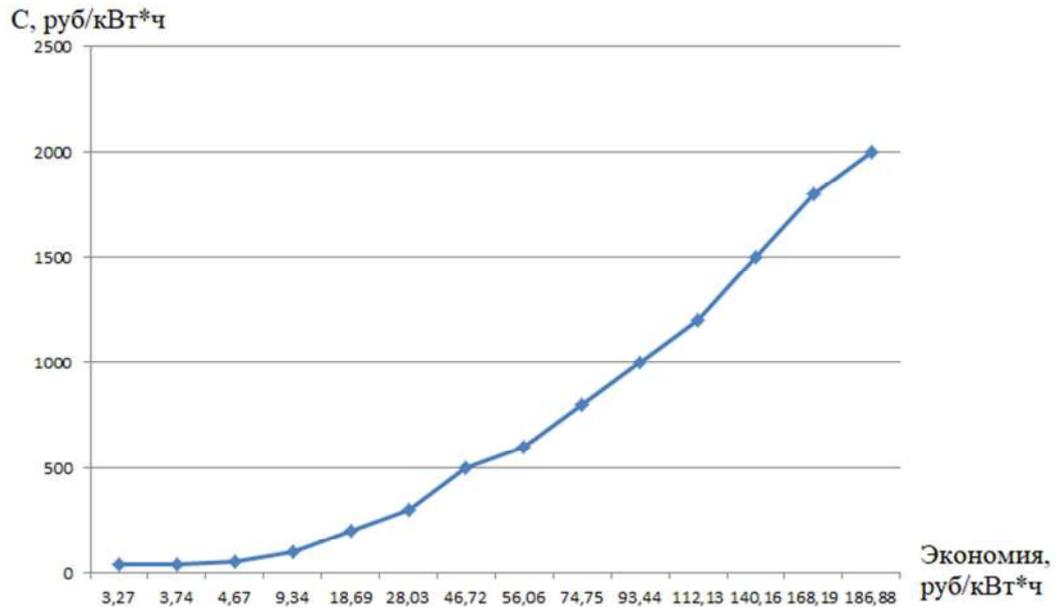


Рис. 6б Изменение экономии на производство электрической энергии при вводе гибридной электростанции

Как видно из таблицы и графика, экономия на производство электрической энергии при установке гибридного комплекса, тем выше, чем выше стоимость тарифа на электрическую энергию в конкретной местности. Экономия достигается за счет экономии дорогостоящего привозного дизельного топлива. Это подтверждает целесообразность строительства гибридных электростанций в локальных системах электроснабжения с высоким уровнем тарифа на электрическую энергию.

4.3 Оптимизация гибридных фото-дизельных систем электроснабжения с отключаемой ДЭС

Оптимизация установленной мощности составных частей гибридной электрической станции с применением аккумуляторов произведена по алгоритму действий, представленному на рисунке 32, на основе метода покоординатного спуска описанного в главе 1. Основные выводы представлены на примере реально существующей гибридной электрической станции в п. Юнкюр введенной в эксплуатацию в 2015 году. Значения графика нагрузки которого, приведенные к характерным суткам месяца, представлены в таблице №22.

Таблица №22. Почасовой график нагрузки п. Юнкюр, кВт

Час	Янв.	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
1	50	42	43	42	41	34	28	34	40	45	38	55
2	45	41	41	41	37	32	30	32	30	35	30	45
3	40	41	41	40	32	28	29	30	26	30	30	36
4	40	41	38	36	30	28	29	30	26	30	30	35
5	40	40	38	36	30	29	28	31	26	30	30	36
6	40	43	43	40	32	30	30	32	26	33	35	42
7	46	62	63	62	35	32	32	35	40	45	45	48
8	82	68	68	67	42	31	49	52	48	52	51	57
9	80	79	80	78	44	43	50	55	45	55	48	60
10	83	72	71	71	53	41	40	50	50	50	48	60
11	75	85	83	78	52	47	40	48	40	53	54	63
12	73	85	84	81	47	50	42	48	42	55	55	72
13	75	75	70	70	43	40	45	50	50	64	60	75
14	75	75	69	67	43	43	43	48	40	60	64	64
15	67	78	68	68	48	43	45	48	45	50	56	62
16	70	70	71	68	41	47	40	50	45	50	52	55
17	70	76	87	74	40	45	40	50	42	52	58	55
18	98	85	98	76	58	53	45	48	42	54	64	72
19	110	92	95	78	44	54	48	52	55	64	92	78
20	110	103	90	84	48	59	45	52	66	72	92	98
21	98	100	87	80	51	60	50	58	78	94	84	110
22	96	95	86	79	43	52	40	58	60	75	78	90
23	85	85	77	73	50	50	38	50	50	68	61	80
24	60	70	72	72	52	45	32	45	45	50	48	68

Для определения оптимальных установленных мощностей основного генерирующего оборудования гибридной электрической станции любого схемного решения требуется работа с графиком нагрузки.

Так как состав существующей дизельной станции неизвестен, то оптимальная установленная мощность ДЭС определяется по соотношению 3.3.6 исходя из обеспечения резервирования максимума нагрузки ($P_{\text{нагр. max}}$) при выходе из работы двух наиболее мощных генераторов. Максимальное значение нагрузки для п. Юнкюр достигает значений 110 кВт, которое отмечается в зимний период времени (см. рис. 67 и таблицу №22).

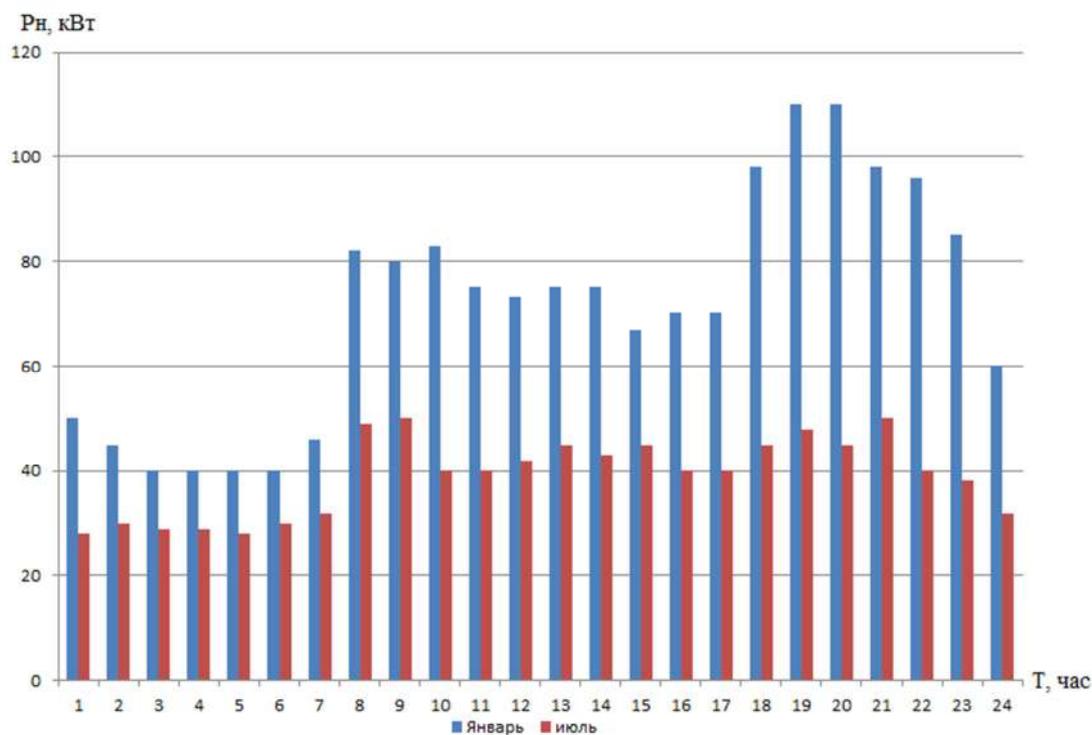


Рис. 67 Почасовой график нагрузки п. Юнкюр для граничных месяцев года

В п. Юнкюр для выполнения соотношения 3.3.6 требуется: дизельные агрегаты мощностью 100 кВт – 2 шт., дизельные агрегаты мощностью 80 кВт – 2 шт., и дизельный агрегат мощностью 60 кВт – 1 шт. При этом составе оборудования общая установленная мощность ДЭС составит 420 кВт.

При выходе из работы двух наиболее мощных генераторов установленная мощность ДЭС составит 220 кВт, что полностью отвечает требованиям надежного электроснабжения поселка.

Установка агрегатов различной установленной мощности, как и в случае с гибридной станцией с непрерывно дизельной генерацией требуется для обеспечения маневренности дизельной станции с целью поддержания загрузки каждого отдельного генератора в требуемых пределах.

Гибридная электрическая станция с возможностью отключения ДЭС может быть построена по двум схемным решениям, представленным на рис. 18 а, в. То есть с применением батарейного, либо гибридного инверторов. В данном параграфе рассматривается схема с использованием батарейного инвертора, что подразумевает раздельную работу фотоэлектрической и дизельной частей гибридной станции.

Для расчета показателей инсоляции в качестве исходных метеорологических данных была принята близлежащая к п. Юнкюр метеостанция Верхоянск. Так как, широта местности близка к широте п. Батагай, угол наклона фотоэлектрических панелей совпадает и равен 52° (оптимальный годовой), расстояние между панелями не учитывается, панели и инверторы приняты типовыми и не изменяются в процессе оптимизации. Пределы загрузки дизельных агрегатов с учетом вероятного существующего состояния составляют от 40 до 80% установленной мощности, аналогично параграфу 4.1.

Изменяемым параметром при оптимизации является установленная мощность фотоэлектростанции. Учитывая, что ФЭС и ДЭС работают раздельно, установленная мощность ФЭС ограничена лишь оптимальными значениями целевых функций. Начальное значение установленной мощности ФЭС принято равным 70 кВт. Шаг изменения в большую сторону, равен 10 кВт.

Исследования проведены с дискретизацией расчетов равным одному часу характерных суток каждого месяца.

Итерационный процесс также как и в предыдущем случае представлен по принципу человеко-машинного взаимодействия. В данном случае основными целевыми функциями, определяющими оптимальный состав (наилучшие технико-экономические показатели) выбраны: минимизация себестоимости электроэнергии и минимизация совокупной емкости аккумуляторных батарей требующейся для полноценного использования возможностей станции. Значения КИУМ при этом как целевая функция не рассматриваются, поскольку за счет применения аккумуляторных батарей он будет максимален для данной местности при любой установленной мощности ФЭС.

Раздельная работа фотоэлектрической и дизельной составляющих гибридной электрической станции имеет особенности.

На рисунке 68 отображена ситуация когда $P_{\text{ФЭС}} \leq P_{\text{нагр}}$, в данном случае вся энергия вырабатываемая фотоэлектростанцией идет только на заряд АКБ. И покрытие нагрузки происходит только за счет дизельной станции.

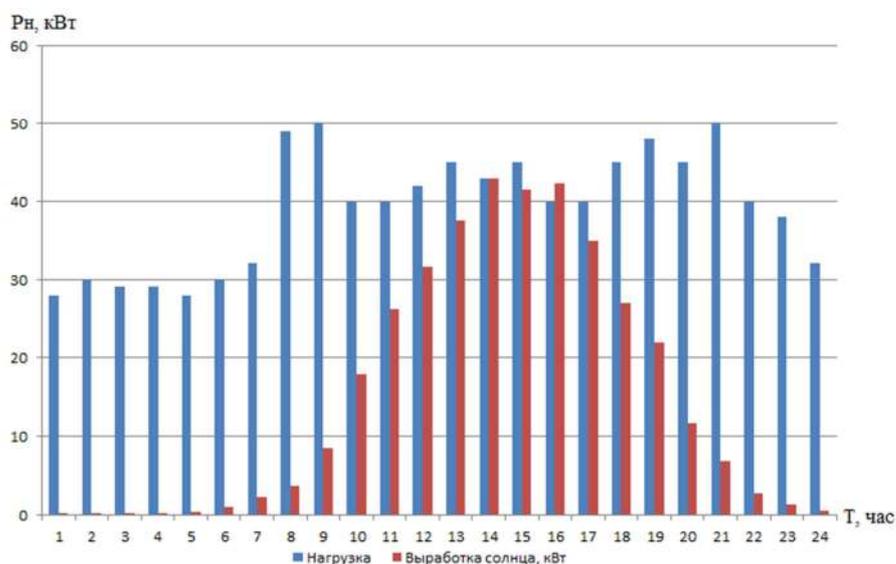


Рис.68 Почасовой график нагрузки п. Юнкюр и выработка ФЭС.

$$P_{\text{ФЭС,уст}} = 70 \text{ кВт, Май}$$

Представленное выше соотношение характерно для зимнего периода работы гибридной электростанции, когда солнечная активность не велика, а также на протяжении всего года при малых установленных мощностях ФЭС (до 2/3 от максимального значения нагрузки для поселков на широте п.Юнкюр). При этом график запасаемой энергии повторяет форму кривой инсоляции (см. рис.69).

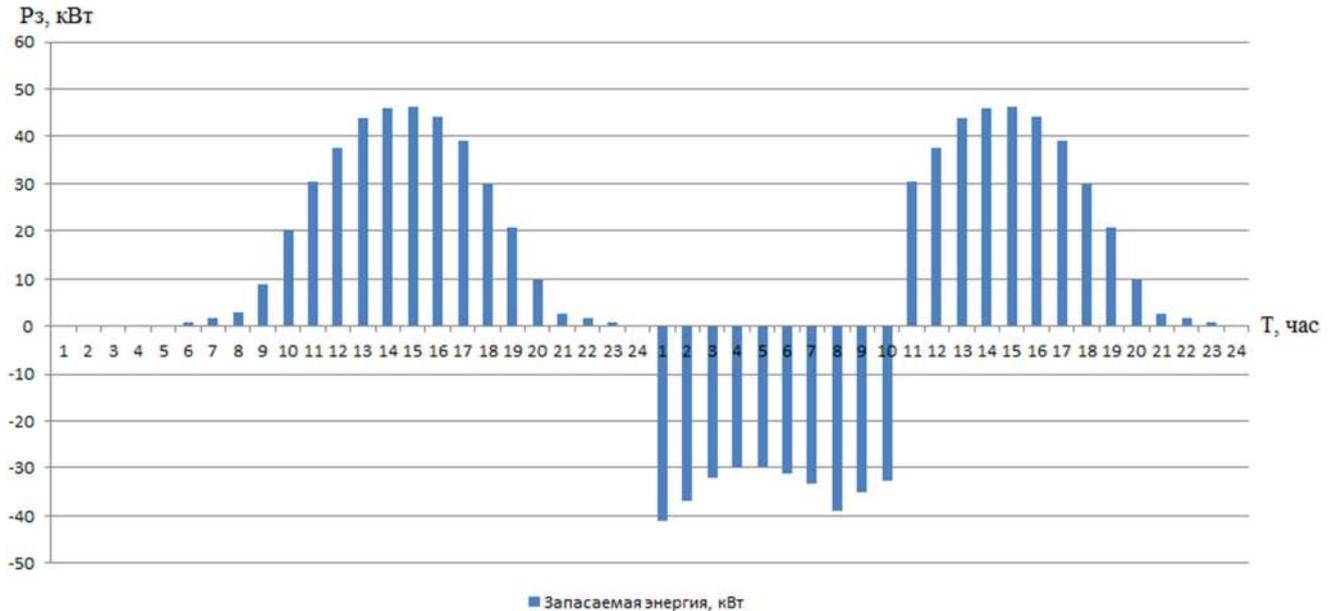


Рис.69 График запасаемой энергии п. Юнкюр. $P_{ФЭС,уст} = 70$ кВт, Май

Накопленный за световой день заряд, предусматривается использовать в ночное и утреннее время следующего дня, когда уровень нагрузки невелик. На рисунке 69 это можно увидеть в период с часу ночи до 10 утра. За счет отдельной работы ФЭС и ДЭС, в этот период времени нагрузка полностью покрывается за счет энергии АКБ, дизельная станция на это время отключается. После того как, емкость АКБ понижается до 50% от номинальной установленной емкости, включается ДЭС и работает до следующей ночи, пока АКБ не восстановит свой заряд. Ограничение заряда на уровне не ниже 50% требуется для продления срока службы аккумуляторных батарей. Описанную работу гибридной электрической станции с отключаемой ДЭС можно наблюдать на графике обеспечения нагрузки (рис. 70).

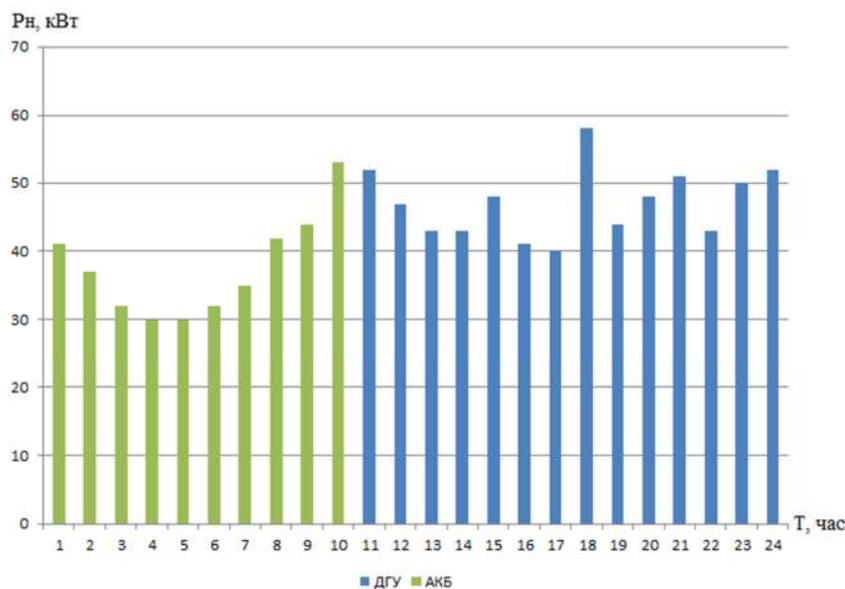


Рис.70 График обеспечения нагрузки составными частями гибридной электростанции в п. Юнкюр. $P_{\text{ФЭС.уст}} = 70$ кВт, Май

С ростом установленной мощности ФЭС (свыше $2/3 P_{\text{нагр.max}}$) от 80 до 130 кВт начинает наблюдаться ситуация, когда $P_{\text{ФЭС}} > P_{\text{нагр}}$ (см. рис. 71), тогда нагрузка покрывается за счет энергии солнца, происходит отключение ДЭС и часть энергии превышающей нужды нагрузки идет на заряд аккумуляторных батарей.

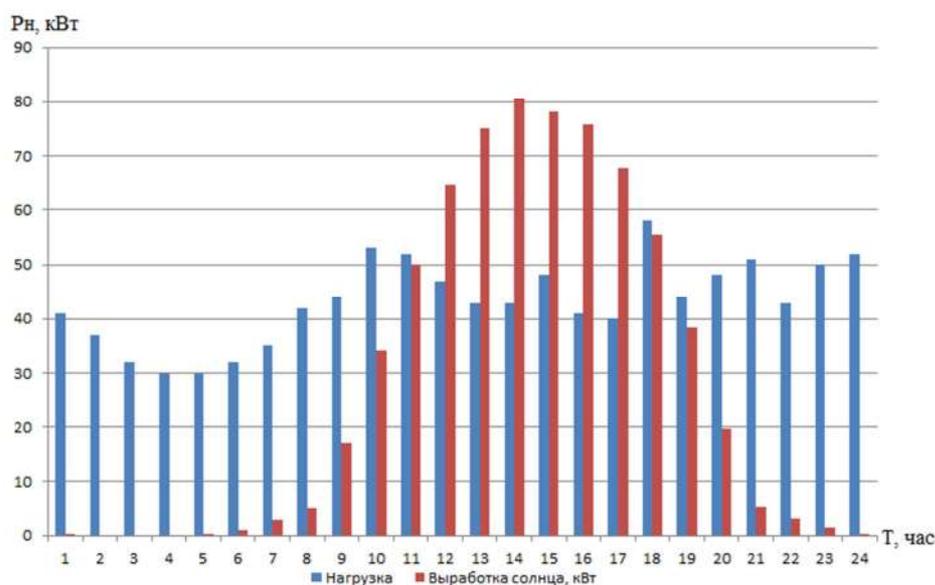


Рис.71 Почасовой график нагрузки п. Юнкюр и выработка ФЭС.

$$P_{\text{ФЭС.уст}} = 120 \text{ кВт, Май}$$

В данном случае график запасаемой энергии выглядит уже совершенно иначе (см. рис. 72).

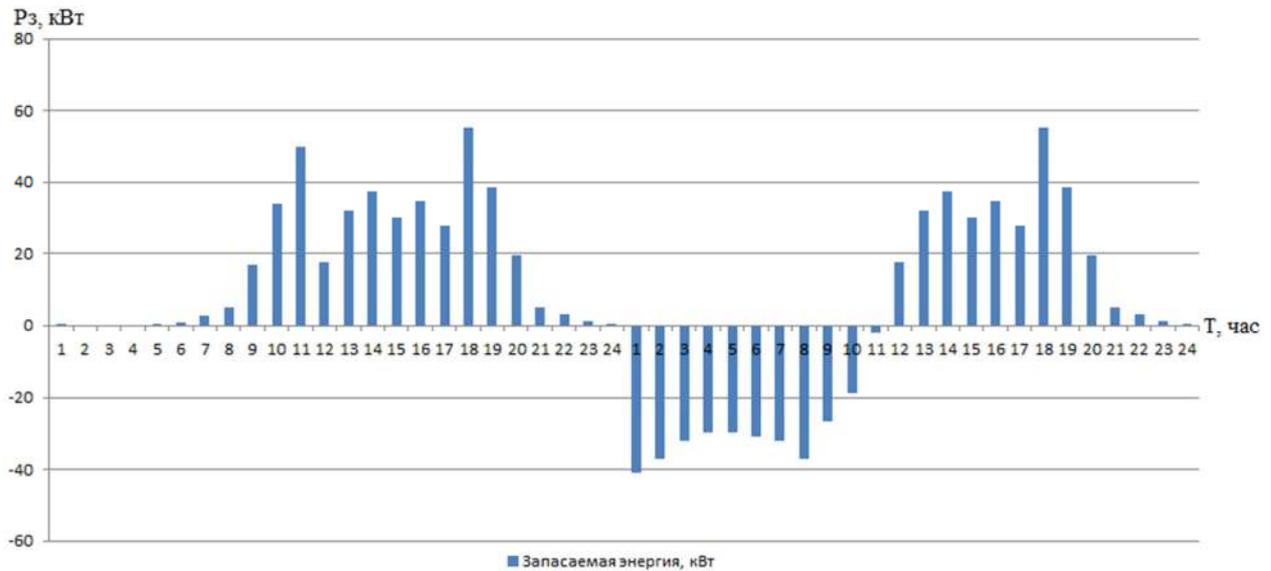


Рис. 72 График запасаемой энергии п. Юнкюр. $P_{\text{ФЭС.уст}} = 120$ кВт, Май

За счет этого в месяцы с наибольшей активностью солнца (апрель-июль) появляется возможность отключения дизельной электростанции более, чем на половину суток (см. рис. 73).

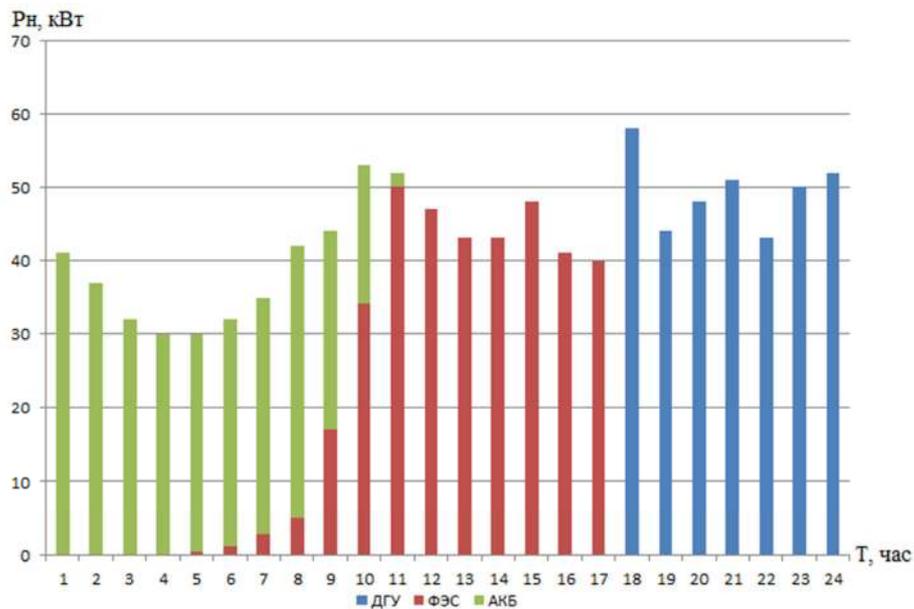


Рис.73 График обеспечения нагрузки составными частями гибридной электростанции в п. Юнкюр. $P_{\text{ФЭС.уст}} = 120$ кВт, Май

Так как в утренние часы обеспечение нагрузки происходит за счет запасенной в АКБ энергии, с переходом в дневные, когда для этого достаточно энергии ФЭС. При этом избыточной энергии солнца хватает для восстановления заряда АКБ до 100% к концу дня (см. рис. 74).

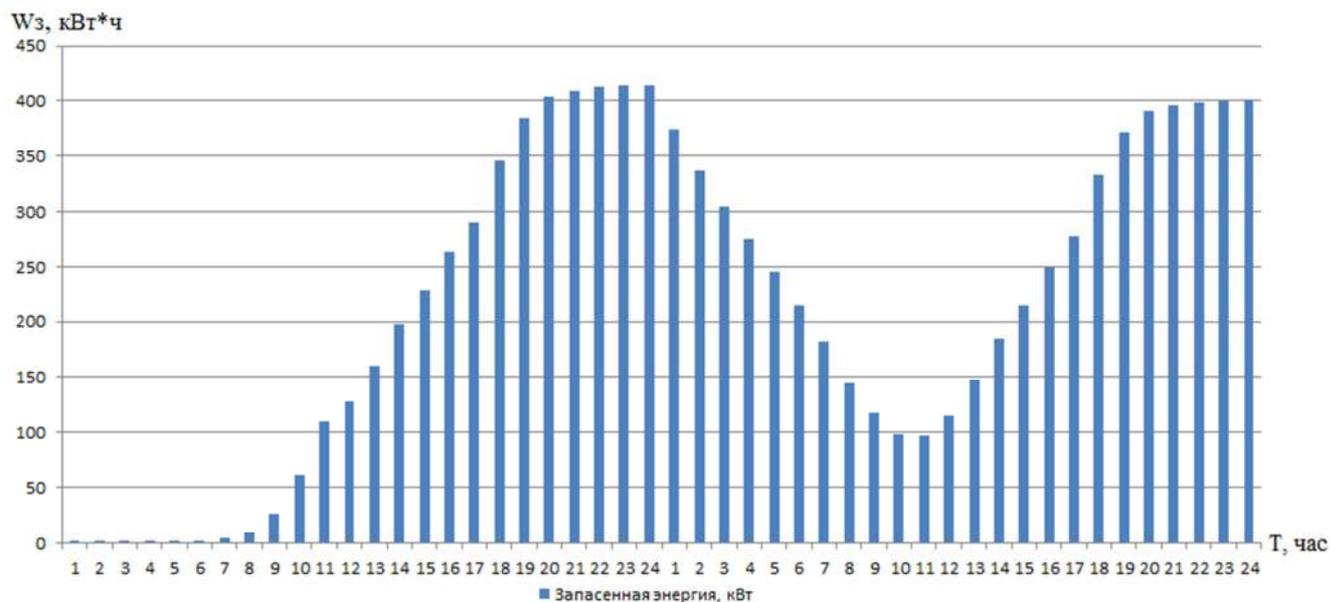


Рис.74 Запасенная в АКБ энергия. $P_{\text{ФЭС,уст}} = 120$ кВт, Май

При этом, требуемая емкость аккумуляторных батарей для полноценного использования возможностей фотоэлектрической станции меньше, чем при установленной мощности ФЭС равной 70 кВт и ниже, а количество энергии произведенной ФЭС и используемой нагрузкой выше. Это объясняется тем, что при 70 кВт всю произведенную энергию ФЭС требуется сначала аккумулировать, и только потом использовать. Данные по требуемой емкости аккумуляторных батарей при различной установленной мощности ФЭС представлены в таблице №23.

Таблица №23. Показатели аккумуляции гибридных электростанций п. Юнкюр с различной установленной мощностью ФЭС

Показатели аккумуляции							
$P_{\text{ФЭС,у}}$ ст	Требуемая емкость АКБ (для покрытия нагрузки)	Полная емкость (при макс. разряде в 40%) [SOC 60%]	Полная емкость (при макс. разряде в 50%) [SOC 50%]	Кол-во батарей АГЭМ50 0-12 (SOC 60%)	Кол-во батарей АГЭМ5 00-12 (SOC 50%)	Кол-во батарей RL2-500G (SOC 60%)	Кол-во батарей RL2-500G (SOC 50%)
кВт	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт.	шт.	шт.	шт.
70	470	1175	940	196	157	1175	940
80	530	1325	1060	221	177	1325	1060
90	490	1225	980	205	164	1225	980
100	400	1000	800	167	134	1000	800
110	380	950	760	159	127	950	760
120	420	1050	840	175	140	1050	840
130	450	1125	900	188	150	1125	900

В таблице №23 помимо требуемой емкости АКБ указана их полная емкость. При этом в двух значениях: При остаточной степени заряда (SOC) 50% и 60%. Это означает, что АКБ будет работать в цикле заряд/разряд не более 40-50% полной емкости. При оптимизации подразумевается использование свинцово-кислотных необслуживаемых батарей, разряд которых ниже данных значений существенно снижает их срок службы, что естественным образом отразится на конечной стоимости гибридной электрической станции.

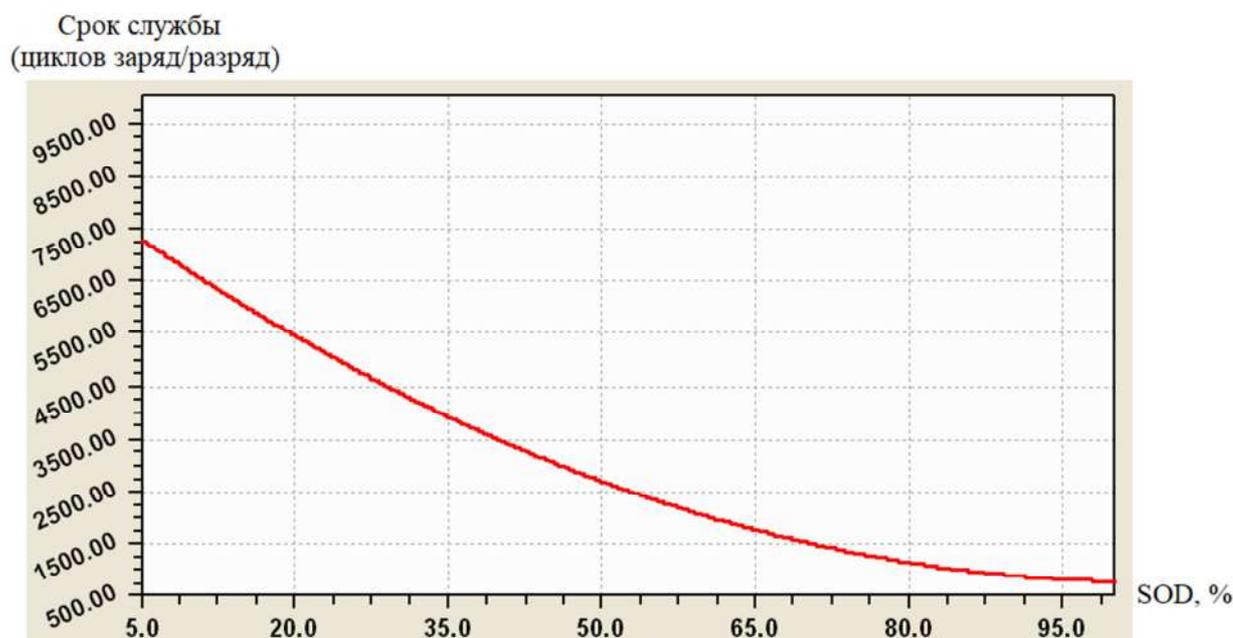
Полная оптимальная емкость аккумуляторных батарей подбирается исходя из соображений, сведения к минимуму затрат на ее обслуживание (поддержание требуемой температуры, вентиляция, размещение), то есть достаточной для размещения в каком-либо существующем здании или одном 20-30 футовом контейнере.

Показатели принятых к рассмотрению аккумуляторных батарей приведены в таблице №24.

Таблица №24. Показатели аккумуляторных батарей

Параметры аккумуляторов						
Наименование батареи	Технология	Емкость Сном, А*ч	Напряжение, В	Энергия батареи, кВт*ч	Габариты, ДхШхВ	Масса, кг
АГЭМ500-12	AGM	500	12	6	957х516х218	234
RL2-500G	GEL	500	2	1	242х172х329	30,5

Технологии свинцово-кислотных аккумуляторных батарей AGM и GEL являются наиболее перспективными на сегодняшний день. Они характеризуются удобством обслуживания, отсутствием выделения взрывоопасных газов в процессе работы, а также значительным количеством циклов заряд/разряд при довольно значительном разряде. Так по заявлению производителя батарея АГЭМ500-12 способна проработать в течение 3000 циклов при разряде до 40% от номинальной емкости, и до 2600 при разряде до 50% (см. рис.75). Что, с учетом сезонного использования в местности п. Юнкюр (за счет явления 1,5 месячной полярной ночи и низкой солнечной активности в осенние месяцы), составит около 10 лет.

Рис.75 Срок службы батарей АГЭМ при $T = 25^{\circ}\text{C}$

Проанализировав данные таблицы №23 можно сделать вывод, что по техническим показателям наилучшей установленной мощностью ФЭС для п. Юнкюр является 110 кВт. Так как при данной мощности наблюдается минимальная требуемая емкость АКБ для обеспечения нужд нагрузки, и соответственно наименьшее количество аккумуляторных батарей. При этом данное количество АКБ помещается в 30 футовом контейнере.

Следует отметить, что оптимальная требуемая емкость может меняться в зависимости от временного интервала, выбранного под разряд АКБ. В связи с чем, должен быть создан приоритет времени разряда. Так для того, чтобы разряжать АКБ утром, требуется аккумулялирование энергии за весь предыдущий день, в случае же разряда АКБ вечером, требуемая емкость может быть снижена.

Различная необходимая емкость аккумуляторных батарей при разных установленных мощностях ФЭС существенно влияет на стоимостные показатели гибридных электрических станций, так как АКБ являются самыми дорогими компонентами в системе. При этом, следует учитывать факт, что полная необходимая емкость обходится в 2,5 раза дороже, чем требуемая для обеспечения нагрузки.

В таблице №25 приведены средние показатели цены компонентов гибридных электрических станций на период 2017-2018 годов [26].

Таблица №25. Средняя стоимость компонентов системы

Средняя стоимость элементов системы			
Стоимость ФЭП, руб/кВт	Стоимость инвертора, руб/кВт	Стоимость АКБ, руб/кВт*ч	Стоимость дизельного генератора руб/кВт
55000	25000	12500	8400

Следует понимать, что значения, представленные в таблице №25, отражают усредненные цены. Конкретная цена на компоненты фотоэлектрической станции сильно зависит от выбранного типа, фирмы изготовителя, времени приобретения

и т.д. Так цена за инвертор может варьироваться от 8 тысяч рублей до 68 за кВт установленной мощности. Цена на дизельные генераторы также очень сильно зависит от исполнения (открытая, в кожухе и т.д.), комплектации, автоматизации. При этом любые из этих компонентов в точке конечного назначения также будут иметь совершенно другую цену в виду значительной удаленности и сложной логистики автономных объектов аналогичных п. Юнкюр.

В таблице №26 приведена примерная стоимость компонентов, общая стоимость гибридной электрической станций на основании параметров таблицы №25 (Без учета логистики, проектирования, монтажа и т.д.), а также расчетная себестоимость производимой гибридной электрической станцией энергии (стоимость топлива принята 38115 рублей за тонну).

Таблица №26. Общая стоимость гибридной электростанции и ее компонентов

Стоимостные показатели							
$P_{\text{ФЭС}}$	Стоимость ФЭП	Стоимость инверторов	Стоимость АКБ (Какб)	Стоимость прочих компонентов (5% от итога)	Стоимость ДГУ	Общая стоимость гибридной установки	Себестоимость производимой энергии
кВт	руб	руб	руб	руб	руб	руб	руб/кВт*ч
70	3 850 000	1 750 000	11 750 000	867 500	3 528 000	21 745 500	11,48
80	4 400 000	2 000 000	13 250 000	982 500	3 528 000	24 160 500	11,68
90	4 950 000	2 250 000	12 250 000	972 500	3 528 000	23 950 500	11,25
100	5 500 000	2 500 000	10 000 000	900 000	3 528 000	22 428 000	10,69
110	6 050 000	2 750 000	9 500 000	915 000	3 528 000	22 743 000	10,37
120	6 600 000	3 000 000	10 500 000	1 005 000	3 528 000	24 633 000	10,36
130	7 150 000	3 250 000	11 250 000	1 082 500	3 528 000	26 260 500	10,30

На основании данных таблицы №26 построена графическая зависимость капитальных вложений (см. рис.76) в компоненты гибридной электрической станции с отключаемой ДЭС при различных установленных мощностях ФЭС, а также графическая зависимость отражающая изменение себестоимости производимой энергии (см. рис. 77).

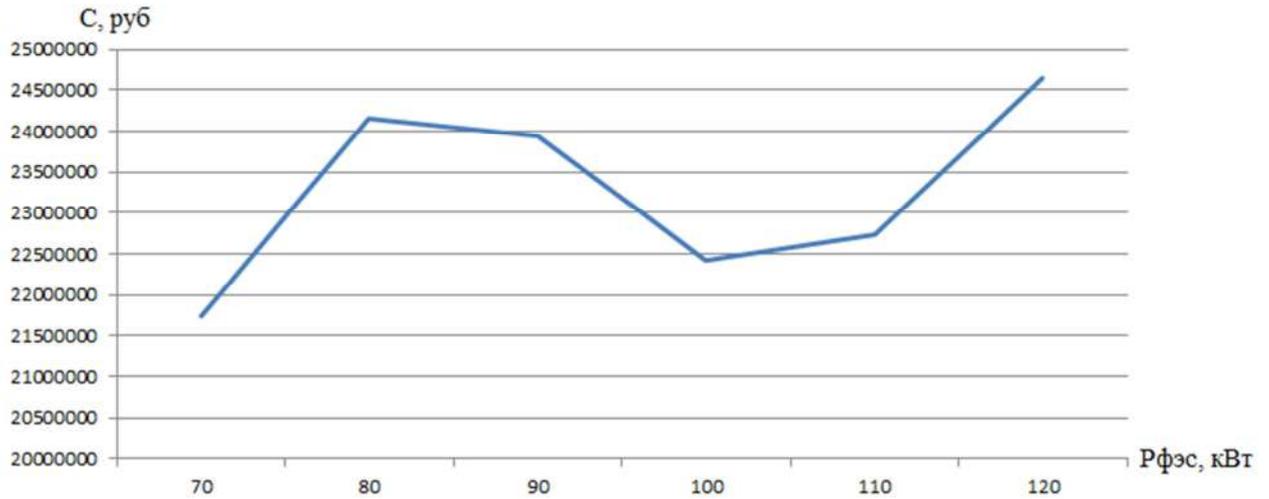


Рис. 76 График изменения стоимости гибридной электрической станции с отключаемой ДЭС при различных установленных мощностях ФЭС

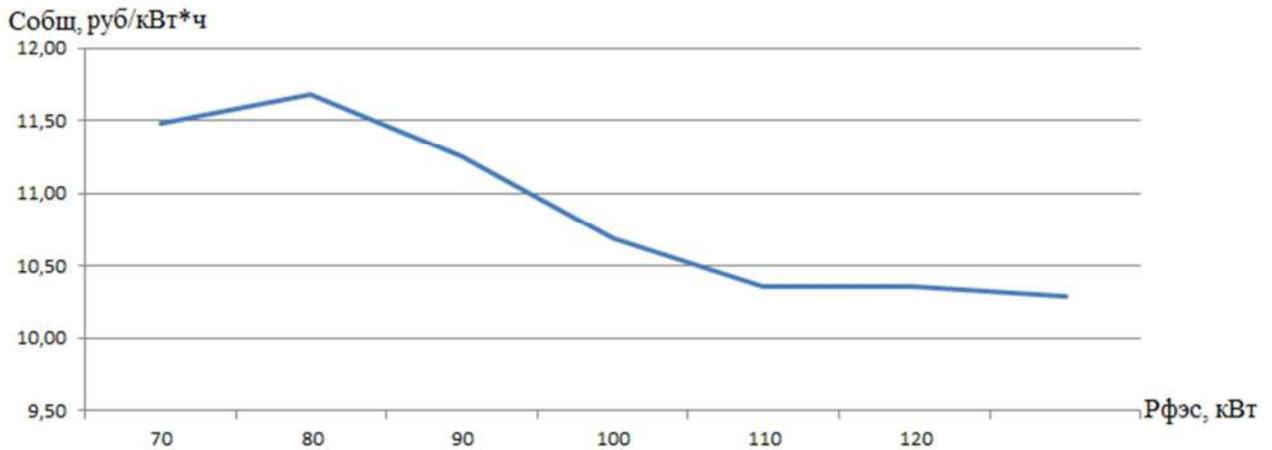


Рис. 77 График изменения себестоимости энергии производимой гибридной электрической станцией при различных установленных мощностях ФЭС

Анализируя графические зависимости, представленные на рисунках 76, 77, а также данные представленные в таблице №26 можно заметить, что общие капиталовложения на компоненты гибридной электрической станции имеют тенденцию к росту при установленной мощности ФЭС менее 80 кВт. Что объясняется значительным количеством времени, когда значения мощности ФЭС меньше мощности нагрузки, и вся вырабатываемая фотоэлектрической станцией энергия запасается в АКБ, с последующим ее разрядом в обозначенный интервал

времени. Это сопровождается значительной требуемой емкостью АКБ, за счет чего происходит удорожание системы. При этом установленная мощность ФЭС равная 80 кВт характеризуется наибольшим значением себестоимости производимой энергии. С ростом установленной мощности ФЭС от 90 до 110 кВт наблюдается снижение общих капитальных затрат на комплектующие гибридной электрической станции. В связи с тем, что чаще проявляется ситуация когда $P_{\text{ФЭС}} > P_{\text{нагр}}$ и избытки энергии превышающие нужды нагрузки невелики. Нет нужды запасать всю энергию вырабатываемую ФЭС. В таком случае требуемая емкость АКБ снижается. За счет этого происходит снижение себестоимости электроэнергии. Нижнее значение, которой можно обозначить на уровне 110 кВт установленной мощности ФЭС. С продолжением роста установленной мощности ФЭС капиталовложения снова начинают расти. Так как избытки энергии, превышающие нужды нагрузки становятся значительными, и для их аккумуляции требуется значительные емкости АКБ. При этом наблюдается ситуация, когда значения себестоимости практически входят в «насыщение» и слабо изменяются при росте мощности.

Исходя из полученных результатов, оптимальная установленная мощность ФЭС гибридной электрической станции в поселке Юнкюр, построенной по схеме раздельной работы равна 110 кВт. При этом значении мощности требуется наименьшее количество аккумуляторных батарей, что обеспечивает лучшие стоимостные показатели станции.

В случае применения в п. Юнкюр гибридной электрической станции построенной на схемном решении с непрерывной дизельной генерацией при соблюдении условий выполнения максимального КИУМ оптимальной установленной мощностью ФЭС будет значение в 30 кВт.

Сравнение значений капитальных затрат и себестоимости энергии оптимальных мощностей при разных схемных решениях гибридных электрических станций отражено на рисунках 78, 79.

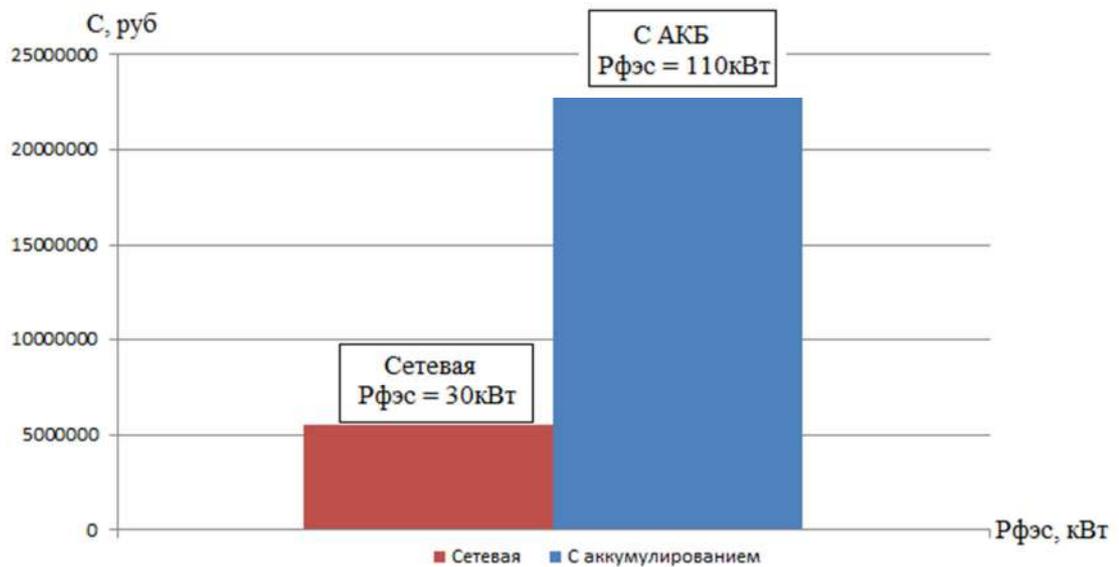


Рис. 78 Сравнение капитальных затрат на комплектующие гибридных станций при различных схемных решениях (оптимальные установленные мощности)

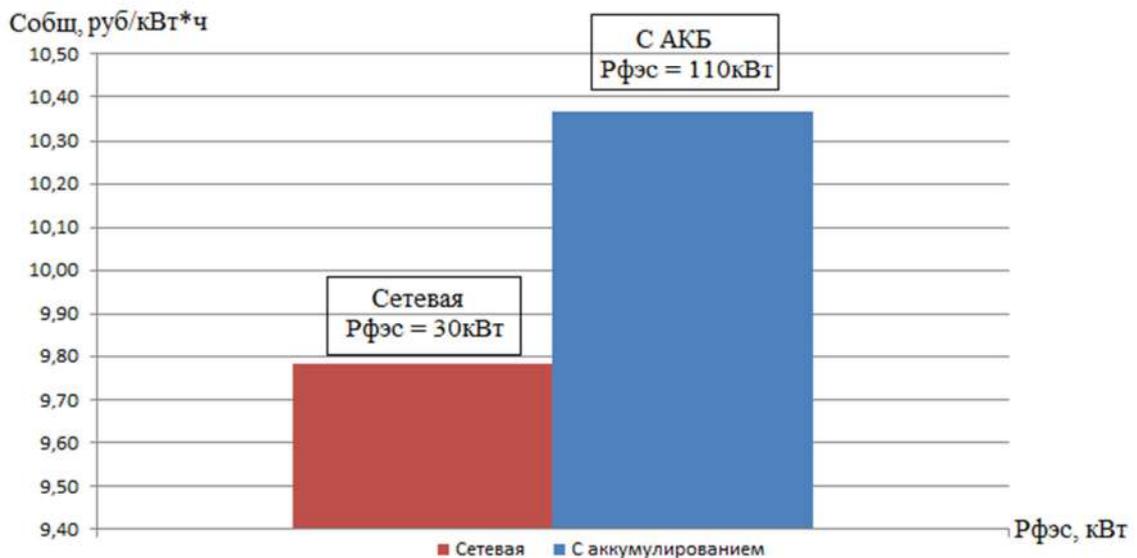


Рис. 79 Сравнение себестоимости производства энергии гибридных станций при различных схемных решениях (оптимальные установленные мощности)

Проанализировав информацию, представленную на рисунках 78, 79 можно сказать - различные схемные решения построения гибридных электрических станций имеют значительно отличающиеся значения оптимальной мощности ФЭС при идентичном значении установленной мощности ДЭС, определяемой максимальным значением мощности нагрузки, которое, как правило, наблюдается зимой, когда ФЭС вне зависимости от схемы практически не функционирует. Установленная мощность ФЭС ограничена оптимальными значениями целевых функций.

Схемное решение с непрерывной дизельной генерацией, согласно рисунку 78, требует значительно меньшие капитальные затраты на комплектующие, ввиду отсутствия АКБ, более дешевых инверторов и меньшей установленной мощности ФЭС. Как показывает рисунок 79, схема с непрерывной дизельной генерацией обладает более низкой себестоимостью производства электрической энергии. Что приводит к выводу о том, что при выборе схемного решения требуется руководствоваться не только экономическими и техническими показателями. Вполне возможно, что применение гибридной электрической станции по схеме с АКБ оправдано, когда важны социальные и экологические факторы, ввиду меньшей продолжительности работы ДЭС в году и, как следствие, большей экономией топлива. Это позволяет уменьшить выделение вредных веществ от сжигания топлива в месте размещения гибридной электростанции.

4.4 Краткие выводы

1. Проведена оптимизация технико-экономических характеристик ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией на основе частного примера в п. Батагай. По итогам анализа определено, что мегаваттные станции, в совокупности с удаленным месторасположением объекта электроснабжения по экономическим соображениям требуют применения ФДЭС с параллельной работой составных частей, без возможности аккумуляирования энергии.
2. Определено, что установленная мощность ФЭС гибридной системы электроснабжения с непрерывной дизельной генерацией значительной мощности (мегаваттные) на широтах аналогичных п. Батагай должна составлять около 20% от максимального значения нагрузки.
3. Проведено исследование влияния широты местности на оптимальный состав оборудования гибридных систем электроснабжения. При смещении гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией подобной п. Батагай в южные территории Якутии установленная мощность ФЭС может быть увеличена до 30% от максимального значения нагрузки за счет большей интенсивности солнечного излучения в переходные периоды, когда величина нагрузки значительна.
4. Поиск оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС с отключаемой дизельной составляющей на частном примере в п. Юнкюр показал, что данное схемное решение целесообразно при уровнях нагрузки примерно до 100÷150 кВт. Рекомендуемая установленная мощность ФЭС по экономическим соображениям должна равняться максимальному значению нагрузки.
5. Проведено сравнение оптимальных составов оборудования гибридных систем электроснабжения с непрерывной дизельной генерацией и отключаемой ДЭС. Сооружение ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией требует существенно меньше затрат по сравнению со схемой с возможностью отключения ДЭС.

Заключение

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Проанализированы факторы, определяющие технико-экономическую эффективность установки гибридных ФДЭС. В частности, перспективность их строительства на северных территориях. Определено что территория Якутия обладает значительным уровнем инсоляции на всей ее территории. При этом в северных районах (начиная с 66° с.ш.) летом наблюдается полярный день, что увеличивает продуктивность ФДЭС в летнее время по сравнению с южными. Стоимость топлива в Якутии имеет самые большие значения по сравнению с другими территориями России, особенно если учитывать децентрализованные области. Все это говорит о целесообразности применения гибридных ФДЭС в Якутии.
2. Проанализированы распространённые программные комплексы оптимизации гибридных систем. Программный комплекс PVsyst определен, как наилучший инструмент позволяющий определять показатели ФЭС наиболее детально. Для оценки адекватности итоговых данных фотоэлектрических систем проведена верификация программного комплекса PVsyst, на основе сравнения основных энергетических показателей реального объекта с расчетными. Выявлена возможность применения комплекса при расчетах, так как погрешность не превышает 10% в годовом разрезе.
3. PVsyst не решает в полной мере вопроса оптимизации гибридных ФДЭС, поскольку предназначен для проектирования только фотоэлектрических систем. Создан инструмент оптимизации установленных мощностей составных частей гибридной электростанции на основе математических моделей элементов ФДЭС, и программного продукта MS Excel сопряженного с данными получаемыми из специализированного ПО PVsyst.

4. Разработаны алгоритмы работы математической модели оптимизации, с учетом требований к продлению срока службы основного генерирующего оборудования, а также устойчивости фото-дизельной системы, отражающие последовательность действий требуемых для определения оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС различных схемных решений.
5. Проведена оптимизация технико-экономических характеристик ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией на основе частного примера в п. Батагай. По итогам анализа определено, что мегаваттные станции, в совокупности с удаленным месторасположением объекта электроснабжения по экономическим соображениям требуют применения ФДЭС с параллельной работой составных частей, без возможности аккумулирования энергии. При этом установленная мощность ФЭС мегаваттных станций на широтах аналогичных п. Батагай должна составлять около 20% от максимального значения нагрузки. При смещении подобной гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией в южные территории Якутии установленная мощность ФЭС может быть увеличена до 30% от максимального значения нагрузки за счет большей интенсивности солнечного излучения в переходные периоды, когда величина нагрузки значительна.
6. Поиск оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС с отключаемой дизельной составляющей показал, что данное схемное решение целесообразно при уровнях нагрузки примерно до 100÷150 кВт. Рекомендуемая установленная мощность ФЭС при данном схемном решении в северных широтах по экономическим соображениям должна равняться максимальному значению нагрузки.

Список литературы

1. Алферов Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики [Электронный ресурс] / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. — 2004г. — выпуск №8. — том 38. — Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/ftp/2004/08/p937-948.pdf>.
2. Башмаков И.А., Оценка расходов на энергоснабжение в ргоинах Крайнего Севера [Электронный ресурс] / И.А. Башмаков, М.Г. Дзедзичек // Энергосбережение научный журнал. — 2017. — выпуск №4. — Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6664
3. ГОСТ 13822-82 Электроагрегаты и передвижные электростанции, дизельные. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 30 с.
4. Герметизированные стационарные аккумуляторные батареи «Хэйз» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.haze.ru/>
5. Дмитриенко В. Н. Особенности гибридных децентрализованных солнечно дизельных комплексов мегаваттного класса / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // XX Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». — Томск: НИ ТПУ, 2014 — Т. 1. — С. 69-73.
6. Дмитриенко В. Н. Перспективы развития фотоэнергетики в России / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // XXI Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». — Томск: НИ ТПУ, 2015 — Т. 1. — С. 64-67.
7. Дмитриенко В.Н. Солнечно-дизельные системы электроснабжения северных поселков / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // Современные проблемы науки и образования. — 2014г. — №3.

8. Дмитриенко В.Н. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328, № 5. — С. 49-55.
9. Дмитриенко В.Н. Строительство солнечной электростанции в п. Батагай Верхоянского улуса республики Саха (Якутия). Основные технические решения. / М.В. Алексеев, В.Н. Дмитриенко, // Пояснительная записка 497406-ПЗ.ОТР. — Томск. — 2014г.
10. Дмитриенко В.Н. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // Фундаментальные исследования – 2015. - №4 – С.61 – 66.
11. Европейская ассоциация фотогальванической промышленности EPIA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.epia.org>.
12. Иванова И.Ю. Малая энергетика Севера: проблемы и пути развития / И.Ю. Иванова. — Новосибирск: Наука, 2002. — 188 с.
13. Каплун А.А. ВИЭ - это необходимость, продиктованная временем / А.А. Каплун // Огни на Востоке. — 2015. — №4. — С.8-13.
14. Каплун А.А. Развитие ВИЭ в ДФО [Электронный ресурс] / А.А. Каплун // Презентация на V международной конференции «Развитие возобновляемой энергетики на Дальнем востоке России». — Якутск, 2015. — Режим доступа: <https://reencon.hse.ru/data/2018/03/23/1164017535/%D0%9A%D0%B0%D0%BF%D0%BB%D1%83%D0%BD%20%D0%90.%D0%90.%20%D0%A0%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D0%B2%20%D0%92%D0%98%D0%AD%20%D0%B2%20%D0%94%D0%A4%D0%9E.pdf>

15. Карамов Д.Н. Актуальность применения возобновляемых источников энергии в децентрализованных населенных пунктах России на примере Ленского района Республики Саха (Якутия) / Д.Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. — 2013. — №11 (82). — С. 279 -283.
16. Карамов Д.Н. Оптимизация состава и оборудования автономных энергокомплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.01 / Карамов Дмитрий Николаевич. – Иркутск, 2016. – 152 с.
17. Карамов Д.Н. Влияние объектов агропромышленного комплекса на результат комплексной оптимизации децентрализованных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Вестник КрасГАУ. — 2015. — том 8. — С. 107-112.
18. Карамов Д.Н. Комплексная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумулирующие устройства на примере п. «Батамай» Кобяйского района Якутии / Д.Н. Карамов // Сборник трудов всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке: Инновационное развитие и управление». — 2015. — С.1-9.
19. Корякин А.К. Опыт и перспективы внедрения альтернативных источников энергии на территории Республики Саха (Якутия) [Электронный ресурс] / А.К. Корякин // Доклад на форуме «Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего востока России». — Якутск, 2013г. — Режим доступа: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/8ef/Alexander-Koryakin_Sakhaenergo.pdf
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Части 1-6. Выпуск 24. Якутская АССР.: — Ленинград Гидрометеоздат, 1989 г. — 198 с.

21. Лиотех. Литий-ионные технологии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.liotech.ru/newsection7159>
22. Лукутин Б.В., Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. — М.: Энергоатомиздат, 2008. — 231 с.
23. Лукутин Б.В. Ветроэлектростанции в автономной энергетике Якутии. / В.Р. Киушкина, Б.В. Лукутин. — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 202 с.
24. Лукутин Б.В. Энергоэффективность фотоэлектростанций в автономных системах электроснабжения / Б.В. Лукутин, Шандарова Е.Б. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008 — 140 с.
25. Манусов В. З. Оценка доступности энергетических ресурсов за счет солнечной радиации в республике Таджикистан / З.С. Ганиев, В. З. Манусов, Ш.М. Султонов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2018. — № 1. — С. 174–177.
26. Мой солнечный дом. Возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/basics/basic-batteries/akkumulyatory-osnovnyye-parametry.htm>
27. Независимое агенство в составе федеральной статистической системы США ЕИА [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=35432>
28. Новости Яндекс. Динамика розничных цен на дизельное топливо [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.news.yandex.ru/quotes/213/20010.html>
29. Попель О.С. Проблемы и перспективы развития возобновляемой энергетике / О.С. Попель // Доклад на международном форуме REENFOR-2014. — Москва, 2014г.

30. Постановление Правительства Российской Федерации №449: офиц. текст. — М., 2013. — 38 с.
31. Программный комплекс оптимизации гибридных систем HOMER [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.homerenergy.com/>
32. Производитель оборудования для фотоэлектростанций SMA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sma.de>
33. Производитель фотоэлектрических панелей Yinglisolar [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.yinglisolar.com/en/products/monocrystalline/ylm-60-cell-series-1/>
34. Производитель дизельгенераторных установок RID. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.rid-international.de/ru>
35. Рекомендации международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности» [Электронный ресурс]. — М. REENFOR-2014, 2014. — Режим доступа: <http://www.reenfor.org/ru/REENFOR-2014%20Outcome/>
36. РАО Энергетические системы востока [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rao-esv.ru>
37. Саврасов Ф.В. Расчет эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями на примере Томской области / Б.В. Лукутин, Ф.В. Саврасов // Известия ТПУ. — 2013. — Т322. — №6. — С.17-21
38. Стребков Д.С. Сельскохозяйственные энергетические системы и экология. / Д.С. Стребков // Альтернативные источники энергии: эффективность и управление. — 1990. — N1. — С.39-40
39. Специализированный программный продукт для проектирования фотоэлектрических станций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.pvsyst.com>

40. Сурков М.А. Мировые тенденции в области построения автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] / В.Р. Киушкина, Б.В. Лукутин, Е.Ж. Сарсикеев, М.А. Сурков // Наукоедение. — 2012. — №4. — Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/42tvn412.pdf>.
41. Тихонов А.В. Технологии возобновляемой (солнечной) энергетики: Мультимедийный учебно-методический комплекс по физике для повышения квалификации педагогического состава московских учреждений общего образования [Электронный ресурс] / А.В. Тихонов, И.И. Тюхов, Л.Ю. Юферев, М.А. Шахраманьян. — Москва, 2009г. — Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/407/66407/files/solar.pdf>
42. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gks.ru/bgd/free/b04_03/IssWWW.exe/Stg/d03/103.htm
43. Фотоэнергетика в мире [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.powerclouds.com>.
44. Шуткин О. Опыт участия в конкурсных отборах проектов возобновляемой энергетики. / О. Шуткин // Доклад на международном форуме REENFOR-2014. — Москва, 2014г.
45. Allegrini Jonas A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems / Jonas Allegrini, Georgios Mavromatidis, Viktor Dorer, Ralph Evins, Kristina Orehounig, Florian Ruesch // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. — V. 52. — P. 1391-1404.
46. Bhumkittipich K. Optimal placement and sizing of distributed generation for power loss reduction using particle swarm optimization / K. Bhumkittipich, W. Phuangpornpitak // Energy Procedia. — 2013. — V. 34. — P. 307-317.

47. Chedid R. Unit sizing and control of hybrid wind–solar power systems / R. Chedid, S. Rahman // *IEEE Transactions Energy Conversion*. — 1997. — V. 12. — P. 79–85
48. Celik A.N. Optimization and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic-wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. / A.N. Celik // *Energy Conversion and Management*. — 2002.
49. Emmanuel Autonomous Fossil Fuel and Renewable Energy – based Power Systems / I. Emmanuel, Lymberopoulos, N. Zoulias // Springer London. — 2008.
50. Mesquita F.G.G. Design Optomization of Stand-Alone Hybrid Energy Systems / F.G.G. Mesquita // 2010
51. EXIDE стимулирование мира вперед [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.exide.com/>
52. Gupta A. Design of an optimal hybrid energy system model for remote rural area power generation / A. Gupta, R.P. Saini, M.P. Sharma. In *Electrical Engineering*. — 2007.
53. Hina Fathima A. Optimization in microgrids with hybrid energy systems / A. Hina Fathima, K. Palanisamy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2015. — V. 45. — P. 431-446.
54. Holmeyer O. Social Cost of Energy Consumption / O. Holmeyer. — Springer-Verlag: New York, 1988.
55. Huneke F. Optimization of hybrid off-grid energy systems by linear programming / F. Huneke, J. Henkel, JAB González, G. Erdmann // *Energy Sustainability and Society*. — 2012. — V. 2. — P. 1-19.
56. HOPPECKE сила в инновациях [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.hoppecke.com/en/products/powerline/>

57. Kapil Narula The role of Decentralized Distributed Generation in achieving universal rural electrification in South Asia by 2030 / Narula Kapil, Nagai Yu, Pachauri Shonali // Energy Policy. — 2012. — P. 345-357.
58. Katsigiannis Y.A. Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables / P.S. Georgilakis, Y.A. Katsigiannis, E.S. Karapidakis // Renewable Power Generation. — 2010. — V. 4. — P. 404-419.
59. Lim P.Y. Control of Photovoltaic-Variable Speed Diesel Generator battery-less hybrid energy system / P.Y. Lim, C.V. Nayar // Energy Conference and Exhibition, Energycon. — Manama, Bahrain, 2010.
60. Lim P.Y. Power Management Strategies for Off-Grid Hybrid Power Systems / P.Y. Lim // Curtin University, School of Electrical and Computer Engineering. — 2011.
61. LEOCH мировые технологии [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.leoch.com/en/news.aspx?tid=4>
62. Minna Ranjeva Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas / Anil K. Kulkarni, Ranjeva Minna // Energy Procedia. — 2012. — V. 20. — P. 258 – 270.
63. Morea F. Life cycle cost evaluation of off-grid pv-wind hybrid power systems / F. Morea, D. Cucchi, G. Viciguerra, C. Valencia // In Telecommunications Energy Conference. — 2007.
64. N.N. Guidelines for Economic analysis of projects [Электронный ресурс]. — ADB. — Режим доступа: <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/32256/economic-analysis-projects.pdf>
65. Rajesh Saiju M.Sc. Hybrid Power System Modelling-Simulation and Energy Management Unit Development: a dissertation in candidacy for the degree of doctor in engineering (Dr. Eng.) / Saiju M.Sc Rajesh. — Nepal, 2008. — P.149

66. Rodolfo Dufo-López. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage / Ismael Aso, José L. Bernal-Agustín, José A. Domínguez-Navarro, Juan Lujano , Ignacio J. Ramírez-Rosado, Dufo-López Rodolfo, José M. Yusta-Loyo // *Applied Energy*. — 2011. — V. 88. — P. 4033–4041.
67. Subho Upadnyay Development of hybrid energy system with cycle charging strategy using particle swarm optimization for a remote area in India / Upadnyay Subho, M.P. Sharma. // *Renewable Energy*. — 2015. — V. 77. — P. 586-598.
68. Thomachan A. Lead acid batteries in solar refrigeration systems / Kattakayam, K. Srinivasan, A. Thomachan // *Renewable Energy*. — 2004. — V. 97. — P. 1243-1250.
69. Tsuanyo D. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications / Y. Azoumah, D. Didier, P. Neveu, D. Tsuanyo // *Energy*. — 2015. — P. 152-163
70. Tremblay O. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application / L. Dessaint, O. Tremblay // *World Electric Vehicle Journal*. — 2009. — V 3. — P. 1–10.
71. Wichert B. PV-Diesel Hybrid Energy Systems for Remote Area power Generation – A Review of Current Practice and Future Developments / B. Wichert // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 1997. — vol.1 n.3. — P. 209-228.
72. Zacharias P. Use of Electronic-Based Power Conversion for Distributed and Renewable Energy Sources / P. Zacharias. — 685 p.

Приложение 1

**АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
И АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. директора инженерной школы
энергетики федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования



«Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет»

 Матвеев А.С.

АКТ

Об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Дмитриенко Виталия Николаевича

Комиссия в составе:

Председатель: Дементьев Ю.Н., к.т.н. профессор
Руководитель отделения

Члены комиссии: Обухов С.Г., д.т.н., профессор
Сурков М.А., к.т.н., доцент

Составили настоящий акт о том, что результаты, диссертационной работы «Исследование и оптимизация структуры и состава фото-дизельных электростанций северных поселков» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в учебном процессе на отделении электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Использование в учебном процессе предложенных Дмитриенко В.Н. инструментов оптимизации и алгоритмов расчета установленных мощностей составных частей гибридных фото-дизельных электростанций позволит повысить качество подготовки специалистов по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

Председатель:



Дементьев Ю.Н.

Члены комиссии:



Обухов С.Г.



Сурков М.А.



Филиал Акционерного общества
«Сибирский энергетический научно-технический центр»-
институт «Томсктеплоэлектропроект»

Филиал АО «Сибирский ЭНТЦ» - институт «ТомскТЭП»

634041, Томск, пр. Кирова, д. 36
Тел.: (3822) 431-431, 43-17-18. Факс: (3822) 43-13-55.
E-mail: post@tomsktep.tom.ru

От 10.09.2015

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы, нижеподписавшиеся:

Председатель комиссии: Кожемякин П.Г., директор филиала

Члены комиссии: Хохлов И.В., главный инженер

Алексеев М.В., главный инженер проектов

Составили настоящий акт о том, что результаты, полученные в ходе выполнения научно-исследовательской работы Дмитриенко Виталия Николаевича, использованы в АО Сибирский ЭНТЦ Томский филиал институт «Томсктеплоэлектропроект».

Использование результатов НИР «Повышение эффективности работы децентрализованных солнечно-дизельных систем электроснабжения отдаленных поселков» заключается в следующем:

- Использование программного продукта PVsyst при проектировании фотоэлектрических станций. Верификация программного комплекса на основе реальных данных функционирующей гибридной системы (солнечно-дизельной).
- Разработка алгоритма моделирования энергетического баланса гибридной системы для систем работающих параллельно с сетью, организованной дизельной электростанцией.
- Определение оптимального соотношения мощностей основного генерирующего оборудования гибридного комплекса при работе с зависимыми инверторами.

Результатом внедрения является реализованная стадия основных технических решений по инвестиционному проекту «Строительство солнечной электростанции в п.Багай Верхоянского улуса республики Саха (Якутия)» - 497406 – ПЗ.ОТР.

Председатель комиссии: Кожемякин П.Г.

Члены комиссии: Алексеев М.В.
Хохлов И.В.

