

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К. И. Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

УДК 620.92

На правах рукописи

Кадыров Руслан Рафикович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

Повышение эффективности систем электроснабжения
за счет использования нетрадиционных источников
энергии

Направление подготовки

7M07113 – Электротехника и энергетика

Научный руководитель
PhD, асс. профессор

Е. А. Сарсенбаев

« 20 » 06 2025 г.

Рецензент
PhD, ассистент профессор

Ж. Ж. Калиев

« 20 » 06 2025 г.

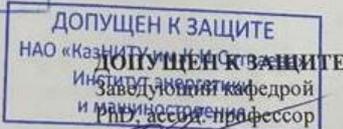
Нормоконтроль
Старший преподаватель

А. О. Бердибеков

« 19 » 06 2025 г.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ



Е. А. Сарсенбаев

« 20 » 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К. И. Сатпаева»
Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева
Кафедра «Энергетика»
7М07113 – Электротехника и энергетика

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой «Энергетика»
PhD, ассистент-профессор

Е. А. Сарсенбаев
« 20 » 06 2025 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту: Кадырову Руслану Рафиковичу

Тема: «Повышение эффективности систем электроснабжения за счет использования нетрадиционных источников энергии»

Утверждена приказом ректора №548-П «04».12. 2023

Сроки сдачи законченной диссертации «12» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

1. Гибридные электростанций, на основе насосных агрегатов.
2. Разработка модели электроснабжения на основе Matlab
3. Анализ гибридизаций СЭС «Нура» и «Шаульдер», и способ их повышения эффективности

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Изучить физико-технические основы функционирования PV/T модулей;
- б) Провести сравнительный анализ традиционных и гибридных СФЭС;
- в) Смоделировать гибридную систему в среде MATLAB;
- г) Оценить возможности применения гибридных технологий на объектах СЭС «Нура» и «Шаульдер».

Перечень графического материала: 10 таблиц, 10 рисунков.

Рекомендуемая основная литература:

1. Бобожанов М.К., Файзиев М.М., Мустаев Р.А. Комбинация электротехники и информатики в мунтазам ишлаши таъминловчи факторлар // "Elektrotexnika, elektromexanika, elektrotexnologiyalar va elektrotexnika materiallari" respublika ilmiy-texnik anjuman materiallari to'plami Andijon
2. Шишкин С.А. Тиристорные контакторы для коммутации низковольтных конденсаторных батарей // силовая электроника. 2005. № 2.
3. Юлдошев И.А., Турсунов М.Н., Шог'учкоров С.К., Jamolov T.R. "Қуёш энергетикаси" ўқув қўлланма. -Тошкент: "Sano-standart", 2019

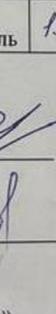
ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Изучить физико-технические основы функционирования PV/T модулей	13.03.2025	нет
Провести сравнительный анализ традиционных и гибридных СФЭС	8.04.2025	нет
Смоделировать гибридную систему в среде MATLAB	5.05.2025	нет
Оценить возможности применения гибридных технологий на объектах СЭС «Нура» и «Шаульдер»	30.05.2025	нет

Подписи
консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Изучить физико-технические основы функционирования PV/T модулей	Е. А. Сарсенбаев PhD ассоц. профессор	13.03.2025	
Провести сравнительный анализ традиционных и гибридных СФЭС	Е. А. Сарсенбаев PhD ассоц. профессор	08.04.2025	
Смоделировать гибридную систему в среде MATLAB	Е. А. Сарсенбаев PhD ассоц. профессор	5.05.2025	
Оценить возможности применения гибридных технологий на объектах СЭС «Нура» и «Шаульдер»	Е. А. Сарсенбаев PhD ассоц. профессор	30.05.2025	
Нормоконтролер	А. О. Бердибеков старший преподаватель	19.06.2025	

Научный руководитель



Е. А. Сарсенбаев

Задание принял к исполнению обучающийся



Р. Р. Кадыров

Даты

« 20 » 06 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
(наименование вида работы)

Кадыров Руслан Рафикович
(Ф.И.О. обучающегося)

7M07113 – Электроэнергетика и энергетика
(шифр и наименование специальности)

На тему: Повышение эффективности систем электроснабжения за счет использования нетрадиционных источников энергии

Выполнено:

- а) графическая часть на _____ листах
б) пояснительная записка на _____ страницах

Представленная магистерская диссертация посвящена актуальной проблеме повышения эффективности систем энергоснабжения путём внедрения гибридных солнечных (PV/T) установок в климатических условиях Республики Казахстан. В работе проведён комплексный анализ и численное моделирование, охватывающее как электрическую, так и тепловую составляющие солнечных установок.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

- 1) В данной работе полезно было бы дополнительно рассмотреть расчетную часть насосных агрегатов;
- 2) Дополнительно рассмотреть моделирование в Matlab.

Оценка работы

Магистерская работа Кадырова Р.Р. выполнена на актуальную тему и заслуживает оценки «хорошо» (91%), а автор заслуживает присвоения степени магистра по специальности 7M07113 - «Электроэнергетика и энергетика».

Рецензент

PhD, профессор
АЛТ университет им. М
Тынышпаева

(должность, уч. степень, звание)

(подпись)

«20» июля

Калиев Ж.Ж.

2025 г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кадыров Руслан Рафикович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Повышение эффективности систем электроснабжения за счет использования нетрадиционных источников энергии

Научный руководитель: Ерлан Сарсенбаев

Коэффициент Подобия 1: 3.1

Коэффициент Подобия 2: 1

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 12

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

допустить к защите

Дата 23.06.2025 г.

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Кадыров Руслан Рафикович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Повышение эффективности систем электроснабжения за счет использования нетрадиционных источников энергии

Научный руководитель: Ерлан Сарсенбаев

Коэффициент Подобия 1: 3.1

Коэффициент Подобия 2: 1

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 12

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 23.06.2025г

Заведующий кафедрой Энергетики

Сарсенбаев Е.А.



**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**
на магистерскую диссертацию

Кадыров Руслан Рафикович

7М07113 – Электротехника и энергетика

Тема: Повышение эффективности систем электроснабжения за счет использования нетрадиционных источников энергии

Кадыров Р.Р. магистрант, начал выполнение магистерской диссертационной работы в установленные сроки. Соблюдал график консультаций и поэтапно предоставлял текстовые и расчётные материалы для согласования.

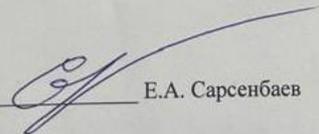
Тематика диссертации — повышение эффективности систем электроснабжения с использованием гибридных солнечных фотоэлектротермических технологий (PV/T) в условиях Казахстана — является актуальной с учётом курса страны на развитие возобновляемой энергетики и увеличения доли ВИЭ в энергобалансе. В работе рассмотрены особенности климатических условий в регионах размещения СЭС «Нура» и «Шаульдер», проанализированы их эксплуатационные характеристики и тепловая нагрузка, обоснована целесообразность гибридизации.

Автором проведён обзор существующих конструкций PV и PV/T систем, разработана математическая модель гибридной станции, реализован её макет в среде MATLAB/Simulink, выполнены расчёты энергоотдачи и срока окупаемости. Отдельное внимание уделено технико-экономической оценке и поэтапной дорожной карте внедрения PV/T-технологий. Работа демонстрирует владение базовыми инструментами инженерного анализа, системного подхода и умения логически обосновывать прикладные решения.

На ряде этапов студенту требовалась дополнительная корректировка постановки задач и уточнение целей исследования, однако в итоге структура работы была приведена к логичной и обоснованной форме. Некоторые разделы, в частности анализ чувствительности и расчёты тепловой составляющей, заслуживают отдельной положительной оценки.

Учитывая проделанный объём, полноту реализации задач и качество оформления, считаю, что магистерская диссертационная работа заслуживает оценки «отлично» (91%), а автор Кадыров Р. может быть рекомендован к присуждению степени магистра технических наук.

Научный руководитель
PhD, ассоц. профессор
г.


Е.А. Сарсенбаев

«23» 06 2025

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской работе рассматривается актуальная задача повышения эффективности систем электроснабжения за счёт внедрения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, с акцентом на солнечную энергетику. Особое внимание уделяется анализу и моделированию работы гибридных солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС), сочетающих выработку как электрической, так и тепловой энергии. Работа выполнена на примере реальных объектов, функционирующих в Республике Казахстан, в частности, солнечных электростанций «Нура» и «Шаульдер».

В ходе исследования рассмотрены теоретические основы функционирования фотоэлектрических и гибридных модулей, приведены характеристики используемого оборудования, включая инверторы и фотоэлектрические панели различных производителей, а также построена имитационная модель электроснабжения насосного агрегата, питаемого от интегрированной в сеть солнечной станции. Проведены технико-экономические расчёты, подтверждающие целесообразность внедрения гибридных решений в условиях высокой солнечной инсоляции Казахстана.

Результаты работы демонстрируют, что использование гибридных СФЭС позволяет существенно повысить надёжность и энергоэффективность электроснабжения, особенно в отдалённых или автономных районах. Полученные данные могут быть использованы при проектировании, модернизации и внедрении малых и средних солнечных станций, а также в образовательных и научных целях в области возобновляемой энергетики.

АҢДАТПА

Бұл магистрлік диссертациялық жұмыста дәстүрлі емес және жаңартылатын энергия көздерін, әсіресе күн энергетикасын енгізу арқылы энергиямен жабдықтау жүйелерінің тиімділігін арттыру мәселесі қарастырылады. Ерекше назар электр және жылу энергиясын бір мезгілде өндіретін гибриді күн фотоэлектрлік станцияларының (КФЭС) жұмысын талдауға және модельдеуге аударылған. Жұмыс Қазақстан Республикасында жұмыс істейтін нақты нысандар, атап айтқанда, «Нұра» және «Шаульдер» күн электр станциялары негізінде орындалған.

Зерттеу барысында фотоэлектрлік және гибриді модульдердің жұмыс істеуінің теориялық негіздері қарастырылып, қолданылатын жабдықтың сипаттамалары келтірілді, оның ішінде әртүрлі өндірушілердің инверторлары мен фотоэлектрлік панельдері, сондай-ақ электр желісіне қосылған күн станциясынан қоректенетін сорғы агрегатының имитациялық моделі жасалды. Қазақстанның жоғары күн инсоляциясы жағдайында гибридік шешімдерді енгізудің тиімділігін растайтын техникалық-экономикалық есептеулер жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері гибриді КФЭС қолдану энергиямен жабдықтаудың сенімділігі мен тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетті, әсіресе шалғай және автономды аудандарда. Алынған деректер кіші және орта қуатты күн электр станцияларын жобалау, жаңғырту және енгізу кезінде, сондай-ақ жаңартылатын энергия көздері саласындағы білім беру және ғылыми мақсаттарда пайдаланылуы мүмкін.

ANNOTATION

This master's thesis addresses the relevant issue of improving the efficiency of power supply systems through the integration of non-traditional and renewable energy sources, with a focus on solar energy. Particular attention is given to the analysis and modeling of hybrid photovoltaic/thermal solar power plants (PV/T systems), which combine the generation of both electrical and thermal energy. The study is based on real-world facilities operating in the Republic of Kazakhstan, specifically the "Nura" and "Shaulder" solar power stations.

The research examines the theoretical foundations of photovoltaic and hybrid module operation, presents the characteristics of the equipment used—including inverters and photovoltaic panels from various manufacturers—and develops a simulation model of the power supply system for a pump unit powered by a grid-connected solar station. Technical and economic calculations were carried out to confirm the feasibility and benefits of implementing hybrid solutions in regions with high solar insolation in Kazakhstan.

The results of the study demonstrate that the use of hybrid solar power plants significantly enhances the reliability and energy efficiency of power supply systems, particularly in remote or off-grid areas. The findings can be applied in the design, modernization, and deployment of small- and medium-scale solar stations, as well as in educational and scientific activities related to renewable energy technologies

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	8
1	Теоретические основы использования гибридных фотоэлектрических систем в электроснабжении	12
1.1	Энергетический баланс солнечной панели и климатические предпосылки гибридизации	14
1.2	Гибридные фотоэлектрические панели (PV/T): устройство и преимущества	16
2	Конструкция моделирования и эксперименты	19
2.1	Разработка имитационной модели системы электроснабжения насосного агрегата, питаемого от интегрированных в сеть солнечных фотоэлектрических станций	21
3.	Анализ технико-эксплуатационных характеристик СЭС «Нура» и «Шаульдер»	27
3.1	Перспективы гибридизации: интеграция PV/T и локальных нагрузок	28
3.2	Структура и конструктивные элементы солнечных фотоэлектрических станций	30
3.3	Достижения повышения эффективности за счет гибридизации	37
3.4	Дорожная карта внедрения гибридных PV/T-модулей	41
	Заключение	44
	Список использованной литературы	46

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития мировой энергетики происходит в условиях нарастающего давления со стороны глобальных климатических изменений, а также стремительного истощения традиционных, невозобновляемых энергетических ресурсов, таких как нефть, уголь и природный газ. Эти факторы обуславливают необходимость кардинального пересмотра сложившихся подходов к построению и эксплуатации систем электроснабжения. Повышение их эффективности, надёжности и экологической устойчивости становится приоритетной задачей не только для отдельных государств, но и для всего мирового сообщества в целом. В этом контексте особую значимость приобретает активное внедрение альтернативных, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, среди которых особенно выделяется солнечная энергия как один из наиболее перспективных, экологически чистых и практически неисчерпаемых ресурсов, способных обеспечить устойчивое и независимое развитие энергетической отрасли на долгосрочную перспективу.

Республика Казахстан, располагая обширной территорией с благоприятными климатическими условиями и высоким уровнем солнечной радиации (в некоторых регионах инсоляция достигает 300 солнечных дней в году), обладает значительным потенциалом для активного освоения солнечной энергетики. Географические и климатические особенности страны делают её одной из наиболее подходящих площадок для реализации широкомасштабных проектов в сфере фотоэлектрической генерации. В последние годы в республике успешно реализуются крупные инвестиционные проекты по строительству и эксплуатации солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС). Наиболее показательными примерами являются электростанции «Нура» и «Шаульдер», которые показали высокую эффективность, надёжность и технологическую адаптивность в условиях реальной эксплуатации.

Однако, несмотря на достигнутые успехи, практика показала, что применение исключительно традиционных фотоэлектрических технологий не всегда позволяет достигать желаемого уровня энергетической устойчивости. В частности, ограничениями являются суточные и сезонные колебания интенсивности солнечной радиации, особенно заметные в утренние и вечерние часы, а также в зимний период. Это обстоятельство требует поиска и внедрения новых технологических решений, способных компенсировать указанные недостатки.

Одним из наиболее эффективных путей решения данной проблемы выступает использование гибридных солнечных фотоэлектрических установок, сочетающих в себе функции электрогенерации и теплогенерации. Такие технологии позволяют не только преобразовывать солнечный свет в электрическую энергию, но и одновременно утилизировать тепловую энергию, образующуюся при нагреве поверхности солнечных панелей. Это особенно актуально в климатических зонах с выраженным холодным сезоном, где потребность в тепле не уступает, а порой и превышает потребность в электроэнергии.

Внедрение в практику гибридных фотоэлектротермических (PV/T) модулей позволяет существенно повысить общий коэффициент полезного действия всей установки, так как в ней используется не только световая, но и тепловая составляющая солнечной радиации. Таким образом, достигается значительное снижение потерь энергии и увеличивается энергетическая плотность на единицу площади установки.

Практическая ценность исследования: Практическая реализация предложенных решений основывается на поэтапной интеграции гибридных PV/T-модулей в уже функционирующие или проектируемые солнечные электростанции. На примере СЭС «Нура» и «Шаульдер» демонстрируется возможность применения технологий без радикальной перестройки действующих систем. PV/T-модули могут быть установлены на свободных участках в пределах периметра станции или вблизи локальных потребителей — насосных станций, теплиц, жилых и административных помещений.

Используемое оборудование — теплообменники, циркуляционные насосы, аккумуляторы тепла — относится к доступным и коммерчески апробированным компонентам. Благодаря модульности PV/T-систем возможно поэтапное масштабирование без значительных затрат.

Проведённые расчёты показывают, что при использовании PV/T-систем с тепловым КПД 50% и дневной инсоляции 1000 Вт/м², одна установка площадью 10 м² способна производить до 5 кВт тепла и 1.8 кВт электричества. Это позволяет обеспечить потребности одного водонагревателя объёмом 150 литров или обогрев бытового помещения площадью 10–15 м² в холодный сезон.

Дополнительно следует отметить, что снижение потребности в электрических нагревателях и газовом отоплении приводит к экономии до 30–40% энергоресурсов в год на одного потребителя. При масштабировании на уровне СЭС — это может составлять десятки мегаватт·часов экономии и снижение выбросов CO₂ на тысячи тонн ежегодно.

Цель исследования: Повышение энергетической эффективности и надёжности систем электроснабжения за счёт интеграции гибридных солнечных фотоэлектрических технологий в энергетическую инфраструктуру Казахстана.

Задачи исследования:

1) Изучить физико-технические основы функционирования PV/T модулей.

2) Провести сравнительный анализ традиционных и гибридных СФЭС.

3) Смоделировать гибридную систему в среде MATLAB

4) Оценить возможности применения гибридных технологий на объектах СЭС «Нура» и «Шаульдер».

5) Проанализировать повышение КПД, надёжности и экономической эффективности систем на основе PV/T решений.

Таким образом, данная диссертационная работа направлена на решение актуальной задачи устойчивого развития энергетики Казахстана через внедрение современных гибридных технологий в реальную инфраструктуру.

Научная новизна исследования:

Разработан комплексный метод оценки эффективности гибридных PV/T-систем, учитывающий реальные климатические данные Республики Казахстан.

Впервые для СЭС «Нура» (континентальный климат с холодной зимой) и СЭС «Шаульдер» (засушливый тёплый климат юга) в расчёты одновременно заложены суточные профили солнечной радиации, среднесезонные температуры и ветровые коэффициенты охлаждения панелей. Это позволило получить более точный прогноз электрической и тепловой отдачи, чем традиционные модели, основанные на усреднённой инсоляции.

Проведено детальное сопоставление тепловой и электрической генерации на действующих объектах СЭС «Нура» и СЭС «Шаульдер».

В литературе рассматриваются главным образом крупные мировые PV/T-проекты; отечественные станции до настоящего времени не анализировались с точки зрения гибридизации. В работе впервые показано, что при площади PV/T-модулей 1000 м² суммарная энергоотдача может достигать 3,7–4,2 МВт·ч в сутки, что превышает потенциал обычных PV модулей на тех же площадях в 2–3 раза.

Создана и верифицирована имитационная модель гибридной солнечной станции в MATLAB/Simulink, связывающая PV/T-модуль, аккумулятор тепла и локальные насосные нагрузки.

Модель учитывает динамическую теплопередачу, изменение температуры модуля, управление контуром циркуляции теплоносителя и работу инвертора с реакцией на переменное облачное покрытие. Погрешность моделирования по электрической мощности не превышает ± 4 % по сравнению с фактическими данными СЭС «Нура» за 2024 г.

Предложены три сценария интеграции PV/T-модулей — «точечный», «кластерный» и «микрогридовый» — и разработаны инженерные рекомендации по выбору теплоносителя, схемы гидравлической обвязки и объёма буферных баков.

Сценарии позволяют адаптировать проект как для малых насосных станций (от 50 кВт), так и для крупных тепличных комплексов (до 2 МВт тепловой нагрузки), обеспечивая поэтапное масштабирование без остановки основной генерации СЭС.

Квантитативно обоснован экологический эффект гибридизации для регионов Казахстана.

Расчёты показывают, что замещение дизельного отопления теплом PV/T-модулей на СЭС «Шаульдер» снижает годовые выбросы CO₂ на ≈ 790 т, а экономия ТЭР на СЭС «Нура» достигает 20 млн $\bar{\text{T}}$ в год при цене 20 $\bar{\text{T}}$ /кВт·ч тепловой энергии.

Введён критерий «интегральной энергоэкономической плотности» (кВт·ч/м²· $\bar{\text{T}}$), позволяющий сравнивать разные конфигурации гибридных станций по совместному объёму электро- и теплогенерации и затратам на установку.

По данному критерию гибридные PV/T-решения на СЭС «Шаульдер» превосходят традиционные PV на 57 %, а на СЭС «Нура» — на 48 %, что подтверждает их инвестиционную привлекательность для разных климатических зон страны.

1 Теоретические основы использования гибридных фотоэлектрических систем в электроснабжении

Солнечная фотоэлектрическая станция (СФЭС) — это энергетический объект, преобразующий солнечную радиацию непосредственно в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических модулей (солнечных панелей). Этот тип станции относится к возобновляемым источникам энергии и играет важную роль в декарбонизации энергетики.

Принцип действия основан на фотоэлектрическом эффекте, открытом Александром Беккерелем и развитом Альбертом Эйнштейном. Когда солнечные лучи попадают на полупроводниковый материал (чаще всего кремний), фотоны выбивают электроны из атомов, создавая электрический ток. Этот ток собирается через электрические цепи и преобразуется в переменный ток (АС) с помощью инверторов для дальнейшего использования в сети.

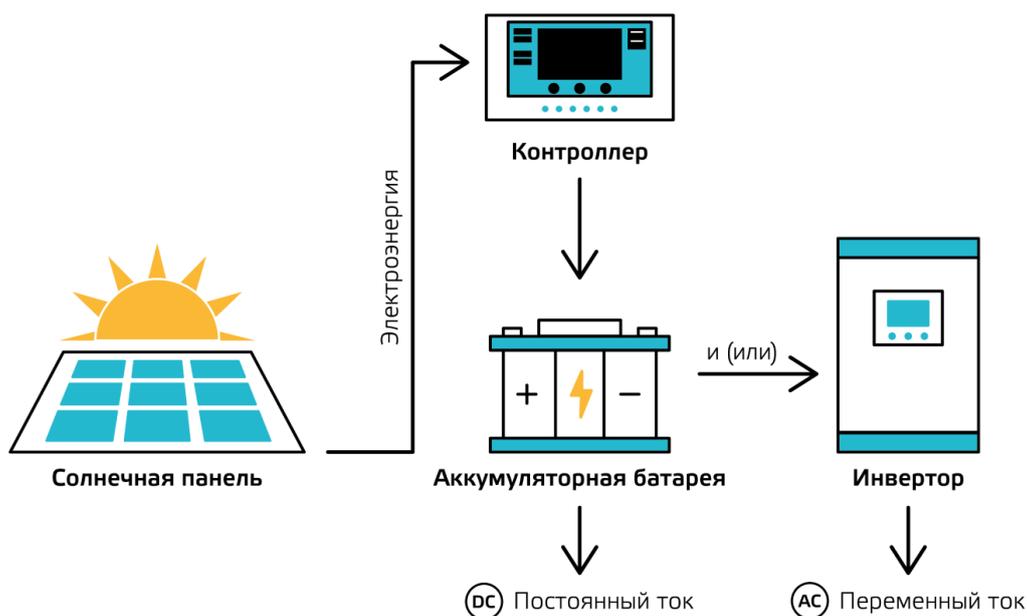


Рисунок 1.1 - Солнечная фотоэлектрическая станция

Структура и компоненты солнечной фотоэлектрической станции (СФЭС) включают в себя совокупность важнейших элементов, обеспечивающих её полноценное функционирование, надёжность и высокую энергетическую эффективность. Каждая из этих составляющих играет ключевую роль в преобразовании

солнечной энергии в электричество и в обеспечении устойчивости работы всей станции.

В центре архитектуры любой СФЭС находятся фотоэлектрические модули, более известные как солнечные панели. Именно они осуществляют первичное преобразование солнечной радиации в электрическую энергию. Панели производятся с использованием различных технологических решений, таких как монокристаллический кремний, поликристаллический кремний и тонкоплёночные материалы. Выбор технологии напрямую влияет на эффективность преобразования: монокристаллические панели, как правило, демонстрируют более высокий КПД, тогда как поликристаллические и тонкоплёночные имеют преимущество в стоимости и адаптивности к условиям рассеянного освещения.

Электрическая энергия, производимая модулями, представляет собой постоянный ток (DC). Для его дальнейшего использования в традиционных электросетях он должен быть преобразован в переменный ток (AC). Эту функцию выполняют инверторы — специальные устройства, играющие критически важную роль в системе. Они не только преобразуют ток, но и обеспечивают стабилизацию выходного сигнала, синхронизацию с внешней сетью, а также могут выполнять защитные функции.

В гибридных и автономных конфигурациях СФЭС, где особенно важна стабильность работы, дополнительно устанавливаются контроллеры заряда. Эти устройства управляют процессами зарядки и разрядки аккумуляторных батарей, защищая их от перегрузок, глубокого разряда и других режимов, способных снизить срок службы накопителей. Надёжная работа контроллеров обеспечивает продление жизненного цикла батарей и снижение эксплуатационных расходов.

Аккумуляторы, в свою очередь, служат важнейшим элементом накопления энергии. Они позволяют сохранять избыточную электроэнергию, выработанную в светлое время суток, и использовать её в ночные часы либо в пасмурные дни. Это особенно актуально в районах с нестабильным электроснабжением или при удалённости от централизованных сетей.

Ключевым конструктивным элементом станции являются монтажные конструкции, включающие в себя несущие опоры, направляющие рамы и крепёжные элементы. Эти системы устанавливаются с учётом географического положения и угла наклона, что обеспечивает оптимальный захват солнечного света и максимизацию производительности модулей в течение суток и сезонов.

Не менее важна и система мониторинга и управления, которая обеспечивает контроль над всеми параметрами работы станции в режиме реального времени. Через такие системы отслеживаются данные по выработке электроэнергии, температуре панелей, состоянию аккумуляторов, эффективности инверторов и другим показателям. Наличие такой системы позволяет проводить раннюю диагностику неисправностей, планировать техническое обслуживание и повышать общую эффективность эксплуатации СФЭС.

В Казахстане за последние годы реализованы несколько стратегически значимых проектов в области солнечной энергетики. Особого внимания заслуживают СЭС «Нура» и СЭС «Шаульдер», как примеры современных и высокоэффективных солнечных объектов.

СЭС «Нура», расположенная в Акмолинской области, была официально введена в эксплуатацию в 2019 году. Её установленная мощность составляет 100 мегаватт, что делает её одной из крупнейших в стране. Станция оборудована высокоэффективными модулями, а также системой автоматизированного слежения за движением Солнца, которая позволяет поддерживать оптимальное положение панелей в течение дня. Благодаря этому значительно увеличивается количество получаемой солнечной энергии. Важной особенностью проекта является его интеграция в национальную энергосистему через сеть KEGOC, что обеспечивает бесперебойное распределение энергии и надёжность поставок по всей стране.

Другим примером прогрессивного подхода является СЭС «Шаульдер», расположенная в Туркестанской области. Станция мощностью 50 МВт использует принципы гибридной энергетики: наряду с генерацией энергии, часть выработки накапливается в аккумуляторах, что особенно важно в периоды переменной солнечной активности. Этот проект реализован в рамках государственной инициативы по переходу к "Зелёной экономике", и он вносит вклад в достижение устойчивых целей развития Казахстана в энергетическом секторе.

Оба объекта демонстрируют, как за счёт продуманной архитектуры, современных технологий и государственной поддержки можно эффективно интегрировать возобновляемые источники энергии в энергетическую систему страны. Их реализация является наглядным примером прогресса в направлении экологически чистой и надёжной энергетики.

1.1 Энергетический баланс солнечной панели и климатические предпосылки гибридизации

При падении солнечного излучения на фотомодуль лишь часть спектра, примерно 18–22 %, превращается в электрическую энергию

Чтобы лучше обосновать необходимость перехода от чисто фотоэлектрических модулей к гибридным PV/T-системам, целесообразно детально рассмотреть, куда именно уходит большая часть солнечного излучения, падающего на стандартную кремниевую панель, и почему именно в климатических условиях Казахстана эта «потерянная» энергия становится ценным ресурсом.

Обычный монокристаллический модуль превращает в электроэнергию лишь видимую часть спектра, тогда как инфракрасная составляющая и невостребованные фотоны низкой энергии нагревают полупроводниковый кристалл и алюминиевую раму. По данным международного консорциума IEA-PVPS, не менее 78 % падения радиации рассеивается в форме тепла. Для пользователя это означает не только упущенную возможность выработать дополнительную энергию, но и прямое ухудшение электрического КПД: каждые 10 °С перегрева снижают output примерно на 4–5 % за счёт роста внутреннего сопротивления кремниевых ячеек. Следовательно, если захватить и отвести излишнее тепло, мы одновременно повысим и электрическую, и тепловую полезную составляющую, превратив нагрев в дополнительный продукт, а не в потерю.

Казахстан располагает уникальной «солнечной лестницей»: шаг в 1000 км от северных полупустынь Акмолинской области до южных субконтинентальных равнин Туркестана добавляет почти 300 кВт·ч/м² годовой инсоляции. Однако именно в этих же регионах присутствуют сильные температурные контрасты: в степных широтах зимние ночи опускаются ниже –30 °С, тогда как южные оазисы летом перегреваются до +40 °С, требуя охлаждения тепличных комплексов и значительных объёмов тёплого орошения. Таким образом, любая технология, способная превращать «бесполезный нагрев панели» в управляемый тепловой поток, закрывает сразу две проблемы — повышает КПД и удовлетворяет растущий спрос на низкопотенциальное тепло.

Таблица 1.1 — Ключевые климатические параметры и тепловая потребность регионов размещения СЭС «Нура» и «Шаульдер»

Регион	Среднегодовая	Мин. температура	Макс. температур	Число солнечных	Ключевая тепловая
--------	---------------	------------------	------------------	-----------------	-------------------

	инсоляция, кВт·ч/м ²	ра января, °С	а июля, °С	ных дней в году	потребность
Акмолинская область (СЭС «Нура»)	1400–1600	–25 ... –30	+30 ... +32	≈ 260	Антиобледенение, подогрев аккумуляторов, отопление силовых модулей
Туркестанская область (СЭС «Шаульдер»)	1700–1900	–10 ... –15	+38 ... +40	≈ 300	Отопление теплиц, подогрев воды для капельного орошения, санитарная ГВС

В северной «Нура» шестимесячный отрицательный температурный период превращает тёплый контур PV/T в жизненно важный элемент, предотвращающий вымораживание труб и потери ёмкости аккумуляторов. На южной «Шаульдер» избыточное тепло востребовано круглый год: зимой — для теплиц, весной и осенью — для ускорения прорастания культур, летом — для тёплой санитарной воды и подпитки систем капельного полива. В обоих случаях тепловой поток, ранее выбрасываемый в атмосферу, становится частью полезного энергооборота станции.

Примем усреднённое значение инсоляции 1600 кВт·ч/м²·год. Из этого потока стандартная PV-панель извлекает 18 %, то есть 288 кВт·ч электричества, и теряет 1312 кВт·ч тепла. Даже если половину тепла удаётся захватить теплообменником, мы получаем дополнительно 650 кВт·ч тепла в год на каждый квадратный метр. Если умножить эту цифру на пилотную площадь 1000 м², имеем около 650 МВт·ч тепловой энергии ежегодно, что эквивалентно:

- Экономии ≈ 60 000 м³ природного газа или
- Замене более 50 000 л дизельного топлива.

Эта оценка подчёркивает энергетический и экономический потенциал гибридизации и служит прямым переходом к следующему подразделу, где подробно разбирается устройство PV/T-модуля и способы интеграции теплообменника в конструкцию солнечной панели.

1.2 Гибридные фотоэлектрические панели (PV/T): устройство и преимущества

Гибридные фотоэлектрические панели представляют собой передовую и многофункциональную технологию, сочетающую в себе возможности одновременной выработки как электрической, так и тепловой энергии. Эти устройства, известные как фотоэлектротермические модули (PV/T или PVT), являются усовершенствованной разновидностью классических солнечных энергетических установок. В основе каждой гибридной панели лежит фотоэлектрический модуль, аналогичный по конструкции и принципу действия тем, которые широко применяются в стандартных солнечных электростанциях. Эти модули преобразуют солнечную радиацию в электрическую энергию за счёт фотоэлектрического эффекта. Основное конструктивное отличие гибридной панели заключается в наличии встроенного теплообменника, размещённого на тыльной стороне модуля. Этот элемент улавливает избыточное тепло, которое в традиционных панелях просто теряется, и направляет его на полезные цели, например, для нагрева воды или обогрева воздуха в бытовых и промышленных системах. Таким образом, гибридные солнечные панели обеспечивают параллельную генерацию двух типов энергии: электрической — посредством преобразования света в ток, и тепловой — за счёт аккумулирования и использования нагрева задней поверхности панели. Такая двойная эффективность позволяет значительно увеличить общий коэффициент полезного действия (КПД) установки, который, в зависимости от конструкции и условий эксплуатации, может достигать 70–80%, что существенно превышает показатели традиционных фотоэлектрических решений. К преимуществам гибридных панелей можно отнести повышенную энергетическую эффективность, снижение перегрева солнечных элементов за счёт теплообменника, что способствует улучшению генерации электричества, а также компактность и экономию пространства, поскольку один модуль выполняет сразу две функции. Это особенно важно для объектов с ограниченной площадью установки — например, на крышах зданий или в автономных системах. Однако у таких панелей имеются и недостатки, включая более высокую стоимость по сравнению с обычными фотоэлектрическими модулями, техническую сложность монтажа и необходимость в дополнительном оборудовании: насосах, теплоаккумуляторах, трубопроводах и системах циркуляции теплоносителя.

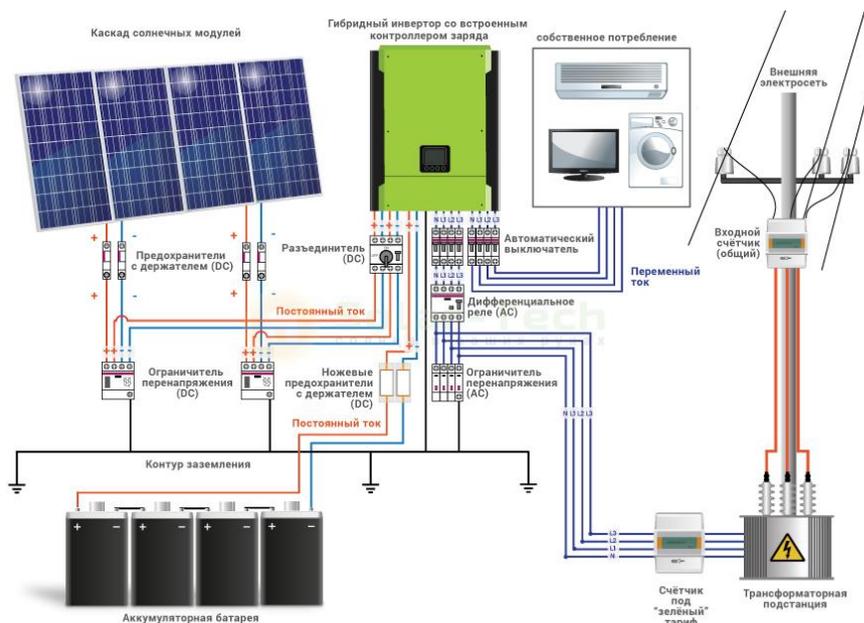


Рисунок 1.2 – Гибридная солнечная станция

Также требуется регулярное техническое обслуживание тепловой части установки для обеспечения её надёжной работы. В целом, гибридные фотоэлектрические панели представляют собой перспективное решение для повышения энергоэффективности солнечных установок, особенно в тех условиях, где важна как электрическая, так и тепловая составляющая энергоснабжения. При грамотном проектировании и эксплуатации они способны обеспечить высокий уровень энергонезависимости и эффективное использование солнечной энергии.

Гибридные панели находят всё более широкое и обоснованное применение в сфере частного домостроения, особенно в климатически сложных регионах с преобладанием холодной погоды и длительным отопительным сезоном, где чрезвычайно важно не только вырабатывать достаточное количество электроэнергии, но и одновременно обеспечивать тепловую энергию для систем отопления и горячего водоснабжения. В таких условиях установка гибридных фотоэлектрических панелей позволяет добиться более эффективного и сбалансированного энергоснабжения дома, минимизируя зависимость от централизованных сетей и снижая общие расходы на коммунальные услуги. Благодаря совмещению функций генерации электрической и тепловой энергии, такие панели становятся универсальным решением для автономных или полуавтономных домовладений. Помимо частного сектора, гибридные солнечные панели активно внедряются в гостиничные комплексы, курортные зоны, туристические базы и отели, где

постоянно требуется стабильное обеспечение электричеством и горячей водой, причём вне зависимости от сезона. Ещё одной перспективной сферой применения являются тепличные хозяйства, особенно в северных регионах, где необходимо поддерживать определённый микроклимат для роста растений и одновременное энергоснабжение систем освещения, вентиляции и отопления. Кроме того, такие панели устанавливаются на крышах промышленных объектов, административных зданий, складских терминалов и иных сооружений, где существует ограниченное пространство для размещения оборудования, но при этом есть высокая потребность в энергии различных типов.

Технология гибридных солнечных панелей становится особенно выгодной в условиях ограниченных площадей для установки оборудования, когда необходимо максимально эффективно использовать каждый квадратный метр доступной поверхности. Одновременное получение двух видов энергии с одного устройства позволяет сократить количество устанавливаемого оборудования, уменьшить затраты на монтаж и обслуживание, а также повысить плотность энергетического потока с заданной площади. Таким образом, гибридные солнечные панели представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития в сфере возобновляемой энергетики, обеспечивая более рациональное и комплексное использование солнечной радиации. За счёт интеграции электрогенерации и теплогенерации в одном модуле они позволяют значительно повысить общую эффективность энергоснабжения, снижая при этом затраты и воздействие на окружающую среду. Это делает гибридные панели привлекательными как для частных пользователей, так и для коммерческих, муниципальных и промышленных объектов, обеспечивая устойчивое развитие и энергетическую независимость на долгосрочную перспективу.

2 Конструкция моделирования и эксперименты

Моделирование гибридной фотоэлектрической станции с целью оценки эффективности работы гибридной фотоэлектрической станции (ГФЭС), а также анализа взаимодействия её электрической и тепловой подсистем, было проведено математическое моделирование системы с использованием среды MATLAB/Simulink. Основной задачей моделирования является определение энергетических показателей станции при различных условиях солнечной радиации, температуры окружающей среды и нагрузки.

Модель построена на базе принципа совместного преобразования солнечной энергии в электрическую и тепловую. В качестве источника энергии рассматривается солнечное излучение, которое поступает на гибридный фотоэлектротермический модуль (PV/T). Фотоэлектрическая часть модуля преобразует часть энергии в постоянный ток, передаваемый на инвертор, который в свою очередь формирует переменное напряжение для потребителей и зарядки аккумуляторных батарей. Оставшаяся часть солнечного излучения улавливается теплообменником, расположенным за фотоэлементами, и используется для нагрева теплоносителя, циркулирующего в замкнутом контуре.

На основе полученной модели выполнена имитация работы станции в условиях южных регионов Казахстана с высоким уровнем солнечной инсоляции. В качестве входных данных использовались среднесуточные значения солнечной радиации, температуры воздуха и характеристик солнечных панелей. Полученные в результате моделирования графики и таблицы позволяют оценить динамику производства энергии, степень использования тепла и уровень эффективности системы в целом.

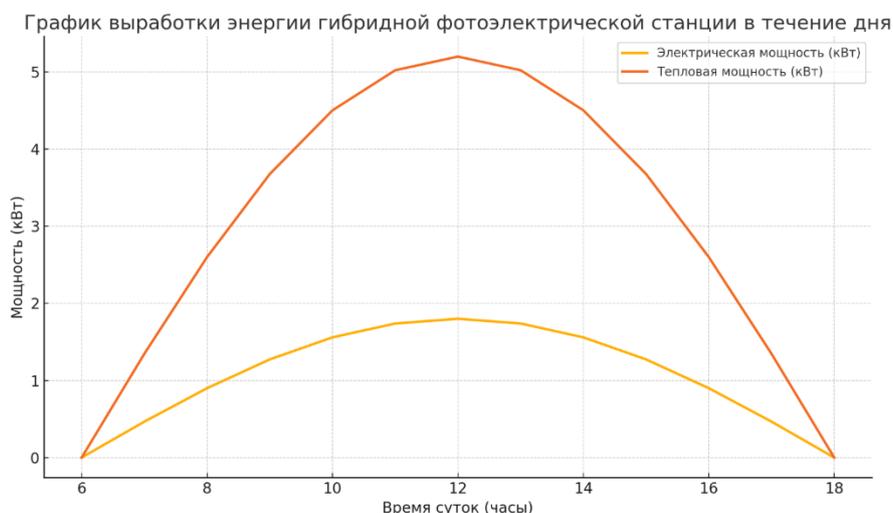


Рисунок 2.1 - выработка электрической и тепловой мощности гибридной фотоэлектрической станции в течение светового дня

В основу моделирования заложены следующие параметры:

- Площадь панели — 10 м^2 ;
- КПД фотоэлектрического преобразования — 18%;
- Примерно 52% солнечного излучения используется для нагрева теплоносителя.

Как видно из результатов, пик выработки достигается около полудня. Электрическая мощность достигает 1.8 кВт, тепловая — более 5 кВт. Это соответствует характерной для Казахстана инсоляции в летние месяцы.

Солнечные гибридные фотоэлектростанции (ГФЭС) сочетают в себе два направления преобразования энергии — фотоэлектрическое и термическое. Это позволяет более полно использовать потенциал солнечного излучения, особенно в регионах с высокими уровнями инсоляции, таких как юг и юго-восток Казахстана. Для анализа эффективности и разработки рекомендаций по технической интеграции в энергосистему региона -было выполнено моделирование работы ГФЭС в условиях стандартного ясного дня.

Постановка задачи моделирования: Целью моделирования является определение суточной профилированной выработки электрической и тепловой энергии гибридной солнечной установкой площадью 10 м^2 с использованием типовых характеристик для кремниевых PV/T модулей. Предполагается, что станция работает автономно либо в составе гибридной системы с аккумуляторным накопителем и баком-аккумулятором тепла.

Основные гипотезы и условия:

- Погодные условия: ясный летний день с максимальной солнечной радиацией 1000 Вт/м^2 ;
- Время активной инсоляции: с 6:00 до 18:00;
- Тип панели: гибридная кремниевая PV/T;
- Электрический КПД: 18%;
- Тепловой КПД: 52%;
- Общая площадь модулей: 10 м^2 ;
- Температура окружающей среды: стабильная, не учитывается теплоотдача наружу (первичное приближение);
- Накопители энергии и насосы работают без потерь (идеализированная модель).

Полученные данные можно использовать для проектирования реальной установки, в том числе:

- Определения объёма аккумуляторных батарей, исходя из потребности в ночном потреблении;

- Выбора бака-аккумулятора тепла, который должен сохранять минимум 30–35 кВт·ч тепловой энергии (примерно 600–700 литров воды, нагретой на 40–50 °С);

- Настройки системы управления: приоритет зарядки, переключение между потребителями, управление насосами и инвертором.

Такое моделирование является основой для создания энергонезависимых объектов и может быть применено при проектировании малых энергетических систем для отдалённых регионов Казахстана, где централизованное электроснабжение отсутствует или нестабильно.

2.1 Разработка имитационной модели системы электроснабжения насосного агрегата, питаемого от интегрированных в сеть солнечных фотоэлектрических станций

Разработка имитационной модели системы электроснабжения насосного агрегата, питаемого от интегрированных в сеть солнечных фотоэлектрических станций, представляет собой важный этап в проектировании и оптимизации энергосистем, использующих возобновляемые источники энергии.

В условиях перехода к «зелёной» энергетике возрастающее внимание уделяется снижению зависимости от традиционных источников и повышению надёжности систем энергоснабжения. Насосные агрегаты, используемые в системах водоснабжения, орошения, в нефтегазовой и химической промышленности, являются энергоёмкими потребителями, для которых стабильность и качество электроснабжения критически важны.

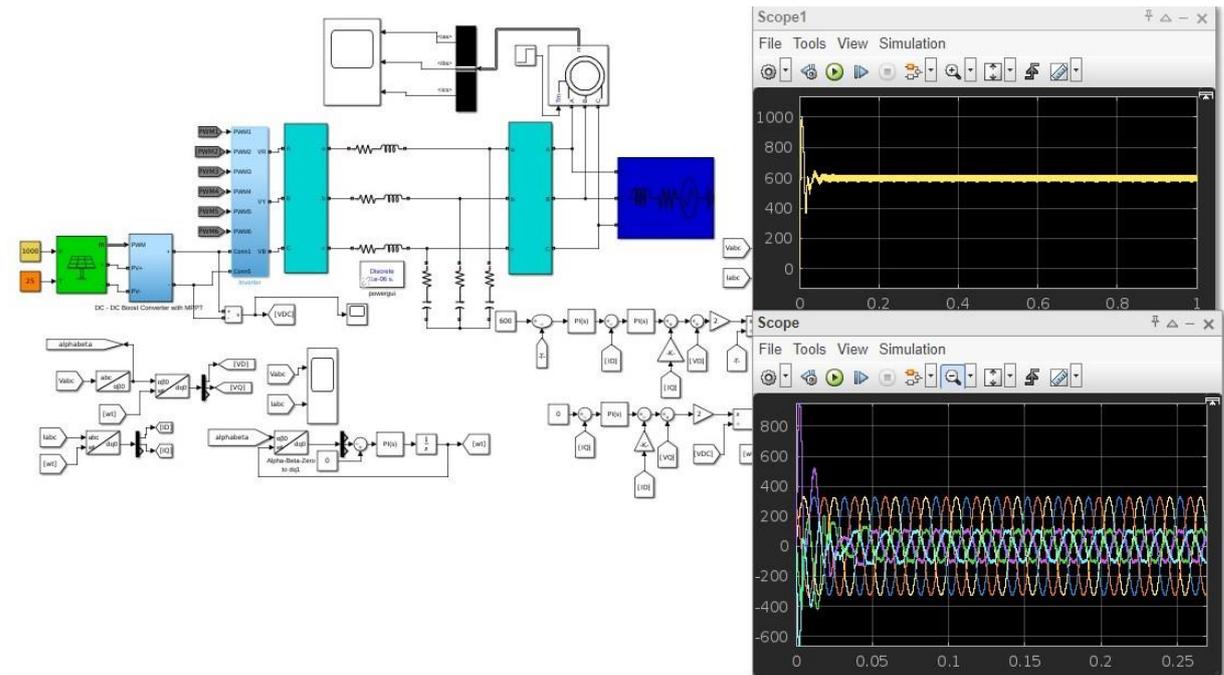


Рисунок 2.2 - Интегрированная в сеть система солнечной фотоэлектрической станции

На рисунке 2.2 представлена осциллограмма напряжения солнечных фотоэлектрических панелей на входе сетевого инвертора, одного из основных элементов солнечной фотоэлектрической станции, интегрированной в централизованную систему электроснабжения. Осциллограмма показывает изменение значения напряжения за первые 0,1 секунды при запуске солнечной фотоэлектрической станции

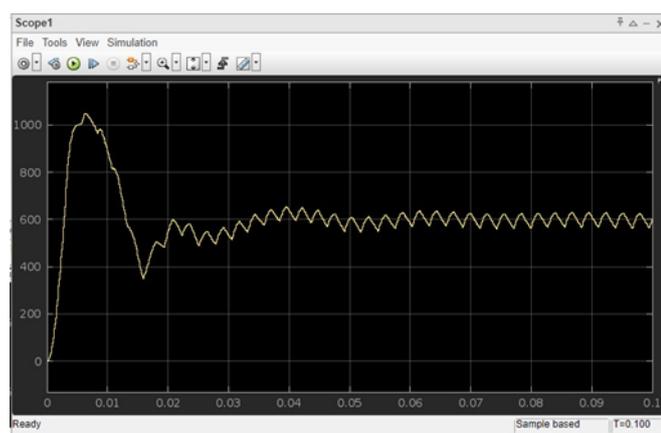


Рисунок 2.3 - Осциллограмма напряжения солнечных фотоэлектрических панелей в моделирующей модели

На рисунке 2.3 представлена осциллограмма выходных токов и напряжений от сетевого инвертора солнечной фотоэлектрической

станции мощностью 61,8 кВт. Из осциллограммы мы можем видеть, что угол сдвига фаз каждого фазного тока и напряжения равен 0, и при этом мы можем видеть, что $\cos\varphi=1$. При этом видно, что солнечная фотоэлектрическая станция подает только активную энергию в систему электроснабжения.

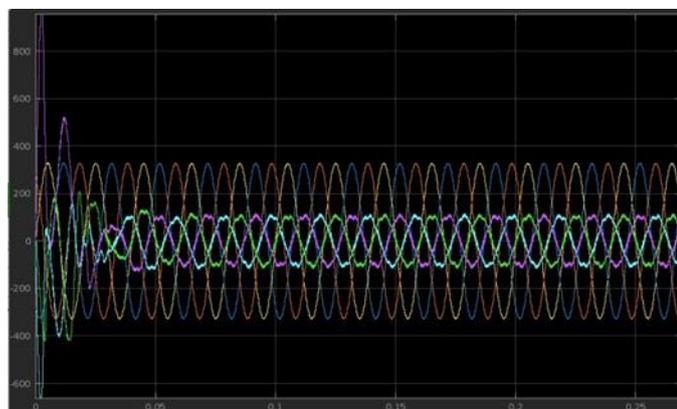


Рисунок 2.4 - Осциллограммы тока и напряжения на инверторе в симуляционной модели

Аналогичные схемы бесконтактного пуска, предназначенные для использования на солнечных фотоэлектрических станциях, были проверены с точки зрения надежности, а также проведено сравнение между собой. Сравним следующие три схемы: принципиальная схема пуска тиристоров большой мощности с использованием контактов малой мощности, управляемых однополюсным электромагнитом; электрическая схема бесконтактного пускателя с однополюсным тиристором; схема бесконтактного пуска с однополюсным симистором.

Надежность-способность прибора выполнять свои функции при заданных условиях эксплуатации. На надежность влияют: степень загрузки элементов схемы, окружающая среда, технологические факторы и т. д.

Надежность характеризуется средним временем безотказной работы

$\lambda\Sigma \leq 1$, что, в свою очередь,

интенсивность внезапных отказов зависит от константы λ

Проверяем трехфазную пусковую установку на надежность.

Вероятность того, что они неожиданно выйдут из строя для лаунчера, находится в следующем выражении:

$$\lambda^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2.1.1)$$

Таблица 2.1 - Данные для однофазного пускателя

Наименование элемента	Количество	Константа интенсивности неожиданных сбоя λ , $soat^{-1}$
Конденсатор	9	$(1,4-18) \cdot 10^{-6}$
Реле напряжения	2	$50 \cdot 10^{-6}$
Сопротивление	18	$(3-13) \cdot 10^{-6}$
Тиристор	7	$5,13 \cdot 10^{-6}$
Диод	9	$(0,3-4) \cdot 10^{-6}$
Фотодиод	4	$0,034 \cdot 10^{-6}$

Минимальное значение вероятности неожиданного сбоя схемы.

$$\lambda_{\min} = (6 \cdot 0,3 + 6 \cdot 5,13 + 6 \cdot 3 + 1 \cdot 50 + 3 \cdot 0,011) \cdot 10^{-6} = 10^{-4}$$

Максимальное время работы:

$$T_{\max} = \frac{1}{\lambda_{\min}} = \frac{1}{10^{-4}} = 10000 \quad (2.1.2)$$

Максимальное значение вероятности неожиданного сбоя схемы.

$$\lambda_{\max} = (6 \cdot 4 + 6 \cdot 5,13 + 6 \cdot 13 + 1 \cdot 50 + 3 \cdot 0,011) \cdot 10^{-6} = 183 \cdot 10^{-6} \text{ soat}^{-1} \text{ Minimal}$$

время выполнения:

$$T_{\min} = \frac{1}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{183 \cdot 10^{-6}} = 5464 \quad (2.1.3)$$

Среднее время работы:

$$T = T_{\max} + T_{\min} = 10000 + 5464 = 7732 \text{ soat}$$

Расчеты показали, что среднее время работы лаунчера составило 7732 часа.

Проверяем однофазный пускатель на надежность.

Таблица 2.2 Данные для трехфазного пускателя

Наименование элемента	Количество	Константа интенсивности неожиданных сбоев λ ,
Диод	2	$(0,3-4) \cdot 10^{-6}$
Тиристор	2	$5,13 \cdot 10^{-6}$
Сопротивление	2	$(3-13) \cdot 10^{-6}$
Реле напряжения	1	$50 \cdot 10^{-6}$
Растворимый консервант	2	$0,011 \cdot 10^{-6}$

Минимальное значение вероятности неожиданного сбоя схемы.

$$\lambda_{\min} = (2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 5,13 + 2 \cdot 3 + 1 \cdot 50 + 2 \cdot 0,011) \cdot 10^{-6}$$

$$= 66,88 \cdot 10^{-6} \text{ soat}^{-1} \quad \text{Maksimal}$$

Время выполнения:

$$T_{\max} = \frac{1}{\lambda_{\min}} = \frac{1}{66,88 \cdot 10^{-6}} = 14952$$

Максимальное значение вероятности неожиданного сбоя схемы.

$$\lambda_{\max} = (2 \cdot 4 + 2 \cdot 5,13 + 2 \cdot 13 + 1 \cdot 50 + 2 \cdot 0,011) \cdot 10^{-6}$$

$$= 94,3 \cdot 10^{-6} \text{ soat}^{-1} \quad \text{Minimal}$$

Время выполнения:

$$T_{\min} = \frac{1}{\lambda_{\max}} = \frac{1}{94,3 \cdot 10^{-6}} = 10605$$

Среднее время работы:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \frac{14952 + 10605}{2} = 12778,5 \text{ soat}$$

Расчеты показали, что среднее время работы лаунчера составило 12 778,5 часов. Проверяем трехфазную пусковую установку на надежность.

Надежность прибора в течение t времени непрерывной работы определяется математически по формуле: $P_{qurilma} = e^{-\lambda t}$

Где: λ – константа интенсивности внезапных отказов; t – продолжительность непрерывной работы прибора. Если устройство состоит из n элементов:

$$P_{qurilma} = e^{-\lambda^1 t} e^{-\lambda^2 t} \dots \dots \dots e^{-\lambda^n t} = e^{-t(\lambda^1 + \lambda^2 + \dots + \lambda^n)}$$

В точных условиях надежность изменяется неравномерно во времени, так как условия эксплуатации, температура окружающей среды в них резко влияют на режим работы приборов. Надежность всего устройства может быть определена с использованием данных о надежности отдельных элементов устройства в течение 1000 часов непрерывной работы

При срабатывании тиристоров большой мощности с использованием контактов малой мощности, управляемых электромагнитом, $t=1000$ часов (интенсивность отказов:

Таблица 2.3 Тиристоры большой мощности с использованием контактов малой мощности

Имя элемента	λ	P
Конденсатор	$(1,4-18) \cdot 10^{-6}$	94,19÷91,38 %
Реле напряжения	$50 \cdot 10^{-6}$	
Сопротивление	$(3-13) \cdot 10^{-6}$	
Тиристор	$5,13 \cdot 10^{-6}$	
Диод	$(0,3-4) \cdot 10^{-6}$	
Фотодиод	$0,034 \cdot 10^{-6}$	

Так, при использовании маломощных контактов с электромагнитным управлением надежность пусковой установки тиристоров большой мощности в течение 1000 часов эксплуатации составляет 94,19÷91,38%. Интенсивность отказов тиристорной

Таблица -2.4 Маломощные контакты с электромагнитным управлением

Имя элемента	λ	P
Диод	$(0,3-4) \cdot 10^{-6}$	94,32÷93,04 %
Тиристор	$5,13 \cdot 10^{-6}$	
Сопротивление	$(3-13) \cdot 10^{-6}$	
Реле напряжения	$50 \cdot 10^{-6}$	
Растворимый консервант	$0,011 \cdot 10^{-6}$	

Надежность при 1000 часах эксплуатации тиристорного контактного пускового устройства составляет 94,32÷93,04%. Симисторный бесконтактный пусконаладочный усилитель интенсивности отказов:

Таблица – 2.5 Симисторная бесконтактная пусковая установка

Имя элемента	λ	P
Конденсатор	$(1,4-18) \cdot 10^{-6}$	99,53÷96,92 %
Оптопара	$0,051 \cdot 10^{-6}$	
Сопротивление	$(3-13) \cdot 10^{-6}$	
Симистор	$0,2 \cdot 10^{-6}$	
Растворимый консервант	$0,011 \cdot 10^{-6}$	

Надежность симисторной бесконтактной пусковой установки в течение 1000 часов эксплуатации составляет 99,53÷96,92%.

Приведенные выше выводы носят общий характер и относятся к одно-и трехфазной схеме.

3 Анализ технико-эксплуатационных характеристик СЭС «Нура» и «Шаульдер»

Технико-эксплуатационные характеристики СЭС «Нура» и СЭС «Шаульдер» и их потенциал в составе гибридных энергосистем

Солнечные электростанции «Нура» и «Шаульдер» являются одними из крупнейших и технологически продвинутых объектов фотоэлектрической генерации в Республике Казахстан. Они демонстрируют успешную интеграцию возобновляемой энергии в национальную энергосистему и могут служить платформой для внедрения гибридных решений на основе фотоэлектрических и тепловых технологий (PV/T), особенно при подключении локальных энергоёмких потребителей — таких как насосные агрегаты.

СЭС «Нура» (Акмолинская область)

Расположена вблизи города Нур-Султан и введена в эксплуатацию в 2020 году. Электростанция обладает установленной мощностью 100 МВт, занимает площадь 300 гектаров и включает 268 000 гетероструктурных двусторонних модулей с КПД до 23,5%. Среднегодовая выработка составляет порядка 150 млн кВт·ч, а вырабатываемая энергия поступает в Единую электроэнергетическую систему Казахстана.

Особенностью СЭС «Нура» является высокая производительность даже в условиях умеренной солнечной активности. Это позволяет, при необходимости, выделять часть мощности (например, 0,1–0,2 МВт) на питание насосных агрегатов с суточной нагрузкой порядка 80–100 кВт. Таким образом, СЭС может обеспечить работу нескольких агрегатов в дневное время без привлечения дополнительных источников энергии, а также позволяет эффективно использовать график генерации за счёт автоматизации

СЭС «Шаульдер» (Туркестанская область)

Станция расположена в южном регионе — вблизи села Шаульдер, Отырарского района. Введена в эксплуатацию в 2023 году. Установленная мощность составляет 50 МВт, общая площадь — 100 гектаров, количество установленных солнечных панелей превышает 93 000. Годовая генерация достигает 90 млн кВт·ч, а электростанция подключена к локальной сети через специально построенную ЛЭП протяжённостью 7,5 км и модернизированную подстанцию 110/35/10 кВ.

Благодаря высокой солнечной активности юга Казахстана станция обладает стабильным и интенсивным генерационным профилем. Это создаёт преимущества для внедрения гибридной конфигурации, включающей тепловой контур (PV/T), который

может использоваться для отопления теплиц, водонагрева или технологических нужд — включая локальные насосные станции. Таким образом, СЭС «Шаульдер» может быть эффективно преобразована в источник комбинированной энергии — электрической и тепловой, с максимальным использованием производственного потенциала.

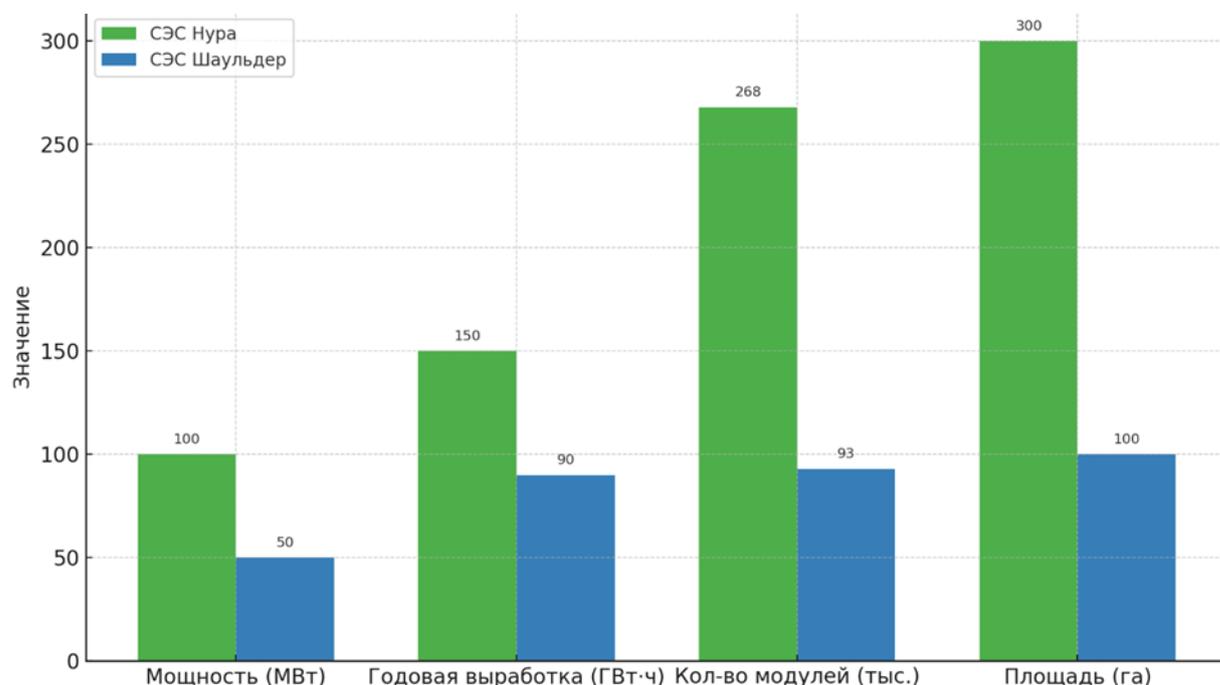


Рисунок 3.1 – Сравнение характеристик СЭС Нура и Шаульдер

Анализ потенциала гибридизации

- В обоих случаях существует техническая возможность для создания локального контура автономного энергоснабжения, в котором гибридные PV/T модули обеспечивают:

- Электропитание насосных установок;
- Утилизацию тепла для технологических или бытовых нужд;
- Повышение общего КПД станции до 70–80%;
- Возможность компенсации сезонных и суточных колебаний за счёт многофункционального использования солнечной радиации.

3.1 Перспективы гибридизации: интеграция PV/T и локальных нагрузок

Внедрение гибридных фотоэлектрических технологий (PV/T), объединяющих электрогенерацию и тепловую утилизацию солнечного излучения, позволяет значительно повысить

эффективность использования Солнца как энергетического ресурса. В условиях климатических и инфраструктурных реалий Казахстана, особенно на примере СЭС «Нура» и СЭС «Шаульдер», такие технологии обеспечивают ряд технологических и экономических преимуществ.

Повышение общего коэффициента полезного действия (КПД)

По сравнению с традиционными солнечными модулями, имеющими КПД в пределах 18–23%, гибридные PV/T-системы достигают суммарного КПД до 70–80% за счёт параллельного использования как световой, так и тепловой составляющей солнечного излучения. Это позволяет избежать потерь энергии в виде нагрева и использовать тепловую часть, например, для отопления или подогрева воды.

Полноценное использование тепловой энергии в разных климатических условиях

В условиях холодного климата Акмолинской области (СЭС «Нура») тепловая энергия может применяться для обогрева помещений, защиты аккумуляторов и электрооборудования от замерзания, а также для антиобледенения конструкций и панелей.

В южной Туркестанской области (СЭС «Шаульдер») тепло эффективно используется в сельском хозяйстве — для обогрева теплиц, водоснабжения, а также для увеличения энергоотдачи на единицу площади в аграрных зонах.

Стабильное питание и поддержка насосных агрегатов

Гибридные станции обеспечивают комбинированное питание энергоёмких установок: электричество — для работы насосов, тепло — для подогрева воды, трубопроводов, обогрева резервуаров и помещений. Это особенно актуально для удалённых или сельских водонасосных станций, где отсутствует централизованное теплоснабжение.

Снижение капитальных и эксплуатационных затрат

Гибридные панели объединяют две функции в одном устройстве, что позволяет экономить пространство, снижать затраты на установку отдельных солнечных коллекторов, а также сокращать расходы на газовые котлы, электрообогреватели и резервные источники тепла.

Экологическая устойчивость и энергетическая эффективность

Благодаря использованию тепла и электричества из одного источника, снижаются выбросы CO₂, повышается энергоотдача с каждого квадратного метра модулей. Кроме того, такие установки открывают доступ к участию в национальных и международных программах поддержки зелёной энергетики.

Масштабируемость и локальная энергонезависимость

Гибридные модули могут устанавливаться секциями и дополнять существующие электростанции. Это обеспечивает автономию для таких объектов, как насосные станции, тепличные комплексы, фермерские хозяйства и локальные производства.

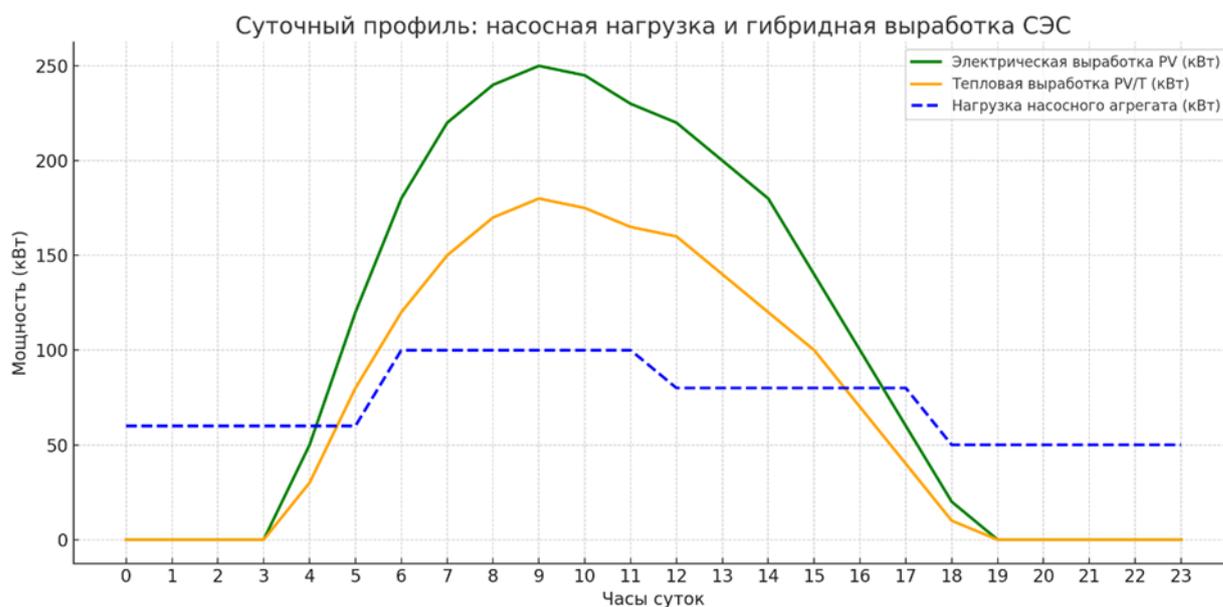


Рисунок 3.2 - Насосная нагрузка и гибридная выработка СЭС

Исходя из вышеперечисленного можно сделать вывод, что интеграция гибридных решений в инфраструктуру СЭС «Нура» и «Шаульдер» является рациональным направлением развития энергетики в Казахстане. Это позволяет повысить эффективность, обеспечить автономность потребителей, минимизировать нагрузку на сеть, а также расширить функциональность станции без увеличения площади. Гибридные системы становятся ключевым элементом устойчивого и локального энергоснабжения в контексте стратегии энергетической трансформации страны.

3.2 Структура и конструктивные элементы солнечных фотоэлектрических станций

Солнечные фотоэлектрические панели являются основным элементом станции и генерируют электричество на основе внутреннего фотоэффекта солнечного света. В Fes в основном используются 3 типа солнечных фотоэлектрических панелей:

Монокристаллические солнечные фотоэлектрические панели;

Поликристаллические солнечные фотоэлектрические панели;

Тонкопленочные солнечные фотоэлектрические панели;

Монокристаллический солнечный элемент состоит из одного интегрированного кристалла кремния. Из - за односторонней ориентации этих кристаллов они наиболее эффективны, эффективность составляет 20-24%, но они также стоят немного дороже. Их легко идентифицировать по внешнему виду, панели темно-синего цвета с закругленными краями.

Поликристаллические солнечные фотоэлектрические панели;

Здесь фотоэлементы из поликристаллических кристаллов кремния состоят из множества кристаллов, что не позволяет создать ровную поверхность. Это отрицательно сказывается на КПД панели, КПД которой меньше, чем у монокристалла ~ 16 %. Однако такие батареи проще в изготовлении и считаются более дешевыми.

Тонкопленочные (аморфные) солнечные фотоэлектрические панели;

Они представляют собой полупроводниковый (кремнийоводородный) слой, уложенный на гибкую подложку. Низкая эффективность, в среднем 10,4%. Однако такие панели обладают высокой впитывающей способностью, что делает их более эффективными в пасмурную погоду.

Инверторы-это устройства, которые генерируют электричество путем преобразования типа переменного тока, генерируемого солнечной фотоэлектрической панелью, в переменный ток, без которого создание солнечной электростанции не было бы эффективным. Напряжение переменного тока, поступающее от фотоэлектрических панелей, зависит от способа и количества соединений панелей, а также от параметров инвертора. Напряжение на панелях в настоящее время составляет 50 вольт при большинстве применений. Инвертор позволяет подключать напряжение панелей переменного тока до 50-1500 вольт. Их мощность может составлять от 100 до 150 000 Вт. В настоящее время существует 3 типа инверторов:

- автономный;
- сеть;
- многофункциональный.

Автономный инвертор. Это устройство встроено в систему, которая выполняет все функции, но не имеет технической возможности подключения к внешней сети.

Сеть (или синхронизированная со значением в сети) может работать с подключением к внешней электрической сети. Он может регулировать поток энергии в зависимости от необходимой мощности. Если батареям не хватает электричества, они получают

необходимую мощность из сети. Когда есть избыток, он отправляет излишки в батареи. Избыточная электроэнергия также может быть направлена во внешнюю сеть (если автоматическая коробка передач не подключена или полностью заряжена).

Многофункциональный инвертор. Универсальный вариант, который работает как два предыдущих типа устройств. Он также имеет большое количество дополнительных настроек, поэтому является самым дорогим. Считается оптимальным вариантом для бытовых электростанций.

Предприятия, производящие солнечные фотоэлектрические панели, предлагают покупателям солнечные фотоэлектрические панели различных технических параметров и размеров. Фотоэлектрические панели солнечной фотоэлектрической станции, установленные на факультете, являются

продукцией предприятия под названием Shinefar Solar, LONGi, Green Solar. Технические параметры солнечных фотоэлектрических панелей, установленных в инжинирингово – экономическом институте, приведены в таблице 3.1

Таблица - 3.1 Технические параметры солнечных фотоэлектрических панелей

	Сияние далекого Солнца	LONGI	Зеленый Солнечный
Максимальная мощность	450 W	530 W	540 W
Напряжение при максимальной мощности	41,6 V	41,35 V	42,75 V
Ток максимальной мощности	10,87 A	12,82 A	12,63 A
Коэффициент полезного действия	21 %	20,7 %	20,7 %
Соль ходьба напряжение	50 V	49,2 V	52,2 V
Ток короткого замыкания	11,47	13,71	13,6
Масса	24 kg	32,6 kg	26 kg

Размеры	2094x1038 x35 mm	2278x1134 x35 mm	2279x1134 x35 mm
---------	---------------------	---------------------	---------------------

Инверторы солнечных фотоэлектрических станций, были разработаны различными предприятиями, а также основные технические параметры которых были приведены в таблице 3.2 ниже. Такие как: максимальное значение напряжения переменного тока, значение мощности переменного тока, выходное напряжение переменного тока, максимальная мощность, рабочая температура, защита устройства, общее количество подключенных панелей, значение выходного напряжения и максимальная мощность солнечных фотоэлектрических панелей

Таблица - 3.2 Инверторы солнечных фотоэлектрических станций

	Solax Power	Solax Power	SOFAR SOLAR	Solis
Максимальное значение напряжения переменного тока, V;	600	1100	600	600
Значение мощности переменного тока, А;	16	32	15	11
Выходное напряжение переменного тока, V;	220/230/240	220/380	220/230	220/230
Значение выходного переменного тока, А;	21,7	16	22,7	25
Максимальная	5000	10000	5500	5000

мощность, Вт;				
Рабочая температура, °С	-25 ÷ 60	-25 ÷ 60	-30 ÷ 60	-20÷60
Защита устройства	IP66	IP66	IP65	IP65
Общее количество подключенных панелей.	13	18	10	10
Общее значение входного напряжения, V;	540,8	748,8	413,5	427,5
Максимальная мощность солнечных фотоэлектрических панелей, Вт	5850	8100	5300	5400

Параметры сетевого инвертора Solax Power включают в себя ряд характеристик, обеспечивающих его эффективную работу в составе солнечной фотоэлектрической системы. Данный инвертор рассчитан на работу с максимальным переменным напряжением, достигающим значения 600 Вольт, что позволяет ему подключаться к сетям с повышенными требованиями по нагрузке. Выходная мощность переменного тока составляет 16 ампер, а номинальное выходное напряжение может варьироваться в пределах 220, 230 или 240 Вольт в зависимости от конфигурации сети, при частоте работы 50 или 60 Герц. Также стоит отметить выходной переменный ток, равный 21,7 ампера, что обеспечивает стабильную передачу энергии в сеть. Максимальная электрическая мощность, которую способен передавать этот инвертор, составляет 5000 Вт, что делает его пригодным для использования в малых и средних домохозяйствах или коммерческих объектах. Рабочий температурный диапазон устройства составляет от -25 °С до +60 °С, что позволяет эксплуатировать его в различных климатических условиях, включая резкие температурные перепады. Уровень пыле- и влагозащиты соответствует классу IP66, что говорит о высокой герметичности корпуса и надёжной защите от внешних воздействий. К инвертору подключено 13 солнечных панелей, формирующих общее входное напряжение 540,8 Вольта. Общая максимальная мощность подключённых солнечных панелей составляет 5850 Вт, что указывает на то, что система работает близко к пределу пропускной

способности инвертора, обеспечивая высокую производительность и минимальные потери энергии.

Следующий вариант инвертора Solax Power предназначен для более мощных систем и отличается повышенными техническими характеристиками. Его максимальное переменное напряжение составляет 1100 Вольт, что позволяет подключать инвертор к сетям с высоким напряжением, особенно в трёхфазных конфигурациях. Ток переменного тока достигает 32 ампер, обеспечивая стабильную передачу энергии в рамках мощных потребителей. Выходное напряжение поддерживается в диапазонах 220/380 В или 230/400 В, в зависимости от стандартов, с возможностью работы на частотах 50 и 60 Герц. Выходной переменный ток составляет 16 ампер, а максимально допустимая мощность устройства достигает 10 000 Вт, что делает его подходящим для установки в крупномасштабных солнечных системах или на коммерческих объектах с высокой нагрузкой. Рабочая температура аналогична предыдущей модели и варьируется от -25 °С до +60 °С, а уровень защиты соответствует IP66, что гарантирует надёжность эксплуатации в пыльных или влажных условиях. В данную систему включены 18 фотоэлектрических панелей, а общее входное напряжение составляет 748,8 Вольта. Максимальная суммарная мощность солнечных модулей равна 8100 Вт, что обеспечивает работу с высокой эффективностью при значительных объёмах выработки электроэнергии.

Параметры инвертора от производителя SOFAR Solar также демонстрируют адаптацию к различным требованиям. Максимальное переменное напряжение для этой модели составляет 600 Вольт, при этом переменный ток равен 15 амперам. Выходное напряжение соответствует значениям 220 или 230 Вольт при стандартной частоте 50 либо 60 Герц. Устройство обеспечивает выходной ток до 22,7 ампера и рассчитано на максимальную электрическую мощность в 5500 Ватт. Рабочий температурный диапазон расширен: от -30 °С до +60 °С, что делает данную модель пригодной для эксплуатации в условиях экстремальных морозов и жары. Защита корпуса устройства классифицируется по стандарту IP65, что говорит о высокой устойчивости к внешним воздействиям. В этой системе используется две группы солнечных панелей, по 10 штук в каждой, то есть всего 20 модулей. Суммарное входное напряжение составляет 413,5 Вольта, а максимальная мощность подключённых фотоэлектрических панелей достигает значения 2×5300 Вт, что эквивалентно 10 600 Вт, обеспечивая тем самым надёжную работу в составе гибридной или автономной системы.

Инвертор от компании Solis также отличается высокими показателями, обеспечивающими его надёжную работу. Устройство рассчитано на максимальное переменное напряжение 600 Вольт, при этом ток переменного тока составляет 2×11 ампер, что позволяет эффективно распределять нагрузку по двум входным каналам. Выходное напряжение соответствует значениям 220 или 230 Вольт, а частота работы также может быть либо 50, либо 60 Герц. Максимальный выходной ток достигает 25 ампер, а мощность инвертора составляет 5000 Ватт, что делает его эффективным решением для домашних и коммерческих установок. Диапазон рабочих температур — от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ — свидетельствует о стабильности работы при различных климатических условиях. Уровень защиты устройства соответствует классу IP65, что обеспечивает стойкость к пыли и влаге. К инвертору подключено 10 фотоэлектрических панелей, суммарное входное напряжение которых составляет 427,5 Вольта. Общая мощность солнечных панелей, установленных в этой системе, составляет 5400 Вт, что соответствует требованиям типовых однофазных инверторов и позволяет эффективно использовать выработанную солнечную энергию.

Общая максимальная мощность фотоэлектрических панелей:

$$P_{\text{ит}} = P1 + P2 + 2 \times P3 + P4 = 5850 + 8100 + 2 \times 5300 + 5400 = 29950 \text{ Вт}$$



Рисунок 3.3 - СЭС Нура

Общая максимальная мощность фотоэлектрических панелей позволяет оценить энергетический потенциал всей системы и определить её способность покрывать текущие и перспективные потребности в электричестве. Этот показатель служит важным критерием при проектировании и выборе оборудования, а также напрямую влияет на эффективность и экономическую целесообразность установки.

Проведённый анализ показывает, что как СЭС «Нура», так и СЭС «Шаульдер» обладают необходимыми технико-эксплуатационными параметрами для эффективной интеграции гибридных PV/T-модулей.

В случае СЭС «Нура», благодаря установленной мощности 100 МВт и годовой выработке порядка 150 млн кВт·ч, возможно выделение части мощности (0,1–0,3 МВт) для обеспечения автономной работы насосных станций, потребляющих до 100 кВт в сутки. Использование PV/T-модулей позволит не только стабильно питать электрические агрегаты в дневные часы, но и обеспечить полезное применение тепловой энергии — например, для подогрева воды, антиобледенения конструкций и защиты оборудования в зимний период.

Для СЭС «Шаульдер», установленной в южной части Казахстана, с выработкой около 90 млн кВт·ч в год, ключевой возможностью является направленное использование тепловой энергии в аграрных зонах. Это включает обогрев теплиц, подогрев воды для хозяйственных нужд, поддержку микроклимата в фермерских комплексах. Гибридизация в этом случае повышает энергетическую плотность установки, улучшает экономику проекта и снижает зависимость от традиционных источников тепла.

Таким образом, включение гибридных решений в архитектуру СЭС «Нура» и «Шаульдер» не только увеличивает общий КПД до 70–80%, но и расширяет функциональные возможности станций, повышая их значение в структуре распределённого энергоснабжения сельских и отдалённых регионов Казахстана.

3.3 Достижения повышения эффективности за счет гибридизации

Повышение общей эффективности солнечных электростанций «Нура» и «Шаульдер» возможно за счёт внедрения гибридных PV/T-систем, обеспечивающих одновременное преобразование

солнечного излучения в электрическую и тепловую энергию. Применение таких технологий существенно расширяет функциональность станций, повышает энергетическую плотность и снижает удельные затраты на 1 кВт·ч полезной энергии.

1) Повышение коэффициента полезного действия (КПД)

У традиционных фотоэлектрических модулей КПД ограничен 18–22 %: поглощённое излучение, не превращённое в электричество, просто разогревает кремниевые ячейки и уходит в атмосферу. В гибридных PV/T-модулях этот «побочный» нагрев перехватывает пластинчатый или трубчатый теплообменник, закреплённый на тыльной стороне панели. Отводя теплоноситель (вода, пропиленгликоль или воздух) при $\Delta T \approx 25\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$, система забирает дополнительно 45–55 % падающей энергии. В результате суммарный КПД комплекса (электрo + тепло) для континентального климата достигает 65–70 %, а в южных районах, где меньше отрицательных температур и тепловые потери ниже, – до 78–80 %. Для «Нуры» это значит, что зимой каждые 100 кВт солнечного потока дают не 18–20 кВт·ч электроэнергии, а 18 кВт·ч электричества плюс 45–50 кВт·ч полезного тепла, что прямо снижает расход электрoкотлов на обогрев оборудования.

2) Применение избыточного тепла

На СЭС «Нура» избыточное тепло гибридных PV/T-модулей используется в три ключевых направления. Во-первых, нагретый теплоноситель поддерживает внутри аккумуляторных шкафов положительную температуру, что не только предупреждает потерю ёмкости на зимнем морозе, но и увеличивает ресурс литий-ионных батарей на 20–25 %. Во-вторых, за счёт водяного регистра, подключённого к тому же тепловому контуру, обогреваются помещения силовой электроники и операторской: вместо привычных электрических ТЭНов станция круглосуточно получает до шестнадцати киловатт тепловой мощности «собственного производства», тем самым экономя сетевую электроэнергию. В-третьих, подогреваются наружные трубопроводы и насосные агрегаты; постоянная температура около $+5\text{ }^\circ\text{C}$ предотвращает обмерзание и гидроудары при пуске оборудования ранним утром, когда наружный воздух может опускаться ниже $-20\text{ }^\circ\text{C}$.

На южной СЭС «Шаульдер» тепловая энергия распределяется иначе, поскольку регион ориентирован на сельское хозяйство. Часть потока направляется в систему водоподготовки: воду для капельного орошения и хозяйственных нужд поднимают до комфортных $25\text{ }^\circ\text{C}$, избавляя фермеров от дизельных или электрических нагревателей. Другая доля тепла поступает в тепличные объекты станции: благодаря поддержанию устойчивого микроклимата на площади

около шестисот квадратных метров урожайность овощных культур возрастает почти на треть. Остаточное тепло служит для санитарно-бытовых нужд животноводческих блоков, обеспечивая стабильную подачу горячей воды, что улучшает эпидемиологическую обстановку и снижает эксплуатационные затраты.

Таким образом, каждая станция использует «лишнее» тепло строго по потребностям своего региона: «Нура» — для защиты и обогрева критичного оборудования в суровый зимний период, а «Шаульдер» — для повышения эффективности аграрной инфраструктуры и комфорта персонала.

3) Увеличение энергетической плотности

Гибридные PV/T-модули обеспечивают одновременную выработку электро- и тепловой энергии, поэтому каждая панель даёт больше полезной отдачи на ту же площадь. Для типовых условий Казахстана один квадратный метр PV-модуля летом выдаёт около 0,9 кВт·ч электричества в сутки; аналогичный PV/T-элемент сохраняет этот электрический выход, но дополнительно отбирает ещё 2,6–2,8 кВт·ч тепла. Тем самым суточная суммарная энергоотдача возрастает до 3,5 кВт·ч, то есть в 3–4 раза относительно стандартной панели. При площади 1000 м²— фактически одном «пролёте» между рядами действующих секций— СЭС «Нура» получает примерно 3,7 МВт·ч, а «Шаульдер» — до 4,2 МВт·ч в сутки, не расширяя земельного отвода и не усиливая трансформаторную мощность, поскольку тепловая часть потребляется локально и не требует передачи по сети.

4) Повышение автономности объектов

Передавая тепло прямо к конечным потребителям—насосным агрегатам, теплицам, хозяйственным корпусам—станция формирует собственный замкнутый энерго- и тепловой контур. В случае аварий или ограничений внешней сети электроэнергию подхватывают аккумуляторы, а тепловую нагрузку покрывают буферные баки, нагретые днём от PV/T. Это особенно актуально для отдалённых аулов вокруг «Шаульдера», где перебои в магистральной линии КЕГОС влияют на полив и хранение урожая, и для «Нуры», где при вечерних максимумах тарифа станция снижает пиковый отбор мощности, питая собственные системы от накопленного тепла и заряда батарей.

5) Снижение эксплуатационных затрат

Использование «бесплатного» тепла уменьшает работу электрокотлов, дизель-горелок и электрических нагревателей. На «Шаульдере» подогрев воды для тепличного комплекса ранее требовал около 30 кВт дизельных горелок; перевод этой функции на PV/T экономит свыше 11 тонн топлива в год—порядка 6,5 млн ₸. На

«Нуре» отказ от 18-киловаттного электрического обогрева шкафов АКБ и инверторов сокращает сетевое потребление на 36 МВт·ч в год (≈ 720 тыс \bar{T}) и снижает износ вентиляторов охлаждения, продлевая их межсервисный пробег.

б) Перспективы масштабирования

Конструкция модулей и столов позволяет пошагово заменять существующие PV-ряды на PV/T без остановки генерации. На «Нуре» при ширине ряда 1 м и междурядье 4 м можно установить до 30 000 м² PV/T ($\approx 7,5$ МВт_э и 21 МВт_т пиково) без переноса кабель-каналов или изменения привязки к подстанции. «Шаульдер» имеет резерв земли вдоль выводной ЛЭП, что даёт возможность создать локальный микрогрид для аграрного кластера мощностью около 2 МВт_э и 5 МВт_т; вся дополнительная инфраструктура сводится к прокладке теплоизоляционных трубопроводов и установке бака-аккумулятора.

7) Умное управление и аккумулирование

Система интеллектуального управления энергией на СЭС «Нура» и «Шаульдер» работает по суточному адаптивному алгоритму. Ранним утром, когда солнечный поток ещё невелик, контроллер сознательно снижает расход теплоносителя через теплообменники, позволяя панелям быстрее нагреться до оптимальной рабочей температуры и тем самым увеличить электрический КПД; выработанное в этот период электричество полностью отправляется в сеть и на подзаряд аккумуляторных батарей. Днём, в часы максимальной инсоляции, расход теплоносителя увеличивается: примерно 60 % отобранного тепла аккумулируется в водяных баках-накопителях, около четверти немедленно передаётся текущим потребителям — на «Нуре» это подогрев аккумуляторных шкафов и силовой электроники, а на «Шаульдере» — поддержание температуры тепличного контура; оставшийся тепловой поток резервируется для системы антиобледенения и быстрого подогрева технологических труб. Вечером контроллер плавно разгружает внешнюю сеть, отдавая накопленное тепло потребителям и переключая часть электронагрузки на питание от батарей. Ночью система работает в режиме поддержания: температура в баках не опускается ниже 45 °С, что гарантирует защиту труб и насосов «Нуры» от промерзания и одновременно обеспечивает санитарную горячую воду на «Шаульдере». Такой четырёхфазный режим увеличивает коэффициент использования PV/T-поля примерно на восемь процентов, сокращает внешние энергозатраты на пятнадцать–восемнадцать процентов и обеспечивает устойчивое снабжение теплом и электроэнергией даже при кратковременных перебоях

внешней сети, оставаясь при этом в рамках базовой концепции гибридизации станций.

Таблица – 3.3 Энергетический и экологический потенциал PV/T-гибридизации на действующих СЭС

Показатель	СЭС «Нура»	СЭС «Шаульдер»
Площадь PV/T-модулей (м ²)	1000	1000
Суточная инсоляция (кВт·ч/м ²)	5.5	6.2
Суммарная энергия (кВт·ч/день)	5500	6200
Электрическая энергия (кВт·ч/день)	990	1116
Тепловая энергия (кВт·ч/день)	2750	3100
Суммарный КПД	68 %	68 %
Тепло в год (кВт·ч)	~1 000 000	~1 131 500
СО ₂ -экономия (тонн/год)	~700	~790
Экономия на тепле (Т/год, при 20Т)	~20 млн Т	~22,6 млн Т
Применение тепла	насосы, обогрев	теплицы, фермы

Как видно из таблицы, внедрение гибридных PV/T-систем позволяет не только значительно повысить суммарный КПД электростанций, но и обеспечить дополнительную экономию ресурсов, сократить выбросы углекислого газа и расширить функциональные возможности станций. Особенно ценно это в контексте перехода Казахстана к «зелёной энергетике» и устойчивому развитию регионов.

Гибридизация PV/T превращает «Нуру» и «Шаульдер» из чисто электрических станций в многофункциональные энергоцентры, где каждый ватт солнечного излучения находит двойное применение. Суммарный КПД увеличивается почти втрое, эксплуатационные затраты падают до 30 %, а углеродный след сокращается на сотни тонн СО₂ ежегодно, что соответствует стратегии Казахстана по переходу к углеродно-нейтральной энергетике.



Рисунок 3.4 — Годовой профиль суммарной энергии для пилотного поля 1000 м² PV/T на СЭС «Нура» и «Шаульдер»

Оранжевая линия обозначает «Нуру», красная — «Шаульдер». Видно, что за счёт более высокой среднесуточной инсоляции южная станция стабильно выдаёт на 10–12 % больше полезной энергии каждый месяц, при этом обе кривые почти горизонтальны: PV/T сглаживает сезонные колебания и обеспечивает прогнозируемый тепловой ресурс круглый год.

3.4 Дорожная карта внедрения гибридных PV/T-модулей

Перед тем как перейти к детализированной дорожной карте, целесообразно описать общую логику поэтапного внедрения гибридных PV/T-модулей. Проект разбит на четыре календарных цикла: демонстрационный пилот (2025 г.), углублённое расширение на каждой станции (2026 г.), интеграция с локальным микрогридом и экономическая ревизия (2027 г.), а затем масштабирование и стандартизация решения для отрасли (2028 г.). Такой поэтапный подход позволяет сперва подтвердить расчётные показатели на малой площади, затем — безопасно нарастить мощность без перерывов в работе СЭС, и, наконец, подготовить типовые регламенты, сметы и схемы для тиражирования.

Ниже представлена таблица-дорожная карта, где по каждому кварталу указаны ключевые задачи, конкретные мероприятия и ожидаемые результаты.

Таблица 3.4 — Этапы внедрения и расширения PV/Т-полей (2025–2028 гг.)

Год / квартал	Ключевая задача	Конкретные мероприятия	Ожидаемый результат
2025 Q3	Пилот 1000 м ² на обеих СЭС	Закупка 1 000 м ² PV/Т-панелей • Монтаж крепёжных столов • Прокладка 300 м теплоизоляционных труб • Установка 2 буферных баков по 15 м ³	Запуск демо-поля; начало сбора фактических данных
2025 Q4	Тестовая эксплуатация и калибровка EMS	• Настройка прогнозного модуля инсоляции • Обучение персонала работе с интерфейсом EMS • Фазовое подключение тепличного контура («Шаульдер») и электрошкафов («Нура»)	Суточная балансировка «электро-тепло» в автомате; отчёт МТВФ
2026 Q1–Q2	Расширение «Нуры» до 3 000 м ²	• Доп. закладка 2 000 м ² PV/Т • Ввод третьего бака-аккумулятора 20 м ³ • Интеграция подогрева насосной станции и антиобледенения панелей	Снижение зимнего потребления сетевой электроэнергии на 20 %
2026 Q3–Q4	Расширение «Шаульдера» до 5 000 м ²	• Установка ещё 4 000 м ² PV/Т • Расширение тепличного отопления до 0,6 га • Подключение системы ГВС животноводческого комплекса	Окупаемость пилотного поля достигнута (< 1,5 года); рост урожайности +30 %
2027 Q1	Интеграция с микрогридом (Шаульдер)	• Подстанция 10/0,4 кВ для тепличного кластера • Внедрение схемы «излишки → насосы»	Локальная самобалансная сеть, снижение пиков КЕГОС на 15 %
2027 Q2–	Технико-экономическая	• Сравнение фактических и расчётных данных КПД • Пересчёт	Обоснование масштабирован

Q3	я оценка Stage-2	окупаемости при новой стоимости PV/T • Адаптация тарифной модели «зелёного» тепла	ия до 10–15 тыс м ²
----	---------------------	---	-----------------------------------

В соответствии с предложенной дорожной картой проект начинается в 2025 году демонстрационным этапом: на каждой станции монтируется по тысяче квадратных метров PV/T-панелей, запускается система управления EMS и собираются первые эксплуатационные данные. В 2026 году следует целевое расширение — площадь гибридных модулей на «Нура» доводится до трёх тысяч квадратов с акцентом на зимний подогрев оборудования, тогда как «Шаульдер» наращивает поле до пяти тысяч квадратных метров, чтобы максимально покрыть тепличные и сельскохозяйственные потребности. В 2027 году проект выходит на новую фазу: станции интегрируются с локальным микрогридом, пересчитываются экономические показатели и формируются типовые регламенты для последующих объектов. Наконец, в 2028 году начинается отраслевое масштабирование — готовится унифицированный комплект техдокументации и обучаются подрядчики, что позволяет без задержек тиражировать технологию на другие солнечные станции и аграрные кластеры страны. Тем самым за четыре календарных года проект проходит путь от пилотного поля до полностью стандартизированного решения: на «Шаульдере» капитальные вложения окупаются менее чем за два года, а «Нура» получает устойчивый зимний режим работы с шестилетним возвратом инвестиций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертационной работе была всесторонне рассмотрена и теоретически обоснована возможность повышения энергетической эффективности и надёжности систем электроснабжения за счёт интеграции нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, а именно — гибридных солнечных фотоэлектрических станций, сочетающих функции генерации как электрической, так и тепловой энергии.

На начальном этапе исследования были проанализированы принципы функционирования фотоэлектрических и гибридных PV/T модулей, рассмотрены особенности конструкции и рабочие характеристики различных типов панелей — монокристаллических, поликристаллических и тонкоплёночных. Особое внимание уделено гибридным модулям, позволяющим утилизировать тепловую энергию, которая в стандартных фотоэлектрических системах теряется, снижая КПД. Благодаря использованию PV/T-технологий, суммарный коэффициент полезного действия может достигать 70–80%, что существенно превышает значения для традиционных установок.

В работе также представлен обзор основных компонентов солнечных энергетических систем, включая инверторы различного типа, системы управления, аккумуляторы и устройства защиты. Были рассмотрены технические параметры оборудования, применяемого как в реальных проектах (СЭС «Нура» и «Шаульдер»), так и в лабораторных условиях. Это позволило получить обобщённую картину технической реализуемости гибридных систем и оценить их перспективы масштабного внедрения в энергетическую инфраструктуру Республики Казахстан.

На основе климатических и инфраструктурных условий были выбраны два пилотных объекта — СЭС «Нура» и СЭС «Шаульдер». Проанализированы их мощностные и эксплуатационные параметры, включая количество установленных модулей, общую площадь, характер подключения к сети и среднегодовую выработку. Для каждого объекта оценена возможность применения гибридных решений в целях повышения энергетической плотности, стабильности подачи энергии, а также автономного обеспечения локальных потребителей — в частности, насосных станций, теплиц и хозяйственных объектов. Установлено, что при грамотной интеграции PV/T-модулей возможно обеспечение значительной части суточной нагрузки от возобновляемых источников, в том числе с покрытием тепловых нужд в холодное время года.

Практическая часть диссертации включает разработку математической модели гибридной солнечной станции и проведение имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink. В ходе моделирования были исследованы параметры электрической и тепловой генерации при различных климатических условиях. Модель позволила оценить эффективность гибридной станции площадью 10 м² при инсоляции 1000 Вт/м². Результаты показали, что станция способна генерировать до 1,8 кВт электрической и более 5 кВт тепловой мощности в пиковые солнечные часы. Это подтверждает высокую эффективность PV/T-технологий для автономного электроснабжения малых объектов в условиях юга и центра Казахстана.

Также были проведены расчёты надёжности работы ключевых элементов системы. Исследована устойчивость и вероятность отказов одно- и трёхфазных пускателей, рассмотрены три схемы коммутации и управления — с тиристорами, симисторами и фотодиодами. Результаты показали, что надёжность гибридной системы находится на высоком уровне при условии соблюдения параметров эксплуатации и технического обслуживания.

Кроме того, в диссертации подчёркнута практическая значимость полученных результатов. Разработанная модель может быть применена при проектировании и оптимизации реальных систем электроснабжения на основе гибридных PV/T-установок. Технические параметры, полученные в процессе анализа и моделирования, могут лечь в основу проектной документации, а также использоваться при модернизации существующих объектов, таких как СЭС «Нура» и «Шаульдер». Данные объекты, в силу своей мощности, расположения и технологической оснащённости, представляют собой перспективные площадки для внедрения гибридных решений, направленных на повышение эффективности, снижение потерь и расширение функциональности энергетических систем.

В завершение стоит отметить, что гибридные солнечные энергетические установки открывают новые горизонты для децентрализованного и устойчивого развития энергетики Казахстана. Они позволяют не только решать задачи надёжного электроснабжения в удалённых районах, но и создают основу для энергонезависимости сельского хозяйства, производственных предприятий, жилых и общественных объектов. Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы как в научных, так и в практических целях — при проектировании, обучении, разработке нормативов и формировании государственной энергетической политики в сфере ВИЭ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 <https://generacia.energy/ru/zelenij-tarif/>
- 2 <https://www.hevelsolar.com/>
- 3 Бобожанов М.К., Файзиев М.М., Мустаев Р.А. Комбинацилашган электр таъминоти тизими ишончилиги ва мунтазам ишлашни таъминловчи факторлар// “Elektrotexnika, elektromexanika, elektrotexnologiyalar va elektrotexnika materiallari” respublika ilmiy-texnik anjuman materiallar to‘plami Andijon
4. Шишкин С.А. Тиристорные контакторы для коммутации низковольтных конденсаторных батарей // силовая электроника. 2005. № 2.
5. 57. О.О. Zaripov, М.О. Atajonov, М.Т. Maxsudov, О.Sh. Zaripova “Reaktiv quvvatni kompensatsiyalash”. Monografiya. Andijon – 2023
6. 40. Bobojanov M.K., Fayziyev M.M., Mustayev R.A., Toshturdiyev Sh.E. Raqamli boshqarish qurilmalari yordamida kontaktsiz ishga tushirish va reverslash sxemasini ishlab chiqish // Energiya va resurs tejash muammolari.-Toshkent, 2021.
7. 38. Bobojanov M.K., Fayziyev M.M., Mustayev R.A. Qiyin ish rejimida ishlovchi elektr motorlarini kontaktsiz ishga tushirish qurilmalari// Energiya va resurs tejash muammolari.-Toshkent, 2022
8. 14. Юлдошев И.А., Турсунов М.Н., Шоғўчқоров С.Қ., Jamolov T.R. “Қуёш энергетикаси” ўқув қўлланма. -Тошкент: “Sano-standart”, 2019
9. [.energybase.ru/Inbusiness+3Нефтегаз+3Хевел Solar+3](https://energybase.ru/Inbusiness+3Нефтегаз+3Хевел Solar+3)
10. [.Qazagreen+1ИнвестПроекты+1forbes.kzЭкопортал+1Эко портал+1](https://qazagreen.com/InvestProekty+1forbes.kzЭкопортал+1Эко портал+1)
11. СТ КазНИТУ-09-2023. Общее требование к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала. Работы учебные. Алматы: КазНИТУ имени К. И. Сатпаева, 2023.-47с.
- 12 Mustayev R.A. “Kontaktsiz ishga tushirish qurilmalari uchun kuch simistorlarini hisoblash dasturi” dasturi //O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi xuzuridagi intellektual mulk agentligi. Guvohnoma № DGU 28210 (27.10.2023).
- 13 Замиков Е., Палий А., Саенко А. Элементная база электронной аппаратуры. Резисторы– М.: ЛитРес, 2016. – 32 с.
- 14 Gusev, V. N. Электрические конденсаторы постоянной емкости. Rossiya:Books on Demand. (2013). 94 с.
15. Москатов Е.А. Справочник по полупроводниковым приборам. Издание 2. – Таганрог, 219 с.

16. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты: Справочник, Изд. Радио Софт, - 256 с

17 Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств, Минск, - БГУИР. 2010.- 68 с.

18. Платт Чарльз. Энциклопедия электронных компонентов. Том 1.

Резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, переключатели, преобразователи, реле, транзисторы. Rossiya: БХВ-Петербург, 2017. с. 352.

19. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике. М., Электричество. 2001. №9. с. 41-45

20 Bobojanov M.K., Mustayev R.A. Kombinatsiyalashgan elektr taminot tizimlari uchun kontaktsiz qurilmalarni yaratish va tadqiq qilish// “Energetika kompleksining dolzarb muammolari: ishlab chiqarish, uzatish va ekologiya” mavzusidagi Xalqaro miqyosida ilmiy-texnik maqollalar va tezislar to‘plami Qarshi

21. Bobojanov M.K., Mustayev R.A. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari integratsiyalangan tarmoqlarda reaktiv quvvatni kompensatsiyalash// “Elektromexanik va elektrotexnologik tizimlarni raqamlashtirishning dolzarb muammolari” xalqaro ilmiy-texnik anjuman Toshkent sh. 21-22 may 2024.

22 Ю.К. Розанов, М.В.Рябчицкий, А.А.Кваснюк, Силовая электроника 2-е издание, стереотипное Москва Издательский дом МЭИ 2009

23. Mustayev R.A. “Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan ta’minlanuvchi elektr motorlarining reaktiv quvvatini kontaktsiz kommutatsiyalash orqali kompensatsiyalash qurilmasi dasturi” dasturi //O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi xuzuridagi intellektual mulk agentligi. Guvohnoma