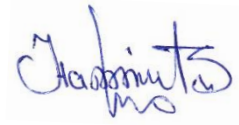


На правах рукописи



НАЗАРОВ МУСО ХОЛМУРОДОВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ АВТОНОМНОЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И  
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
(на примере системы Памира)**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Манусов Вадим Зиновьевич**

**Официальные  
оппоненты:** **Сальников Василий Герасимович**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский государственный  
университет водного транспорта», кафедра  
«Электроэнергетических систем и  
электротехники», профессор;

**Бубенчиков Антон Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Омский  
государственный технический университет»,  
кафедра «Электроснабжение промышленных  
предприятий», доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», г.  
Томск

Защита диссертации состоится «22» сентября 2022 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц -зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации <https://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Осинцев Анатолий  
Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время, после того как объединённая электроэнергетическая система Средней Азии разделилась на отдельные энергосистемы, на территории Республики Таджикистан все большую роль в электроснабжении потребителей как в частных, так и общественных секторах экономики, играют возобновляемые и альтернативные источники энергии. В значительной степени это соответствует высокогорным регионам, которые во многих случаях отделены от национальной энергетической системы (ЭЭС) Таджикистана и представляют собой автономные региональные энергосистемы. Наряду с этим, взаимные связи между альтернативными и возобновляемыми источниками генерации и электропотреблением усложняются, так как изменяются требования к балансу мощности при различных режимах, что обусловлено некоторой неопределенностью генерации мощностей источниками энергии и необходимостью подключения накопителей энергии.

При этом правительство Республики Таджикистан предложило перспективный путь развития электрификации отдаленных районов, сущность которого состоит в широком использовании региональных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в виде малых гидроэлектростанций (МГЭС), расположенных главным образом в высокогорных областях страны, и альтернативных источников энергии на основе ветровой и солнечной энергии. В качестве перспективного объекта исследования в данной работе выбрана автономная электроэнергетическая система Памира, расположенная в Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) Таджикистан; при этом она имеет возможность дополнительного экспорта электроэнергии в соседнюю страну. При этом поставлена задача комплексного рассмотрения трех стадий использования энергии, а именно: генерация, передача и распределения электрической энергии.

Для реализации этого пути были приняты некоторые законы и постановления в соответствии с программами краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного развития, основанные на использовании возобновляемых и альтернативных источников энергии. Главную роль в осуществлении этих планов играет предпочтение источникам малой распределённой генерации как приоритетному стратегическому направлению развития электроэнергетики высокогорных районов Таджикистана.

Таким образом, можно утверждать, что планирование режимов и их оптимизация в автономных электроэнергетических системах со значительной долей ВИЭ, включая альтернативные источники энергии, требует более высокого уровня интеллектуализации процессов выработки, передачи и распределения электроэнергии.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в научные исследования в планирование и выбора оптимальных режимов внесли отечественные и зарубежные ученые: Т.А. Филиппова, Е.В. Цветков, В.М. Горнштейн, В.И. Обрезков, Ю.А. Секретарев, В.Н. Горюнов, Н.И. Воропай, С.Г. Обухов, А.Г. Русина, О.С. Попель и другие.

Наряду с этим, развитию и применению альтернативных и возобновляемых источников энергии посвящены работы многих отечественных авторов, таких как:

Е.В. Соломин, Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, В.З. Манусов, С.Н. Удалов, Ю.Г. Шакарян, А.А. Бубенчиков и другие.

**Объект исследования** – автономная электроэнергетическая система со значительной долей возобновляемых и альтернативных источников энергии.

**Предмет исследования** – прогнозирование, планирование и оптимизация состава возобновляемых источников генерации энергии на суточном интервале времени.

**Цель работы:** разработка математических моделей и методов для оптимизации электропотребления в автономных электрических системах, включающих возобновляемые источники энергии с возможностью ее аккумуляции.

**Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:**

1. Выполнить анализ потенциального и возможного к использованию запаса возобновляемых источников энергии для локального высокогорного региона Памира республики Таджикистан.

2. Разработать методы краткосрочного прогнозирования скорости ветрового потока и солнечной инсоляции общего применения.

3. Провести исследование режимов альтернативных источников энергии в виде солнечной фотоэлектрической и ветровой электростанций.

4. Выполнить анализ и разработать метод планирования и оптимизации режимов автономных электроэнергетических систем.

5. Для снижения числа трансформации напряжения, с целью повышения качества функционирования региональной автономной энергосистемы разработать новую концепцию электрической сети на напряжение 20 кВ.

**Методы исследования:** теория искусственных нейронных сетей; методы оптимизации на основе линейного программирования и продукционных правил; методы анализа и балансирования установившихся режимов системы с учетом накопителя энергии.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Обоснована необходимость прогнозирования ветровой и солнечной энергии с помощью искусственной нейронной сети и структурно-параметрической оптимизации модели для достижения наибольшей точности.

2. Выдвинута и проверена новая в данной предметной области гипотеза об использовании для краткосрочного прогнозирования данных не всего временного ряда, а только отобранных часов суток.

3. Предложены метод и алгоритм оптимального планирования энергопотребления на основе линейного программирования и правил продукции для минимизации финансовых расходов отдельных генерирующих потребителей.

4. Предложена новая радикальная концепция исполнения автономной электрической сети Памира с исключением излишних трансформаций энергий и совпадения основного напряжения 20 кВ сопредельного государства.

**Практическая значимость и реализация работы:**

1. Разработана программная реализация предложенного метода и алгоритма оценки погрешности прогноза скорости ветрового потока и солнечной инсоляции “Построение нейросетевых моделей для прогнозирования энергетического потенциала альтернативных источников энергии”.

2. Установлены оптимальные углы наклона по азимуту панелей солнечной фотоэлектрической станции (СФЭС) для каждого из сезонов.

3. Разработан программный продукт “Оптимизация режимов электропотребления автономной электрической системы с распределенной генерации”.

4. Представлены акты внедрения в промышленность в энергетическую компанию ОАО "Памирская Энергетическая Компания", в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета и Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Оценка энергетического потенциала Республики Таджикистан, позволяющая предопределить возможности использования возобновляемых и альтернативных источников энергии.

2. Предложенный метод и алгоритм прогнозирования на основе адаптивных искусственных нейронных сетей для скорости ветрового потока и солнечной инсоляции повышает уровень достоверности результатов и как следствие уточняет прогноз мощности, вырабатываемой источниками энергии.

3. Обоснована и доказана целесообразность фиксированного положения фотоэлектрических панелей по азимуту для каждого из сезонов года, что позволяет повысить энергоэффективность солнечной станции.

4. Предложенный метод и алгоритм оптимального планирования электропотребления для определенного состава источников энергии позволяет снизить материальные и финансовые затраты электропотребителя.

5. Новая концепция конфигурации автономной энергетической сети на напряжении 20 кВ в исполнении самонесущих изолированных проводов позволяет избежать неоправданных трансформаций, снизить ремонтно - аварийные затраты и обеспечивает совпадения с напряжением 20 кВ сопредельного государства.

#### **Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.**

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам Паспорта специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

- пункт 6 – «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;
- пункт 8 – «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике»;
- пункт 13 – «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

**Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов,** подтверждается корректным использованием теории электроэнергетических систем, теоретических основ электротехники, статистических методов обработки данных, методов искусственного интеллекта в виде искусственных нейронных сетей с обучением, а также хорошей достоверностью метеорологических данных.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах и технических совещаниях:

- Международная научно-практическая конференция «Энергетика: состояние и перспективы развития», Таджикский технический Университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе 20 декабря, 2021 г.;
- Республиканская научно-практическая конференция «Наука – основа инновационного развития», Таджикский технический Университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе 27-28 апреля, 2021 г.;
- Первый Международный Научно-промышленный форум "Транспорт. Горизонты развития", г. Н. Новгород – Новосибирск, 25 – 28 мая 2021 г.;
- 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020, «Ural Smart Energy», Ekaterinburg, Russia, 13-15 November, 2020 г.;
- 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2019) June 29 - July 3, 2019 г., Erlagol (Altai Republic, Russia);
- XIV International scientific-technical conference “Actual Problems of Electronic Instrument Engineering”, APEIE-2018, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia 2-6 October, 2018 г.;
- Четырнадцатая международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения", АПЭП-2018, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, 2-6 октября 2018 г.

**Публикации.** По материалам исследований диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 работы в рецензируемых изданиях из перечня, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 4 работы индексированы в наукометрических базах Web of Science и Scopus, 5 работ в прочих изданиях. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 60 %.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего в себя 102 наименования и 2 приложений. Общий объем работы составляет 195 страниц, включая 51 таблиц и 100 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** в соответствии с мировым трендом развития электроэнергетики рассмотрено состояние и перспективы использования возобновляемых и альтернативных источников энергии на территории Республики Таджикистан. При этом современные энергетические системы переживают период серьезных изменений, а именно: децентрализацию и переход к локальным энергосистемам с распределённой генерации без централизованного электроснабжения.

В этих условиях использование возобновляемых источников энергии в качестве альтернативы традиционным, становится приоритетным направлением электроэнергетики. Исследователи ищут решения, чтобы получить наиболее надежный и эффективный способ производства электроэнергии с использованием

возобновляемых и альтернативных источников энергии. Так, повышенное внимание к технологиям использования возобновляемых источников энергии в таких крупных масштабах привело к постоянному снижению затрат на развитие технологии производства, хранения и преобразования «зеленой» энергии.

Регион Памира административно называется, как Горно-Бадахшанская автономная область, система электроснабжения которой, функционирующая на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии, в 2002 г. перешла от компании «Барки Точик» под контроль частной электрокомпании «Памир Энерджи» на срок 25 лет на основе концессионного соглашения и начала функционировать изолированно (автономно) от основной энергосистемы Таджикистана.

В настоящее время в ведении «Памир Энерджи» находится 11 гидроэлектростанций, из которых более крупные - ГЭС «Памир-1» и «Хорог», а также 9 малых ГЭС общей установленной мощностью 43,5 МВт. Три ГЭС из вышеперечисленного списка (ГЭС «Памир-1», ГЭС «Хорог», ГЭС «Намангут») работают на сеть (на общую нагрузку), причем ГЭС «Памир-1» и ГЭС «Хорог» находятся в каскаде на р. Гунт, а ГЭС «Намангут» находится на реке - р. Пяндж. Все другие 11 гидростанций функционируют в автономном режиме в отдельных районах.

В данной электрической системе используются линии электропередачи напряжением 35/10/0,4 кВ, общая протяженность которых составляет 2609 км. Для малых гидроэлектростанций Памира в зимние месяцы характерна недостаточная обеспеченность водными ресурсами, поэтому гидроэлектростанции, работая в заданном нагрузкой графике, используют естественный расход воды без перераспределения в суточном интервале. В связи с этим в зимний период ГЭС не могут покрывать максимальные нагрузки суточного графика в часы утреннего и вечернего максимумов. В зимнее время, когда во всех районах Памира наблюдается максимальный спрос на электроэнергию, малые ГЭС, не имеющие водохранилищ большой емкости, дают почти минимальную мощность.

Таким образом возникает острая необходимость использования альтернативных источников энергии, ветровой и солнечной, а также накопителя энергии.

**Вторая глава** посвящена разработке метода прогнозирования скорости ветрового потока и солнечной инсоляции на основе рекуррентной нейронной сети с обратной связью в виде коэффициента обратного распространения. При этом прогнозирование осуществляется для четырёх сезонов года. Рассмотрена два математических моделей прогнозирования, а именно: для многолетней непрерывной выборке и для отдельно выбранных часов на суточном интервале. Прогнозируемые значения возобновляемых и альтернативных источников энергии служат для более объективной оценки вырабатываемой мощности альтернативными источниками энергии.

В работе в качестве базовой архитектуры нейронной сети использован многослойный перцептрон с одним скрытым слоем (Рисунок 1).

Рассмотрено два вида моделей:

1. модель, принимающая на вход данные за все предыдущие часы в течение недели
2. модель, принимающая на вход данные только за предыдущие часы, совпадающие с прогнозным часом в течение месяца

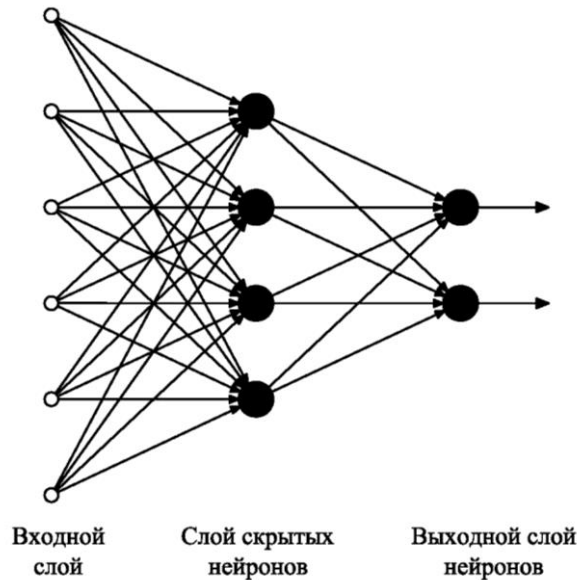


Рисунок 1 - Многослойный перцептрон

Второй вариант подразумевает, что, например, для прогноза скорости ветра на 14:00 31 января будут использованы данные о средних скоростях ветра в 14:00 1, 2, ... 30 января.

Оба варианта имеют следующий вид по слоям:

1. входной слой;
2. нейроны скрытого слоя;
3. выходной нейрон с сигмоидальной функцией активации.

Число нейронов скрытого слоя подбирается экспериментально.

Проведено исследование влияния функций активации нейронов скрытого слоя – ReLU и классической сигмоидальной представленные следующими выражениями:

$$f(s) = \max(0, x) \quad (1)$$

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (2)$$

Графическое отображение этих функций активации представлены на рисунке 2.

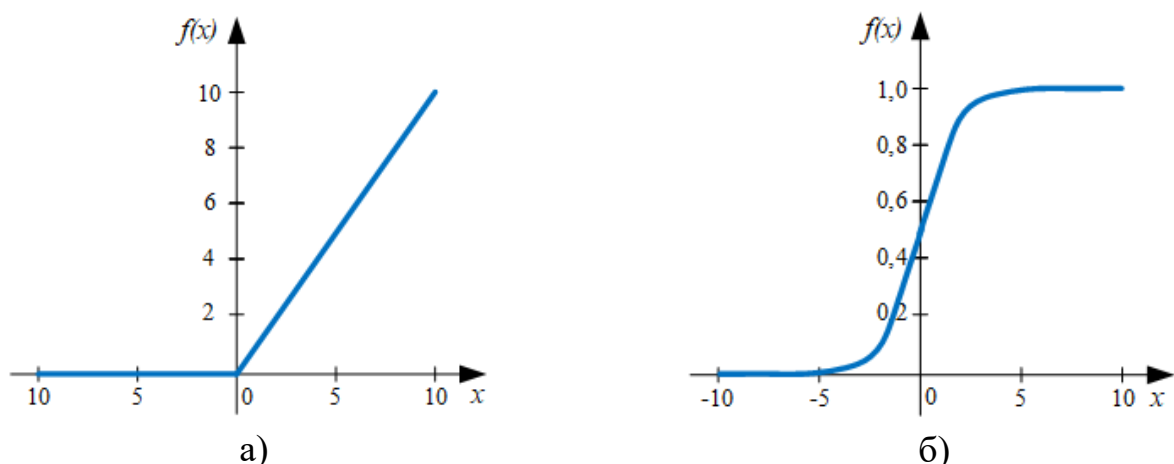


Рисунок 2 – Функция активации ReLU (а), и классическая сигмоидальная функция активации (б)



В данной работе использованы для алгоритмов обучения, основанных на стохастическом градиентном спуске: классический стохастический градиентный спуск (stochastic gradient descent) и адаптированный (Adam).

Если классический градиентный спуск можно описать выражением

$$W = W - \alpha dW, \quad (3)$$

то метод Adam будет представлен следующим образом:

$$V_{dW} = \beta_1 V_{dW} + (1 - \beta_1) dW \quad (4)$$

$$S_{dW} = \beta_2 S_{dW} + (1 - \beta_2) dW^2 \quad (5)$$

$$V_{dW}^{corr} = V_{dW} (1 - \beta_1^t) \quad (6)$$

$$S_{dW}^{corr} = S_{dW} (1 - \beta_2^t) \quad (7)$$

$$W = W - \alpha V_{dW}^{corr} \left( \sqrt{S_{dW}^{corr} + \varepsilon} \right)^{-1} \quad (8)$$

где  $W$  – матрица весов;  $dW$  – матрица градиентов;  $V_{dW}$  – матрица скорости изменения параметров;  $\beta_1, \beta_2$  – параметры баланса энергии;  $\alpha$  – шаг обучения.

**Анализ методов прогнозирования скорости ветрового потока на основе почасовых временных рядов.** На первоначальном этапе решена задача по прогнозированию значений на основе почасовых выборок скорости ветрового потока, поскольку диспетчерское управление в энергосистеме, как правило, ведется по каждому часу отдельно.

Ниже, в таблице 1 приведены результаты определения оптимального количества нейронов прогноза скорости ветрового потока при функции активации скрытого слоя ReLU, алгоритмом обучения адаптированный (Adam) и шаге обучения  $n=10^{-3}$ .

Таблица 1 – Относительная погрешность прогноза скорости ветрового потока зимой (Relu+Adam) с шагом  $n=10^{-3}$

Стадия обучения	Относительная погрешность	Количество нейронов, шт.						
		3	6	9	12	15	18	21
1	Обучения, %	31,750	30,100	31,124	29,946	27,104	26,036	30,628
	Валидации, %	30,898	29,506	30,446	29,414	27,324	27,066	29,846
2	Обучения, %	31,373	26,927	27,766	24,501	20,091	21,378	23,182
	Валидации, %	30,311	27,221	27,905	25,603	22,494	23,404	25,919
3	Обучения, %	30,559	24,897	26,533	21,576	17,123	18,681	19,659
	Валидации, %	29,825	25,616	26,636	23,993	20,922	21,746	22,521
4	Обучения, %	-	23,101	-	20,393	15,378	17,072	18,021
	Валидации, %	-	25,345	-	24,444	19,574	20,931	21,715
5	Обучения, %	-	22,904	-	-	-	-	17,097
	Валидации, %	-	24,806	-	-	-	-	20,290

Relu+Adam по обучению представлена на рисунке 3 а, по валидации на рисунке 3 б.

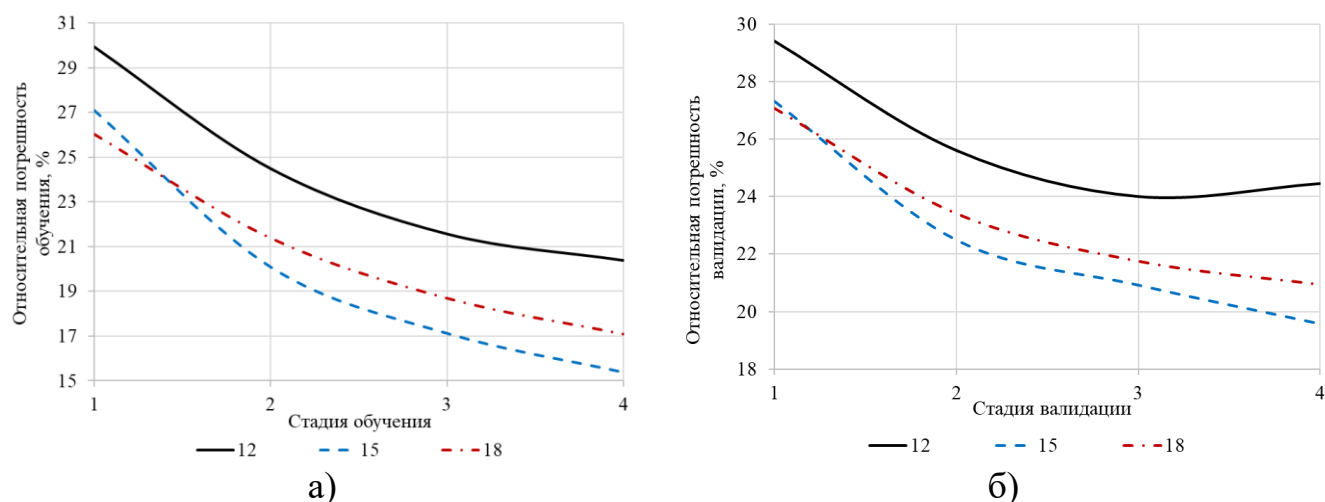


Рисунок 3 - Относительная погрешность прогноза скорости ветра зимой (Relu+Adam) с шагом  $n=10^{-3}$  (а – при обучении, б – при валидации)

Далее было выполнено исследование о влиянии шага обучения нейронных сетей на величину погрешности прогноза. Были выбраны значения шага обучения равной  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  (Таблица 2).

Таблица 2 - Относительная погрешность прогноза скорости ветра зимой (Relu+Adam) при 15 нейронах и изменении шага обучения

Шаг обучения	Относительная погрешность	Стадия обучения					
		1	2	3	4	...	15
$10^{-2}$	Обучения, %	31,975	32,081	-	-	...	-
	Валидации, %	31,065	31,530	-	-	...	-
$10^{-3}$	Обучения, %	27,104	20,091	17,123	15,378	...	-
	Валидации, %	27,324	22,494	20,922	19,574	...	-
$10^{-4}$	Обучения, %	34,425	33,467	32,762	32,366	...	23,105
	Валидации, %	35,380	32,403	31,869	31,540	...	24,549

Полные результаты исследований и сравнительный анализ методов определения погрешности прогнозирования скорости ветра для всех сезонов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Относительная погрешность прогноза скорости ветрового потока на основе почасовых временных рядов

Метод	Кол. нейронов, шт.	Шаг обучения	Относ. погрешность валидации %
Зима			
ReLU+Adam	15	$10^{-3}$	19,574
ReLU+Gradient	9	$10^{-3}$	31,083
Sigmoid+Adam	12	$10^{-3}$	30,210
Sigmoid+Gradient	15	$10^{-2}$	32,749
Весна			
ReLU+Adam	15	$10^{-3}$	26,113
ReLU+Gradient	6	$10^{-3}$	33,192
Sigmoid+Adam	6	$10^{-3}$	33,646
Sigmoid+Gradient	15	$10^{-2}$	33,781

Продолжение таблицы 3

Лето			
ReLU+Adam	12	$10^{-3}$	22,580
ReLU+Gradient	12	$10^{-3}$	25,204
Sigmoid+Adam	12	$10^{-3}$	25,244
Sigmoid+Gradient	3	$10^{-2}$	25,202
Осень			
ReLU+Adam	15	$10^{-3}$	27,783
ReLU+Gradient	18	$10^{-3}$	36,706
Sigmoid+Adam	12	$10^{-3}$	38,922
Sigmoid+Gradient	18	$10^{-2}$	38,977

Видно, что наилучший прогноз реализуется при использовании функции активации нейрона скрытого слоя ReLU совместно с методом обучения Adam.

**Анализ методов прогнозирования солнечной инсоляции на основе почасовых временных рядов.** На втором этапе аналогичным образом решена задача по прогнозированию значений солнечной инсоляции.

Ниже в таблице 4 представлены результаты исследований и сравнительный анализ методов определения погрешности прогнозов солнечной инсоляции для различных сезонов.

Таблица 4 – Относительная погрешность прогноза солнечной инсоляции на основе почасовых временных рядов

Метод	Кол. нейронов, шт.	Шаг обучения	Относ. погрешность валидации %
Зима			
ReLU+Adam	18	$10^{-3}$	5,550
ReLU+Gradient	18	$10^{-4}$	8,449
Sigmoid+Adam	3	$10^{-3}$	3,998
Sigmoid+Gradient	6	$10^{-4}$	10,811
Весна			
ReLU+Adam	12	$10^{-3}$	7,818
ReLU+Gradient	15	$10^{-4}$	8,332
Sigmoid+Adam	15	$10^{-3}$	7,226
Sigmoid+Gradient	6	$10^{-4}$	7,519
Лето			
ReLU+Adam	15	$10^{-3}$	8,164
ReLU+Gradient	12	$10^{-4}$	6,782
Sigmoid+Adam	12	$10^{-3}$	8,729
Sigmoid+Gradient	15	$10^{-4}$	8,616
Осень			
ReLU+Adam	6	$10^{-3}$	3,516
ReLU+Gradient	6	$10^{-4}$	9,592
Sigmoid+Adam	6	$10^{-3}$	2,642
Sigmoid+Gradient	12	$10^{-4}$	7,007

Видно, что наилучший прогноз реализуется при использовании функции активации нейрона скрытого слоя Sigmoid совместно с адаптивным методом обучения Adam.

**Анализ методов прогнозирования скорости ветрового потока и солнечной инсоляции по общей выборке временного ряда.** На следующем этапе для прогнозирования скорости ветрового потока и солнечной инсоляции использована общая выборка их ретроспективных данных значений за каждый сезон.

Выше было показано, что с точки зрения наименьшей относительной погрешности прогноза для прогноза скорости ветра дает сочетания ReLU+Adam.

Для солнечной инсоляции функции активация ReLU и Sigmoid при адаптивном обучении (Adam) дают примерно равные погрешности (7,2% и 7,8%). Поэтому для прогнозирования по общей выборке выбрано сочетание функции активации и метода обучения ReLU+Adam.

Результаты исследований и сравнительный анализ погрешности прогнозирования скорости ветра для всех сезонов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Относительная погрешность прогноза по общей выборке

Время года	Кол. нейронов, шт.	Шаг обучения	Относ. погрешность валидации %
Скорость ветра			
Зима	18	$10^{-3}$	37,763
Весна	15		42,124
Лето	18		31,905
Осень	18		37,568
Солнечная инсоляция			
Зима	12	$10^{-3}$	1,672
Весна	15		0,947
Лета	15		0,564
Осень	18		0,842

Видно, что наименьшая относительная погрешность прогноза будет для летнего сезона и составит около 30%, которую желательно уменьшить. Таким образом прогноз ветра по общей выборке хуже, чем по почасовым рядам (19 %).

Наоборот, для солнечной инсоляции наименьшая относительная погрешность прогноза для летнего сезона составила 0,5%, иначе говоря, прогноз по общей выборке является более точным по сравнению по почасовым рядам (2,6%).

**В третьей главе** проведено исследование режимов альтернативных источников энергии от солнечной фотоэлектрической и ветровой электростанций.

Для балансирования режимов в исследуемой автономной энергосистеме Памира на промышленной частоте, особенно в зимний период, целесообразно и необходимо привлечения дополнительных источников генерации электроэнергии на основе альтернативных источников энергии, а именно ветрового потока и солнечной инсоляции.

В данной главе дана потенциальная оценка максимальной активной мощности, которую можно получить на основе альтернативных источников энергии. При этом показано условия, когда солнечный трек будет отслеживаться полностью с помощью автоматических устройств и условия, когда угол наклона панели будет фиксирован в зависимости от сезона года.

**Оценка потенциальной мощности солнечной фотоэлектрической электростанции.** Отслеживая солнечный трек на суточном интервале времени, можно оценить максимальную мощность, выдаваемую панелями солнечной фотоэлектрической станции (СФЭС) при условии, что солнечные лучи будут всегда перпендикулярны по отношению к плоскости солнечных панелей. Для этой оценки использованы прогнозные знания солнечной инсоляции, которые получены во второй главе. В работе показано, что для балансирования режимов и резервирования необходимо две СФЭС установленной мощностью 3 МВт, каждая. При этом мощность каждой солнечной панели при габаритах 2205x1032x35 мм равна 465 Вт, а коэффициент полезного действия составляет 20,65 %.

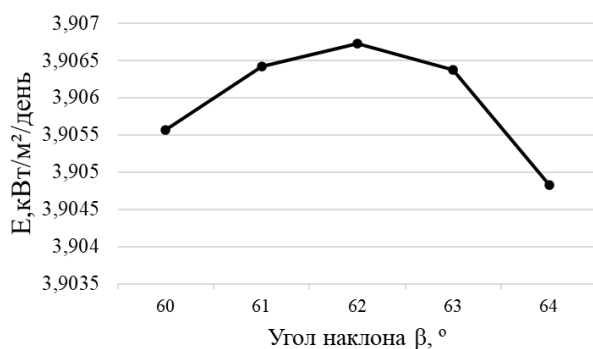
При проектировании солнечной электростанции, для более точного расчёта необходимо рассчитывать инсоляцию с учётом реальной ориентации в пространстве. Солнечные модули, установленные в различных местах станции, ориентированные по-разному, будут иметь различный угол склонения к горизонтальной поверхности и иметь различный азимут, что значительно влияет на величину получаемой инсоляции для конкретного модуля.

Расчёт инсоляции на произвольно ориентированную поверхность, осуществляется по формуле:

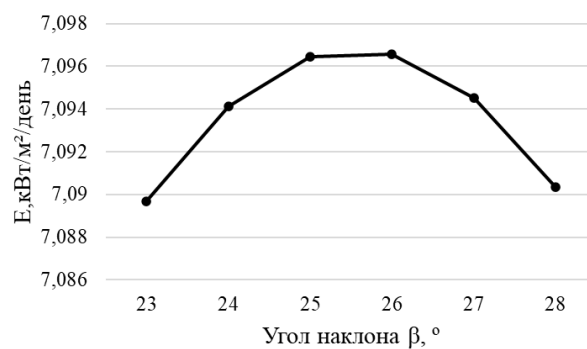
$$E = E'' \cdot \cos \theta \quad (9)$$

где  $E''$  - инсоляция на горизонтальную поверхность,  $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ;  $\theta$  – угол между направлением потока излучения и нормалью к поверхности приемник,  $^\circ$ .

Выбор оптимального угла для конструкции с изменяемым углом происходит, исходя из максимального значения прихода инсоляции на ориентируемую поверхность для каждого исследуемого характерного дня сезона (Рисунок 4-а, б, в, г).



а)



б)

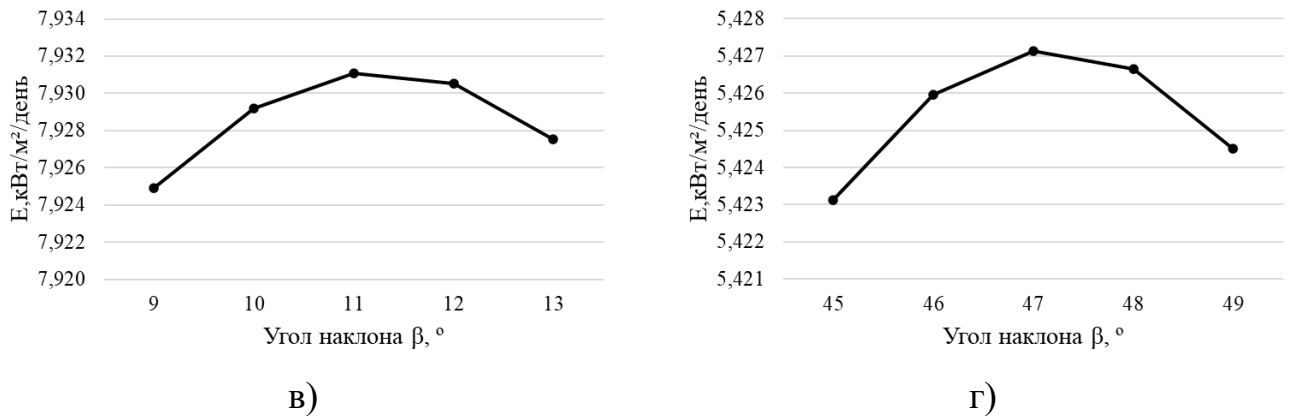


Рисунок 4 - Зависимость дневной инсоляции от угла  $\beta$  (а – зимний сезон; б – весенний сезон; в – летний сезон; г – осенний сезон)

Таким образом, фиксированный угол наклона солнечных панелей целесообразно устанавливать для каждого из сезонов, а именно:

- Зимой  $\beta = 62^\circ$ ;
- Весной  $\beta = 26^\circ$ ;
- Летом  $\beta = 11^\circ$ ;
- Осенью  $\beta = 47^\circ$ .

#### Оценка потенциальной мощности ветроэлектростанции.

Территория Памира имеет обширный потенциал использования энергии ветра, поскольку средняя годовая скорость ветра в этом районе на высоте 50 метров составляет 10,24 м/с, что является высоким показателем энергоэффективности.

Для данной энергосистемы выбрана суммарная установленная мощность ветрового парка 10 МВт, которая состоит из 6 ветроустановок мощностью по 1,650 МВт. В соответствии с паспортными данными, выработка мощности начинается со скорости ветра 4 м/с. При достижении скорости 15 м/с вырабатывается номинальная мощность. В диапазоне 15–25 м/с поддерживается номинальная мощность ветроустановок.

Мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ) напрямую зависит от скорости ветрового потока, который сильно изменяется во времени, от местной погоды и поверхности местности. Зависимость между скоростью ветра, проходящего через ометаемую площадь установки и мощности выражается следующим образом:

$$P = A \cdot C_p \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2} \quad (10)$$

где  $\rho$  - плотность воздушного потока ( $\text{кг/м}^3$ ), зависящая от температуры и давления воздуха;  $A$  - площадь поверхности, ометаемая лопастями ( $\text{м}^2$ );  $V$  - скорость ветра (м/с);  $C_p$  - коэффициент эффективности ветроустановки;  $\lambda$  - коэффициент быстроходности.

Оценка потенциальной вырабатываемой мощности ветроэлектростанции для характерных дней каждого сезона показана на рисунке 5.

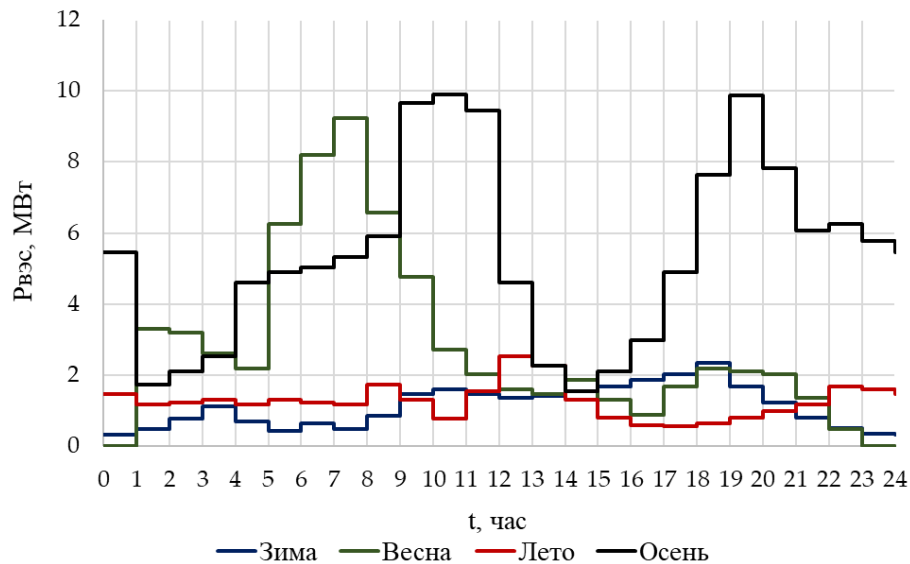


Рисунок 5 - Выработка мощности ВЭС для характерных дней каждого сезона

Видно, что наибольшая мощность ВЭУ развивается весной и осенью.

**Обоснование установки и выбор накопителей энергии.** Одним из важнейших компонентов работы любой автономной электростанции является накопление энергии в связи с некоторой непредсказуемостью выработки мощности альтернативными источниками энергии. Накопитель энергии позволяет обеспечить оптимальную работу ветряной электростанции в безветренную или маловетренную погоду, либо на период планового или аварийного ремонта, расходуя запасённую энергию.

Так как применение накопителей энергии в виде литий-ионных аккумуляторов хорошо известна, в настоящей работе предпринята попытка применения сверхпроводящих индукционных накопителей (СПИН). При этом следует отметить, что в работе также рекомендовано применение трансформатора с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками.

Преимуществами использования СПИН являются:

- накопление энергии во время избыточного ветрового потока или солнечной инсоляции и ее расходование в периоды недостаточности генерации от источников;
- выравнивание графиков нагрузки автономной энергосистемы на суточном интервале;
- увеличение надежности передачи и распределения электрической энергии;
- демпфирование низкочастотных колебаний в сети;
- поддержка электропитания во время перерывов электроснабжения ответственных потребителей;
- быстроедействие, достигающее миллисекунд, что позволяет реагировать на быстротекущие аварийные процессы в энергосистеме;
- экологическая чистота.

Для исследуемой автономной энергосистемы Памира выбран один СПИН мощностью 5 МВт, который установлен в узле рядом с ветроэнергетической установкой.

**В четвертой главе** рассмотрены основные режимы электропотребления в энергосистеме с учетом их сезонности. Электропотребители данного региона

Таджикистана в связи с дефицитом электроэнергии имеют возможность самостоятельно установить дополнительные генерирующие источники энергии в виде ветроэнергетических установок, солнечных фотоэлектрических станций и накопителя энергии для ее сохранения.

**Формирования математической модели оптимального электропотребления.** Основная задача работы состоит в том, чтобы предложить оптимальное соединение 11 потенциалов малой гидроэнергетики вместе с ветровыми и фотоэлектрическими системами, что будет представлять собой гибридную систему электроснабжения. Безусловно это повышает надежность и качество функционирования системы.

Уравнение баланса мощности для данной автономной системы будет иметь следующий вид

$$P_{ГЭС} + P_{ВЭС} + P_{СЭС} \pm P_{Н.Э.} = P_H + \Delta P, \quad (11)$$

где  $P_{ГЭС}$  – мощность гидроэлектростанций;  $P_{ВЭС}$  – мощность ветростанций;  $P_{СЭС}$  – мощность солнечных станций;  $P_{Н.Э.}$  – мощность накопителей энергии;  $P_H$  – потребляемая мощность нагрузки;  $\Delta P$  – потери электроэнергии при передаче и распределении.

Уравнение баланса в интегральной форме выглядит следующем образом

$$\int_0^{24} P_{ГЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{ВЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{СЭС}(t)dt \pm \int_0^{24} P_{Н.Э.}(t)dt = \int_0^{24} P_H(t)dt + \int_0^{24} \Delta P(t)dt, \quad (12)$$

Задача минимизации финансовых расходов отдельного генерирующего электропотребителя решается на основе минимизации целевой функции в предположении, что почасовые измерения мощности и энергии численно совпадают

$$\sum_{i=1}^{24} R_i P_{ГЭС} + \sum_{i=1}^{24} R_i P_{ВЭС} + \sum_{i=1}^{24} R_i P_{СЭС} \pm \sum_{i=1}^{24} R_i P_{Н.Э.} = \sum_{i=1}^{24} P_{H_i} + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_i, \quad (13)$$

где  $R_i$  – почасовой расход электроэнергии от данного вида источника генерации;  $P_{ГЭС}$  – мощность потребляемая от ГЭС в  $i$ -й час;  $P_{ВЭС}$  – мощность потребляемая от ВЭС в  $i$ -й час;  $P_{СЭС}$  – мощность потребляемая от СЭС в  $i$ -й час;  $P_{Н.Э.}$  – мощность потребляемая от накопителей энергии в  $i$ -й час

В связи с тем, что целесообразно минимизировать финансовые затраты каждого отдельного электропотребителя, выражение 13 необходимо записать с учетом индивидуальной стоимости каждого альтернативного или возобновляемого источника энергии

$$\left( C_{ГЭС} \cdot \sum_{i=1}^{24} R_i P_{ГЭС} + C_{ВЭС} \cdot \sum_{i=1}^{24} R_i P_{ВЭС} + C_{СЭС} \cdot \sum_{i=1}^{24} R_i P_{СЭС} \pm C_{Н.Э.} \cdot \sum_{i=1}^{24} R_i P_{Н.Э.} \right) \rightarrow \min, \quad (14)$$



где  $C_{ГЭС}$  – стоимость электроэнергии, выработанной на ГЭС;  $C_{ВЭС}$  – стоимость электроэнергии, выработанной на ВЭС;  $C_{СЭС}$  – стоимость электроэнергии, выработанной на СЭС;  $C_{Н.Э.}$  – стоимость электроэнергии, аккумулированной на Н.Э.

В случае профицита энергии подобное уравнение можно записать для максимизации доходов

$$\left( k \cdot C_{ГЭС} \cdot \sum_{i=1}^{24} G_i P_{ГЭС} + k \cdot C_{ВЭС} \cdot \sum_{i=1}^{24} G_i P_{ВЭС} + k \cdot C_{СЭС} \cdot \sum_{i=1}^{24} G_i P_{СЭС} \pm k \cdot C_{Н.Э.} \cdot \sum_{i=1}^{24} G_i P_{Н.Э.} \right) \rightarrow \max, (15)$$

где:  $G_i$  – избыток электроэнергии в  $i$ -й час для каждого источника энергии;  $k$  – коэффициент доходности от продажи электроэнергии

Наряду с этим, исходя из баланса мощности в часы максимума суточного графика нагрузки выбраны накопители для сохранения энергии с учетом непредсказуемости генерации “зеленой энергии”. Исходя из этого, указанные выше уравнения необходимо решать при ограничениях в форме неравенств, а именно:

$$12 \leq P_{ГЭС} \leq 43,5 \text{ МВт}; 0 \leq P_{ВЭС} \leq 10 \text{ МВт}; 0 \leq P_{СЭС} \leq 6 \text{ МВт}; 0 < P_{Н.Э.} \leq 5 \text{ МВт}.$$

Кроме того, в качестве дополнительного электропотребителя должна быть учтена возможность передачи электроэнергии в сопредельное государство, который закупает избыточную энергию в случае ее профицита в автономной энергосистеме.

**Алгоритм решения и его программная реализация.** В данной работе выбран в качестве математического метода оптимизации метод линейного программирования. В целом задача линейного программирования может быть сформулирована так: найти некоторый вектор значений переменных, обеспечивающих экстремум линейной функций при ограничениях в форме равенств и неравенств.

Для выполнения исследований разработано программное обеспечение для оптимального планирования выбора состава генерирующих источников на суточном интервале времени. Алгоритм программы основан на методе линейного программирования с использованием нижеприведенных условий в виде правил продукции.

– правило продукции потребления электроэнергии, вырабатываемой ГЭС

ЕСЛИ ( $P_{ГЭС} < P_H$ ) ТО

$$RP_{ГЭС} = P_{ГЭС} \text{ и } OP_{ГЭС} = 0$$

ИНАЧЕ

$$RP_{ГЭС} = P_H \text{ и } OP_{ГЭС} = P_{ГЭС} - P_H$$

На рисунке 6 приведен алгоритм решения задачи для этих правил продукции.

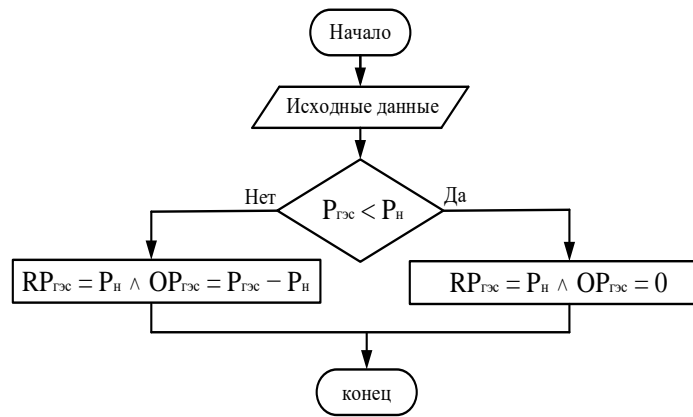


Рисунок 6 - Блок-схема алгоритма потребления электроэнергии, вырабатываемой ГЭС

Подобным образом предложены правила продукции и алгоритмы электропотребления полученной от ВЭС, СЭС и НЭ.

Для накопителя электроэнергии правила продукции заряда от различных альтернативных и возобновляемых источников энергии формулируются отдельно с учетом ограничений в форме равенств и неравенств. При этом установлены следующие приоритеты накопления энергии: первоначально от ГЭС, затем от ВЭС и далее от СЭС. Алгоритм заряда накопителя от энергии, вырабатываемой ГЭС представлен на рисунке 7.

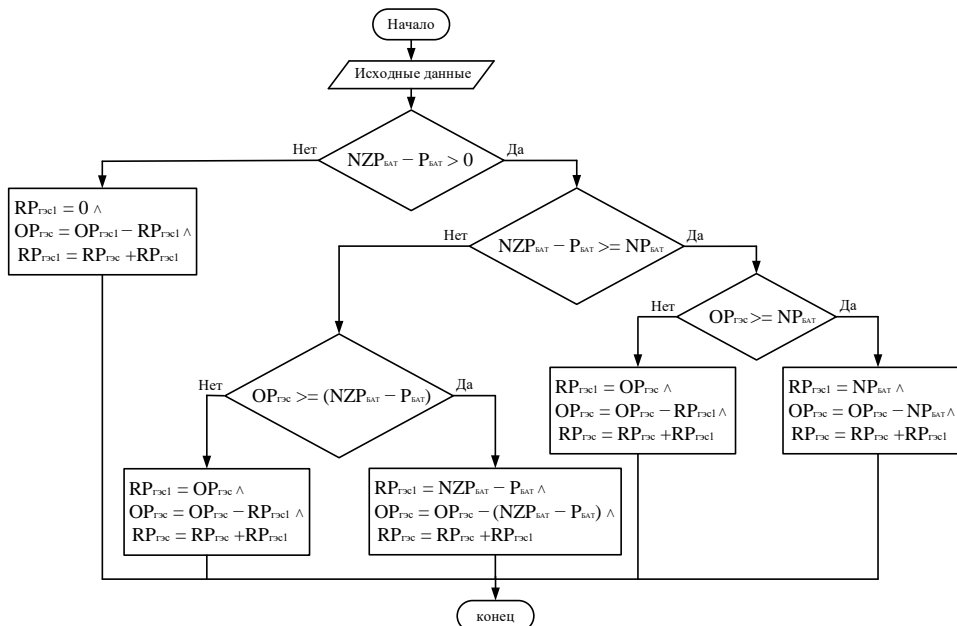


Рисунок 7 - Блок-схема алгоритма заряда накопителя от энергии, вырабатываемой ГЭС

Наряду с этим составлены алгоритмы заряда накопителя от энергии генерируемой ВЭС и СЭС.

Уравнения режима накопления и расхода энергии для накопителя энергии на час вперед выглядит следующим образом:

$$P_{БАТ}(+) = P_{БАТ} + RP_{ГЭС1} + RP_{ВЭС1} + RP_{СЭС1} - RP_{БАТ} \quad (16)$$

В целом, минимальные финансовые затраты электропотребителей на суточном интервале зимнего дня будут достигнуты при следующем соотношении альтернативных источников генерации и накопителя энергии (рисунок 8).

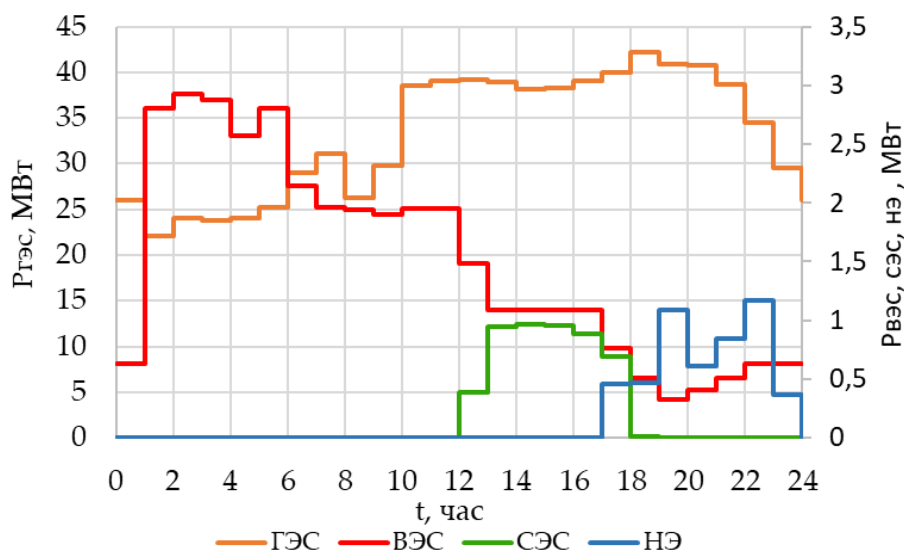


Рисунок 8 - Выбор генерирующих источников и накопителей энергии для минимизации финансовых затрат на электропотребление

Показано, что благодаря оптимальному управлению электропотребления на каждом часе суточного интервала времени может быть достигнута минимизация финансовых затрат на электропотребление, как в целом для региона, так и для каждого электропотребителя, если он имеет собственные источники альтернативной генерации энергии. Такой подход является новым и соответствует инновационному предложению на краткосрочную перспективу развития региона.

**Анализ установившихся режимов автономной электроэнергетической системы.** Автономная энергосистема Памира в настоящее время содержит чрезмерное количество трансформации электроэнергии, а именно: 0,4 кВ; 6 кВ; 10 кВ; 20 кВ; 35 кВ, что значительно усложняет эксплуатацию и аварийно-ремонтные работы. Кроме того, в сопредельном государстве используется более современная система электроснабжения, основанная на самонесущих изолированных проводах (СИП) 20 кВ. В связи с этим, в настоящей работе предложена новая концепция построения электрической сети на одном напряжении 20 кВ с использованием СИП, что существенно сокращает полосу отчуждения линии электропередачи в условиях горной местности и хорошо стыкуется с системой сопредельного государства.

Для существующей сети трансформации напряжения рассчитано потокораспределение до и после подключения альтернативных источников энергии. При этом суммарные потери активной и реактивной мощности составляют: до подключения –  $\Delta P_{\Sigma}=2,19$  МВт,  $\Delta Q_{\Sigma}=5,12$  МВАр; после подключения –  $\Delta P_{\Sigma}=1,26$  МВт,  $\Delta Q_{\Sigma}=3,85$  МВАр. Иначе говоря, потери активной мощности снижаются на 42,3 %, а реактивной на 24,8 %. Падение напряжения в узлах до подключения источников было около 16%, а после снизилось до 8%.

На следующем этапе рассмотрено выполнение электрической сети с исключением промежуточных напряжений 35 и 10 кВ. При этом вся сеть автономной энергосистемы переводится на СИП напряжением 20 кВ. При этом потери активной и реактивной мощности составило:  $\Delta P_{\Sigma}=2,2$  МВт,  $\Delta Q_{\Sigma}=2,55$  МВАр. При этом отклонения напряжений в узлах не превышают 10 % от номинального напряжения.

Кроме того, рассчитан вариант с сохранением напряжения 35 кВ между узлами ГЭС Памир и ДЭС в конструктивном исполнении СИП, в связи с достаточно большой длиной этой линии. По сравнению с исходным режимом данное конкретное исполнение электрической сети дает наилучший результат как в отношении снижения потерь активной и реактивной мощности, так и в отношении наименьшего отклонения напряжения в узлах. По сравнению с исходным режимом потери активной мощности снизились 53,5 %, а реактивной – 52,4 %. Отклонение напряжения в узлах для данного исполнения составляет менее 6%.

**В пятой главе** дано технико-экономическое обоснование использования альтернативных источников энергии. Каждому отдельному электропотребителю предоставлена возможность повышать свою энергоэффективность путем минимизации финансовых затрат в зависимости от той или иной доли использования возобновляемых и альтернативных источников энергии. Решение задачи осуществляется для каждого часа на суточном интервале времени. Оптимальное распределение финансовых затрат электропотребителя для характерного зимнего дня представлено в таблице 6.

Таблица 6 - Оптимальное распределение финансовых затрат электропотребителя на суточном интервале времени

Время, час.	Ргэс, руб.	Рвэс, руб.	Рсэс, руб.	Ракб, руб.	Сум. руб.
1	37553	6722,4	0	0	44275,4
2	40963,2	7032	0	0	47995,2
3	40495,7	6904,8	0	0	47400,5
4	40871,4	6172,8	0	0	47044,2
5	42826,4	6736,8	0	0	49563,2
6	49371,4	5148	0	0	54519,4
7	52798,6	4718,4	0	0	57517
8	44738,9	4665,6	0	0	49404,5
9	50722,9	4574,4	0	0	55297,3
10	65628,5	4680	0	0	70308,5
11	66475,1	4672,8	0	0	71147,9
12	66731,8	3571,2	1170	0	71473
13	66213,3	2604	2847	0	71664,3
14	64870,3	2604	2892	0	70366,3
15	65157,6	2604	2856	0	70617,6
16	66420,7	2604	2655	0	71679,7
17	67916,7	1828,8	2073	1638	73456,5
18	71714,5	1224	27	1674	74639,5
19	69502,8	770,4	0	3920,4	74193,6
20	69292	979,2	0	2188,8	72460
21	65837,6	1224	0	3027,6	70089,2
22	58738,4	1507,2	0	4226,4	64472
23	50270,7	1507,2	0	1324,8	53102,7
24	44247,6	1507,2	0	0	45754,8
Сумма					1478442

Таким образом, электротребитель может минимизировать свои финансовые затраты в зависимости от предпочтительности использования генерирующего источника на суточном интервале.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложении** к диссертации содержатся государственные свидетельства о регистрации разработанных программ для ЭВМ и документы, подтверждающие внедрение данной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Показано, что на территории Республики Таджикистан сосредоточены большие запасы гидроэнергии, величина которого составляет около половины гидроэнергетических запасов Центральной Азии. В настоящее время в Таджикистане нет промышленного использования потенциала солнечной энергии. Особенности климатического расположения данной территории достаточно благоприятны для применения солнечной энергии. Обширное использование солнечной энергии в Таджикистане позволило бы обеспечить четверть государственного спроса на электроэнергию. При этом годовой потенциал солнечной энергии оценивается в 25 млрд. кВт·ч.

Ресурсы ветровой энергетики в Таджикистане могут быть оценены следующими величинами:

- валовой потенциал – 62214,6 МВт;
- технический потенциал – 3852,7 МВт;
- экономический целесообразный потенциал – 1926,35 МВт

2. Определено, что не только из-за принципиальных отличий прогнозирования солнечной и ветровой энергии, но и ввиду отличий между временами года создание единой универсальной модели даст меньшую точность, чем адаптация модели к решаемой задаче. Причем речь идет не только об обучении модели, но и о выборе ее архитектуры (числа нейронов скрытого слоя). Таким образом, на используемых в работе данных экспериментально обосновано, что для прогнозирования солнечной и ветровой энергии с помощью искусственной нейронной сети требуется решение задачи структурно-параметрической оптимизации модели для достижения наибольшей точности. Число нейронов скрытого слоя составило от 12 до 18 в зависимости от задачи.

3. В работе на основе алгоритма контроля за процессом обучения нейронной сети с определением оптимального числа эпох обучения определены оптимальные с точки зрения точности прогнозирования гипер-параметры многослойного перцептрона: число нейронов скрытого слоя, алгоритм обучения, шаг обучения, функции активации нейронов скрытого слоя. Алгоритм позволяет найти момент, когда процесс обучения модели переходит в стагнацию или поиск ложных зависимостей, за счет этого можно сократить время обучения и предотвратить переобучение модели. Вычислительные эксперименты, проведенные отдельно для каждого сезона и вида энергии, показали, что предпочтительными для рассматриваемой задачи являются метод обучения нейронной сети – Adam с шагом обучения  $10^{-3}$ , функция активации нейронов скрытого слоя ReLU. Данный вывод

может быть использован в будущем в подобных исследованиях для сокращения трудозатрат на подбор указанных гипер-параметров модели.

4. Отдельно выдвинута и проверена новая в данной предметной области гипотеза об использовании для краткосрочного прогнозирования данных не всего временно ряда, а только отобранных часов суток, совпадающих с прогнозным часом. Для прогноза скорости ветра гипотеза повысила точность, средняя ошибка снижена с 37 до 24 %. Для солнечной инсоляции гипотеза не подтвердилась, так как с ее использованием средняя ошибка повышается с 1 до 5 %.

5. Обоснован выбор и идеология построения солнечной фотоэлектрической станции с фиксированным углом наклона, который в зависимости от сезона года изменяется в пределах 11°, 26°, 48°, 62°, что позволяет сократить эксплуатационные расходы на построение и обслуживание этих станций.

Наряду с этим, выбраны ветроустановки типа Vestas V66 в количестве 6 штук общей установленной мощностью около 10 МВт. Используя прогнозные значения скорости ветра, дана оценка энергетического потенциала ветростанции по сезонам года.

6. В связи с непредсказуемостью скорости ветрового потока предусмотрена установка в узле, где находится ветростанция накопителя для сохранения энергии. Выполнен анализ конструктивного исполнения и энергоэффективности источников сохранения энергии и показана высокая эффективность накопителей на сверхпроводящей диэлектрической среде – жидком азоте, а именно: сверхпроводящей индукционный накопитель (СПИН). Одновременно с этим рассмотрены возможности применения трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками и определены их электрические параметры при различной мощности.

7. Показано оптимальное соотношение генерации энергии альтернативными источниками от суточного электропотребления в зимний период. При этом в летний период в оптимальном выборе источников генерации нет необходимости, так как вся электрическая нагрузка может быть восполнена энергией гидроэлектростанций региона.

8. Предложены метод и алгоритм оптимизации энергопотребления для минимизации финансовых расходов отдельных генерирующих потребителей. Оптимизация основана на методе линейного программирования с переменными ограничениями на суточном интервале. Системный анализ показывает, что каждый генерирующий потребитель может самостоятельно минимизировать свои затраты на электроэнергию и максимизировать выгоду от обмена.

9. Предложена и обоснована новая радикальная концепция построения электрической сети автономной энергосистемы Памира путем исключения лишних трансформаций напряжения на основе преобладания номинального напряжения 20 кВ с использованием системы самонесущих изолированных проводов, что позволяет значительно повысить пропускную способность, увеличить натуральную мощность линии электропередачи, улучшить качества напряжения электрической сети путем снижения потерь реактивной мощности в два раза и согласовать уровень напряжения с зарубежной сетью для экспорта электроэнергии.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК*

1. М.Х. Назаров. Оптимизация режимов электропотребления автономной электрической системы с возобновляемыми и альтернативными источниками энергии / В.З. Манусов, М.Х. Назаров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – №4(153). – С. 810–820.

2. М.Х. Назаров. Оценка энергетического потенциала солнечной радиации региона с применением солнечного трекера / В.З. Манусов, Д.С. Ахьёев, М.Х. Назаров, И.Н. Одинаев, М.Х. Сафаралиев // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – №1(78). – С. 189–203.

3. М.Х. Назаров. Проектирование силовых трансформаторов со сверхпроводниковой обмоткой с использованием 3d модели / В.З. Манусов, М.Х. Назаров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – №3-4. – С. 191–196.

### *Публикации в изданиях, входящие в наукометрических баз данных Web of Science и Scopus*

4. Nazarov M. Optimal Management of Energy Consumption in an Autonomous Power System Considering Alternative Energy Sources / Manusov V., Nazarov M., Matrenin P., Beryozkina S., Safaraliev M., Zicmane I., Ghulomzoda A. // Mathematics–2022. – №3. – T10. – 525. – 17 P.

5. Nazarov M. Energy consumption conditions optimization of the autonomous system based on carbon-free energy / Manusov V., Nazarov M. // Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020, «Ural Smart Energy». – 2020. – pp. 93–96.

6. Nazarov M.K. Analyses of electrical parameters of power transformers with superconducting windings / Manusov V.Z., Nazarov M.K., Ivanov D.M. // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. – 2019. – pp. 547–551.

7. Nazarov M.Kh. Design and perspectives for innovative application of power transformers with a superconducting winding / Manusov V.Z., Nazarov M.Kh. // Actual problems of electronic instrument engineering (apeie) - proceedings APEIE - 2018. 14th international scientific-technical conference. – 2018. – pp. 290 –294.

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях и материалах международных, всероссийских конференций*

8. М.Х. Назаров. Выбор оптимальных режимов электропотребления в автономной системе с возобновляемыми источниками энергии / В.З. Манусов, М.Х. Назаров, Р.И. Кода, Б.В. Палагушкин // Речной транспорт (XXI век). – 2021. – №3(99). – С. 60–63.

9. М.Х. Назаров. Выбор оптимальных режимов электропотребления изолированной энергосистемы на основе возобновляемых источников энергии / В. З. Манусов, Дж.С. Ахьеев, Ш.А. Бобоев, М.Х. Назаров // Материалы науч.-практ. конф.-выставки: «Дни возобновляемых источников энергии в Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими», Душанбе, 1-2 июня 2021 г. – 2021. – С. 71–83.

10. М.Х. Назаров. Планирование и оптимизация режимов автономной энергосистемы Памира / В.З. Манусов, М.Х. Назаров, Ш.А. Бобоев // Материалы Республиканская научно-практическая конференция: «Наука – основа инновационного развития», Душанбе, 27-28 апреля 2021 г. – С. 495–500.

11. М.Х. Назаров. Оценка энергии солнечного потенциала Памира / В. З. Манусов, Дж.С. Ахъев, М.Х. Назаров, Д.А. Абросимов // Материалы международная научная конференция «Энергетика: состояние и перспективы развития», Душанбе, ТТУ им. акад. М.С. Осими, – 2021. – С. 113–119.

12. М.Х. Назаров. Проектирование и перспектива инновационного применения силовых трансформаторов со сверхпроводниковой обмоткой / В.З. Манусов, М.Х. Назаров // Материалы четырнадцатой международной научно-технической конференции: «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018», Новосибирск, НГТУ, – 2018. – С. 251–256.

### *Зарегистрированные программы для ЭВМ*

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613134 – (программа «Построение нейросетевых моделей для прогнозирования энергетического потенциала альтернативных источников энергии»), дата выдачи 11 марта 2020 г.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617121 – (программа «Оптимизация режимов электропотребления автономной электрической системы с распределенной генерации»), дата выдачи 3 июня 2019 г.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 x 84/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ №1150. Подписано в печать 28.06.2022 г.