

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОЗАПРАВОЧНЫМИ СТАНЦИЯМИ

Докладчик: Шамарова Наталия Андреевна,
стар. преподаватель ЭиЭ ФГБОУ ВО ИРНИТУ

Организация: Иркутский политех

Научный руководитель: Шушпанов Илья Николаевич,
к.т.н., доцент ЭиЭ ФГБОУ ВО ИРНИТУ

27.11.2024



СОДЕРЖАНИЕ

- Актуальность.
- Цель и задачи.
- I. Принципы построения модели определения оптимальных параметров системы накопления электрической энергии в системе электроснабжения
- II. Разработка метода моделирования профиля нагрузки электрозарядных станций и генерации ВЭС с учетом неопределенности
- III. Моделирование системы электроснабжения, включающие СНЭЭ, ВЭС и ЭЭС
- IV. Выбор параметров СНЭЭ на основе многокритериального подхода
- Выводы

АКТУАЛЬНОСТЬ

Текущее состояние электрозаправочной инфраструктуры [1]

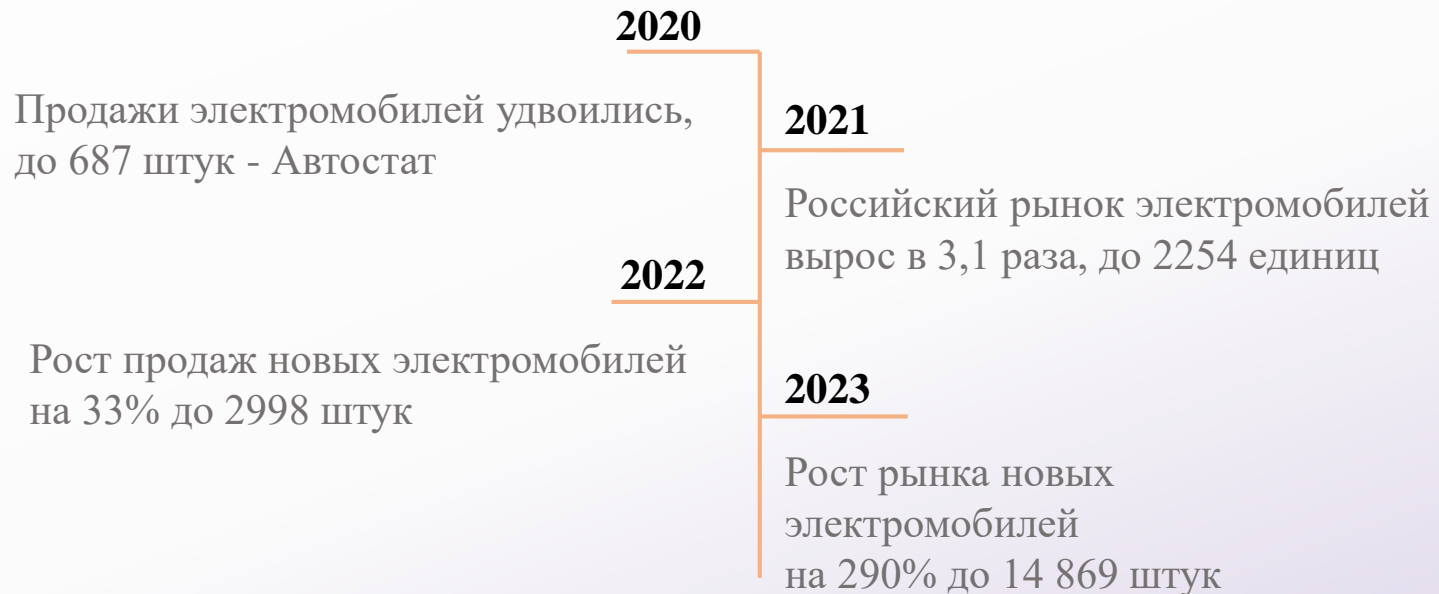
- 1** — **2015 год**
Начало активного развития ЭЗС в России
- 2** — **2015-2021 годы**
Рост числа ЭЗС в 33,2 раза
- 3** — **2021 год**
71 электромобиль на 1 ЭЗС в России
- 4** — **2021 год (для сравнения)**
14 электромобилей на 1 ЭЗС в Германии

1. По данным «Автостата»
2. Аналитический центр при правительстве РФ
<https://ac.gov.ru/>

Ежегодный прирост

Потребность в
увеличении
мощности на 1,2 ГВт
в год

Продажи и рынок электромобилей [1]



Влияние роста электромобилей на энергетический сектор [2]



ПРОБЛЕМАТИКА

Особенности спроса на зарядку электромобилей:

Концентрация в городских районах

Основной спрос на зарядку электромобилей сосредоточен в городах с уже сформированной системой электроснабжения. Это создает дополнительную нагрузку на существующую инфраструктуру.

Развитие междугородней инфраструктуры

Необходимость в создании сети ЭЗС вдоль автомагистралей требует решения проблем с передачей достаточной мощности в удаленные районы.

Потребность в быстрой зарядке

Растущий спрос на станции быстрой зарядки, которые требуют значительной мощности в короткие промежутки времени, создает дополнительные вызовы для системы электроснабжения.

Пиковые часы потребления

Наибольшая потребность в зарядке возникает в часы пик, что совпадает с периодами максимальной нагрузки на электросети. Это усугубляет проблему перегрузки системы.



Проблемы интеграции ЭЗС в существующую систему электроснабжения

Качество электроэнергии

Высокая нагрузка от станций быстрой зарядки может привести к ухудшению качества электроэнергии, включая колебания напряжения и гармонические искажения. Это негативно влияет на работу других потребителей.

Надежность энергоснабжения





Увеличение пиковой нагрузки от ЭЗС снижает резервный запас мощности системы, что может привести к перебоям в энергоснабжении и снижению общей надежности сети.

ВЫЗОВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Перспективы развития ЭЭС

Фактор	Влияние на развитие ЭЭС
Стоимость присоединения	Высокая, сдерживает рост
Ограничения сетей	Значительные, требуют модернизации
Технология V2G	Позволяет владельцам электромобилей становиться «просьюмерами» — не только потреблять мощность, но и выдавать ее обратно
Управление спросом	Разработка стратегий управления спросом, включая внедрение службы бронирования, ценовое регулирование для сглаживания пиковых нагрузок, связанных с массовой зарядкой электромобилей.
Интеграция с ВИЭ и СНЭЭ	Учет возможностей использования СНЭЭ, солнечной или ветровой энергии для зарядки электромобилей, что может снизить нагрузку на сеть и сделать зарядку более экологичной.

Характеристики системы накопления электрической энергии

-  **Компенсация пиков**
СНЭЭ позволяют накапливать энергию в периоды низкого потребления и отдавать ее в сеть во время пиковых нагрузок, сглаживая график потребления.
-  **Время отклика**
Современные СНЭЭ способны реагировать на изменения нагрузки в миллисекундном диапазоне, обеспечивая стабильность напряжения и частоты.
-  **Повышение надежности**
СНЭЭ могут служить резервным источником питания при кратковременных отключениях, повышая общую надежность энергоснабжения ЭЭС.
-  **Оптимизация ресурсов**
Использование СНЭЭ позволяет оптимизировать использование существующих мощностей СЭ, снижая потребность в дорогостоящей модернизации

ПРОБЛЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЗС

Целевая функция методов оптимизации при планировании ЭЗС:

Потребители

Удобство расположения и доступность

Инвесторы

Максимизация прибыли и минимизация затрат

Характеристики системы электроснабжения

Стабильность напряжения, надежность, потери мощности

В большинстве методах недостаточно раскрыты следующие условия:

- анализ всех участников, как со стороны потребителей, так и системы электроснабжения (СЭ) и инвесторов ЭЗС при размещении ЭЗС.
- подходы к интеграции распределенной генерации как ВИЭ в СЭ с ЭЗС, для поддержания бесперебойной работы микросети и ЭЗС
- стохастические модели прогнозирования неопределенности нагрузки для учета диапазона колебания нагрузки ЭЗС и ее влияние на СЭ, а также прогнозирования неопределенности генерации от ВИЭ
- оптимизация работы микросети и ЭЗС с помощью СНЭЭ
- расположение ЭЗС с учетом оценки надежности СЭ

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СНЭЭ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ограничения		Публикации																	%								
		Sufyan M., 2019	Yang Y., 2013	Narayan N., 2018	Shin H., 2020	Dulout J., 2017	Lan H., 2015	Shang Y., 2020	Carpinelli G., 2017	Soltani N., 2020	Yue M., 2015	Bahramirad S., 2012	Knap V., 2015	Bhusal N., 2021	Baloyi T., 2021	Luo Y., 2014	Astaneh M., 2018	Arabali A., 2014		Awad A., 2015	Zhang Y., 2017	Alsaidan I., 2017	Zhang Y., 2018	Fioriti D., 2022	Amini M., 2021	Huo D., 2022	Tahir H., 2022
Сеть	Баланс	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	64%
	Неопределенность	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓							✓	✓	✓	✓				✓	✓	60%
	Стоимость							✓																			4%
	Надежность										✓				✓	✓	✓	✓			✓						24%
СНЭЭ	Деградация							✓					✓		✓					✓	✓	✓	✓			28%	
	Стоимость			✓				✓												✓		✓	✓	✓	✓	✓	28%



Неопределенность нагрузки ЭЭС и генерации ВИЭ

Недостаточный учет стохастичности ВИЭ и нагрузки ЭЭС приводит к неточностям в оценке параметров СНЭЭ.



Деградация СНЭЭ

Отсутствие учета деградации СНЭЭ может привести к неверной оценке их эффективности и надежности в долгосрочной перспективе.



Стоимость расширения и надежность системы электроснабжения

Недостаточное внимание к экономическим аспектам и показателям надежности при оценке оптимальных размеров СНЭЭ и ВИЭ.



Ограниченность методов анализа в условиях многокритериальности

Ограниченное применение многокритериальных методов анализа ограничивает возможности комплексной оценки влияния различных факторов.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Существующие проблемы

Сложность планирования ЭЗС с учетом спроса и расположения в существующие сети, требующие реконструкцию для присоединения дополнительной мощности ЭЗС

Сложность моделирования нагрузки ЭЗС, которая характеризуется большой дисперсией

Трудность в разработке и оценке оптимального размера СНЭЭ

Подходы решения

Моделирование работы и оценка параметров СНЭЭ и ВИЭ для поддержания работы ЭЗС в сетях с низкой пропускной способностью.

Разработка модели нагрузки электрозаправочных станций с учетом ее стохастичности за счет применения усовершенствованного метода Монте-Карло.

Методика оптимизации оценки параметров СНЭЭ на основе многокритериального анализа с учетом стохастичности генерации ВИЭ и потребления электроэнергии от ЭЗС

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель исследования:

Разработка методики оценки оптимальных параметров накопителей электрической энергии в системах электроснабжения с электрозаправочными станциями

Задачи:

- Выполнение анализа текущего состояния исследований СЭ и определение требований к оптимальной оценке параметров СНЭЭ. Выявление необходимых критерий, от которых зависит выбор параметров СНЭЭ, и проведение их количественной оценки.
- Формулирование методических принципов моделирования СНЭЭ в системе электроснабжения.
- Разработка математической модели для описания работы СЭ с учетом совместного функционирования СНЭЭ, ВЭС и ЭЗС.
- Разработка метода моделирования нагрузки ЭЗС с учетом ее стохастичности.
- Разработка комплексной методики оптимизации оценки параметров СНЭЭ с учетом стохастичности генерации ВЭС и потребления электроэнергии от ЭЗС, деградации СНЭЭ, надежности и стоимости модернизации СЭ для поддержания бесперебойной работы ЭЗС.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

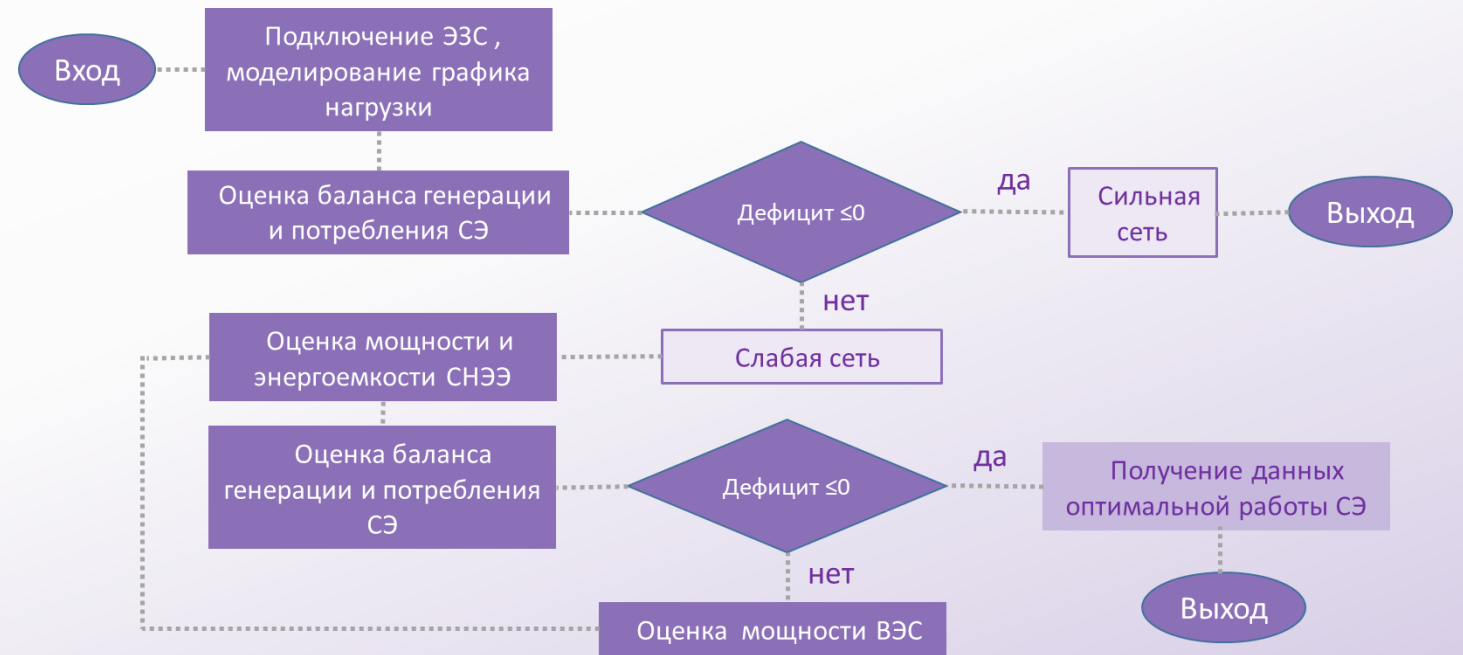
- Методические принципы моделирования СНЭЭ в системе электроснабжения с учетом стохастичности генерации на основе ВИЭ и потребления электроэнергии электрозаправочных станций.
- Модель нагрузки электрозаправочных станций с учетом ее стохастичности. Предложена модель на основе усовершенствованного метода Монте-Карло применительно к нагрузке электрозаправочных станций.
- Методика оптимизации оценки параметров СНЭЭ на основе многокритериального анализа.

**I. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

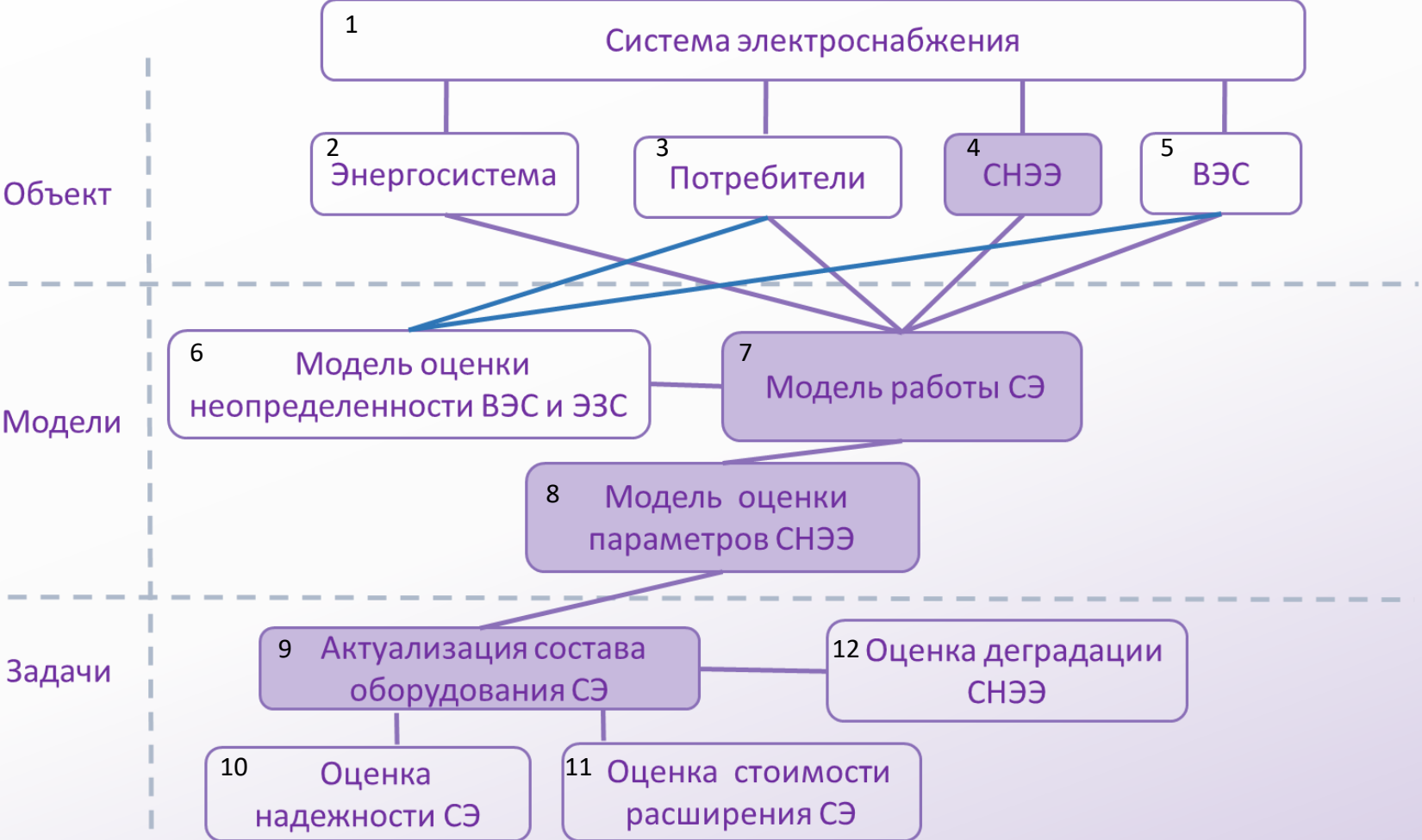
1.1 ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Требования к разрабатываемой модели:

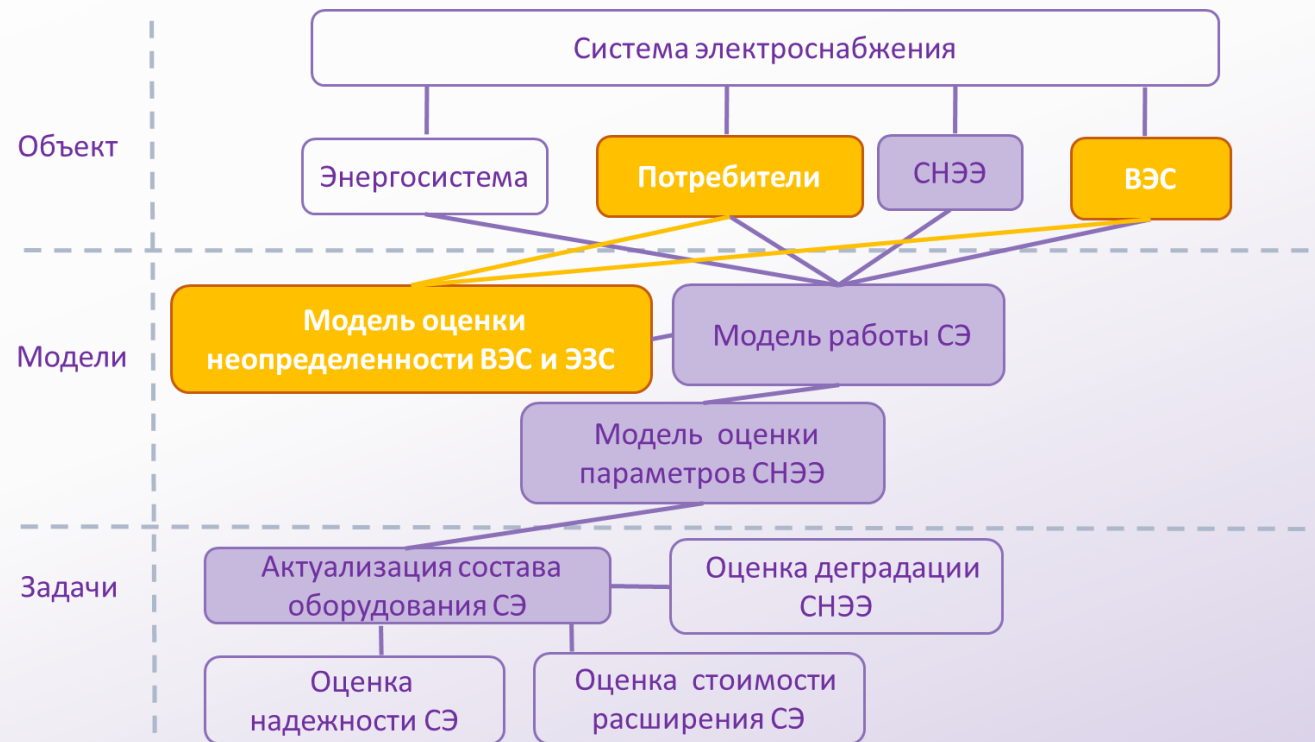
1. Модель должна обеспечивать соблюдение **ограничений по балансу**, а также оценивать дефицита и профицита мощности системы электроснабжения.
2. Модель должна включать оценку **неопределенности нагрузки ЭЭС** и **генерации ВЭС**.
3. Модель должна включать **оценку деградации СНЭЭ** в различных режимах работы. Выбор модели деградации должен основываться на особенности функционирования СНЭЭ в условиях стохастичности заряда-разряда и нелинейном характере деградации.
4. Модель должна включать **экономические показатели** и **показатели структурной надежности** модернизированной системы электроснабжения.



1.2 ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СНЭЭ



II. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ И ГЕНЕРАЦИИ ВЭС С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ



2.1 АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ НАГРУЗКИ ЭЭС

В работе метод Монте-Карло используется для создания профиля нагрузки с учетом нескольких случайных составляющих и расчета выходных переменных, что позволяет учесть неопределенность нагрузки ЭЭС:

- время начала зарядки автомобиля ($T_{нач}$);
- мощность, потребляемая k -м автомобилем (P_k);
- продолжительность зарядки ($T_{зар}$);
- количество подключаемых автомобилей ($N_{день}$).



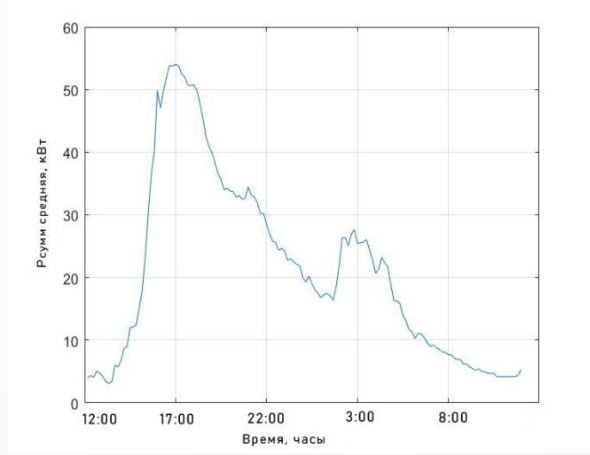
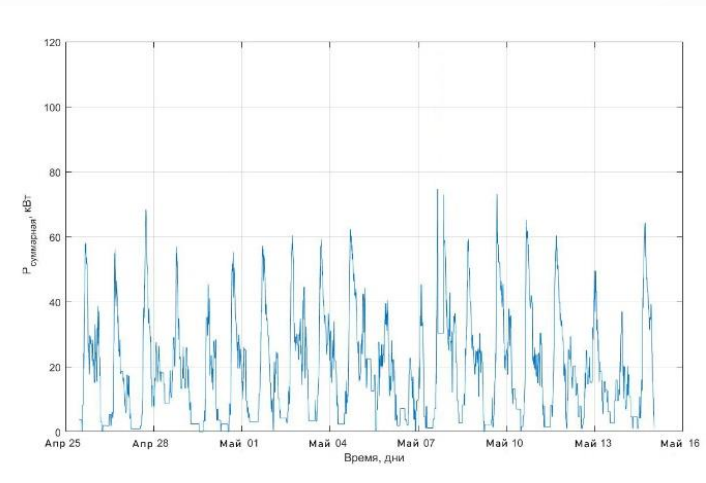
2.2 ВХОДНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Входные данные моделирования:

- время интервала моделирования 14 дней,
- количество машин в интервале моделирования равным 1000 шт.

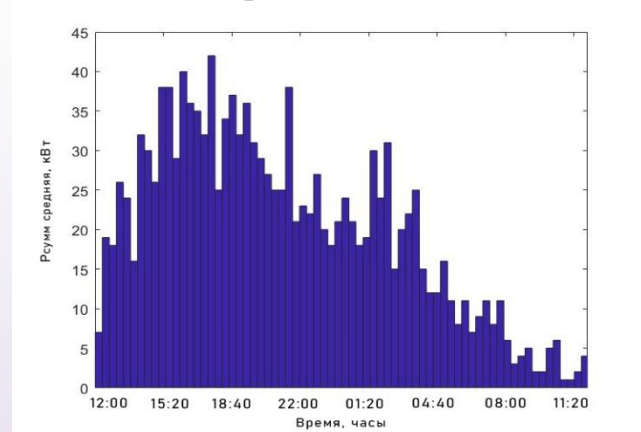
Параметры случайной величины:

- продолжительность зарядки электромобиля: $m=4$ часа, $\sigma^2=3$ часа
- мощность электромобиля: $m=25$ кВт и $\sigma^2=15$ кВт
- количество электромобилей, приезжающих на зарядку каждый день
- время начала зарядки (подключения ЭМ): параметры Вейбулла распределения $\alpha=1$ (определяет форму распределения) и $b=1,5$ (определяет масштаб). Параметры случайной величины нормального распределения $m=1$ и $\sigma^2=1$.

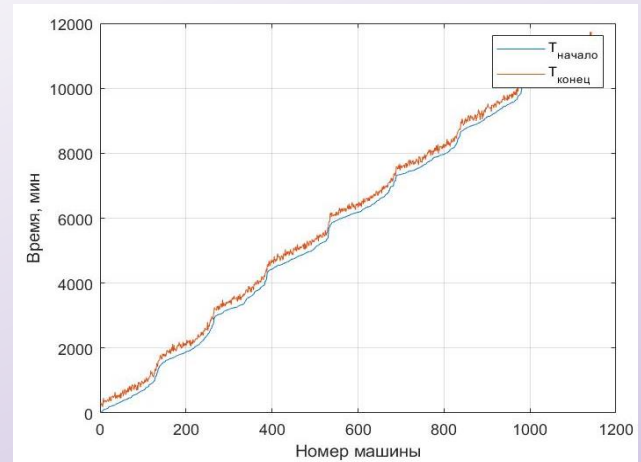


А) Эмпирический график интенсивности мощности подключений электромобилей за определенный интервал времени

Б) Усреднённый эмпирический график нагрузки

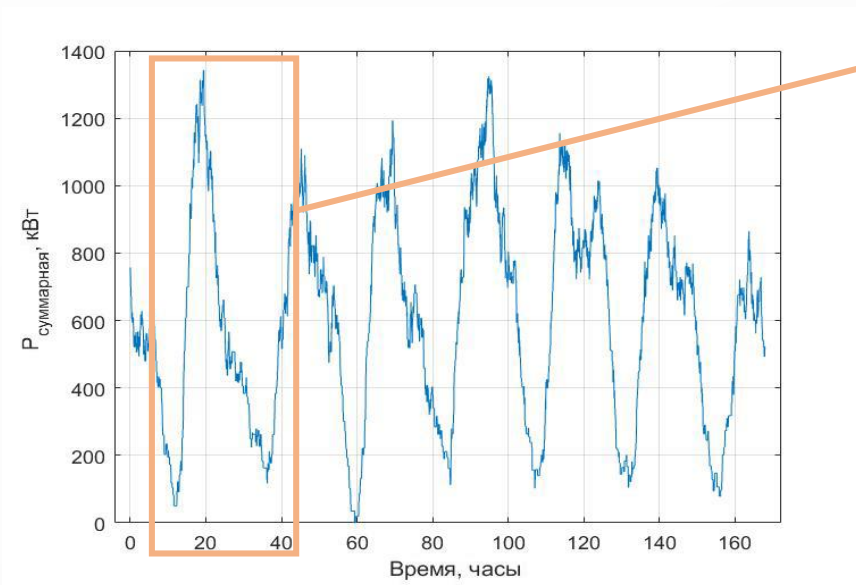


В) Гистограмма случайных подключений мощности ЭЭС с помощью распределения Вейбулла и нормального распределения на основе эмпирических данных

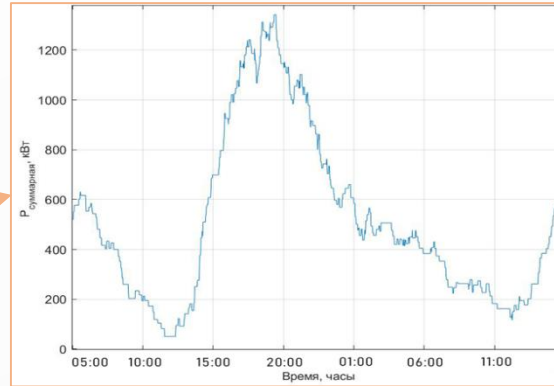


Г) График времен начала и окончания зарядки в зависимости от порядкового номера приехавшего на зарядку ЭМ

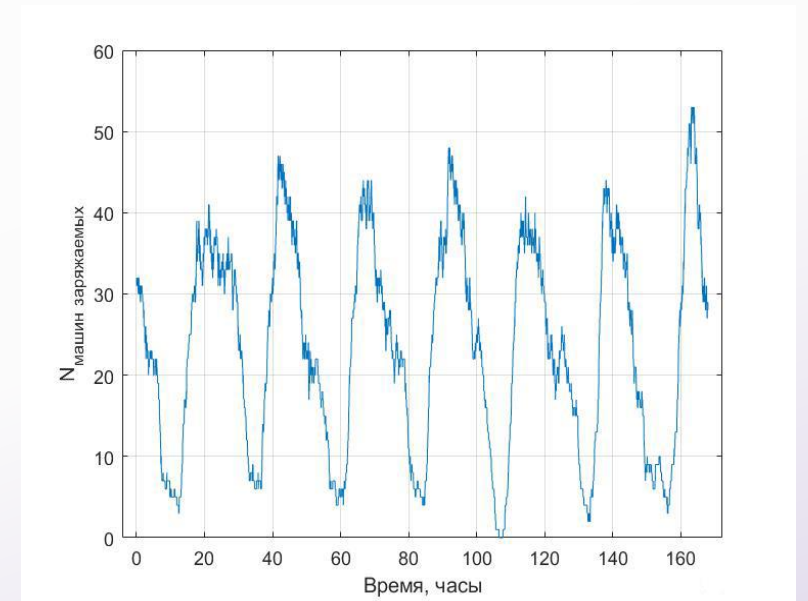
2.3 ПОЛУЧЕНИЕ СУММАРНОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЭС



А) График изменения суммарной мощности нагрузки ЭЭС в течение недели



Б) Сгенерированный суточный график нагрузки

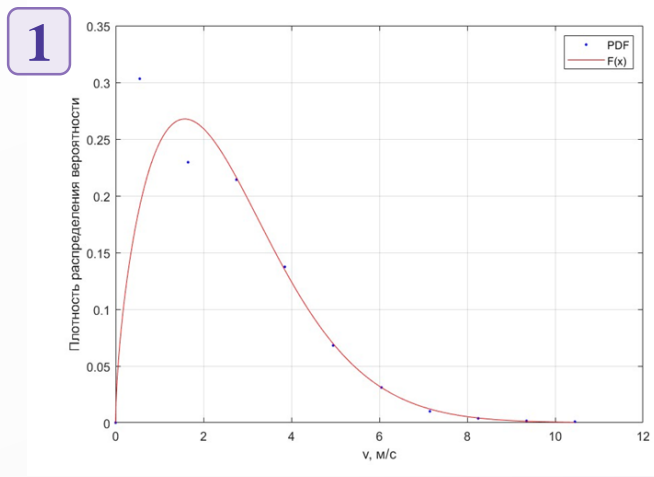


В) График количества одновременно заряжаемых машин во времени

Необходимая электрозаправочная станция:

50 разъемов от 10 до 40 кВт

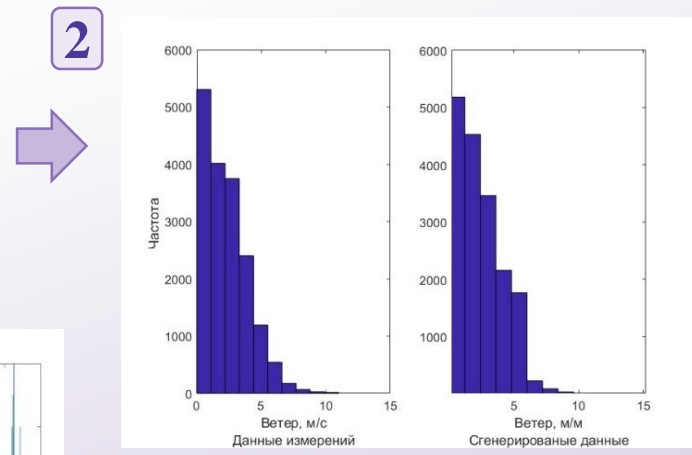
2.4 АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ ОТ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ



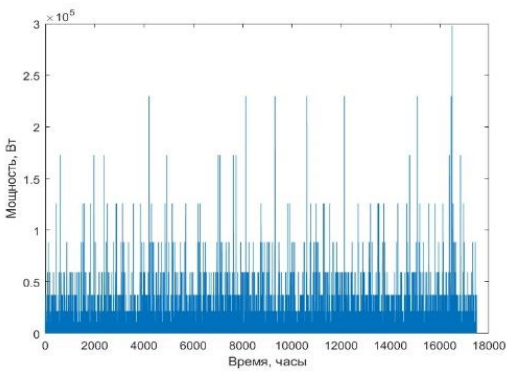
$$F(x) = a \cdot b \cdot x^{(b-1)} \cdot e^{(-a \cdot x^b)}$$

$a=0,2931, b=1,3024,$
 $R^2 = 0,9679, RMSE = 0,0211$

А) Функция плотности вероятности Вейбулла



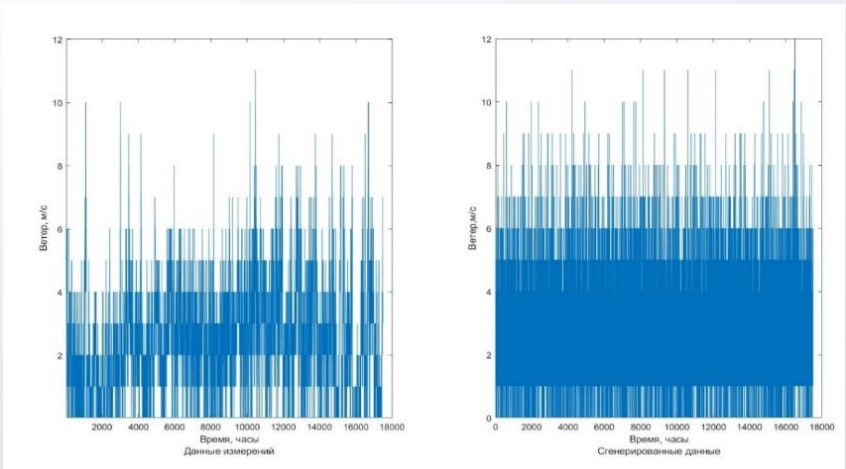
Б) Гистограмма распределений данных измерений и сгенерированных данных скорости ветра



Средняя мощность ВЭС в ваттах в зависимости от скорости ветра определяется по формуле:

$$P = C_p \pi R^2 0,5 V^3 \rho \eta_{ред} \eta_{ген}$$

Г) Выработка мощности ВЭС

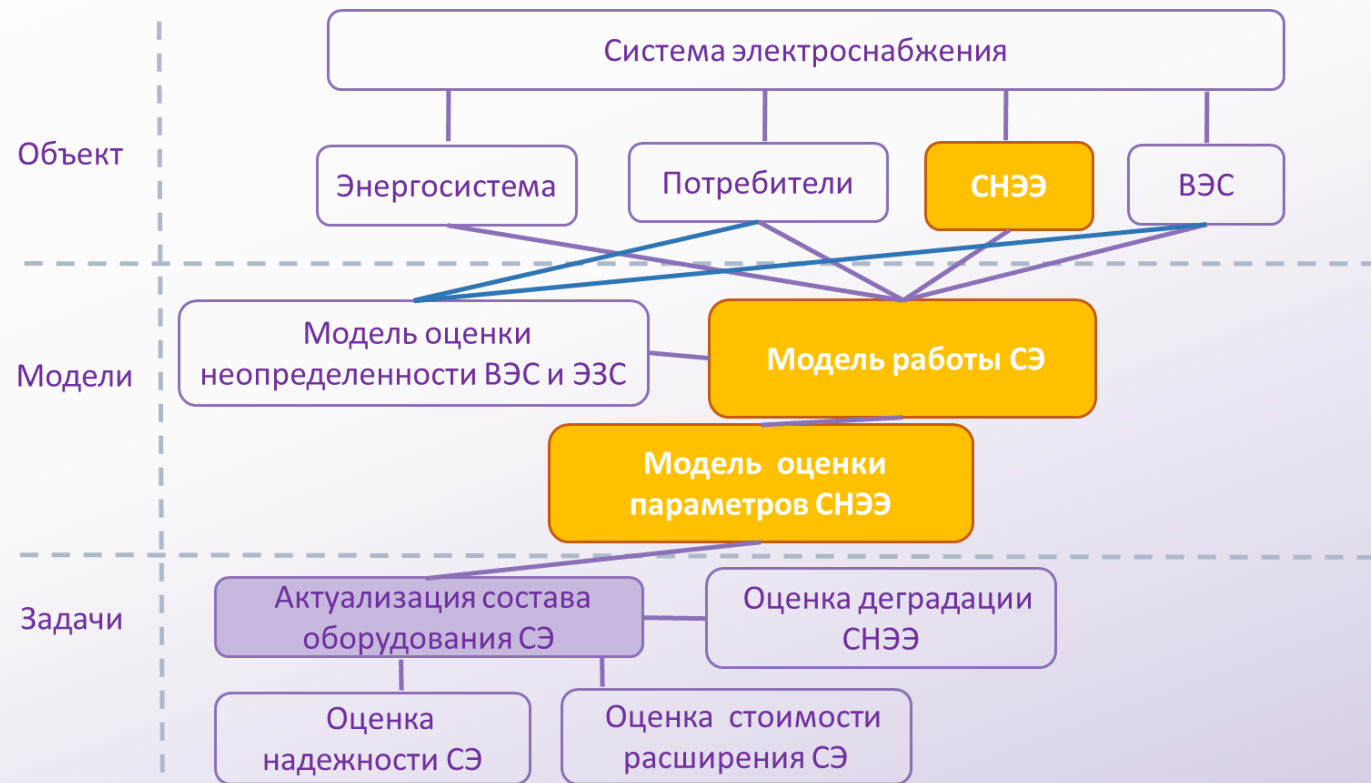


В) Скорость ветра эмпирических измерений (1) и сгенерированных данных (2)

4

3

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ СНЭЭ, ВЭС И ЭЭС



3.1 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ СЭ

Учет неопределенности нагрузки ЭЭС и генерации на основе метода стохастического программирования Монте-Карло

Моделирование системы электроснабжения, выбор параметров СНЭЭ
Смешанное целочисленное линейное программирование

Ограничения

Ограничения баланса:

$$P_{gs}(i) + P_{gw}(i) \pm E_b(i) = P_l(i)$$

При ограничениях пропускной способности сети:

$$P_{gs}(i) \leq P_{gs\lim}(i)$$

Запланированная выходная мощность ВЭС ограничена прогнозируемой выходной мощностью:

$$P_{gw}(i) \leq P_{gw\prog}(i)$$

Ограничения СНЭЭ:

$$-P_{chb}(i) < P_b(i) < P_{disb}(i)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_0 + \int_i^{i+1} P_b(i) di / E_{ном} \leq SOC_{\max}$$

$$E_b(i) = P_b(i) \cdot T_d(i)$$

$$E_{b\min}(i) < E_b(i) < E_{b\max}(i)$$

Оценка дефицита и профицита э/э

$$P_l(i) = P_{lv}(i) + P_{ls}(i)$$

$$E_d(i) = P_{gs}(i) - P_l(i)$$

$$P_d(i) = P_{gs}(i) - P_l(i) \pm E_b(i)$$

$$E_d(i) = P_{gs}(i) + P_{gw}(i) - P_l(i) \pm P_b(i)$$

$$E_p(i) = P_{gs}(i) - P_l(i) - (E_{b\max} - P_b(i))$$

$$E_p(i) = P_{gs}(i) + P_{gw}(i) - P_l(i) - (E_{b\max} - P_b(i))$$

Алгоритм заряда-разряда СНЭЭ

$$P_{disb}(i) = P_{gw}(i) + P_{gs}(i) - P_l(i)$$

$$P_{ch}(i) = P_{gw}(i) + P_{gs}(i) - P_l(i), P_{dis}(i) = 0,$$

$$P_{ch}(i) = 0, P_{dis}(i) = 0,$$

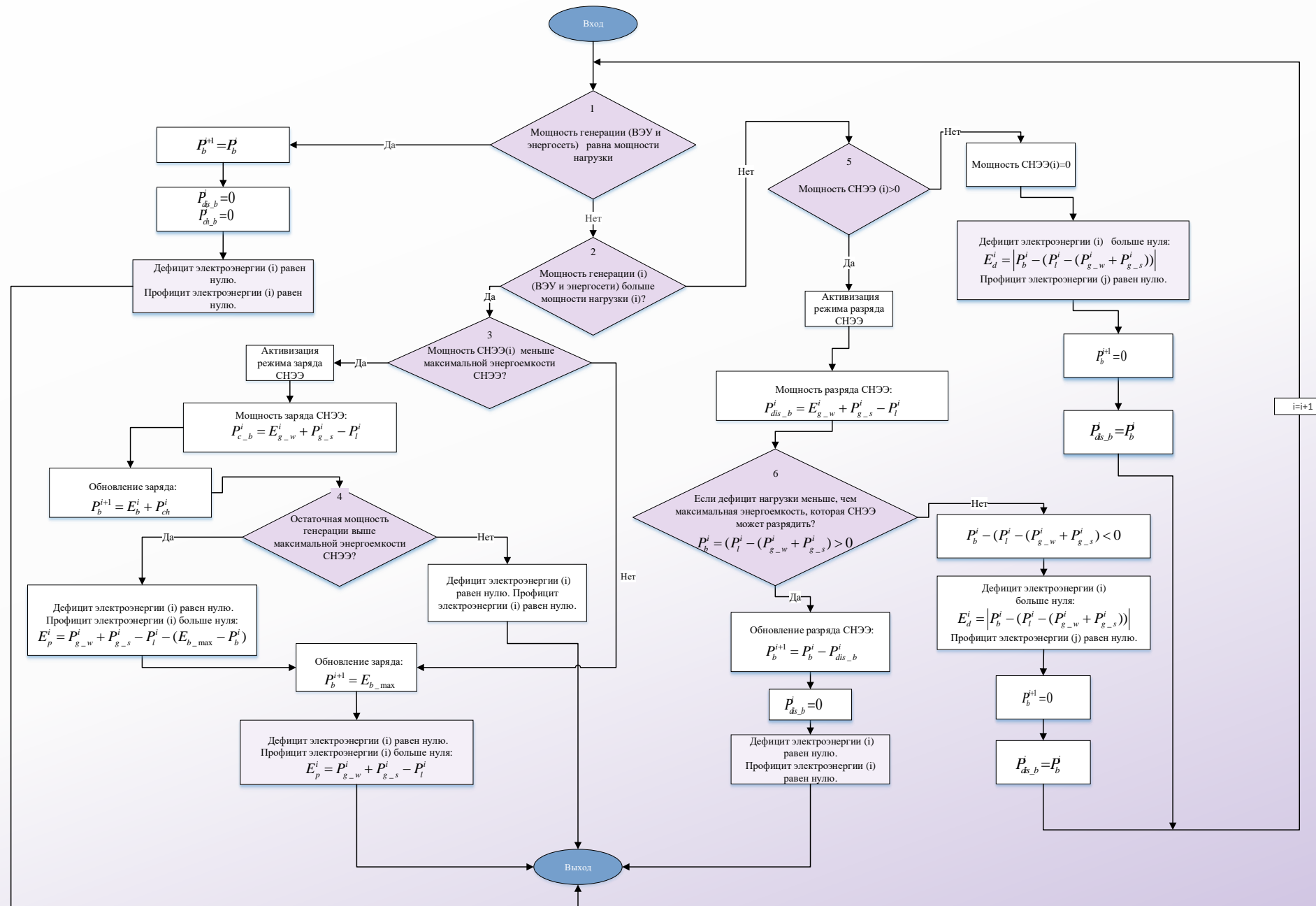
Дефицит ≤ 0

нет

да

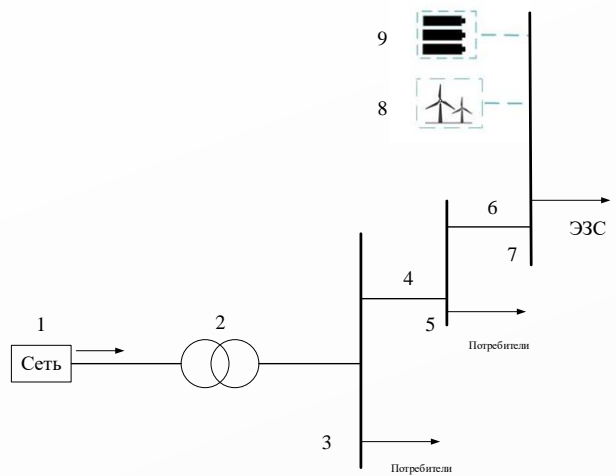
Получение данных оптимальной работы СЭ

3.2 АЛГОРИТМ ЗАРЯДА-РАЗРЯДА СНЭЭ



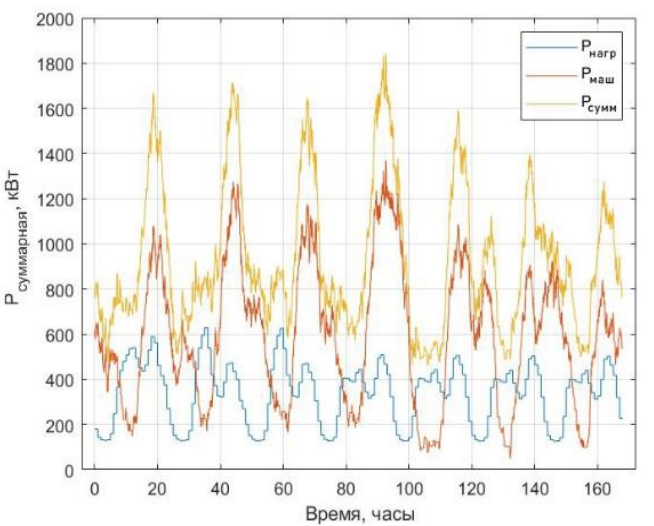
3.3 ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Оценка параметров СНЭЭ

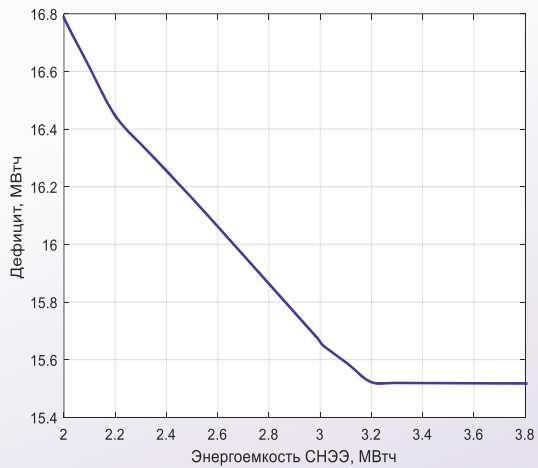


А) Радиальная схема СЭ

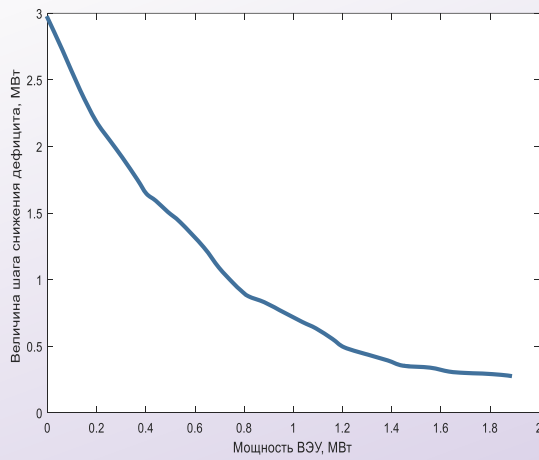
Р вэу	Дефицит нагрузки	Р max нагрузки	Р снээ	Время разряда	Энергоемкость СНЭЭ	Дефицит нагрузки
0	28,52	1,043	0			
0,1	25,54	1,024	1,02	3,8	3,876	10,34
0,2	23	1,004	1	4,2	4,2	6,03
0,3	20,82	0,976	0,98	5,5	5,39	1,78
0,4	18,89	0,965	0,965	5,4	5,211	0
0,5	17,23	0,946	0,946	5,15	4,8719	0
0,6	15,74	0,926	0,926	4,88	4,51888	0
0,7	14,42	0,907	0,907	4,7	4,2629	0
0,8	13,34	0,888	0,88	4,45	3,916	0
0,9	12,45	0,868	0,87	4,45	3,8715	0
1	11,63	0,849	0,849	4,1	3,4809	0



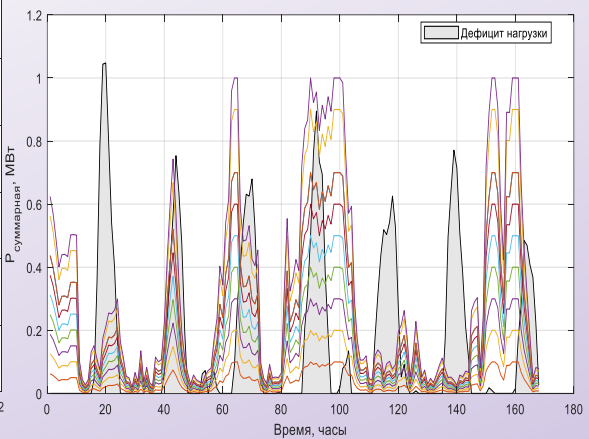
Б) Общая нагрузка СЭ и ЭЭС



В) Подбор энергоемкости СНЭЭ



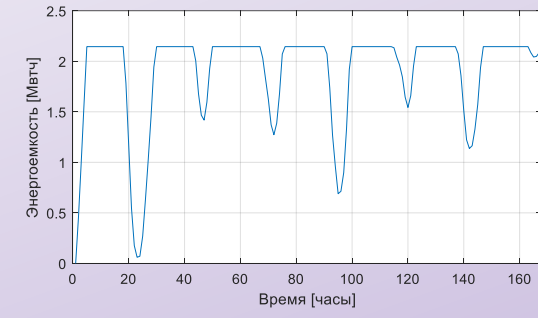
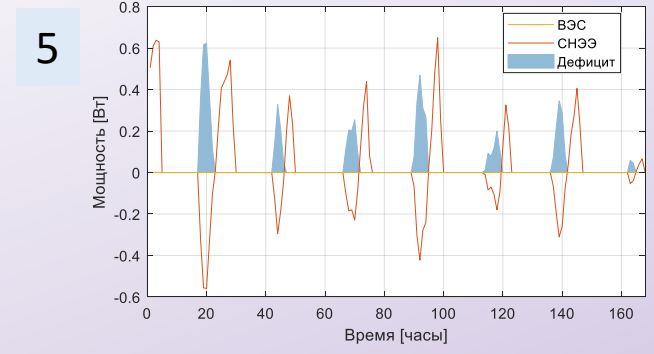
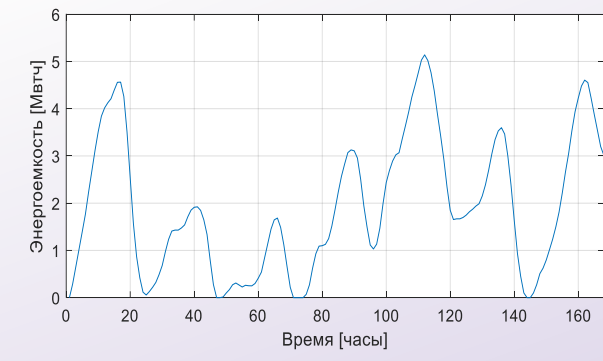
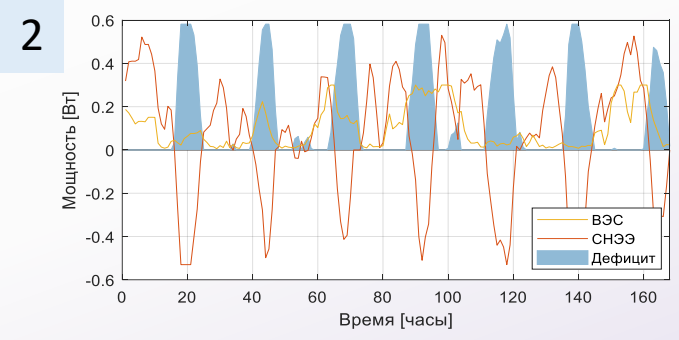
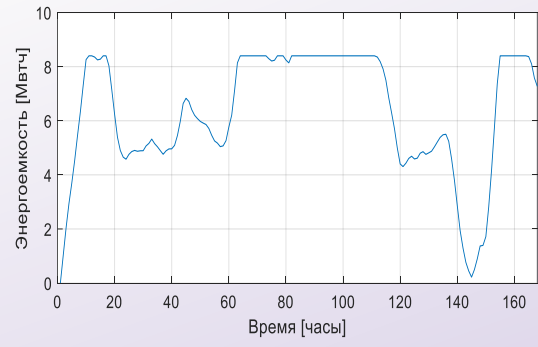
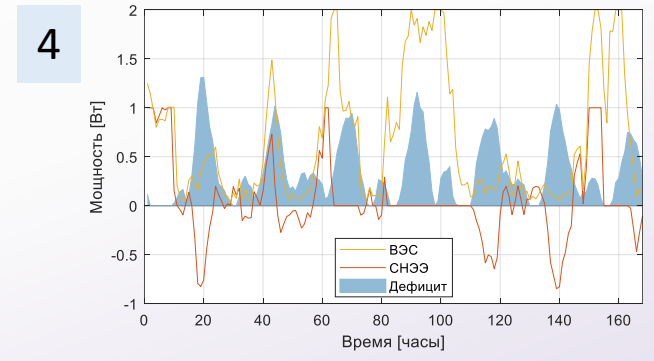
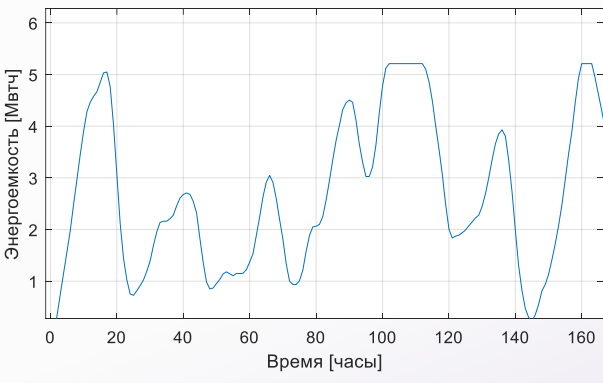
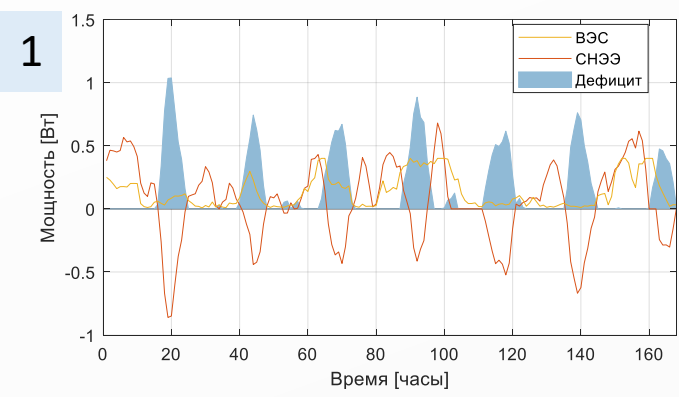
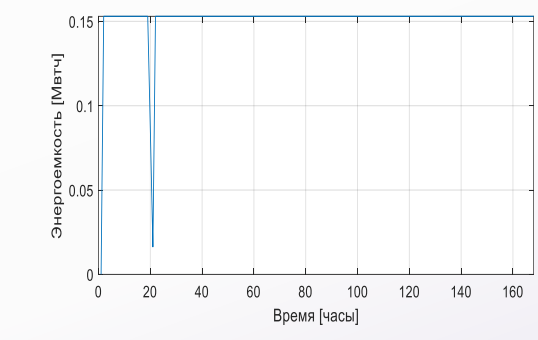
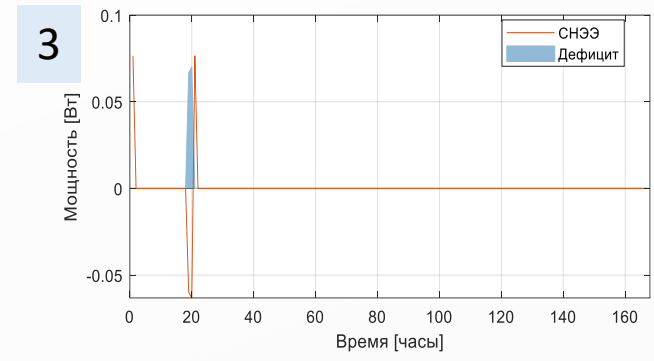
Г) Подбор мощности ВЭС



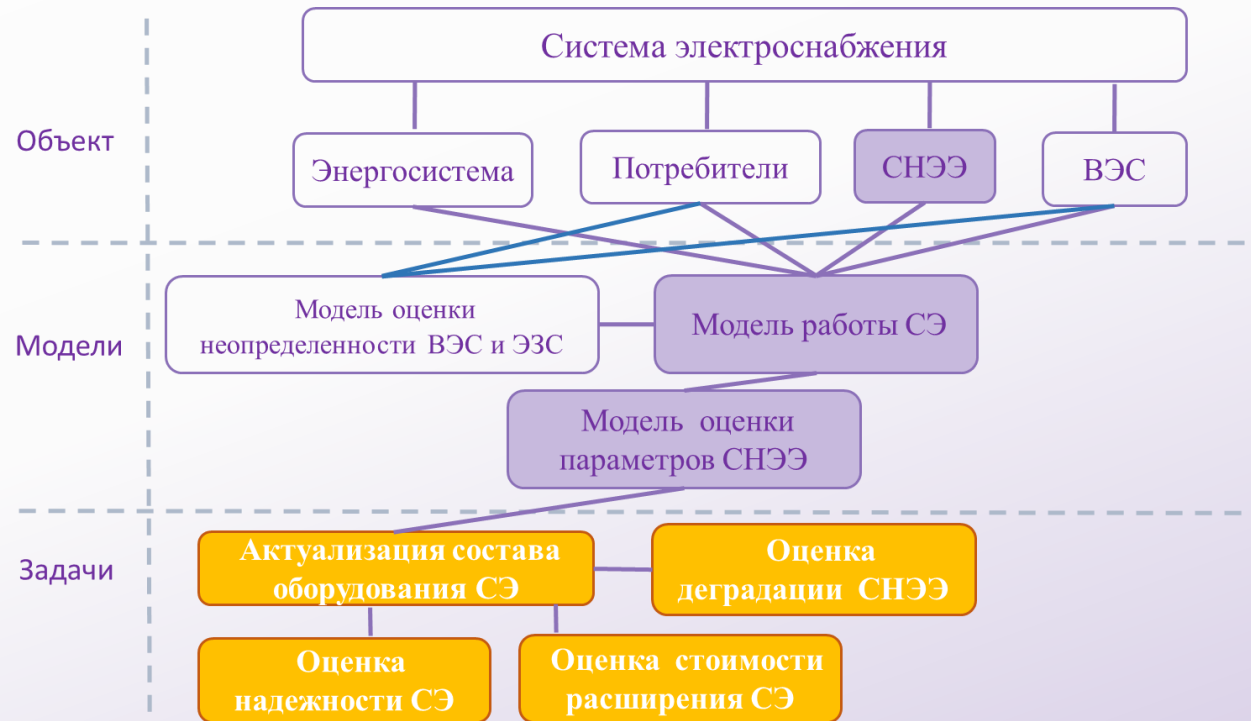
Д) Подбор мощности ВЭС

Оценка параметров СНЭЭ

Вариант	Мощность сети, МВт	Мощность нагрузки	Мощность ВЭУ, МВт	Мощность СНЭЭ, МВт	Время разряда СНЭЭ, часы	Энергоемкость, МВт·ч
1	0,88	1,8	0,4	0,965	5,4	5,211
2	0,88	1,4	0,3	0,53	10	5,3
3	1,764	1,8	0	0,0765	2	0,153
4	0,63	1,8	2	1	8,4	8,4
5	1,26	1,8	0	0,65	3,3	2,145



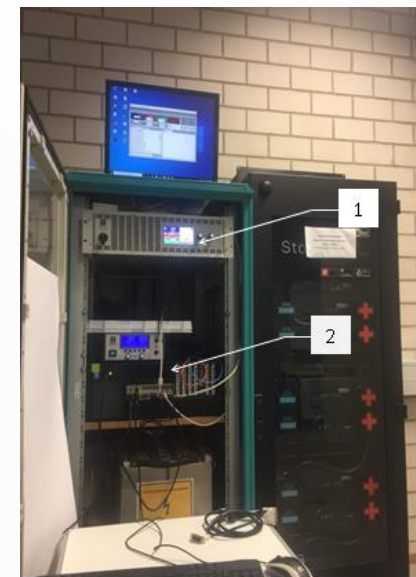
IV. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СНЭЭ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА



4. 1 ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СНЭЭ

4.1.1 Исследование фактического состояния СНЭЭ

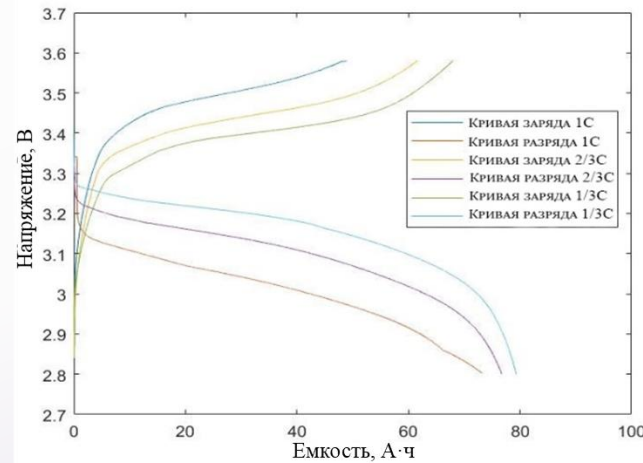
- ❑ Если не проводить калибровку по оставшейся емкости, степень заряженности может рассчитываться некорректно, привести излишнему переразряду или заряду ЛИАБ, что вызовет к **ускоренной деградации АКБ** или выходу его из строя.
- ❑ Высокая степень деградации может привести к падению емкости и недоотпуску электроэнергии потребителю.
- ❑ Определение мощности и емкости СНЭЭ без учета деградации батарей может привести к завышенным показателям доходов и резкому снижению надежности.



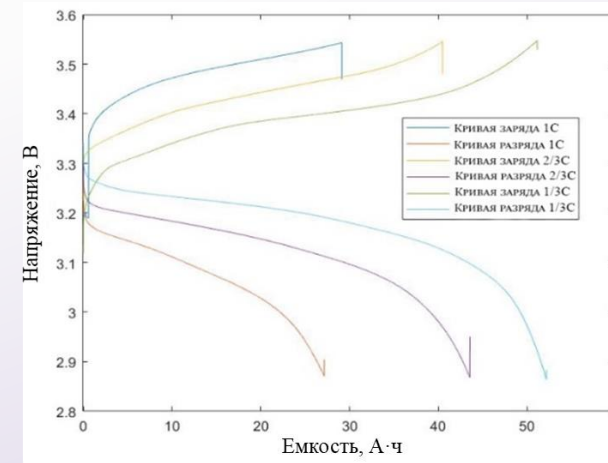
Измерение фактической емкости АКБ:

Тип батареи	LiFePO ₄
Название модели	LFP100ANA WIDE
Вес	3,6 кг
Номинальная емкость	100 Ач
Максимальный ток заряда	300 А (3С)
Максимальный ток разряда	300 А (3С)
Оптимальный ток заряда	50 А (0,5С)
Оптимальный ток разряда	50 А (0,5С)
Номинальное напряжение	3,2 В
Максимальное напряжение	3,6 В
Минимальное напряжение	2,8 В

$$C = I^n t$$

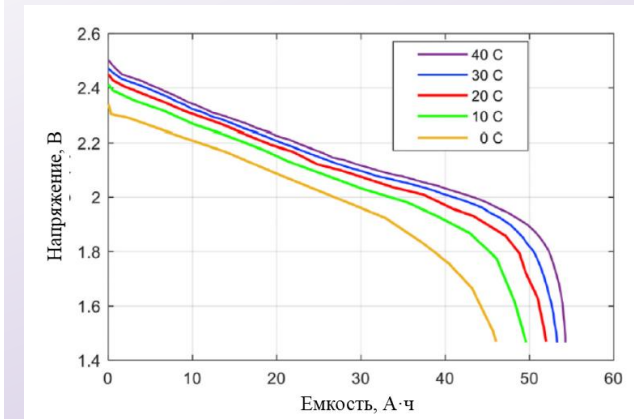


1)



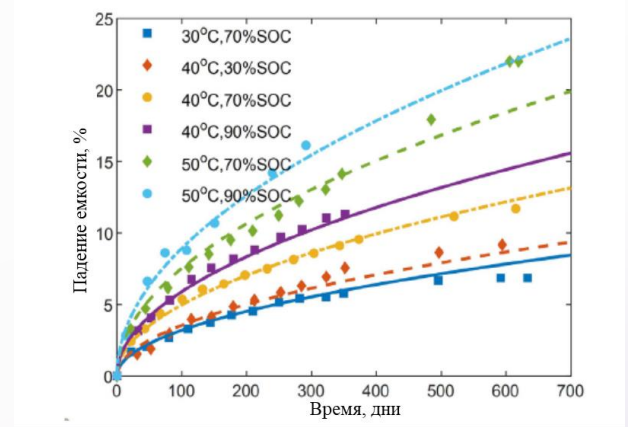
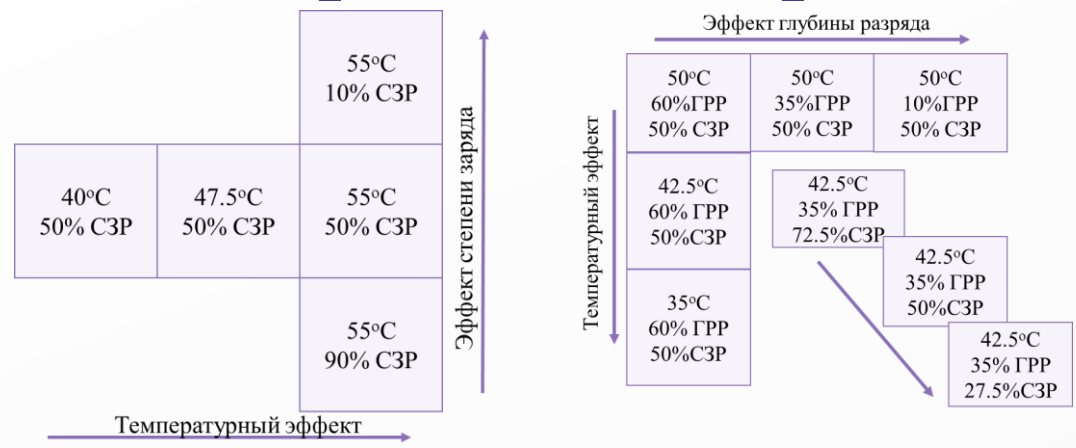
2)

А) Результаты тестовых испытаний на определение фактической емкости АКБ при различной величине токов нагрузки для АКБ в середине срока службы (1) и в конце срока службы (2)



Б) Напряжение разряда ячейки LTO1020 при различных температурах [1]

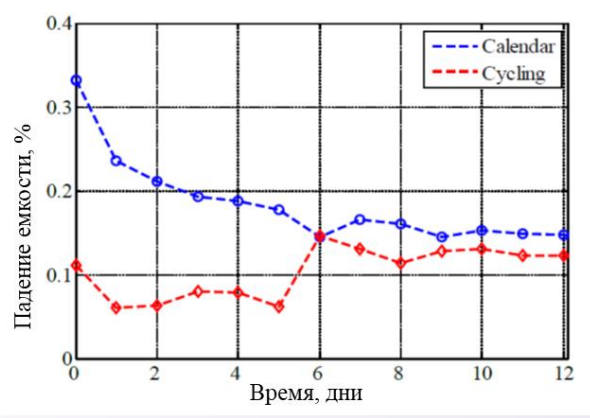
4.1.2 Проблематика моделирования деградации СНЭЭ



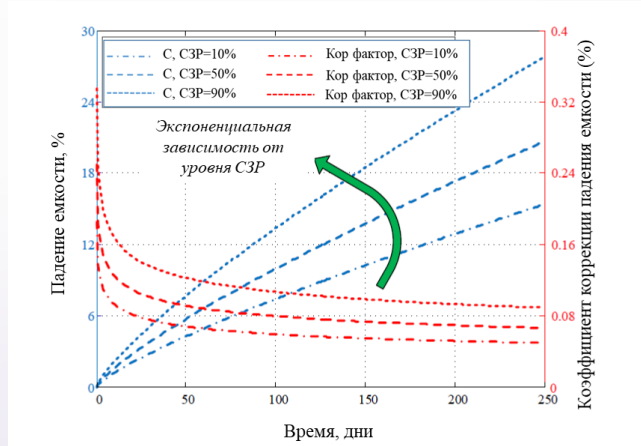
Б) Матрица для определения календарного срока службы испытанных элементов LiFePO₄

В) Матрица для определения циклического срока службы испытанных элементов LiFePO₄ [2]

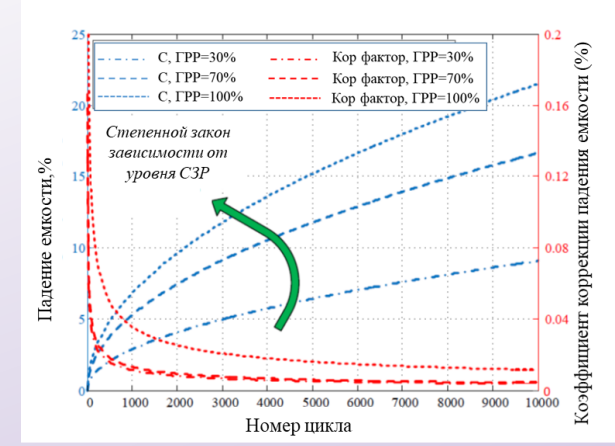
Г) Результаты тестов на календарное старение АКБ [1]



А) Календарное и циклическое старение



Д) Расчетное снижение энергоемкости при 25°C и различных уровнях заряда [2].



Е) Расчетное угасание емкости при циклировании при 25°C с различной глубиной цикла [2].

1. Zhang S. et al. Adaptively coordinated optimization of battery aging and energy management in plug-in hybrid electric buses //Applied Energy. – 2019. – Т. 256. – С. 113891.
2. Stroe D. I. et al. Degradation behavior of lithium-ion batteries based on lifetime models and field measured frequency regulation mission profile //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Т. 52. – №. 6. – С. 5009-5018.

4.1.3 Существующие модели деградации СНЭЭ

Публикации	Применение	Химия	Тип старения	Модель старения	Стресс факторы
Olmos J.(2021)	Электрический транспорт и энергетические системы	LFP NMC	Цикл.	Эмпирическая модель циклической деградации	Глубина разряда (ГРР), Ток разряда (ТЗР), Температура (Т), Степень заряда (СЗР)=50%
Shin H (2020)	СЭС, ВЭУ сглаживание мощности	LMO	Цикл. календарное	Модель деградации	ГРР и СЗР, ТЗР,
Dulout J.(2017)	СЭС, сглаживание мощности	ЛИБ	Цикл. календарное	Модель срока службы, основанная на концепции механической деградации	ГРР
Valentin Silvera Diaz (2021)	СЭС, сглаживание мощности	LFP	Цикл. календарное	Полуэмпирическая модель	ГРР, ТЗР, Т-календарного старения СЗР - календарного старения
Vermeer W (2020)	СЭС, EV, V2G	NMC	Цикл. календарное	Полуэмпирическая модель	ТЗР, Т,
Lee M. et al.(2020)	СЭС сглаживание мощности	LFP	Цикл.	Модель циклического старения	ГРР
Sandelic M. (2018)	Вторичное регулирование частоты в системе с ВЭС	LFP	Цикл. календарное	Модель, основанная на сроке службы	Т, СЗР, ТЗР
Wu Y. et al. (2022)	Станция зарядки электромобилей	LFP	Цикл.	Модифицированный алгоритм Rainflow	Т, ГРР
Wang Y. (2016)	ВЭС-ЭЭС, участие в энергетическом рынке	ЛИБ	Цикл.	Линеаризованная модель деградации батареи, включающая ограничения на процент деградации батареи и стоимость деградации	ГРР
Gräf D. (2022)	Стабилизация частоты сети	NMC	Цикл.	Полуэмпирическая модель	Т, ТЗР
Scarabaggio P (2020)	V2G, стабилизация частоты	LFP	Цикл.	Деградация на основе эмпирической модели	ГРР

Особенности функционирования СНЭЭ в составе системы электроснабжения:

неравномерные циклы заряда, вызванные стохастической нагрузкой и генерацией от ВИЭ; использованием СНЭЭ в регулировании частоты (что влечет за собой более короткое время циклов)

Пример использования СНЭЭ:

в качестве регулятора частоты: низкая глубиной разряда (20% ГРР*), но высокие токи (ток заряда/разряда 3С) [1]

в качестве сглаживания генерации на основе ВИЭ: высокой глубиной разряда (80% ГРР), но низкими токами (ток заряда/разряда 0,5С) [1]

*глубина разряда

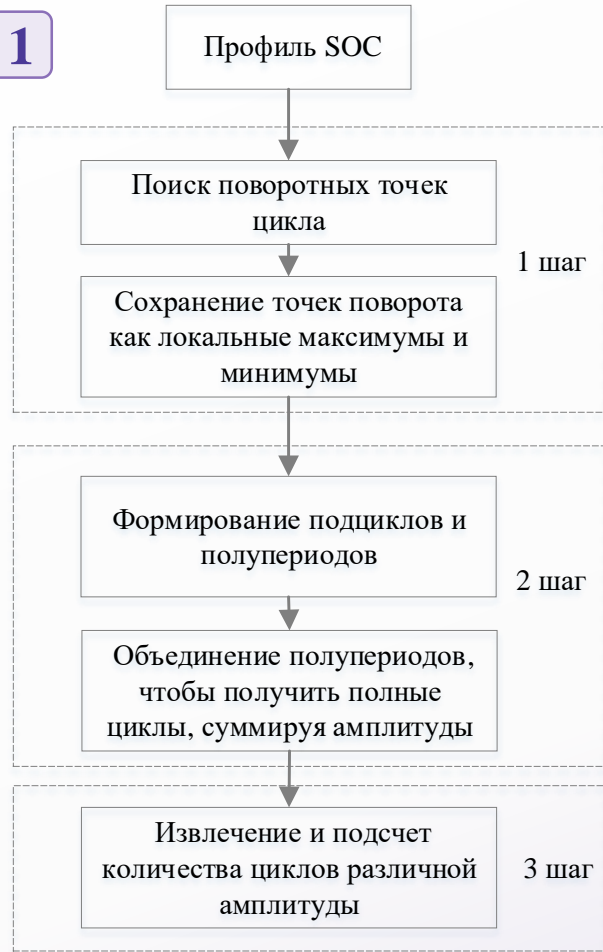
Требования к модели деградации СНЭЭ

в составе системы электроснабжения, включающие ВИЭ и ЭЭС :

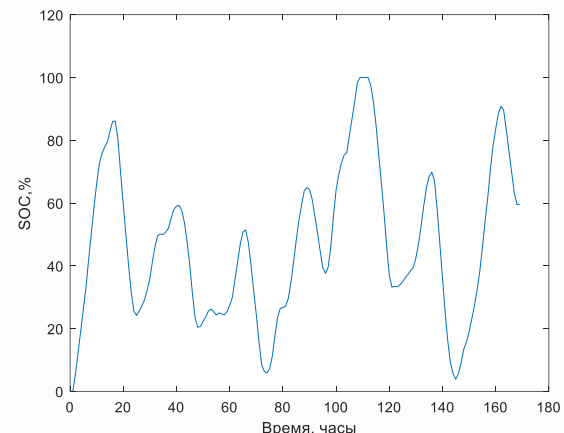
- Учет влияния нерегулярных циклов и других факторов стресса
- Учет нелинейного характера деградации

4.1.4 Описание применяемой модели деградации СНЭЭ

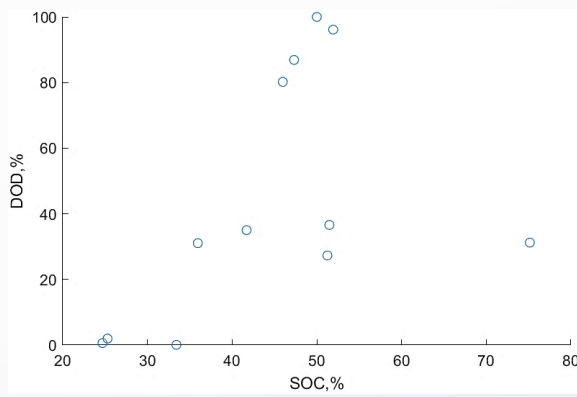
1



А) Схема алгоритма Rainflow



Б) Пример профиля заряда СНЭЭ



В) Распределение подсчитанных циклов

- 1) амплитуда цикла;
- 2) среднее значение цикла;
- 3) номер цикла;
- 4) время начала цикла;
- 5) время окончания цикла.

2

Календарное старение и циклическое старение являются линейными процессами деградации по отношению к числу циклов и могут быть выражены в виде функции:

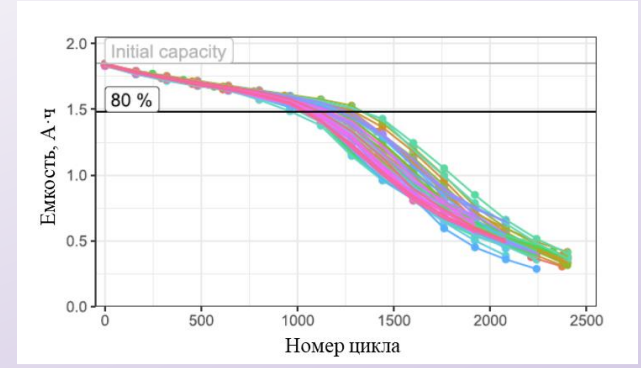
$$f_o(t, DOD^*, SOC^*, T_c) = f_t(t, \overline{SOC}, \overline{T_c}) + \sum_i^N n_i f_c(SOC_i, DOD_i, T_{c,i})$$

3

Описание нелинейной ускоренной степени деградации старения с помощью механизмов старения аккумулятора (механизм роста слоя межфазной пленки твердого электролита (SEI)):

$$L = 1 - \alpha_{SEI} e^{-N\beta_{SEI} f_d} - (1 - \alpha_{SEI}) e^{-Nf_d}$$

$$L = 1 - \alpha_{SEI} e^{-t\beta_{SEI} f_d} - (1 - \alpha_{SEI}) e^{-tf_d}$$



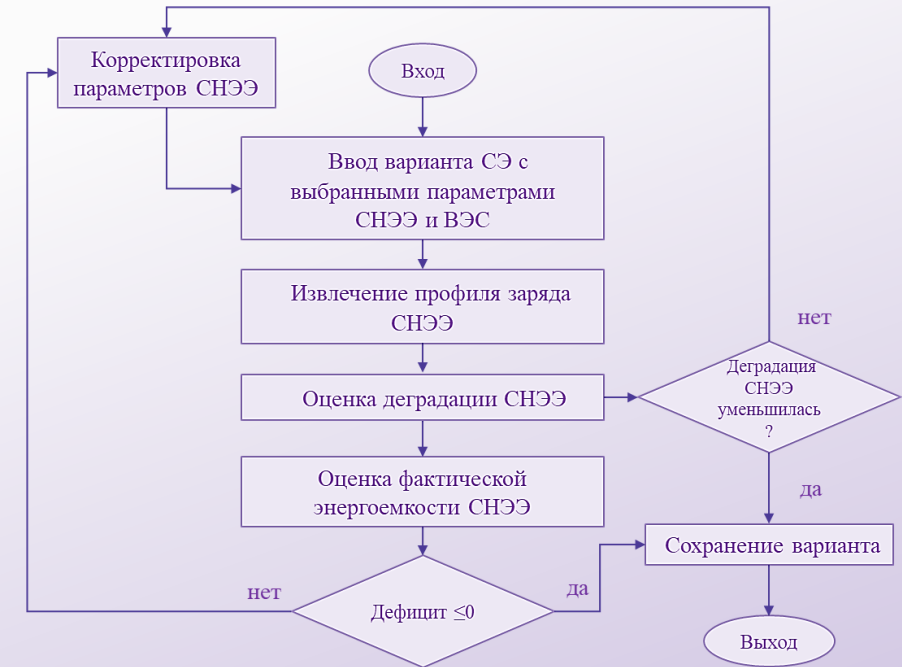
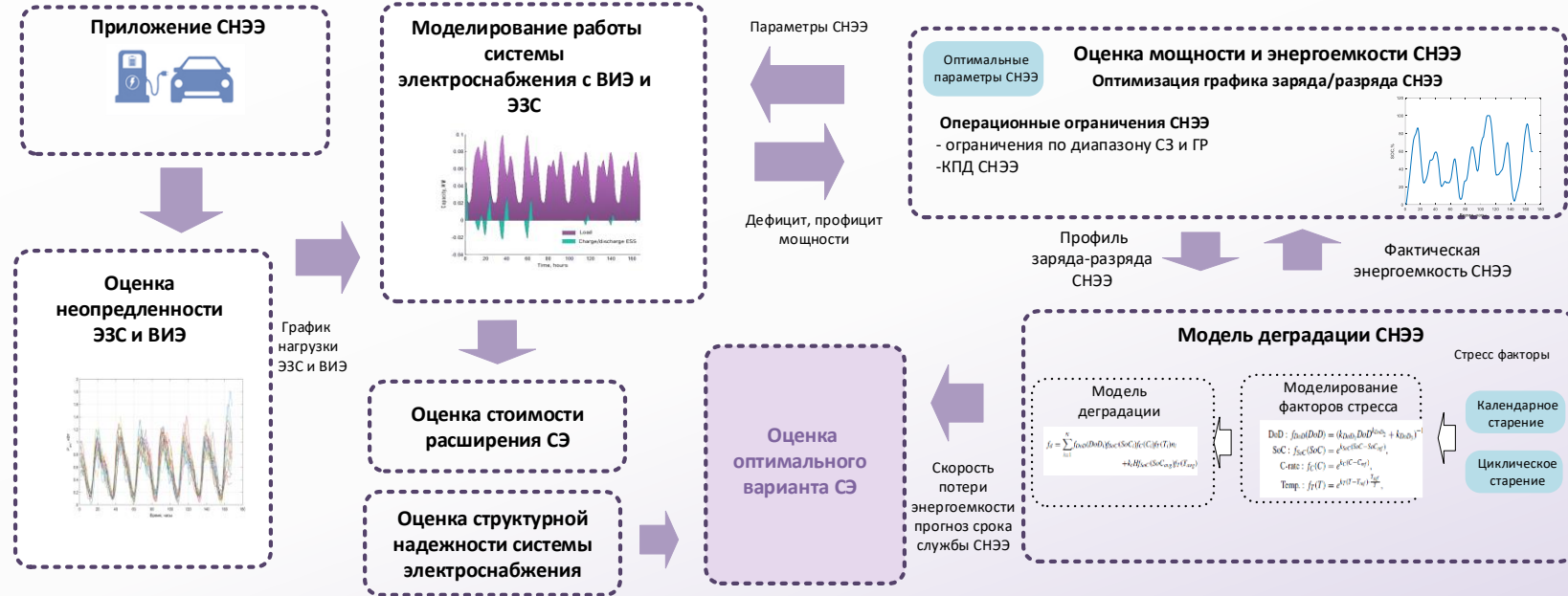
Г) Данные о длительном циклическом старении батарей [1]

1. Baumhöfer T. et al. Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance // Journal of Power Sources. – 2014. – Т. 247. – С. 332-338.

4.1.5 Использование модели деградации СНЭЭ в составе системы электроснабжения

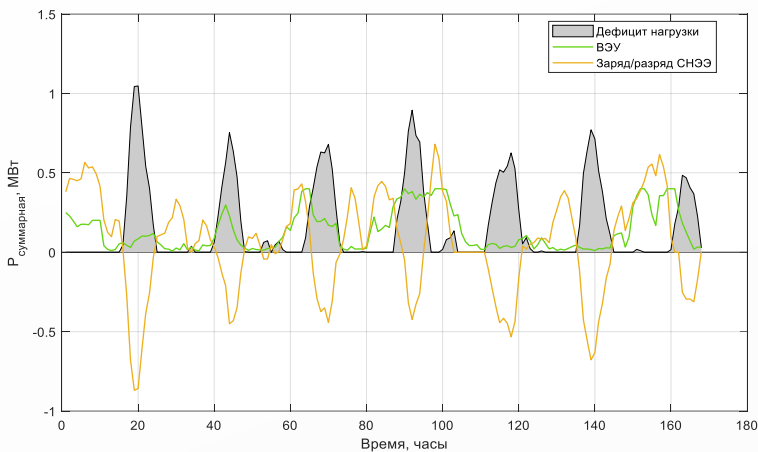
Использование модели деградации СНЭЭ для решения задач оценки параметров СНЭЭ и выбора оптимального варианта:

Использование модели деградации СНЭЭ для выбора наилучшего режима эксплуатации СНЭЭ:

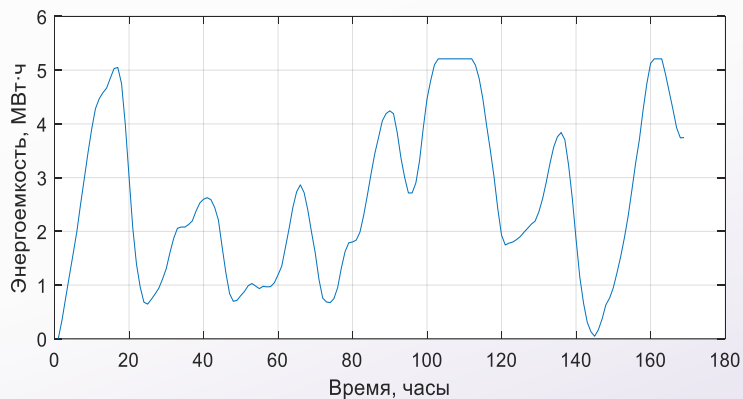


4.1.6 Оценка деградации СНЭЭ

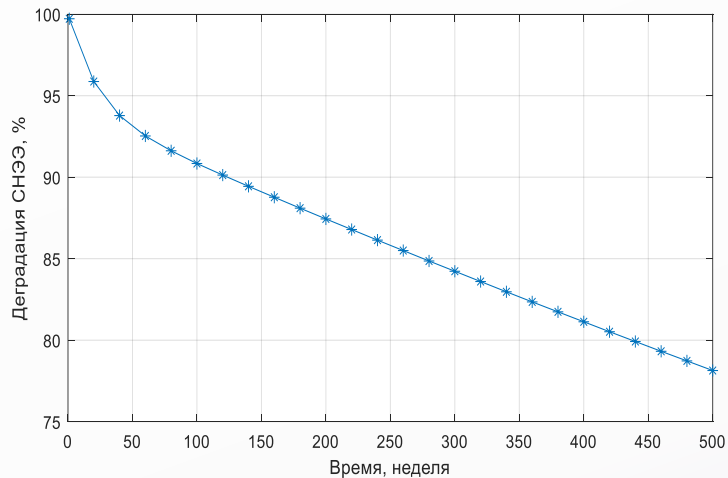
Оценка деградации:



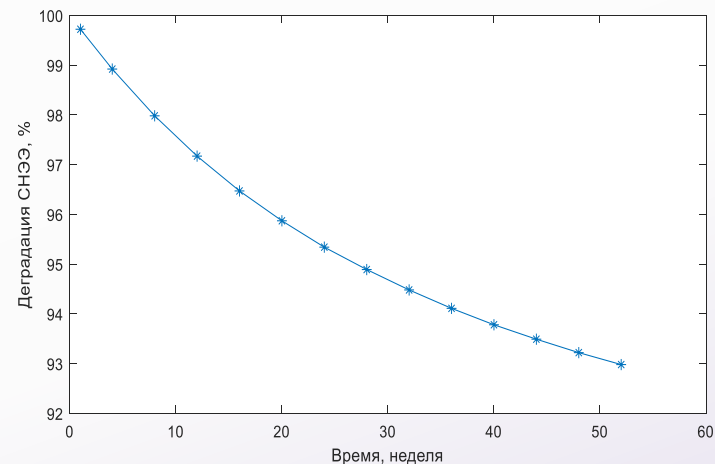
а) График режима заряда/разряда СНЭЭ для 1 варианта



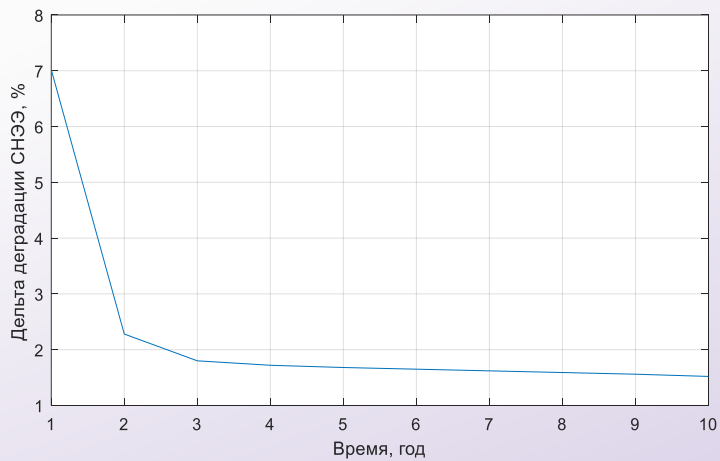
б) Энергоемкость СНЭЭ для варианта 1



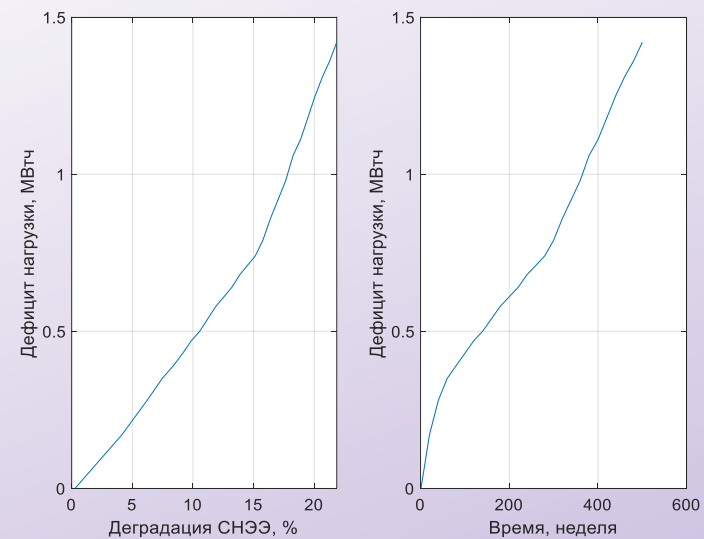
в) Деградация СНЭЭ, вариант 1



г) Деградация СНЭЭ за год



е) Доля деградации СНЭЭ по годам



ж) Увеличение дефицита э/э с возрастанием деградации СНЭЭ

4.1.7 Анализ снижения деградации СНЭЭ

А) Увеличение энергоемкости СНЭЭ

Сценарий	1	2	3	4	5	6
Увеличение энергоемкости, %	-	10	20	30	40	50
СНЭЭ, МВт·ч	5,21	5,73	6,25	6,77	7,29	7,81
Деградация, %	21,86	21,32	20,92	20,60	20,34	19,98

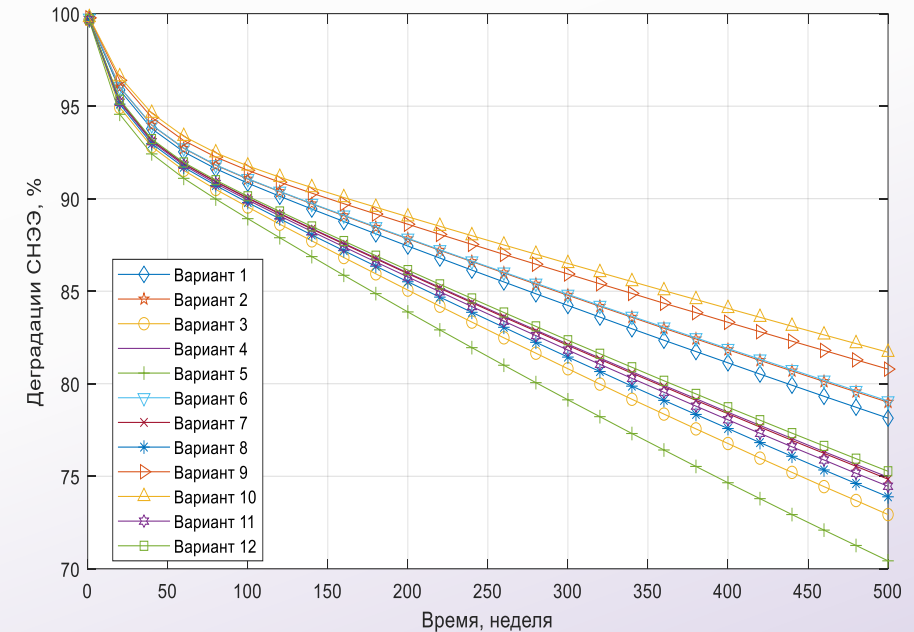
Б) Увеличение мощности ВЭС

Сценарий	1	2	3	4	5	6	7
ВЭУ, МВт	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
СНЭЭ, МВт·ч	5,21	4,87	4,52	4,26	3,91	3,87	3,48
Деградация, %	21,86	22,71	23,47	23,78	24,17	24,81	25,16

Вывод: Результаты расчетов показывает, что с увеличением энергоемкости СНЭЭ снижается деградация СНЭЭ, поскольку снижается глубина разряда СНЭЭ при неизменной мощности ВЭУ. Напротив, при увеличении мощности ВЭУ и снижении СНЭЭ, деградация СНЭЭ увеличивается.

4.1.8 Сравнение деградации при различных режимах работы СНЭЭ в составе СЭ

Вариант	Мощность сети, МВт	Мощность нагрузки	Мощность ВЭУ, МВт	Мощность СНЭЭ, МВт	Время разряда СНЭЭ, часы	Энергоемкость, МВт·ч	Деградация, %	N _ц Количество циклов 1 неделя
1	0,88	1,8	0,4	0,965	5,4	5,211	21,86	5,98
2	0,88	1,4	0,3	0,53	10	5,3	21	5,62
3	1,764	1,8	0	0,0765	2	0,153	27,07	1,16
4	0,63	1,8	2	1	8,4	8,4	25,05	2,88
5	1,26	1,8	0	0,65	3,3	2,145	29,57	7,41
6	0,88	1,8	0,4	0,965	8	7,72	20,93	6,64
7	0,88	1,8	1	0,849	4,1	3,4809	25,16	5,11
8	0,88	1,8	2	0,65	4,53	2,9445	26,11	3,09
9	0,88	1,8	0,4	0,965	10	9,65	19,21	6,73
10	0,88	1,8	0,38	0,965	10	9,65	18,3	6,45
11	0,63	1,4	2	0,9	8,9	7,92	25,54	2,74
12	0,63	1,8	2	1,3	8,4	10,92	24,73	1,49



Выводы

Наибольшая степень деградации приходится на пятый вариант при увеличении пропускной способности сети в два раза. Ускоренная деградация вызвана увеличением частоты циклов заряда-разряда СНЭЭ, поскольку основную нагрузку по срезанию пиков нагрузки берет на себя СНЭЭ. Самая низкая скорость деградации отмечается в варианте 10 при дополнительном увеличении энергоемкости СНЭЭ и снижении мощности ВЭС. В остальных вариантах количество циклов в среднем составляет три цикла в неделю. Угасание энергоемкости в течение рассматриваемого периода варьируется от 18,3 до 29,5 %.

4.3 МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СНЭЭ

Целевая функция многокритериального анализа определяется путем минимизации геометрической суммы критериев, состоящей из трех показателей:

- стоимости планирования расширения СЭ (C_s),
- величины деградации СНЭЭ (L_d)
- показателя структурной надежности СЭ

$$L_*(-L \cdot \cos 30^0; -L \cdot \sin 30^0) = P_*\left(-\frac{\sqrt{3}L}{2}; -\frac{L}{2}\right)$$

$$P_*(P \cdot \cos 30^0; -P \cdot \sin 30^0) = P_*\left(\frac{\sqrt{3}P}{2}; -\frac{P}{2}\right)$$

$$C_*(0; C)$$

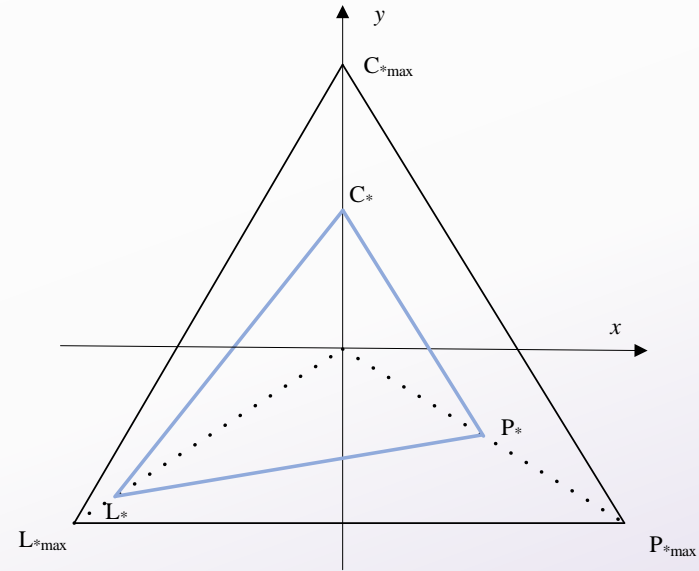


Диаграмма поиска оптимального решения

$$S = \frac{1}{2} |(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)|$$

$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} (PL + PC + LC)$$

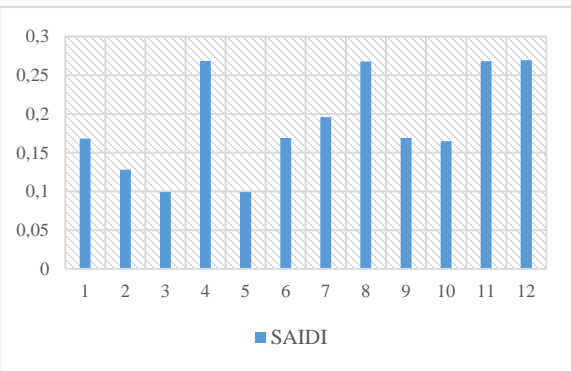


$$P_{SAIDI} \cdot L_d + P_{SAIDI} \cdot C_s + L_d \cdot C_s \rightarrow \min,$$

4.3.1 Сравнение вариантов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Деградация	0,74	0,71	0,92	0,65	0,62	0,85	1	0,71	0,85	0,89	0,86	0,84
Надежность	0,62	0,48	0,37	0,63	0,61	0,99	0,37	0,63	0,73	0,99	0,99	1
Стоимость	0,44	0,44	0,07	0,78	0,78	0,8	0,2	0,63	0,35	0,38	0,77	1
Площадь треугольника	0,46	0,37	0,18	0,61	0,58	1	0,29	0,56	0,5	0,69	0,99	1,15

Структурная надежность:



$$P_{SAIDI} = \frac{\sum T_j \cdot N_j}{N_t}$$

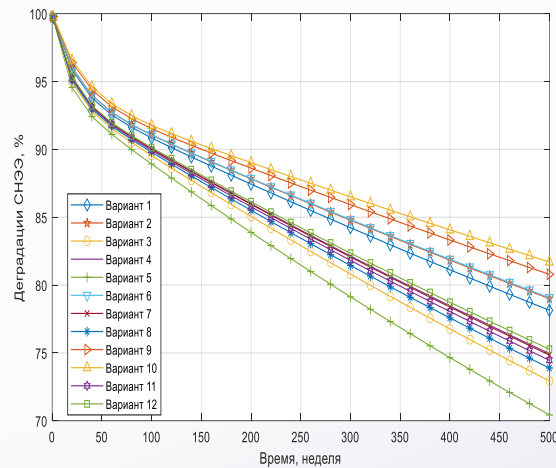
А) Сравнение надежности по вариантам

Стоимость расширения СЭ:



Б) Сравнение стоимости по вариантам

Деградация:

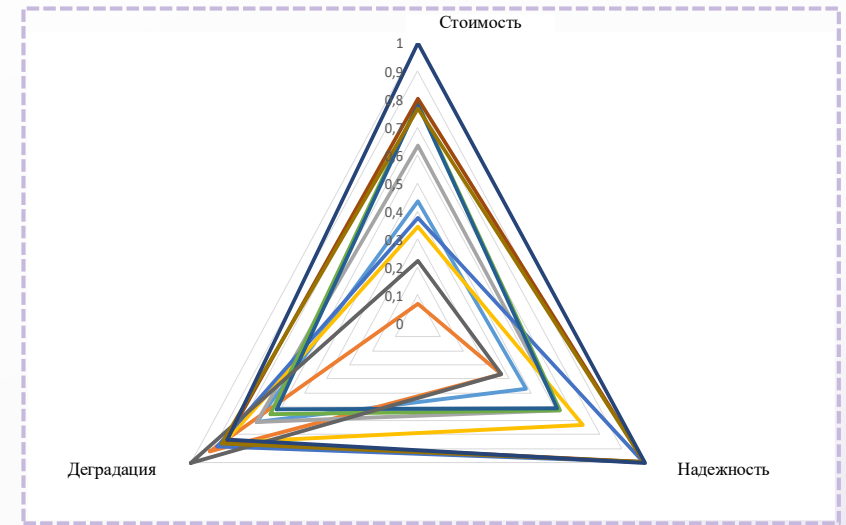


В) Сравнение деградации по вариантам

$$C_z = C_b + C_{gw} + C_n,$$

$$C_b = kP + mE$$

где, C_z – общие затраты на расширение СЭ,
 C_b – затраты на установку СНЭЭ,
 C_{gw} – затраты на установку ветростанции,
 C_n – прочие затраты, связанные с расширением системы
 k и m – цена за единицу мощности и энергоемкости СНЭЭ соответственно.



Г) Диаграмма выбора оптимального решения

Выводы

Анализ показал, что наиболее эффективным является вариант №3 или близкий к нему вариант №5. Однако, если отсутствует возможность технологического присоединения необходимой мощности, наиболее предпочтительным вариантом является №2. Однако в данный вариант рассматривался при частичном срезании пика нагрузки от 1,8 до 1,4 МВт·ч за счет ограничения выдачи мощности на ЭЭС. Данный вариант будет нести дополнительные издержки, связанные с недоотпуском электроэнергии потребителю, а именно ЭЭС. Поэтому, наиболее близкий по площади к третьему и второму варианту, является вариант №1.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ текущего состояния исследования СЭ, включающих ВИЭ и СНЭЭ условиях неопределенности выработки электроэнергии от ВИЭ и стохастичности нагрузки, а также анализ существующих методов и моделей деградации СНЭЭ для определения работы системы в течение полного жизненного цикла. Выполнено обоснование необходимости разработки метода моделирования СЭС с использованием СНЭЭ и ЭЗС и ВИЭ для решения различных задач.
2. Сформулированы методические принципы моделирования СНЭЭ в системе электроснабжения.
3. Разработана математическая модель для описания работы СЭ с учетом совместного функционирования СНЭЭ, ВЭС и ЭЗС.
4. Разработан метод моделирования нагрузки ЭЗС с учетом ее стохастичности. Задача моделирования нагрузки ЭЗС заключается в построении модели, позволяющая учитывать неопределенность нагрузки, связанной со стохастичностью спроса на зарядку.
5. Разработана комплексная методика оптимизации оценки параметров СНЭЭ с учетом стохастичности генерации ВЭС и потребления электроэнергии от ЭЗС, деградации СНЭЭ, надежности и стоимости модернизации СЭ для поддержания бесперебойной работы ЭЗС. Основным принцип методике основан на выборе мощности и энергоемкости СНЭЭ с учетом многофакторного анализа, чем отличает ее от существующих моделей.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Научная новизна. В результате выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

- Разработана математическая модель системы электроснабжения для описания работы СЭ с учетом совместного функционирования СНЭЭ, ВЭС и ЭЗС.
- Разработан метод моделирования нагрузки ЭЗС с учетом ее стохастичности.
- Разработана методика оптимальной оценки параметров СНЭЭ на основе математического моделирования СНЭЭ в составе СЭ с учетом выполнения баланса электроэнергии для компенсации пиков нагрузки, учитывающие стохастичность генерации ВЭС и потребления электроэнергии от ЭЗС, с учетом деградации СНЭЭ, надежности и стоимости модернизации СЭ.

Практическая значимость и результаты внедрения.

- Разработана методика определения оптимальных параметров систем электроснабжения ЭЗС с учетом стохастичности генерации от ВИЭ и стохастичности нагрузки в СЭ со слабой электрической связью.
- Разработан программный инструмент для исследования систем электроснабжения с СНЭЭ, который может быть использован для дальнейших практических исследований.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ

- Разработанная методика может быть полезна производителям систем накопления энергии и электростанций, а также компаниям, стремящимся создать инфраструктуру для электрозаправочных станций с целью обеспечения электроснабжения потребителей.
- Методика позволяет определить оптимальные электрические параметры СНЭЭ и ВИЭ с учетом графика загрузки электрозаправочной станции и ограничений, влияющих на выбор этих параметров.
- Предложенная методика позволяет провести детальный расчет альтернативных вариантов электроснабжения ЭЗС, учитывая различные сценарии нагрузки, характеристики используемых источников энергии, что способствует оптимизации процессов СНЭЭ и ВИЭ и повышению устойчивости энергетической инфраструктуры в условиях растущего спроса на электрическую энергию.
- Модель ЭЗС является полезным инструментом для участников рынка при определении оптимального числа разъемов зарядной станции и оценке необходимой мощности на этапе планирования присоединения ЭЗС в существующую сеть.
- Модель может быть использована для систем, включающих большую долю неопределенных элементов, таких как ВИЭ и ЭЗС.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа имеет два направления дальнейших исследований:

1. Исследование подходов эксплуатации и управления микросетей постоянного тока для интеграции ВИЭ и СНЭЭ с целью питания ЭЭС.
2. Исследование, посвященное СНЭЭ в качестве независимого источника питания, направлено на обеспечение стабильности и надежности электросетей, а также на поддержание необходимой мощности сети в условиях переменной нагрузки и колебаний генерации ВИЭ.

Совершенствование существующей методики:

- Осуществление верификации предложенных моделей на основе разнообразных статистических данных, что позволяет оценить их точность и надежность в условиях изменяющихся параметров электроэнергетических систем, а также выявить потенциальные области для дальнейшего совершенствования алгоритмов прогнозирования и оптимизации работы систем электроснабжения.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

По теме исследования опубликовано 18 печатных работ (включая сборники статей конференций), из них 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 – в изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science, в том числе 1 статья, включенная в Q1, 14 – включённых в российскую научную электронную библиотеку. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

1. Шамарова, Н.А. Подход к учёту основных стресс-факторов, влияющих на деградацию аккумуляторных батарей в составе систем накопления электроэнергии / Н. А. Шамарова, И. Н. Шушпанов, К. В. Суслов, П. В. Илюшин // Энергетик. – 2023. – № 9. – С. 9-14. – EDN DJODKT.
2. Шамарова, Н.А. Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей / Н.А. Шамарова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 1(53). – С. 24-33. – EDN LOJLRC.
3. Шамарова, Н.А. Оценка оптимальной мощности накопителя для микросети с электрозаправочными станциями / Н. А. Шамарова, И. Н. Шушпанов, А.К. Суслов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2023: Материалы XIII Международной научно-технической конференции: в 2 томах, Красноярск, 23–27 октября 2023 года. Том 2. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 119-122. – EDN VVCQFH.
4. Шамарова, Н. А. Сложности корректной оценки величины энергоёмкости литий-ионных аккумуляторных батарей в составе систем накопления электроэнергии / Н. А. Шамарова // Энергоэксперт. – 2022. – № 2(82). – С. 70-74. – EDN LUALOU.

Публикации в изданиях Scopus и Web of Science:

1. Shamarova, N. Review of Battery Energy Storage Systems Modeling in Microgrids with Renewables Considering Battery Degradation / N. Shamarova, K. Suslov, P. Ilyushin, I. Shushpanov // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – P. 6967. – DOI 10.3390/en15196967. – EDN WTILM.
2. Lombardi, P. A Net-Zero Energy System Solution for Russian Rural Communities / P. Lombardi, B. Arendarski, K. Suslov, [et al.] // E3S Web of Conferences, Irkutsk, Cape Hadartha, 27 июля – 02 2018 года. Vol. 69. – Irkutsk, Cape Hadartha: EDP Sciences, 2018. – P. 01013. – DOI 10.1051/e3sconf/20186901013. – EDN TVSJBF.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИХ В
СЕБЯ ЭЛЕКТРОЗАПРАВОЧНЫЕ СТАНЦИИ**

Спасибо за внимание!

Докладчик: Шамарова Наталия Андреевна,
стар. преподаватель ЭиЭ ФГБОУ ВО ИРНИТУ

E-mail: k15@istu.edu

Научный руководитель: Шушпанов Илья Николаевич,
к.т.н., доцент ЭиЭ ФГБОУ ВО ИРНИТУ