

УДК 621.3

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БАЛАНСИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С АТОМНЫМИ СТАНЦИЯМИ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Сугак В.В., студент гр. бЭЭТ-233, III курс

Научный руководитель: Черных Т.Е., старший преподаватель

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аннотация: В статье рассматривается проблема обеспечения балансирующей мощности в объединенных энергосистемах, содержащих атомные электростанции (АЭС) и возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Выполнен анализ современных тенденций развития электроэнергетики России, включая планы по увеличению доли атомной генерации до 25% к 2045 году и росту мощностей ВИЭ. Показано, что сочетание атомных энергоблоков, традиционно работающих в базовой части графика нагрузки, со стохастической генерацией ВИЭ создает дефицит регулировочных диапазонов. На основе результатов эксперимента «Маневр-1» подтверждена принципиальная возможность расширения маневренных характеристик реакторов ВВЭР-1200 до диапазона 100-40% от номинальной мощности. Представлены результаты математического моделирования фрагмента энергосистемы, демонстрирующие эффективность применения систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) для компенсации суточных неравномерностей. Разработана программа для расчета требуемых параметров накопителей, выполнен сценарный анализ для различных долей ВИЭ.

Ключевые слова: атомная электростанция, возобновляемые источники энергии, балансирующая мощность, системы накопления электроэнергии, маневренность, ВВЭР-1200, Единая энергосистема России, эксперимент «Маневр-1».

Введение. Современная электроэнергетика России находится в стадии глубокой трансформации, обусловленной необходимостью обеспечения энергетической безопасности, технологического суверенитета и выполнения климатических обязательств. Электроэнергетический комплекс страны производит около 1 166 млрд кВт·ч [1] электроэнергии ежегодно, занимая четвертое место в мире по объему генерации. Согласно Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, утвержденной Правительством РФ [2], предусматривается увеличение доли атомной генерации в структуре производства электроэнергии с 18,9% в 2023 году до 24% к 2042 году. В общей сложности планируется ввод 38 энергоблоков АЭС суммарной мощностью 29,3 ГВт. Доля солнечных и ветровых электростанций, согласно документу, вырастет более чем в четыре раза – с 0,8% до 3,3%.

Президентом РФ поставлена задача к 2045 году увеличить долю атомной выработки в энергобалансе до 25%, и Генеральная схема в полной мере отражает эту цель. Одновременно с развитием атомной генерации в России активно развивается сектор возобновляемой энергетики. По данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики (АРВЭ), на конец 2025 года в России функционирует 7,21 ГВт ВИЭ, включая 2,73 ГВт солнечных электростанций, 2,97 ГВт ветровых электростанций, 1,31 ГВт малых гидроэлектростанций.

Однако интеграция ВИЭ в Единую энергосистему России создает серьезные вызовы для обеспечения ее устойчивости. Атомные электростанции традиционно проектировались для работы в базовой части графика нагрузки. Физико-технические ограничения реакторных установок (отравление ксеноном, неравномерность энерговыделения в активной зоне, термические напряжения в оборудовании) ограничивают допустимую скорость изменения мощности и глубину разгрузки.

Важным шагом в решении данной проблемы стали исследования, проведенные учеными «Росатома» в рамках эксперимента «Маневр-1» [3], подтвердившие принципиальную возможность работы реакторов ВВЭР-1200 в маневренном режиме 100-40%.

Целью настоящего исследования является анализ технических возможностей обеспечения балансирующей мощности в энергосистемах с совместной работой АЭС и ВИЭ в условиях российской электроэнергетики [4, 5], а также разработка методики определения требуемых параметров систем накопления электроэнергии для компенсации суточной неравномерности генерации. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ регулировочных характеристик атомных энергоблоков российского дизайна (ВВЭР-1200) с учетом результатов эксперимента «Маневр-1»; исследование современных технических решений для накопления электроэнергии и их применимости в задачах балансирования с учетом требований ГОСТ Р 71521-2024 [6]; разработка математической модели фрагмента энергосистемы и проведение вычислительных экспериментов для типовых условий российской энергосистемы; создание программного инструмента для предварительной оценки потребности в балансирующих мощностях.

Результаты исследования. Атомные энергоблоки с реакторами ВВЭР-1200, составляющие основу современной российской атомной генерации, традиционно рассматривались как источники, предназначенные для работы в базовой части графика нагрузки. Однако результаты эксперимента «Маневр-1» демонстрируют принципиальную возможность расширения регулировочного диапазона. Испытания подтвердили работоспособность топлива при циклическом изменении мощности в диапазоне 100-40% от номинала со скоростями, соответствующими реальным потребностям энергосистемы.

В ходе эксперимента моделировался суточный цикл, включающий ночную разгрузку (семь часов работы на мощности 40%), утренний набор нагрузки (четыре часа на мощности 100%), дневную разгрузку (четыре часа на мощности 40%), а также вечернюю работу на мощности 100% (девять часов).

Реакторные испытания продолжались в течение 224 эффективных суток, за это время было выполнено 218 циклов снижения-увеличения мощности. Результаты исследования подтвердили, что ядерное топливо производства «Росатома» полностью сохраняет целостность и работоспособность в условиях многократного быстрого изменения линейной мощности твэла.

Для количественной оценки потребности в балансирующих мощностях разработана имитационная математическая модель фрагмента энергосистемы, реализованная на языке Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Модель описывает динамику суточных режимов работы генерирующего оборудования с дискретностью 1 час.

Входными параметрами модели являются установленная мощность АЭС (1200 МВт), минимально допустимая мощность АЭС в маневренном режиме (480 МВт), установленная мощность ВЭС (300 МВ), установленная мощность СЭС (200 МВт), базовый уровень нагрузки, варьирующийся в течение суток от 980 до 1480 МВт.

Алгоритм работы имитационной модели:

- Задание исходных данных (мощности АЭС, ВЭС, СЭС, диапазон нагрузки).

- Цикл по часам суток ($t = 0 \dots 23$): формирование профиля АЭС (маневренный режим); формирование стохастического профиля ВЭС; формирование профиля СЭС (солнечная активность); формирование профиля нагрузки; расчет суммарной генерации; расчет небаланса мощности; определение требуемой мощности СНЭЭ.

- Расчет интегральных параметров: максимальная мощность СНЭЭ; энергоемкость СНЭЭ (с учетом КПД).

- Визуализация результатов (графики, таблицы).

Верификация модели осуществлялась путем сопоставления полученных профилей с известными данными о типовых режимах работы ЕЭС России, а также с результатами натурного эксперимента «Маневр-1». Погрешность модели не превышает 5% по интегральным показателям.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования суточных режимов работы рассматриваемого энергокомплекса, полученные с использованием разработанной программы имитационного моделирования.

На верхнем графике представлены суточные графики нагрузки (черная линия) и генерации: АЭС ВВЭР-1200 (синяя линия), ВЭС (зеленая линия), СЭС (желтая линия). Пунктирными синими линиями показаны минимальный (480 МВт) и максимальный (1200 МВт) уровни мощности АЭС. На среднем графике отображен небаланс мощности (генерация минус нагрузка): зеленым цветом выделены зоны избытка генерации, красным – зоны дефицита. На нижнем графике показана требуемая мощность системы накопления электроэнергии: синим цветом выделены зоны заряда (поглощение избытков), оранжевым – зоны разряда (покрытие дефицита). Пунктирными линиями отмечены максимальные значения мощности СНЭЭ.

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие закономерности. В ночные часы (0-7 ч) при работе АЭС на минимальном уровне мощности (480 МВт) и низком уровне нагрузки (около 980 МВт) формируется значительный дефицит генерации, требующий разряда накопителя. В утренние часы (7-11 ч) происходит набор мощности АЭС до номинального уровня (1200 МВт) при одновременном росте нагрузки и появлении солнечной генерации, что приводит к переменному знаку небаланса. В дневные часы (11-15 ч) при снижении мощности АЭС до 840 МВт и наличии солнечной генерации (до 190 МВт) формируются зоны как дефицита, так и избытка. Вечерние часы (15-22 ч) характеризуются работой АЭС на номинальном уровне мощности (1200 МВт), снижением солнечной генерации до нуля и ростом нагрузки до вечернего пика (1480 МВт), что создает устойчивый дефицит мощности.

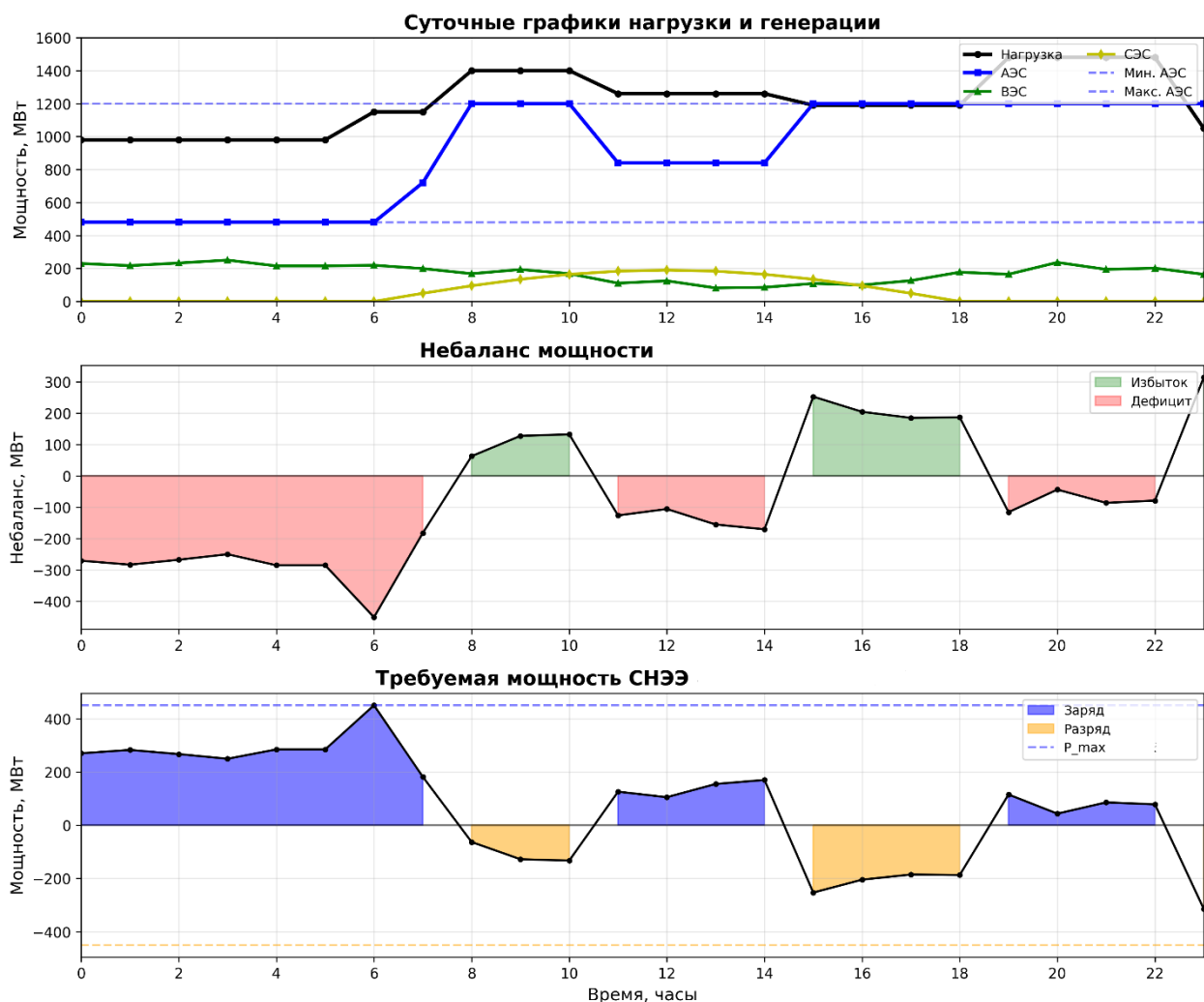


Рис. 1. Результаты моделирования совместной работы АЭС, ВИЭ и СНЭЭ

На основе имитационного моделирования выполнен расчет требуемых параметров системы накопления электроэнергии. Для базового сценария получены следующие результаты: максимальная требуемая мощность СНЭЭ

составляет 442,6 МВт; требуемая энергоемкость накопителя с учетом КПД 92% (в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71521-2024 [6] для литий-ионных СНЭЭ) – 472 МВт·ч; максимальный небаланс мощности достигает 450,5 МВт.

Сценарный анализ для различных долей ВИЭ (таблица 1) демонстрирует нелинейный рост требуемой мощности накопителей при увеличении доли ВИЭ. При доле ВИЭ 67% от мощности АЭС требуемая мощность накопителя возрастает до 380 МВт, что составляет 32% от установленной мощности АЭС.

Таблица 1 – Зависимость требуемых параметров СНЭЭ от доли ВИЭ

Сценарий	Состав ВИЭ, МВт	Доля ВИЭ от АЭС, %	Р _{макс} СНЭЭ, МВт	Е _{емк} СНЭЭ, МВт·ч
Низкая доля	100 ВЭС + 50 СЭС	12,5	112	124
Средняя доля	300 ВЭС + 200 СЭС	41,7	185	472
Высокая доля	500 ВЭС + 300 СЭС	66,7	380	985

Выводы. Интеграция атомных электростанций и возобновляемых источников энергии в Единой энергосистеме России требует наличия балансирующих мощностей. Результаты эксперимента «Маневр-1» подтвердили принципиальную возможность расширения регулировочного диапазона реакторов ВВЭР-1200 до 100-40% от номинала, однако скорость изменения мощности остается ограниченной физическими процессами в активной зоне. Это обуславливает необходимость применения дополнительных технических средств для компенсации быстрых флуктуаций генерации ВИЭ.

Системы накопления электроэнергии являются эффективным средством первичного балансирования, способным реагировать на изменения режима в миллисекундном диапазоне. Принятый ГОСТ Р 71521-2024 создает нормативную основу для применения СНЭЭ в ЕЭС России и технологически изолированных энергосистемах.

Разработанная программа имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценить требуемые параметры системы накопления для конкретного состава генерирующего оборудования. Для типовой конфигурации (АЭС 1200 МВт + ВИЭ 500 МВт) требуемая мощность накопителя составляет 185 МВт с энергоемкостью 472 МВт·ч. При увеличении доли ВИЭ до 67% требуемая мощность возрастает до 380 МВт.

Полученные результаты моделирования (рис. 1) наглядно демонстрируют характер суточных небалансов мощности при совместной работе АЭС и ВИЭ, а также необходимые режимы работы системы накопления для их компенсации. Максимальные значения небалансов приходятся на периоды утреннего и вечернего пиков нагрузки, что соответствует типовым режимам Единой энергосистемы России.

Практическая реализация рассмотренных подходов требует дальнейшего совершенствования нормативной базы и развития систем автоматического регулирования. Опыт внедрения ЦС АПРАМ в Калининградской энергосистеме демонстрирует эффективность автоматизированного управления резервами мощности и может быть распространен на другие регионы ЕЭС России [7].

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию структуры генерирующих мощностей с учетом утвержденной Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года и разработку адаптивных алгоритмов управления, сочетающих использование АЭС с расширенными маневренными характеристиками, ВИЭ и накопителями для обеспечения устойчивости Единой энергосистемы России.

Список литературы

1. Отчет о выполнении в 2025 году Схемы и программы развития электроэнергетических систем России – Электронный ресурс -Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/shablon-is/news/29541/>
2. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2024 г. № 3523-р – Электронный ресурс -Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/157376/>
3. Ученые «Росатома» подтвердили надежность эксплуатации ядерного топлива ВВЭР большой мощности в маневренном режиме – Электронный ресурс - Режим доступа: <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/novosti-otrasli/46701/>
4. Динамика развития ВИЭ в России: что показали итоги 2025 года и что ждать дальше // Ассоциация развития возобновляемой энергетики. 30 декабря 2025. – Электронный ресурс - Режим доступа: <https://rreda.ru/news/smi-onas/4253/>
5. Сугак В.В. Конвергенция атомной и возобновляемой энергетики / В сборнике: Теоретические и прикладные задачи энергетики. Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 50-летию первого выпуска инженеров-промтеплоэнергетиков. Воронеж, 2025. С. 105-110.
6. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы – Электронный ресурс - Режим доступа: <http://gost.gtsever.ru/Data/831/83156.pdf>
7. В Калининградской энергосистеме внедрена первая в России система автоматического третичного регулирования частоты – Электронный ресурс - Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/powernetworks/914453-v-kaliningradskoy-energosisisteme-vnedrena-pervaya-v-rossii-sistema-avtomaticheskogo-tretichnogo-regul/>