

УДК 621.311:621.354
Шифр специальности ВАК 2.4.3., 2.3.7.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Целью данной работы является исследование особенностей совместной работы ветроэнергетической установки (ВЭУ) и системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) на базе суперконденсаторов (СК) при кратковременных изменениях скорости ветра и нагрузки, а также оценка эффективности СНЭЭ на базе СК при компенсации небаланса активной мощности и поддержании частоты в энергосистеме. В ходе работы разработаны имитационные модели изолированной и объединенной ветроэнергетических систем (ЭЭС) в программном комплексе (ПК) MATLAB Simulink, включающие в себя ВЭУ IV типа на базе синхронного генератора с постоянными магнитами, СНЭЭ на базе СК, их систем управления, линии электропередачи, нагрузку, генерирующее оборудование и приемную эквивалентную ЭЭС. Проведены опыты с изменением скорости ветра и нагрузки в энергосистемах. Полученные результаты показывают, что СНЭЭ на базе СК позволяет компенсировать кратковременные отклонения активной мощности ВЭУ и участвовать в поддержании частоты в изолированной энергосистеме.

АВТОРЫ:
Р.Р. Хисамов,
ORCID ID 0009-0007-1989-2802,
khisamovrr@mpei.ru
Р.В. Булатов, к.т.н.,
ORCID ID 0000-0002-8334-9026
Т.В. Рузина,
ORCID ID 0009-0001-8115-7004
П.А. Балаев,
ORCID ID 0009-0000-7577-9125,
Национальный
исследовательский университет
«МЭИ», Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#ветроэнергетическая
установка; #система
накопления электроэнергии;
#суперконденсаторы;
#ветроэнергетическая система;
#силовые преобразователи;
#имитационное моделирование

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Хисамов Р.Р., Булатов Р.В.,
Рузина Т.В., Балаев П.А.
Исследование совместной
работы ветроэнергетической
установки и системы накопления
электроэнергии на базе
суперконденсаторов в составе
энергосистем // Энергия единой
сети. 2026. № 2 (81). С. 22–31.



ВВЕДЕНИЕ

Переход к генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является актуальной задачей в мировой энергетике на протяжении последних лет. В России по состоянию на 01.01.2026 установленная мощность объектов ВИЭ в совокупности составляет 7,21 ГВт, из которых 2,97 ГВт представлены ветроэлектростанциями (ВЭС), 2,73 ГВт — солнечными электростанциями (СЭС), 1,31 ГВт — малыми гидроэлектростанциями (мГЭС) мощностью до 50 МВт [1].

Одной из важных особенностей работы ВЭУ является зависимость выдаваемой активной мощности от скорости ветрового потока. Изменение скорости ветра приводит к изменению мощности ВЭУ, что может вызывать отклонение фактической выдачи от заданного графика. В объединенных энергосистемах такие колебания могут приводить к изменению перетоков мощности, а в изолированных и дефицитных энергосистемах — к небалансу активной мощности и отклонению частоты [2, 3].

Один из способов компенсации кратковременных колебаний активной мощности — применение СНЭЭ. Они способны при увеличении генерации ВЭУ накапливать избыток мощности и выдавать ее в сеть при возникновении дефицита, вызванного снижением скорости ветра или увеличением нагрузки. Наиболее актуальными для совместной работы с ВЭУ являются аккумуляторные батареи (АБ) и СК. АБ обладают большей удельной энергией и целесообразны для длительного хранения энергии, тогда как СК отличаются высокой удельной мощностью, малым временем отклика и большим числом циклов «заряд — разряд», что обуславливает их применение при компенсации кратковременных отклонений параметров режима энергосистем [4, 5].

Основные технико-экономические характеристики СНЭЭ, рассматриваемых в контексте совместной работы с ВЭС, приведены в таблице 1 [6]. Стоимость приведена в относительных единицах за 1 кВт·ч. Для литий-ионных АБ на базе LFP относительная стоимость принята равной 1, а для СК — определена для блока EDLC-системы мощностью 1 МВт и длительностью разряда 45 с [9].

АБ обладают высокой удельной энергией в сравнении с СК, что делает их предпочтительными для длительного хранения энергии и обеспечения устойчивой работы энергосистем [10]. Их применение целесообразно при долговременном отключении основной генерации в энергосистеме и отключениях сетевых (резервных)

связей, через которые осуществляется транзит мощности в энергосистему или при длительном отсутствии ветра.

Отличительными характеристиками СК являются высокая плотность мощности и высокая скорость ее выдачи при разряде и заряде [5, 11]. Основной недостаток СК — сильная зависимость рабочего напряжения от уровня заряда и более высокая стоимость по сравнению с АБ (таблица 1). Высокие динамические характеристики СК, а также большое число циклов «заряд — разряд» позволяют использовать их для компенсации кратковременных колебаний мощности ВЭУ, связанных с резкими изменениями скорости ветра и флуктуациями нагрузки [12, 13].

СК могут быть эффективны для решения проблем кратковременных колебаний ветра или при резких изменениях параметров режима, вызванных, например, набросом и сбросом нагрузки. Это обусловлено высокой скоростью заряда и разряда СК, а число рабочих циклов является достаточным для продолжительной эксплуатации [14].

Таким образом, целью настоящей работы является исследование особенностей совместной работы ВЭУ и СНЭЭ на базе СК при кратковременных изменениях скорости ветра и нагрузки, а также оценка эффективности СНЭЭ на базе СК при компенсации небаланса активной мощности и поддержании частоты в изолированных энергосистемах.

Для достижения указанной цели разработаны имитационные модели изолированной и объединенной энергосистем в ПК MATLAB Simulink, включающие ВЭУ IV типа на базе синхронного генератора с постоянными магнитами, СНЭЭ на базе СК, их систем управления, линии электропередачи, нагрузку, генерирующее оборудование и приемную эквивалентную энергосистему. На созданных моделях проведены опыты с изменением скорости ветра и нагрузки в энергосистеме.

СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Для создания имитационных моделей использован ПК MATLAB Simulink. Принципиальная схема исследуемой энергосистемы приведена на рисунке 1. Она содержит ВЭУ IV типа на базе синхронного генератора с постоянными магнитами, силовой преобразователь, СНЭЭ на базе СК и DC-DC-преобразователь, L-фильтры, повышающий трансформатор, пассивные элементы (ЛЭП

Таблица 1. Техничко-экономические характеристики АБ и СК

СНЭЭ	Среднее напряжение ячейки, В	Удельная энергия, Вт·ч/кг	Ресурс при глубине разряда 80 %, циклы	Срок службы, лет	Саморазряд	Относительная стоимость за 1 кВт·ч	Степень освоенности технологии
Литий-ионные АБ, LFP	3,2	100–140	до 5000	до 10	низкий	1	высокая
Двухслойный СК, EDLC	2,7–3,0	2–8	до 1 000 000	до 20	высокий	150–200	выше среднего

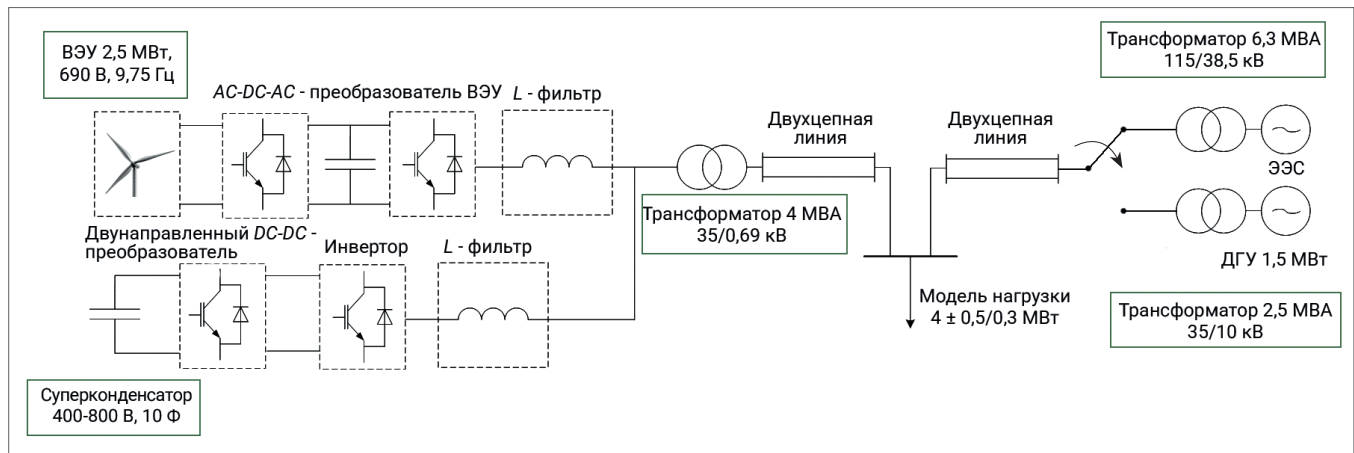


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой энергосистемы

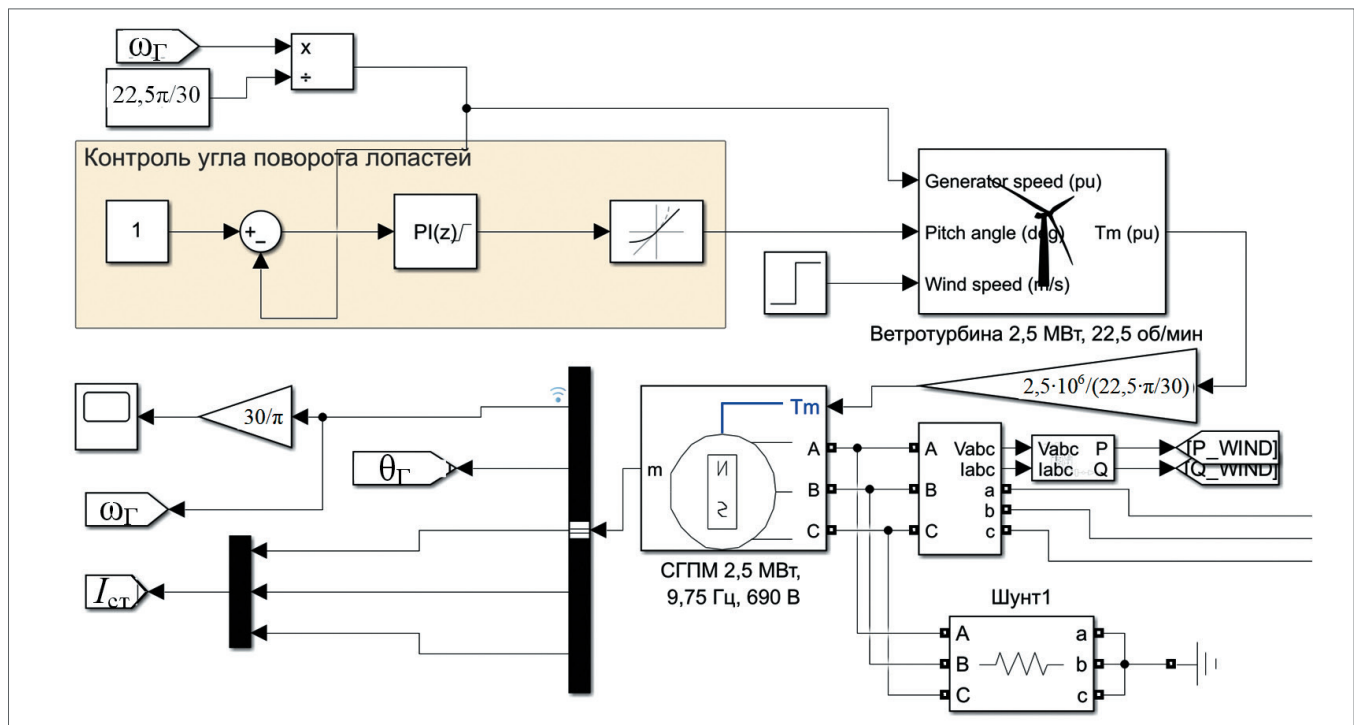


Рис. 2. Модель ВЭУ

и нагрузку), модель дизель-генератора (для изолированной энергосистемы) и модель эквивалентной ЭЭС (для объединенной энергосистемы).

В процессе работы ВЭУ выдает мощность, соответствующую текущей скорости ветра. В имитационной модели представлена ВЭУ Lagerwey L100 2,5 МВт. Механическая мощность N (Вт), вращающая ротор, определяется скоростью ветрового потока V (м/с) по формуле (1) [15].

$$N = \frac{C_p \rho S V^3}{2}, \quad (1)$$

где C_p — коэффициент использования энергии ветра, рассчитываемый по формуле (2); ρ — плотность воздуха, кг/м³; S — ометаемая площадь, м².

$$C_p(Z, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 Z, \quad (2)$$

где $C_1 = 0,5176$;
 $C_2 = 116$;
 $C_3 = 0,4$;

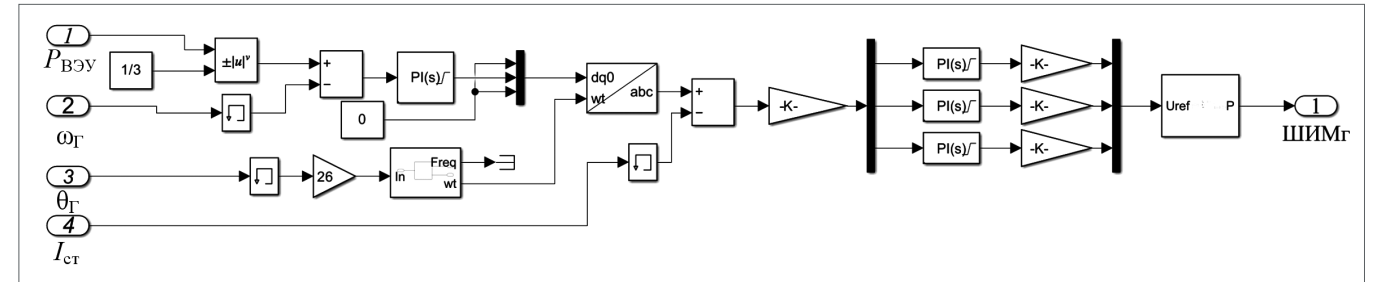


Рис. 3. Система управления силовым преобразователем со стороны генератора

$C_4 = 5$;
 $C_5 = 21$;
 $C_6 = 0,0068$.

Расчет параметра λ_i определяется по формуле (3).

$$\lambda_i = \frac{1}{\left(\frac{1}{Z + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)}, \quad (3)$$

где β — угол поворота лопастей.

Для модели при $\beta = 0$ значения составляют $C_{pmax} = 0,48$ и $Z_{max} = 8,1$.

Модель ВЭУ в ПК MATLAB Simulink представлена на рисунке 2. На вход блока ветротурбины подаются скорость ветра, скорость вращения генератора ω_r , приведенная к номинальной скорости вращения, и угол поворота лопастей. Данные параметры влияют на механический момент на выходе турбины в относительных единицах. Система управления углом поворота лопастей реагирует, когда мощность превышает номинальную, и включает в себя ПИ-регулятор с ограничением по максимальному углу поворота (принят равным 20°) и ограничением скорости поворота лопастей (2°/с) [15].

Подключение ВЭУ к энергосистеме осуществляется с помощью силового преобразователя AC-DC-AC [16], главной задачей которого является обеспечение синхронной работы ВЭУ и ЭЭС, реализуемое посредством системы управления (СУ).

Система управления преобразователем со стороны ветрогенератора представлена на рисунке 3. Опорная угловая скорость вращения генератора определяется исходя из допущения, что в установившемся режиме $\omega_g = k_m \sqrt[3]{N}$, где k_m — коэффициент, зависящий от параметров ветроколеса (принимается равным 1) [15]. Данное значение сравнивается с фактической скоростью вращения и через ПИ-регулятор подается на блок преобразования $dq-abc$, где на вход ω_t подается значение угла ротора θ_r . Далее с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) создаются сигналы управления силовым преобразователем ШИМГ.

Система управления силовым преобразователем со стороны сети обеспечивает синхронную работу ВЭУ и энергосистемы. Для этого в СУ применяется фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) — следящая

система с отрицательной обратной связью, основанная на преобразовании входного сигнала напряжения в точке подключения силовых преобразователей в dq -или $\alpha\beta$ -координатах и их последующей обработке для получения значения фазы напряжения. Значение фазы используется в двух целях: для обратного преобразования $dq-abc$, которое задает сигналы контроллера тока в системе управления преобразователя, и для формирования импульсов ШИМ, открывающих ключи силового преобразователя.

На рисунке 4 приведена имитационная модель СУ. На вход СУ подаются фазные напряжения в точке общего присоединения (ТОП) и токи перед L-фильтром. На основе полученного значения фазы $\theta_{\text{ФАПЧ}}$ сигналы напряжения и тока в dq -координатах направляются в контроллер тока. Задающие значения I^*d и I^*q рассчитываются по формулам (4) и (5) соответственно [2, 17].

$$I^*d = \frac{2}{3} \left(\frac{V_d P + V_q Q}{V_d^2 + V_q^2} \right). \quad (4)$$

$$I^*q = \frac{2}{3} \left(\frac{V_d Q - V_q P}{V_d^2 + V_q^2} \right). \quad (5)$$

При исследовании изменения частоты в изолированной энергосистеме СНЭЭ управляется ПИ-регулятором (рисунк 5), который сравнивает уставку по частоте с ее фактическим значением [18]. Если ВЭУ и СНЭЭ работают в составе объединенной энергосистемы, используется блок управления мощностью, который поддерживает заданную суммарную активную мощность системы ВЭУ-СК. На вход этого блока поступают уставка активной мощности системы ВЭУ-СК и фактическая активная мощность ВЭУ. Задание активной мощности для СНЭЭ рассчитывается как разность между уставкой системы ВЭУ-СК и фактической мощностью ВЭУ. Если мощность ВЭУ превышает заданную уставку, СНЭЭ переходит в режим заряда; если мощность ВЭУ становится ниже уставки — в режим разряда. Канал управления СНЭЭ выбирается логическим блоком: при работе в объединенной энергосистеме используется канал регулирования мощности, при работе в изолированной — канал регулирования частоты.

СК моделируется с помощью стандартного блока библиотеки MATLAB Simulink, принцип работы которого

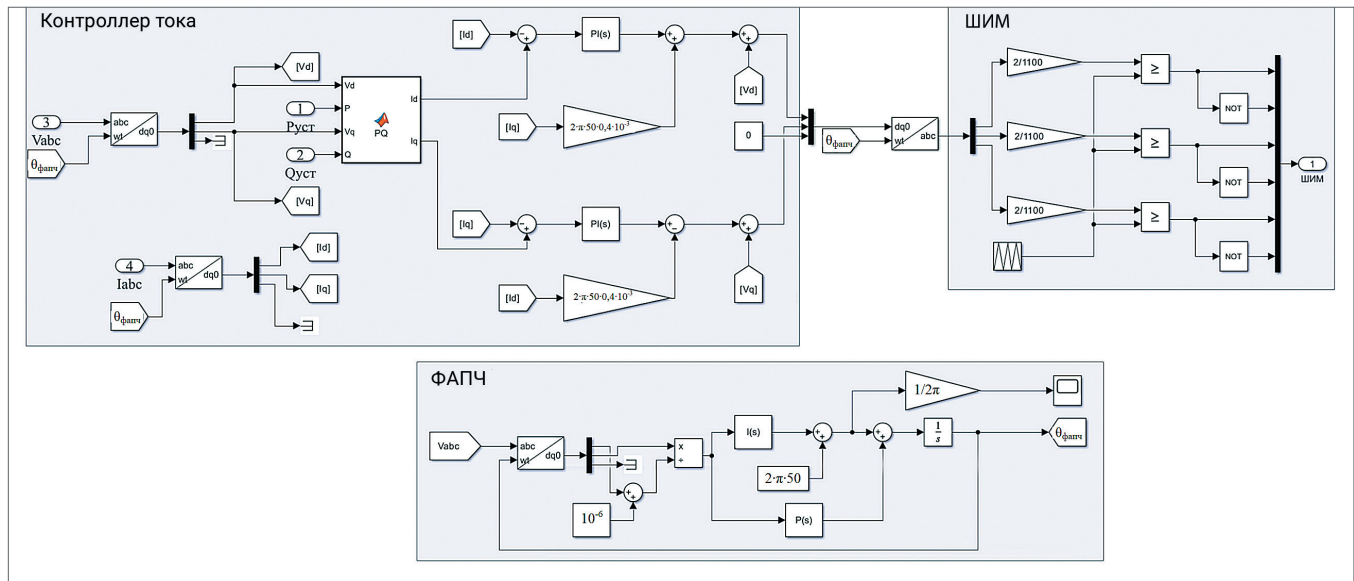


Рис. 4. Система управления силовым преобразователем со стороны сети

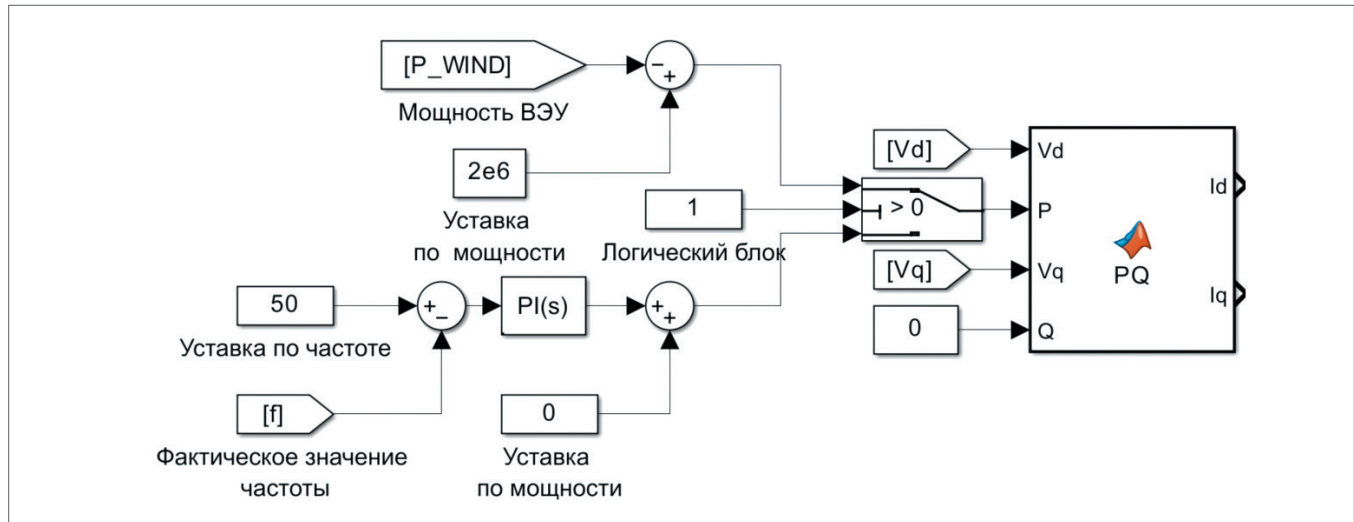


Рис. 5. Система управления СНЭЭ с каналами регулирования мощности и частоты

описан в [18]. Емкость СК при параметризации модели определяется по формуле (6).

$$C = \frac{2W}{U^2}, \quad (6)$$

где W — энергия, Дж;

U — напряжение на зажимах СК, В.

В работе используется СК емкостью 10 Ф с рабочим диапазоном напряжений 400–800 В.

Подключают СК с помощью двунаправленного преобразователя постоянного тока (DC-DC-преобразователя), так как для него характерна сильная зависимость напря-

жения от уровня заряда [5, 19]. Система управления СК представлена на рисунке 6. Чтобы поддерживать уровень напряжения, необходимый для корректной работы инвертора СНЭЭ, напряжение на выходе DC-DC-преобразователя сравнивается с уставкой (1100 В). Сигнал об ошибке по напряжению поступает в ПИ-регулятор. На его выходе с помощью генератора ШИМ формируются управляющие импульсы на открытие транзисторов — они подаются при сравнении фактического тока в сети I_ϕ и тока на выходе ПИ-регулятора I_y . Напряжение на стороне постоянного тока DC-DC-преобразователя (1100 В) определяется в зависимости от значения напряжения в энергосистеме.

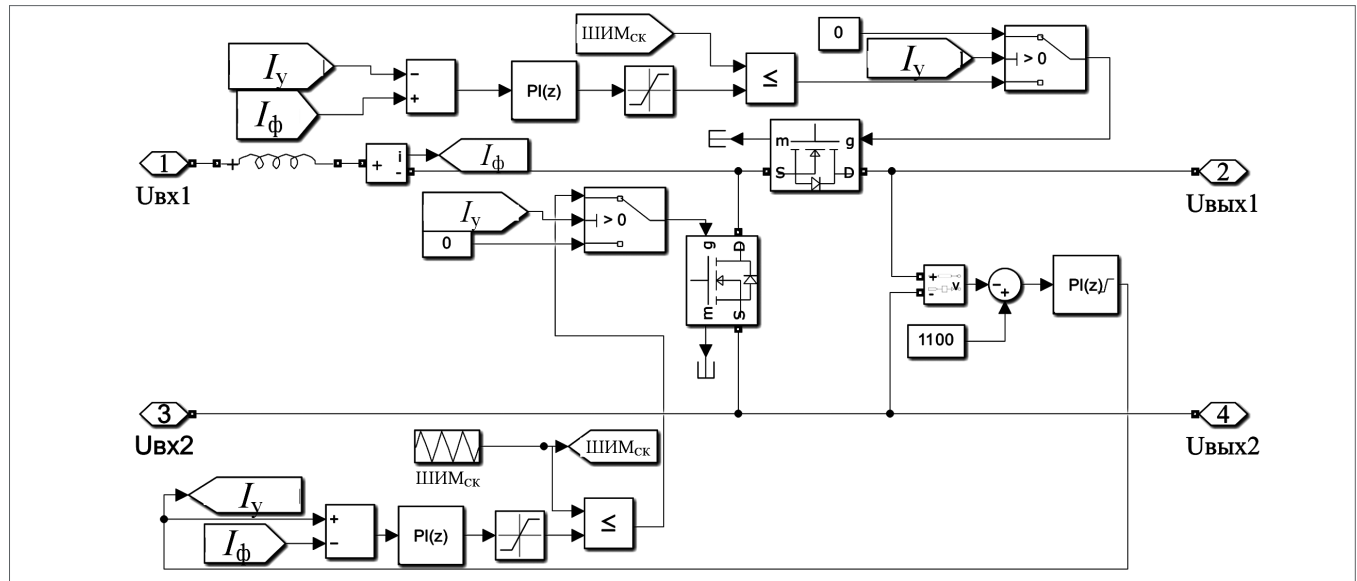


Рис. 6. Модель DC-DC-преобразователя

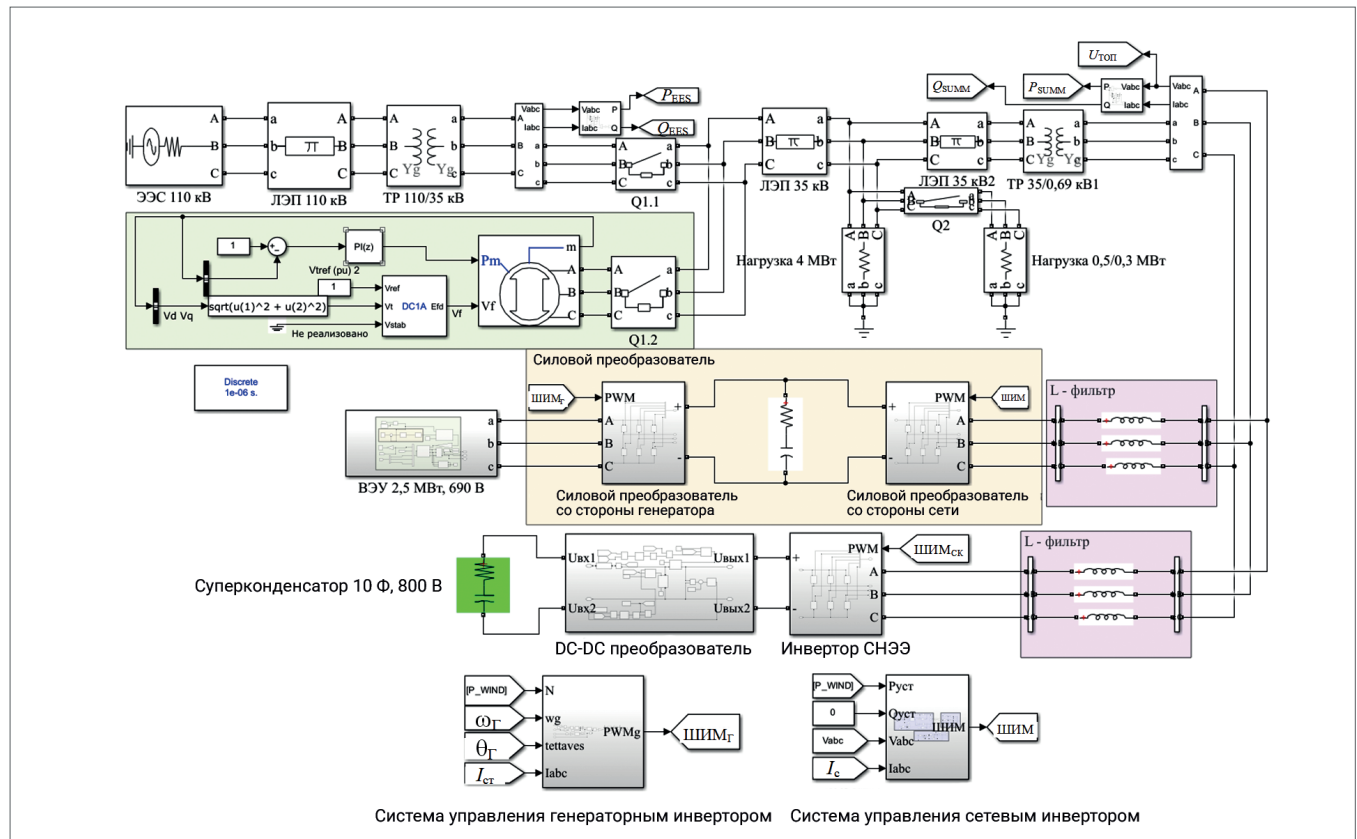


Рис. 7. Имитационная модель исследуемых энергосистем

Система управления силовым преобразователем DC-AC аналогична системе управления преобразователем ВЭУ со стороны сети. Входным параметром по мощности является разность между требуемой

и фактической мощностью ВЭУ. Описания имитационных моделей традиционных элементов энергосистем, которые используются в модели, представлены в [20].

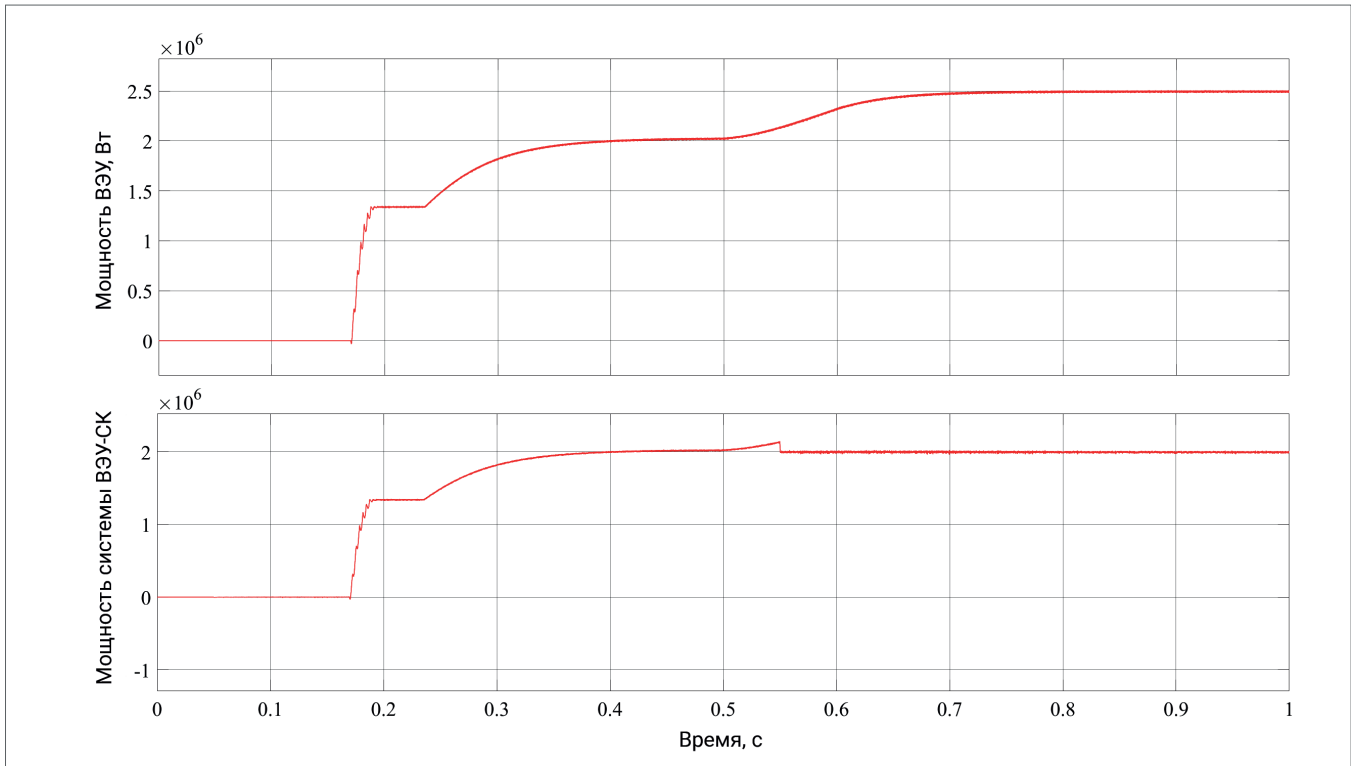


Рис. 8. Мощность ВЭУ и системы ВЭУ-СК при увеличении скорости ветра

Схема содержит эквивалентную энергосистему и дизель-генераторную установку (ДГУ). Модель ЭЭС представляет собой идеальный трехфазный источник питания, собранный по схеме «звезда с заземленной нейтралью» и указанный в модели блоком Three-Phase Source. Напряжение устанавливается номинальным и равным 110 кВ.

В модели ДГУ представлена синхронным генератором с регулятором скорости вращения и системой управления мощностью, работающей по сигналу рассогласования между заданными и фактическими значениями скоростями вращения [21]. Основные характеристики модели приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики ДГУ

Параметр	Значение
Номинальная мощность, МВА	1,5
Количество пар полюсов	2
Напряжение, кВ	10
Частота, Гц	50
Скорость вращения, об/мин	1500

Итоговая имитационная модель для проведения опытов и оценки эффективности совместного использования ВЭУ и СНЭЭ на базе СК представлена на рисунке 7. Предусмотрена вариативность работы ВЭУ и СНЭЭ в составе изолированной и объединенной энергосистемы за счет использования выключателей *Q1.1* и *Q1.2*, а изменение нагрузки осуществляется с помощью выключателя *Q2*. Комплекс оборудования (включая ВЭУ, СК, их силовые преобразователи и фильтры) объединяется в общую систему ВЭУ-СК, для которой задается единая уставка по мощности (диспетчерский уровень мощности).

Проведены опыты с изменением скорости ветра при работе ВЭУ в составе объединенной энергосистемы, а также опыты с изменением нагрузки при работе в составе изолированной энергосистемы.

ОПЫТ ПРИ ПОВЫШЕНИИ СКОРОСТИ ВЕТРА

В опытах с изменением скорости ветра синхронизация ВЭУ с внешней сетью завершается к моменту 0,17 с, после чего формируются управляющие воздействия на ВЭУ и СНЭЭ на базе СК.

Уставка мощности для системы ВЭУ-СК составляет 2 МВт. Начальная скорость ветра — 10,5 м/с, мощность ВЭУ — 2 МВт. В момент 0,5 с скорость ветра увеличивается до номинальной (12 м/с), а мощность ВЭУ спустя

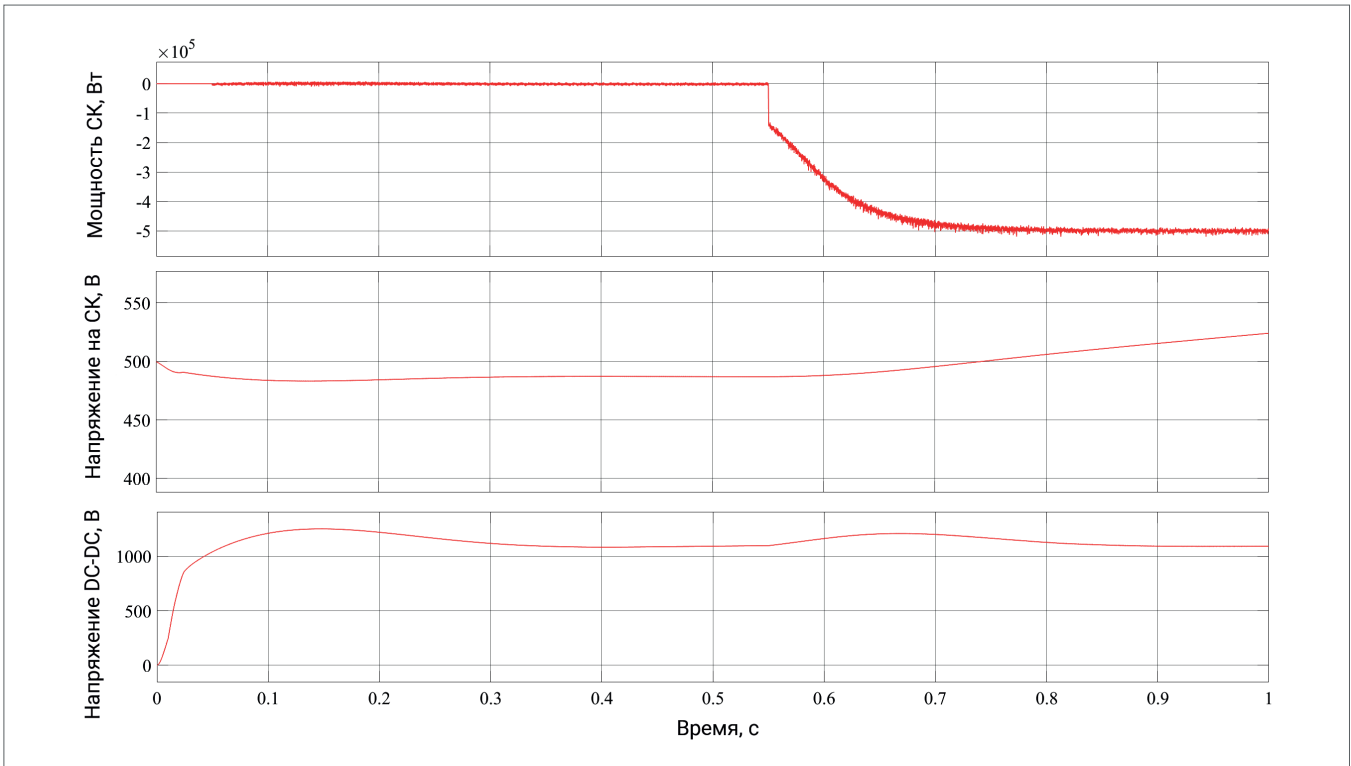


Рис. 9. Показатели работы СК

0,1 с достигает 2,5 МВт. Для СК время отклика на внешнее воздействие задано значением 0,05 с — оно представляет собой суммарную задержку измерения и работы контура управления силовым преобразователем СК [22]. В момент 0,55 с система ВЭУ-СК выдает мощность, которая соответствует заданной уставке, СК при этом переходит в режим потребления мощности. Мощности на выводах ВЭУ и системы ВЭУ-СК приведены на рисунке 8. Мощность, заряд (уровень напряжения на зажимах СНЭЭ) и напряжение на выходе DC-DC-преобразователя приведены на рисунке 9.

Анализ полученных графиков показывает, что СК способны потреблять избыток активной мощности относительно заданной уставки системы. Время поддержания этого режима зависит от начального уровня заряда. При потреблении мощности 0,5 МВт скорость заряда составляет 16,7 %/с.

Таким образом, СК емкостью 10 Ф способны компенсировать избыток мощности 0,5 МВт в течение более 4 с, что способствует поддержанию баланса мощности при резких изменениях скорости ветра.

ОПЫТ ПРИ НАБРОСЕ НАГРУЗКИ

Данный опыт проводится при работе ВЭУ в изолированной энергосистеме, в составе которой предусмотрена ДГУ мощностью 1,5 МВт. До момен-

та 0,17 с происходит синхронизация ВЭУ с сетью и формирование установившегося режима при обеспечении мощности нагрузки генератором и ВЭУ. В момент 0,2 с устанавливается режим работы ВЭУ и ДГУ, соответствующий их номинальным параметрам (суммарная выдаваемая мощность составляет 4 МВт).

В момент 0,5 с осуществляется наброс нагрузки 0,5 МВт, а в момент 0,52 с СК компенсирует дефицит мощности 0,5 МВт. Мощности в узлах системы и частота в сети приведены на рисунке 10. При набросе нагрузки в сети наблюдается дефицит активной мощности, что приводит к снижению частоты. Результаты моделирования показывают, что в этом случае система ВЭУ-СК мгновенно компенсирует возникающий дефицит мощности. Частота в сети остается практически неизменной, что подтверждает эффективную работу СНЭЭ на базе СК. Таким образом, СК являются действенным средством регулирования частоты в изолированной энергосистеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования разработаны имитационные модели изолированной и объединенной энергосистем в ПК MATLAB Simulink, включающие ВЭУ мощностью 2,5 МВт и СНЭЭ на базе СК. На созданных моделях проведены

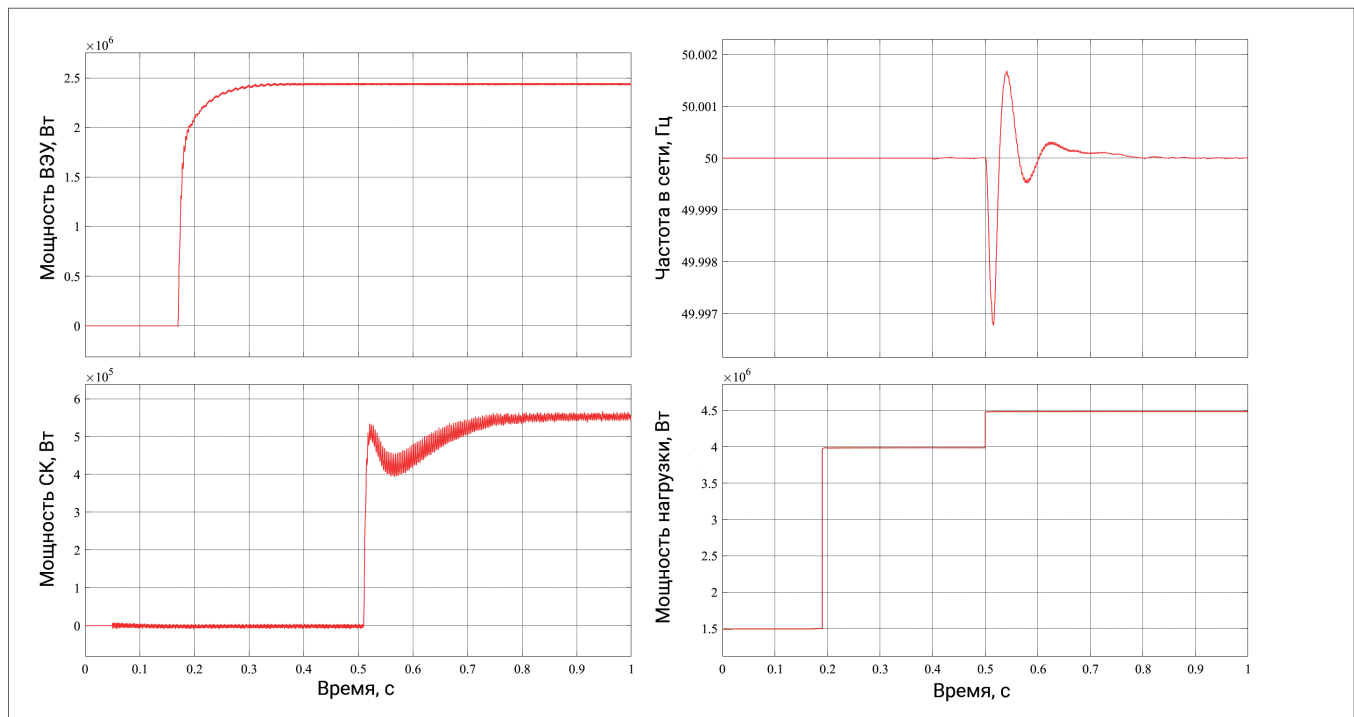


Рис. 10. Мощности на выходах ВЭУ, СК, нагрузки и частота в сети

опыты, позволившие проанализировать реакцию системы ВЭУ-СК на различные возмущения (изменения скорости ветра и потребляемой мощности нагрузки). Определено, что СК способен практически мгновенно выдавать или потреблять требуемую мощность, при этом продолжительность его работы зависит от начального заряда. При выдаче мощности 0,5 МВт скорость разряда составляет 16,7%/с, что позволяет СК работать в этом режиме в течение 4 с.

Кроме того, результаты опытов подтверждают теоретические положения о совместной работе ВЭУ и СНЭЭ на базе СК, согласно которым такая система эффективно обеспечивает баланс мощности в энергосистеме. Использование СНЭЭ на базе СК позволяет поддерживать заданное значение выходной мощности ВЭУ-СК без разгрузки ВЭУ. В изолированной энергосистеме ВЭУ-СК выступает эффективным средством регулирования частоты (если отклонение частоты носит кратковременный характер).

▼ **Финансирование:** работа выполнена в рамках проекта «Разработка физической модели системы накопления электроэнергии с реализацией цифрового управления различными подсистемами накопления» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: технологии будущего» в 2024–2026 гг.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Статистика ВИЭ // Ассоциация развития возобновляемой энергетики: [сайт]. URL: <https://reda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 01.05.2026). Текст: электронный.
2. Илюшин П.В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 4. С. 98–107.
3. Симонов А.В. Методика и алгоритм проверки параметров настройки функции LVRT ветроэнергетических установок ветровых электростанций при их интеграции в ЕЭС России / А.В. Симонов, П.В. Илюшин // Релейная защита и автоматизация. — 2022. — № 1 (46). — С. 72–81.
4. Балаев П.А., Петракова Т.В., Хисамов Р.Р. История и перспективы применения систем накопления электроэнергии в России // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы XIX Международной молодежной научно-практической конференции. Казань: 2025. С. 20–22.
5. Current Experience and Prospects for the Use of Energy Storage Systems in the Russian Federation / R.V. Bulatov, P.A. Balaev, T.V. Petrakova, R.R. Khisamov // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2025. P. 1–7. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10971017.
6. Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems / F. Nadeem, S.M.S. Hussain, P.K. Tiwari, A.K. Goswami, T.S. Ustun // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 4555–4585. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2888497.
7. Liu X., Li K., Li X. The Electrochemical Performance

and Applications of Several Popular Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: A Review // Communications in Computer and Information Science. 2018. DOI: 10.1007/978-981-13-2381-2_19.

8. 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment / V. Viswanathan, K. Mongird, R. Franks [et al.] // Pacific Northwest National Laboratory, 2022. PNNL-33283.
9. Technology Strategy Assessment: Supercapacitors / V. Durvasulu, K. Anderson, E. Elgqvist [et al.] // U. S. Department of Energy, Office of Electricity, 2023. DOE/OE-0039.
10. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии / Кулова Т.Л., Николаев И.И., Фатеев В.Н., Алиев А.Ш. // Kinyu Problemleri. 2018. № 1.
11. Вольфович Ю.М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 4. С. 197–238.
12. Aranizadeh A., Mirmozaffari M., Khalatabadi Farahani B. Maximizing Wind Turbine Power Generation Through Adaptive Fuzzy Logic Control for Optimal Efficiency and Performance // Wind. 2025. Vol. 5, № 1. Article 4.
13. Configuration and control strategy for an integrated system of wind turbine generator and supercapacitor to provide frequency support / R. Wang, S. Qin, W. Bao, A. Hou, Y. Ying, L. Ding // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 154. Article 109456. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109456.
14. de Carvalho W.C., Bataglioli R.P., Fernandes R.A.S., Coury D.V. Fuzzy-based approach for power smoothing of a full-converter wind turbine generator using a supercapacitor energy storage // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 184. Article 106287. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106287.
15. Рамадан А., Елистратов В.В. Моделирование режимов работы сетевой ветроэнергетической установки с синхронным генератором на постоянных
16. магнитах // Электричество. 2019. № 7. С. 11–21.
17. Bernet S. Recent developments of high power converters for industry and traction applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2000. Vol. 15, № 6. P. 1102–1117.
18. MATLAB//MATLAB Help Center: [сайт]. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/capacitor.html> (Дата обращения: 29.10.2025). Текст: электронный.
19. Балаев П.А., Петракова Т.В., Хисамов Р.Р., Булатов Р.В. Разработка имитационных моделей систем накопления электроэнергии с реализацией цифрового управления различными подсистемами накопления // Технологии будущего: сборник трудов X открытой Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов с международным участием, Москва, 19–23 мая 2025 года. Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2025. С. 179–194. EDN: KDHJWX.
20. Rashid M.H., David Ivan E., Torshin I. Power Electronics Handbook. 3rd ed. Massachusetts: Elsevier, 2011. P. 249–408.
21. Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие / Л.П. Костюченко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2012. 215 с.
22. Investigation of the Influence of the Virtual Inertia System on the Stability of a PV Plant / V. Burmeyster, I.I. Berdyshev, R.V. Bulatov [et al.] // in Proc. 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2024. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479718.
23. Dimensioning Methodology of an Energy Storage System Based on Supercapacitors for Grid Code Compliance of a Wave Power Plant / G. Navarro, M. Blanco, J. Torres, J. Nájera, Á. Santiago, M. Santos-Herran, D. Ramírez, M. Lafoz // Energies. 2021. Vol. 14, № 4. Article 985. DOI: 10.3390/en14040985.



Станьте частью команды
АО «Россети Научно-
технический центр»



Сканируйте QR-код
начните путь
к профессиональному
росту!