

УДК 620.9:620.92

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-62-70

Влияние режимов работы гибридных энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии на определение типа аккумуляторов энергии

М.Г. Тягунов, Р.П. Шевердиев

Цели исследования — изучение особенностей работы генерирующих установок, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в составе гибридного энергокомплекса и определение требований, предъявляемых генерирующими установками на базе ВИЭ к накопительным системам по объемам запасаемой энергии, режимам приема и отдачи мощности на продолжительных, средних и коротких интервалах времени.

На примере данных реального потребителя, расположенного на острове Попова, смоделированы энергетические комплексы, выполнены расчеты и анализ их рабочих режимов.

Определены технические требования, предъявляемые установками к эксплуатационным характеристикам накопителей энергии по объемам запасаемой энергии, режимам приема и выдачи мощности на разных интервалах времени.

Полученные результаты важны для разработки эффективных систем накопления энергии гибридных энергокомплексов, функционирующих на основе ВИЭ, обеспечивающих повышение их надежности и технико-экономической эффективности.

Исходя из проведенных расчетов и анализа режимов работы гибридного энергокомплекса с ВИЭ установлено, что для удовлетворения требованиям комплекса необходимо применение в его составе гибридного накопителя энергии, в котором сочетаются различные источники электрической энергии, одни из которых, ввиду их высокой энергоемкости (например, водородные накопители электроэнергии), можно рассматривать как источники энергии для сезонного и суточного регулирования, а другие (суперконденсаторы), — как источники мощности в режимах приема и отдачи импульсов мощности на секундных интервалах времени.

Ключевые слова: изолированные энергорайоны, гибридные накопитель и энергокомплекс, водородные накопители, суперконденсаторы, ветроэнергетическая установка.

Для цитирования: Тягунов М.Г., Шевердиев Р.П. Влияние режимов работы гибридных энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии на определение типа аккумуляторов энергии // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 62—70. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-62-70.

Determining the Type of Energy Storage Devices for RES-Based Hybrid Energy Complexes to Suit the Energy Complex Operation Modes

M.G. Tyagunov, R.P. Sheverdiev

The aim of the work is to study the performance characteristics of generating units operating on the basis of renewable energy sources (RES) as part of a hybrid energy complex and to determine the requirements posed by these generating units to the storage systems in terms of stored energy amounts and power absorption and delivering conditions on long, medium and short intervals of time.

Using the data from a real consumer located on Popov Island, the relevant energy complexes were modeled, and their operating modes were calculated and analyzed.

The technical requirements posed by the RES-based installations to the performance characteristics of energy storage devices in terms of stored energy amounts and power absorption and delivering conditions on different time intervals are determined.

The obtained results are important for elaborating efficient energy storage systems for RES-based hybrid energy complexes for improving their reliability and technical and economic efficiency.

It has been established, based on the calculations and analysis of the RES-based hybrid energy complex operation modes, that for meeting the hybrid energy complex requirements, the complex should be fitted with a hybrid energy storage system combining various sources of electrical energy. Some of them, in view of their high energy capacity (e.g., hydrogen electric energy storage devices), can be considered as energy sources for seasonal and daily regulation, and others (supercapacitors) can be regarded as power sources to be used in the modes of absorbing and delivering power pulses on second time intervals.

Key words: isolated energy regions, hybrid energy complex and energy storage, hydrogen storages, supercapacitors, windmill.

For citation: Tyagunov M.G., Sheverdiev R.P. Determining the Type of Energy Storage Devices for RES-Based Hybrid Energy Complexes to Suit the Energy Complex Operation Modes. Bulletin of MPEI. 2020;4:62—70. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-62-70.

Введение

Существующие оценки использования энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в единой энергетической системе России, за исключением крупных ГЭС, показывают их малую конкурентоспособность по сравнению с крупными электростанциями на ископаемых видах энергоресурсов. С одной стороны, это связано с малой мощностью и высокой стоимостью производимой электроэнергии на наиболее распространенных солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанциях по сравнению с крупными электростанциями. С другой стороны, включение СЭС и ВЭС в ЕЭС России связано с необходимостью обеспечения гарантии энергоснабжения, несмотря на нестабильность прихода первичного ресурса указанных станций.

Использование ВИЭ в системах распределенной генерации, прежде всего в изолированных и удаленных энергорайонах, составляющих примерно 2/3 территории страны, значительно более привлекательно из-за высокой стоимости доставки в них топлива для около 900 дизельных электростанций (ДЭС) с общей выработкой 2,54 млрд. кВт·ч в год, высоких удельного расхода топлива (до 850 г/кВт·ч), себестоимости вырабатываемой энергии (в некоторых случаях до 80 руб/кВт·ч), значительного ущерба окружающей среде выбросами продуктов сгорания дизельного топлива и засорения ее использованной тарой от дизтоплива [1].

Таким образом, уменьшение объема потребления дальнепривозного топлива в децентрализованных зонах является важной социальной, экономической и экологической задачей. Однако и потребителям изолированных районов нужно обеспечить гарантированное электроснабжение, чего можно достичь либо использованием гарантирующих источников энергии, либо включением в состав электростанций на основе ВИЭ накопителей энергии [2].

Изучение возможности использования накопителей различного типа ведется во всех странах, так или иначе развивающих энергетику ВИЭ, и этой тематике посвящено большое число работ [3]. Однако далеко не все исследования направлены на поиск и создание накопителей со вполне определенными свойствами, диктуемыми режимными особенностями различных типов энергетических установок на основе ВИЭ, особенно СЭС и ВЭС. Настоящая публикация посвящена анализу особенностей работы энергоустановок на основе ВИЭ, функционирующих в составе гибридного энергокомплекса, и определению требований, предъявляемых ими к накопительным устройствам.

Структура гибридного энергокомплекса гарантированного энергоснабжения

Один из способов повышения энергетической эффективности систем децентрализованного энергоснабжения — внедрение гибридных энергокомплексов

гарантированного энергоснабжения (ГЭК) с использованием ВИЭ [4].

На рисунке 1 приведена структурная схема предлагаемого ГЭК, представляющая собой систему, в которую входят энергоустановки, функционирующие на базе ВИЭ — фотоэлектрическая (ФЭУ), ветроэнергетическая (ВЭУ), гидроэнергетическая (ГЭУ) и теплонасосная энергетическая (ТНЭУ), электродвигатель (ЭК), солнечная система теплоснабжения (ССТ), накопители и потребители электрической (НЭЭ, НТЭ) и тепловой (НТЭ, ПТЭ) энергии.

Основными недостатками ВИЭ являются малая плотность энергетического потока и отсутствие гарантированной мощности некоторых установок ВИЭ. Основные проблемы связаны с непостоянством во времени таких источников энергии, как солнечное излучение, ветер, сток малых рек, тепло окружающей среды.

Это значит, что в изолированных энергосистемах подобные установки не могут обеспечить бесперебойное энергоснабжение потребителя. К примеру, расчет выходной мощности ВЭУ, сделанный на основе реальных данных по изменению скорости ветра на острове Попова показал, что даже в течение часа колебания мощности ВЭУ могут меняться от 0 до 48% установленной мощности.

Очевидно, что в такой ситуации для поддержания баланса генерируемой и потребляемой мощности автономных энергокомплексов необходимо наличие накопителей энергии (НЭ), которые позволят решить проблему гарантированного энергоснабжения потребителей, поэтому ключевые компоненты в схеме ГЭК (см. рис. 1) — системы аккумулирования электрической и тепловой энергии.

Проблемы статической устойчивости систем энергоснабжения с ВИЭ вызывают необходимость определения и учета технических требований к эксплуатационным характеристикам систем накопления энергии по приему и выдаче мощности для разных интервалов времени, что является важным условием для создания эффективных

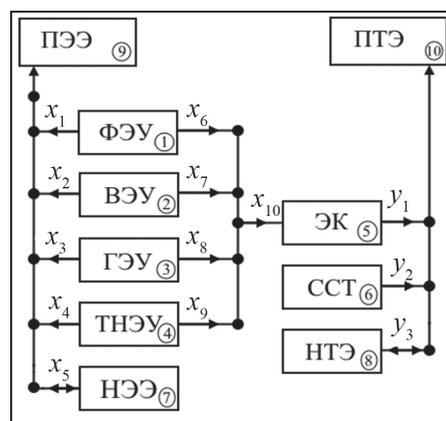


Рис. 1. Структурная схема гибридного энергокомплекса: $x_1 — x_{10}, y_1 — y_3$ — потоки электрической и тепловой энергии

систем накопления энергии для ГЭК, функционирующих на основе ВИЭ, обеспечивающих повышение их надежности и технико-экономической эффективности.

Требования к накопителям энергии для установок на основе возобновляемых источников энергии

Применение НЭ обеспечивает ГЭК на основе ВИЭ повышением надежности энергоснабжения за счет использования систем накопления в качестве гарантирующих источников энергии, снижением отрицательных воздействий переменной генерации ВИЭ на гарантирующее генерирующее оборудование, увеличением срока эксплуатации генерирующего оборудования вследствие повышения стабильности режима его работы, бесперебойным и надежным энергоснабжением потребителей, регулированием частоты и перетоков активной мощности, снижением потерь энергетических ресурсов при понижении энергопотребления.

Для определения требований к НЭ по объему запасаемой энергии, режимам приема и отдачи мощности на разных интервалах времени (год, месяц, сутки, час, секунда) проведены расчет и анализ режимов ГЭК по методике [5].

Наиболее распространённые и динамично развивающиеся в настоящее время, а также наиболее волатильные по выдаваемой мощности системы ВИЭ — ФЭУ и ВЭУ, поэтому анализ режимов ГЭК для определения требований к НЭ проводится именно для них.

Требования к накопителям энергии на годовом интервале времени

Требования к НЭ на годовом интервале времени определяются из анализа годового энергетического баланса, составленного как для случаев использования ФЭУ и ВЭУ для обеспечения нужд потребителя отдельно друг от друга, так и при их совместном использовании.

Проанализируем годовые балансы электрической энергии при раздельном применении ВЭУ и ФЭУ и в случае их комбинированного применения. В послед-

нем случае считаем, что годовой объем электроэнергии между ними распределен равномерно.

В качестве исходных данных для определения энергетических характеристик ВЭУ и ФЭУ воспользуемся данными о среднемесечной скорости ветра, рассчитанными по фактическим измерениям скорости на ветроизмерительном комплексе (ВИК) ВЭУ на острове Попова на высоте 40 м и информацией о месячной инсоляции из базы данных НПС. Полученные годовые балансы даны на рис. 2.

Результаты анализа показали, что хотя годовой энергетический баланс соблюдается, использование установок ВИЭ не может гарантировать надежное электроснабжение потребителей, так как объемы потребляемой и генерируемой энергии значительно различаются в разные месяцы года. Для ВЭУ максимальное значение генерируемой энергии приходится на декабрь, когда выработка ВЭУ почти в 2 раза превышает объем электрической энергии, потребляемый нагрузкой. Максимальный дефицит энергии ВЭУ наблюдается в августе и составляет около 60% от требуемого потребителю объема электроэнергии.

Максимальное значение генерируемой ФЭУ энергии наблюдается в мае, она примерно в 1,5 раза превышает потребление. Максимальный дефицит приходится на декабрь, что составляет порядка 60% от требуемого объема энергии.

Анализ энергетического баланса при комбинированном применении ФЭУ и ВЭУ, приведенного на рис. 3, показывает, что избыток и дефицит энергии в разные месяцы года уменьшаются. Но даже при этом остается несоответствие режима генерации и потребления энергии по месяцам года

Для сглаживания сезонных колебаний потребляемой и вырабатываемой энергии рассмотрим применение идеального накопителя, способного аккумулировать все имеющиеся излишки энергии и выдавать их без потерь при возникновении дефицита.

Зависимости, изображенные на рис. 4, показывают результат направления излишков на аккумулирование энергии и ее последующей выдачи при дефицитах в

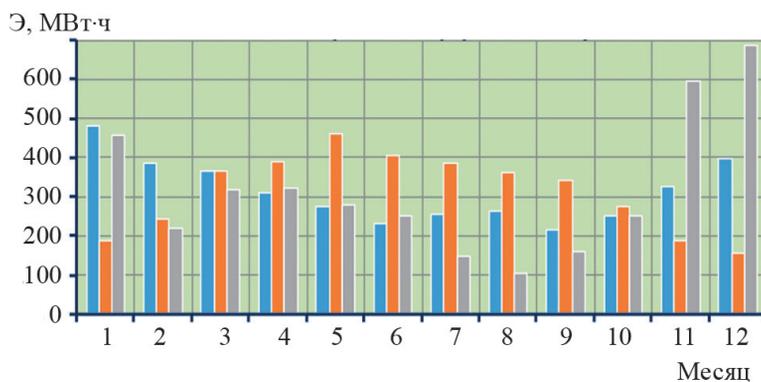


Рис. 2. Годовой энергетический баланс при раздельном применении ФЭУ и ВЭУ:
 ■ — потребляемая энергия ($\text{Э}_{\text{потр}}$); ■, ■ — выработки ФЭУ ($\text{Э}_{\text{ФЭУ}}$) и ВЭУ ($\text{Э}_{\text{ВЭУ}}$)

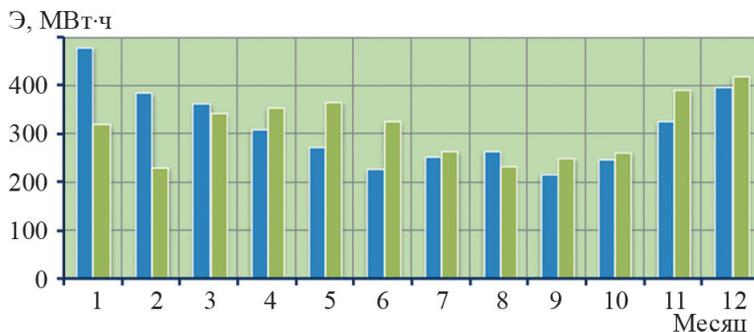


Рис. 3. Годовой энергетический баланс при комбинированном применении ФЭУ и ВЭУ:

■ — потребляемая энергия ($\Sigma_{\text{потр}}$); ■ — суммарная выработка ФЭУ и ВЭУ ($\Sigma_{\text{ФЭУ+ВЭУ}}$)

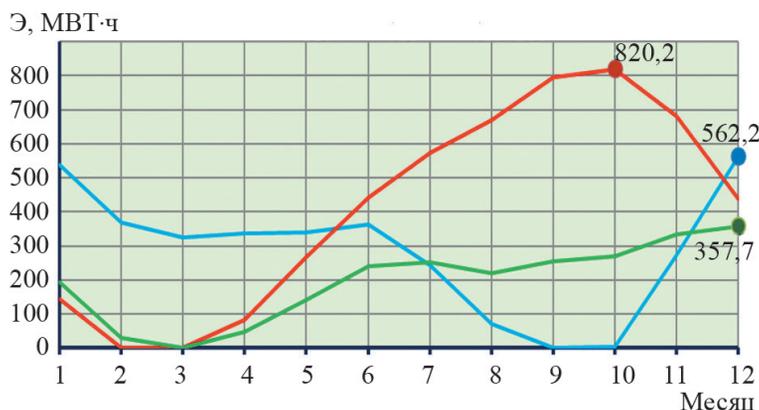


Рис. 4. Объем хранения электроэнергии идеальным НЭ, необходимый для сглаживания сезонных колебаний энергии, вырабатываемой ФЭУ (—) и ВЭУ (—) отдельно и совместно (—)

течение года для случаев комбинированного и раздельного применения ВЭУ и ФЭУ.

Из рисунка 4 следует, что самый большой объем хранения энергии, необходимый для сглаживания избытка выработки ФЭУ, приходится на октябрь и составляет 820 МВт·ч. Максимум хранения для ВЭУ приходится на декабрь и равен 562,2 МВт·ч.

Зависимость необходимого объема хранения энергии при комбинированном использовании ФЭУ и ВЭУ более пологая и достигает максимума в 357,7 МВт·ч, в декабре. Видно, что при комбинированном применении ФЭУ и ВЭУ требований к накопителю энергии меньше, а необходимый объем хранения при комбинированном снижается в 2 и 1,5 раза, соответственно, по сравнению с объемом хранения при их раздельном использовании.

Таким образом, для полного сглаживания сезонных колебаний потребляемой и вырабатываемой энергии для ГЭК с комбинированным применением ФЭУ и ВЭУ требуется НЭ, емкостью около 357,7 МВт·ч, способный обеспечивать хранение энергии в интервале не менее полугода.

Анализ [6, 7] показал, что обеспечить наилучшим образом все функции рассмотренного идеализированного накопителя на годовом интервале времени способны такие типы НЭ, как ГАЭС, водородные накопители энергии и пневмоаккумуляторы.

Требования к накопителям энергии на суточном интервале времени

Требования, предъявляемые к НЭ установками ВИЭ на суточном интервале времени, получим из анализа суточного энергетического баланса на примере реальных 10-минутных данных по нагрузке потребителя, расположенного на острове Попова, скорости ветра, измеренной ВИК на высоте 40 м и суточному изменению солнечной радиации из базы данных НПС.

Выходная электрическая мощность ФЭУ в i -й момент времени определяется по методике, использованной в [8]. Выходная электрическая мощность ВЭУ в i -й момент времени известна из рабочей характеристики ВЭУ.

На рис. 5 изображены расчетные зависимости изменения мощности ВЭУ и ФЭУ, а также зависимости изменения электрической нагрузки потребителя для характерных суток четырех сезонов года (15 января, 15 апреля, 15 июля, 15 октября).

Несмотря на то, что энергия, генерируемая установками ВИЭ, в каждые из рассматриваемых суток равна потребляемой энергии, на суточных графиках изменения мощности отчетливо видны временные интервалы, на которых суммарная мощность установок ВИЭ не балансирует электрическую нагрузку с недостатком или избытком.

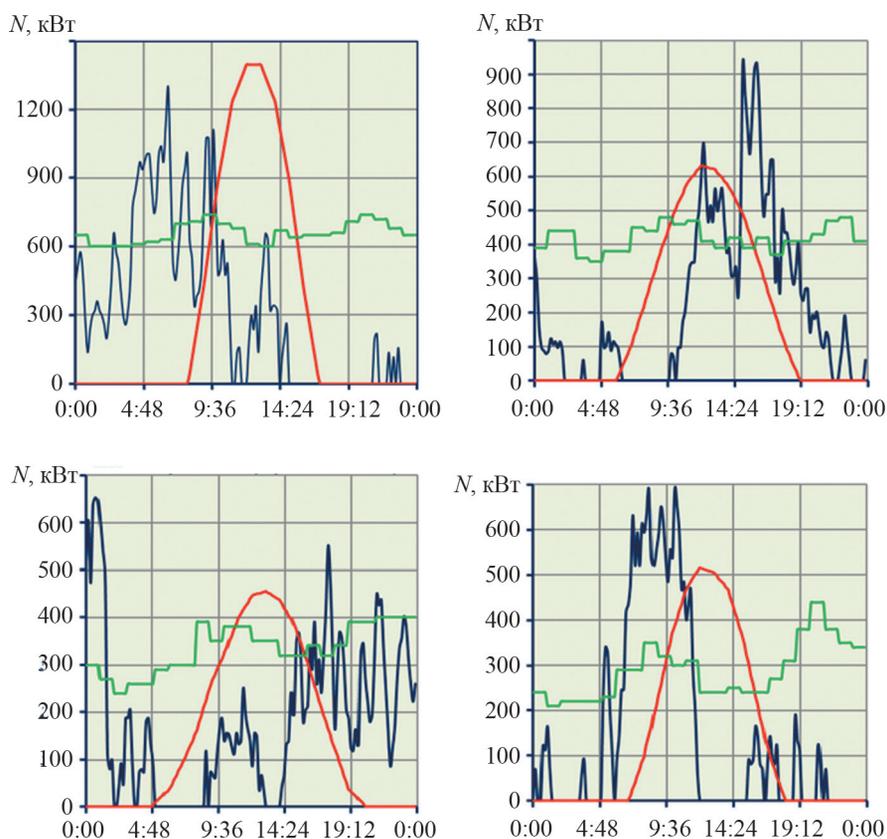


Рис. 5. Зависимости изменения мощностей ВЭУ (—), ФЭУ (—) и электрической нагрузки (—) для 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября

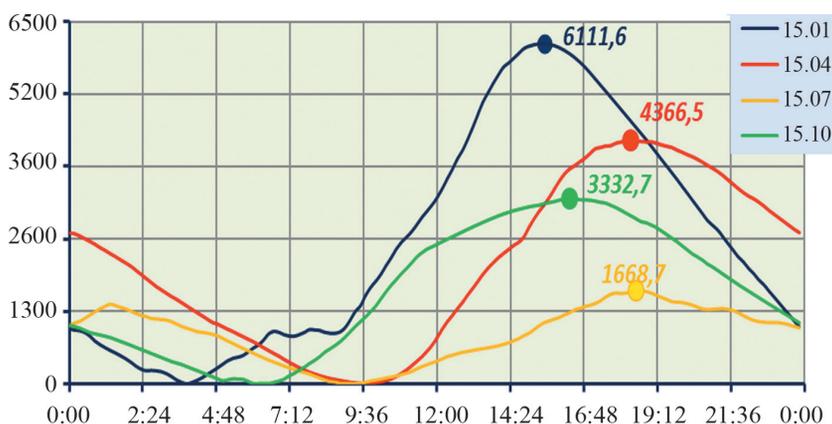


Рис. 6. Объемы хранения электроэнергии идеальным НЭ, необходимые для сглаживания суточных колебаний потребляемой и вырабатываемой энергии ФЭУ и ВЭУ

Для сглаживания колебаний потребляемой и вырабатываемой мощности использован идеальный НЭ, способный аккумулировать и выдавать неограниченную мощность без потерь и инерции.

Зависимости на рис. 6 показывают аккумулярование энергии и ее последующую выдачу при возникновении дефицита мощности в рассматриваемые сутки.

Емкость НЭ, необходимая для сглаживания колебаний потребляемой и генерируемой мощностей, составляет 6111,6; 4366,5; 1668,7 и 3332,7 кВт·ч, соот-

ветственно, для 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября. Таким образом, для компенсации колебаний мощности на средних интервалах времени требуются НЭ емкостью около 6111,6 кВт·ч со сроком хранения энергии до суток.

Рассмотрены рабочие режимы НЭ с точки зрения требований к его зарядным/разрядным характеристикам. Это обусловлено тем, что зарядная/разрядная мощность разных типов НЭ может быть ограничена производителем. Например, в соответствии с рекомен-

дациями потребителя, зарядная мощность свинцово-кислотных аккумуляторных батарей ограничена 10% от их номинальной емкости.

Из рисунка 6 следует, что режимы заряда чередуются с режимами разряда, а зарядная/разрядная мощность меняется в широком диапазоне значений. Максимальная зарядная мощность НЭ для всех рассматриваемых суток не превышает 4% от его номинальной емкости, а максимальная разрядная мощность составляет чуть более 3%. Данным требованиям удовлетворяют водородные накопители энергии и все типы электрохимических аккумуляторных батарей [7, 9].

Наиболее надежным и эффективным в данном случае является водородный накопитель энергии (ВНЭЭ), представляющий собой комплекс из электролизера воды, систем хранения газов (водорода и кислорода) необходимой емкости, терморегулирования, водообеспечения и электрохимического генератора (ЭХГ) [7, 9 — 13]. Это связано с тем, что ВНЭЭ обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с электрохимическими аккумуляторами: возможностью длительного хранения запасов энергии, отсутствием саморазряда, высокими сроком службы и энергоемкостью, независимостью энергоемкости от температуры.

Требования к накопителям энергии на внутрисуточных интервалах времени

Считается, что ГЭК на основе ФЭУ и ВЭУ свойственна значительная волатильность выдаваемой мощности на коротких интервалах времени длительностью в несколько секунд. С целью изучения подобных режимов рассмотрим фактические данные эксплуатации реальных ФЭУ и ВЭУ.

Анализ режима работы ФЭУ выполнен по данным эксплуатации экспериментальной солнечной станции в Новочебоксарске. На рисунке 7 представлены данные мониторинга режимов работы разнотипных ФЭУ, снятые 28 июля 2019 г.

На 15-минутном интервале времени с 30-секундной дискретизацией даны графики изменения инсоляции и мощности разнотипных ФЭУ (гетероструктурная, тонкопленочная и поликристаллическая) изучаемой станции. Данные рис. 7 подтверждают, что солнечная инсоляция и, следовательно, выходная мощность ФЭУ, варьируются в широком диапазоне за небольшие интервалы времени, а выходная мощность всех типов ФЭУ меняется пропорционально солнечной инсоляции практически мгновенно, поскольку в ФЭУ нет инерционных механических элементов.

Рассмотрим фактические данные эксплуатации ВЭУ VDM-2 в Санкт-Петербурге, предоставленные руководством организации «ВДМ-техника».

Итоги мониторинга режима ВЭУ за 29 декабря 2016 г. изображены на рис. 8, где на трехминутном интервале времени с посекундной дискретизацией изложено изменение скоростей ветра и вращения ветроколеса, расчетной теоретической, а также фактической выходной мощностей ВЭУ.

Видно, что за короткие промежутки времени скорость ветра и выходная мощность ВЭУ меняются в достаточно широком диапазоне. Зависимость фактической выходной мощности ВЭУ не совпадает с ее расчетной теоретической мощностью. Это связано с тем, что у ВЭУ, в отличие от ФЭУ, есть инерционные элементы. Кривая фактической выходной мощности ВЭУ смещена вправо относительно кривой теоретической мощности на величину инерционной постоянной ВЭУ.

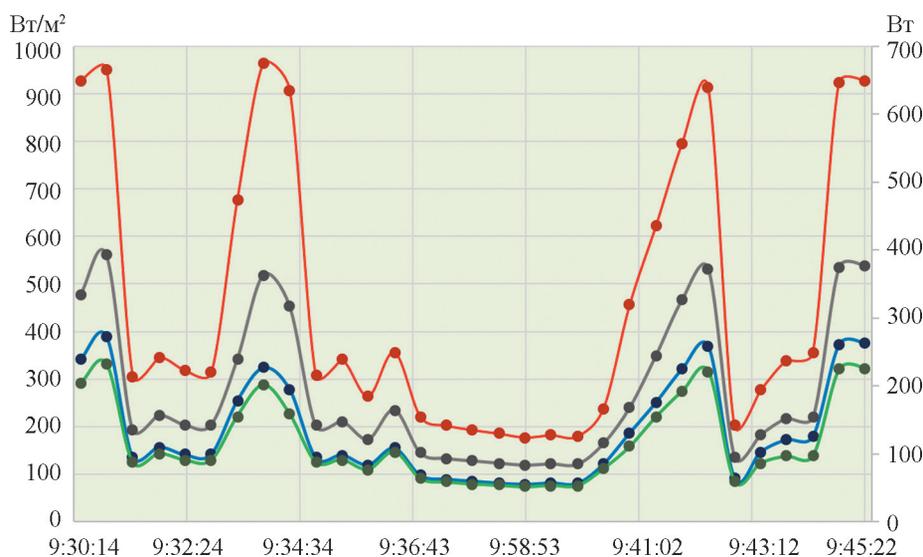


Рис. 7. Рабочие режимы ФЭУ:

● — солнечная радиация; ● — Nevel HJT 305 стекло-пленка; ● — HVL GG72; ● — multi PERC 270

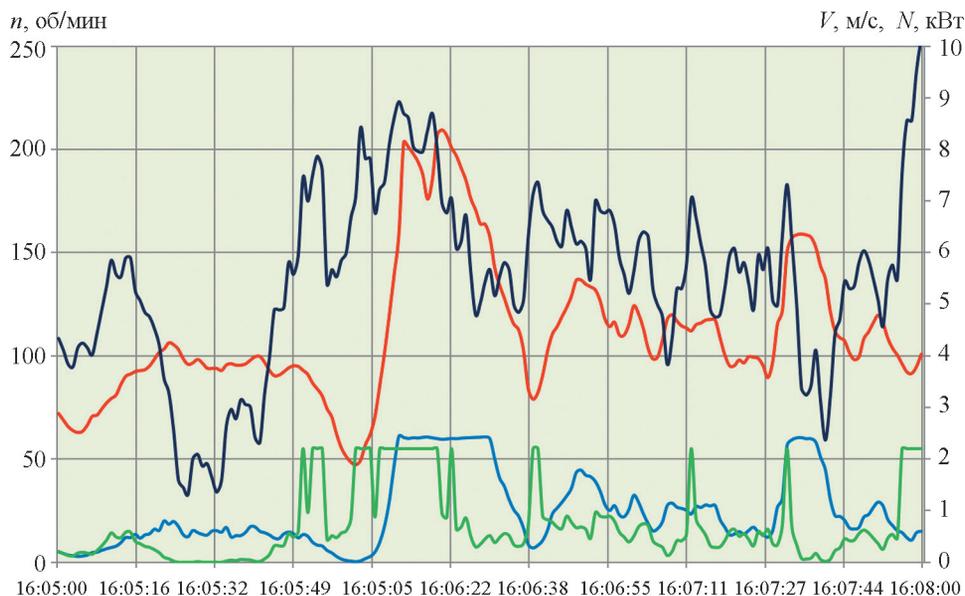


Рис. 8. Рабочий режим ВЭУ:

V (—) — скорость ветра; $N_{ВЭУтеор}$ (—), $N_{ВЭУфакт}$ (—) — теоретическая и фактическая выходная мощности ВЭУ; n (—) — скорость вращения ветроколеса

Кроме того, высокочастотные флуктуации скорости ветра практически не влияют на величину фактической выходной мощности, поскольку демпфируются инерционными массами вращающихся частей ВЭУ. При этом ее выходную мощность определяют колебания скорости ветра с частотой, соизмеримой с инерционной постоянной ВЭУ, равной 7...8 с.

Следовательно, выходная мощность на близких к этому значению отрезках времени колеблется в очень широком диапазоне. При наличии ФЭУ и ВЭУ в составе ГЭК высока вероятность появления режимов дефицита и избытка мощности на очень коротких интервалах времени.

Таким образом, для компенсации колебаний мощности на коротких интервалах времени длительностью в несколько секунд необходимы НЭ, способные дать быстрый прием и отдачу мощности. Обеспечение большого ресурса работы ЭХГ и электролизеров требует стабилизации режимов потребления и отбора мощности, поэтому их эксплуатация в маневренных режимах ограничена. Указанным требованиям соответствует такой вид НЭ, как суперконденсаторы [14 — 18]. Их отличительными особенностями являются способность быстро заряжаться неограниченное количество раз и разряжаться за время от нескольких миллисекунд до десятков минут, отдавая высокие мощности в нагрузку.

Заключение

На основе анализа режимов работы ГЭК с ВИЭ получены следующие выводы.

ГЭК с использованием ВИЭ характеризуются значительными колебаниями потребляемой и генериру-

емой мощности на разных интервалах времени (год, месяц, сутки, час, сутки).

Для компенсации сезонных колебаний в ГЭК с ВИЭ, работающими в изолированных энергорайонах (при суточном максимуме до 1 МВт), требуются НЭ емкостью около 357,7 МВт·ч, способные обеспечить хранение энергии на срок более полугода, а для компенсации колебаний мощности на средних интервалах времени — НЭ емкостью около 6111,6 кВт·ч со сроком хранения энергии до суток. Установлено, что указанным требованиям наилучшим образом отвечает ВНЭЭ.

Для компенсации колебаний мощности на коротких интервалах времени длительностью в несколько секунд необходимы НЭ, способные предоставить быстрый прием и отдачу мощности. Указанным требованиям соответствует такой вид НЭ, как суперконденсаторы.

Для удовлетворения требованиям ГЭК необходимо применение в его составе гибридного накопителя энергии (ГНЭ), в котором сочетаются водородные накопители и суперконденсаторы.

Водородные накопители играют роль основного накопителя электрической энергии в составе ГНЭ для сезонного и суточного регулирования. В свою очередь, СК компенсирует моменты резких и кратковременных провалов вырабатываемой ФЭУ и ВЭУ мощности, а в моменты резкого, кратковременного увеличения вырабатываемой мощности запасает энергию, тем самым устраняя кратковременные импульсы. Следовательно, разработка ГНЭ позволит сочетать в себе достоинства обоих накопителей электрической энергии: быстродействие и высокую удельную энергию СК со стабильной продолжительной работой ВНЭЭ.

Литература

References

1. **Елистратов В.В.** Технологические и технико-экономические особенности энергокомплексов на основе ВИЭ для сложных природно-климатических условий // Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы: Материалы V Междунар. конф. Махачкала, 2017. Т. 1. С. 42—46.
2. **Tyagunov M.** Distributed Energy System's is Future of the World's Power Industry // Proc. 2nd Intern. Conf. Appl. Information Technology to Renewable Energy Processes and Systems. Amman: University of Petra, 2017. Pp. 113—117.
3. **Elbaset Mohamed A.A., Abdelwahab S.A.M., Ibrahim H.A., Eid M.A.E.** Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems. Heidelberg: Springer Intern. Publ., 2019.
4. **Шевурдиев Р.П., Тягунов М.Г.** Гибридный энергокомплекс гарантированного энергоснабжения с водородным аккумулярованием энергии // Энергетика. Технологии будущего: Сборник докл. II Науч.-техн. конф. студентов М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 18—19.
5. **Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г.** Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 13—15. С. 55—67.
6. **Ганс В.С.** Балансировка волатильности — пределы немецкой зеленой революции [Электрон. ресурс] www.aftershock.news/?q=node/620466 (дата обращения 01.04.2020).
7. **Oberhofer A.** Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration. San Diego: Global Energy Network Institute, 2012.
8. **Jones A.D., Underwood C.P.** A Thermal Model for Photovoltaic Systems // Solar Energy. 2001. V. 70(4). Pp. 349—359.
9. **Попель О.С., Тарасенко А.Б., Филиппов С.П.** Энергоустановки на основе топливных элементов: современное состояние и перспективы // Теплоэнергетика. 2018. № 12. С. 5—23.
10. **Бредихин С.И. и др.** Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. М: Из-во НТФ «Энергопрогресс», 2017.
11. **Коровин Н.В.** Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
12. **Smith D.** Large Utilities Tom to Solid Oxide Systems. Nottingham: Modern Power Syst. Germany Suppl., 2000. Pp. 27—30.
13. **Батенин В.Г. Баранов Н.Н.** Создание новых видов автономных энергоустановок на основе методов прямого преобразования энергии // Известия РАН. «Серия Энергетика». 1997. № 2. С. 3—28.
14. **Бердников Р.Н. и др.** Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. № 2(7). С. 40—51.
1. **Elistratov V.V.** Tekhnologicheskie i Tekhniko-ekonomicheskie Osobennosti Energokompleksov na Osnove VIE Dlya Slozhnykh Prirodno-klimaticheskikh Usloviy. Vozobnovlyаемaya Energetika: Problemy i Perspektivy: Materialy V Mezhdunar. Konf. Makhachkala, 2017;1:42—46. (in Russian).
2. **Tyagunov M.** Distributed Energy System's is Future of the World's Power Industry. Proc. 2nd Intern. Conf. Appl. Information Technology to Renewable Energy Processes and Systems. Amman: University of Petra, 2017: 113—117.
3. **Elbaset Mohamed A.A., Abdelwahab S.A.M., Ibrahim H.A., Eid M.A.E.** Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems. Heidelberg: Springer Intern. Publ., 2019.
4. **Sheverdiev R.P., Tyagunov M.G.** Gibrnidnyy Energo kompleks Garantirovannogo Energosnabzheniya s Vodородnym Akkumulirovaniem Energii. Energetika. Tekhnologii Budushchego: Sbornik Dokl. II Nauch.-tekh. Konf. Studentov M.: Izd-vo MEI, 2019:18—19. (in Russian).
5. **Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G.** Analiz Rezhimov Raboty Nakopiteley Energii v Avtonomnykh Gibrnidnykh Elektrostantsiyakh s Vozobnovlyаемymi Istochnikami Energii. Al'ternativnaya Energetika i Ekologiya. 2008;13—15:55—67. (in Russian).
6. **Gans V.S.** Balansirovka Volatil'nosti — Predely Nemetskoй Zelenoy Revolyutsii [Elektron. Resurs] www.aftershock.news/?q=node/620466 (Data Obrashcheniya 01.04.2020). (in Russian).
7. **Oberhofer A.** Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration. San Diego: Global Energy Network Institute, 2012.
8. **Jones A.D., Underwood C.P.** A Thermal Model for Photovoltaic Systems. Solar Energy. 2001;70(4): 349—359.
9. **Popel' O.S., Tarasenko A.B., Filippov S.P.** Energoustanovki na Osnove Toplivnykh Elementov: Sovremennoe Sostoyanie i Perspektivy. Teploenergetika. 2018;12:5—23. (in Russian).
10. **Bredikhin S.I. i dr.** Statsionarnye Energeticheskie Ustanovki s Toplivnymi Elementami: Materialy, Tekhnologii, Rynki. M: Iz-vo NTF «Energoprogress», 2017. (in Russian).
11. **Korovin N.V.** Toplivnye Elementy i Elektrokhimicheskie Energoustanovki. M.: Izd-vo MEI, 2005. (in Russian).
12. **Smith D.** Large Utilities Tom to Solid Oxide Systems. Nottingham: Modern Power Syst. Germany Suppl., 2000:27—30.
13. **Batenin V.G. Baranov N.N.** Sozdanie Novykh Vidov Avtonomnykh Energoustanovok na Osnove Metodov Pryamogo Preobrazovaniya Energii. Izvestiya RAN. «Seriya Energetika». 1997;2:3—28. (in Russian).
14. **Berdnikov R.N. i dr.** Gibrnidnyy Nakopitel' Elektroenergii dlya ENES na Baze Akkumulyatorov i Superkondensatorov. Energiya Edinoй Seti. 2013;2(7): 40—51. (in Russian).

15. **Козюков Д.А.** Гибридные накопители электроэнергии в ветро-солнечных установках // Инновационная наука. 2015. Т. 1. № 7. С. 33—35.

16. **Марьенков С.А.** Гибридный накопитель электрической энергии для сетей с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников электрической энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 02(56). Ч. 3. С. 120—123.

17. **Chen H. e. a.** Progress in Electrical Energy Storage System: a Critical Review // Prog. Nat. Sci. 2009. V. 19. Pp. 291—312.

18. **Деньщиков К.К., Жук А.З.** Гибридный накопитель электроэнергии на базе аккумуляторов и суперконденсаторов [Электрон. ресурс] www.docplayer.ru/30757314-Gibridnyu-nakopitel-elektroenergii-na-baze-akkumulyatorov-i-superkondensatorov-d-t-n-denshchikov-k-k-d-f-m-n-zhuk-a-z.html (дата обращения 05.10.2019).

15. **Kozyukov D.A.** Gibridnye Nakopiteli Elektroenergii v Vetro-solnechnykh Ustanovkakh. Innovatsionnaya nauka. 2015;1;7:33—35. (in Russian).

16. **Mar'enkov S.A.** Gibridnyy Nakopitel' Elektricheskoy Energii dlya Setey s Raspredeleynoy Generatsiey na Osnove Vozobnovlyaemykh Istochnikov Elektricheskoy Energii. Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal. 2017;02(56);3:120—123. (in Russian).

17. **Chen H. e. a.** Progress in Electrical Energy Storage System: a Critical Review. Prog. Nat. Sci. 2009;19: 291—312.

18. **Den'shchikov K.K., Zhuk A.Z.** Gibridnyy Nakopitel' Elektroenergii na Baze Akkumulyatorov i Superkondensatorov [Elektron. resurs] www.docplayer.ru/30757314-Gibridnyy-nakopitel-elektroenergii-na-baze-akkumulyatorov-i-superkondensatorov-d-t-n-denshchikov-k-k-d-f-m-n-zhuk-a-z.html (Data Obrashcheniya 05.10.2019).

Сведения об авторах:

Тягунов Михаил Георгиевич — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», академик Академии электротехнических наук РФ, e-mail: mtyagunov@mail.ru

Шевердиев Рахидин Пирвеледович — магистрант НИУ «МЭИ», e-mail: razhidin.sheverdiev.96@mail.ru

Information about authors:

Tyagunov Mikhail G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, Academician of the Russian Academy of Electrical Sciences, e-mail: mtyagunov@mail.ru

Sheverdiev Razhidin P. — Master Student of NRU MPEI, e-mail: razhidin.sheverdiev.96@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 14.01.2020

The article received to the editor: 14.01.2020