ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы

В.А.ШПЕНСТ, А.А.БЕЛЬСКИЙ, Е.А.ОРЕЛ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492. EDN SNUKNA

Аннотация. Возобновляемые источники энергии постепенно обретают свою нишу использования в минерально-сырьевом комплексе. Их активно применяют в отдаленных малонаселенных районах для питания вахтовых поселков, геологоразведочных и метеорологических станций, аппаратуры трубопроводов, сотовых вышек, освещения вертолетных площадок и т.д. По сравнению с питанием от дизельгенераторных установок, системы с возобновляемыми источниками не требуют транспортировки топлива, характеризуются малыми сроками окупаемости и гибкой настройкой под разные категории потребителей. Основные препятствия к их распространению – нестабильность генерации и высокая себестоимость производимого электричества. Первый способ решения этих проблем заключается в развитии технологий, увеличении удельной мощности объектов генерации и систем накопления энергии. Второй способ – энергосбережение и рациональное использование ресурсов. Предложены решения для реализации второго способа. Объектом исследования являются автономные электротехнические комплексы постоянного тока с фото- и ветроэнергетическими установками. Переток мощности от источников генерации к потребителям в таких системах осуществляется через промежуточную шину постоянного тока, уровень напряжения которой влияет на потери мощности в процессе энергопередачи. Проблемой большинства комплексов является то, что напряжение шины жестко задано, в то время как оптимум, для которого будут характерны наименьшие потери, изменяется в зависимости от объемов генерации и потребления. Поэтому электротехнические комплексы теряют часть передаваемой энергии. Во избежание этого в комплекс добавляют алгоритм автоподстройки уровня напряжения шины под изменяющиеся условия работы. Дополнительный вклад в повышение эффективности способно внести динамическое изменение рабочей частоты преобразователей в составе комплекса в зависимости от нагрузки. Оценка по результатам имитационного компьютерного моделирования показала, что потери активной мощности в комплексе с выработкой 10 кВт на протяжении срока его службы сокращаются на 2-5 %.

***Ключевые слова*:** возобновляемая энергетика; энергоэффективность; КПД; солнечные панели; силовая электроника

Поступила: 02.03.2023 ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 19.07.2023*** ***Опубликована: 19.07.2023***

Введение. Мировая энергетика стремительно меняется. Благодаря развитию технологий изменения носят не только количественный, но и качественный характер, необратимо меняя облик энергетических систем будущего. Ключевыми направлениями развития становятся децентрализация, цифровизация и интеллектуализация процессов генерации, распределения и потребления электрической энергии.

Новые веяния оказывают влияние и на минерально-сырьевой комплекс (МСК). На передний план выходят задачи оптимизации технологических цепочек и повышения производительности труда [1-3]. Достаточно остро встает проблема обеспечения электроэнергией отдаленных и малонаселенных территорий, богатых перспективными месторождениями природных ископаемых. Высокая стоимость электроэнергии затормаживает процессы развития, вынуждая потребителей искать новые способы генерации, а также образовывать свои, более эффективные малые электросети (англ. microgrids) [4, 5].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В нашей стране с развитой централизованной системой электроснабжения использование автономных энергосистем с собственными источниками генерации оправдано в основном в северных и северо-восточных регионах [6-8]. Включение их в систему централизованного электроснабжения в прошлом было признано неэффективным и слишком дорогостоящим. В результате электроснабжение этих территорий осуществлялось от дизельных электростанций, имеющих низкий КПД и высокую стоимость выработки электроэнергии, которая доходит до 80-120 руб./кВт·ч [9].

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с жизненным циклом 20-25 лет позволяет снизить стоимость до 25-35 руб./кВт·ч [10]. Себестоимость зависит не только от материальных затрат, но и эффективности преобразования и передачи энергии потребителю. Целью данного исследования является предложить способ повышения энергоэффективности автономных электротехнических комплексов с ВИЭ. Актуальность работы связана с важностью темы энергосбережения для потребителей МСК отдаленных северных территорий, получающей поддержку на высоком государственном уровне.

Методы. Жизненный цикл электротехнического комплекса (ЭТК) с ВИЭ составляет более 20 лет. Расходы включают капитальные затраты на старте проекта, ежегодные – на обслуживание и утилизационные – по окончании проекта. Себестоимость электроэнергии COE (англ. cost of energy) равна отношению суммарных денежных расходов к суммарной потребленной электроэнергии. При этом потребленная электроэнергия $W_{потр}$ не равна выработанной $W_{ген}$ из-за наличия потерь в энергосистеме:

$$W_{потр} = \eta W_{ген}, \quad (1)$$

где η – КПД при передаче электроэнергии. Чем выше η, тем ниже себестоимость COE, у современных ЭТК η = 0,8-0,85 [11].

Для минерально-сырьевого сектора использование ВИЭ наиболее оправдано для питания объектов малой мощности (1-10 кВт), удаленных от основных линий электропередачи на десятки и сотни километров [12-14]. Такими потребителями являются небольшие вахтовые поселки, геологоразведочные и метеорологические станции, сотовые вышки, аппаратура трубопроводов, двигатели небольших насосных установок, системы защиты от коррозии, системы освещения вертолетных площадок, средства охраны, связи, обнаружения утечек веществ и т.д.

Для ЭТК с ВИЭ характерно разнообразие архитектур и принципов управления. Система может быть построена на постоянном или переменном токе [15], управляться централизованно или децентрализованно [16], работать автономно или обмениваться энергией с другими сетями [17, 18]. Простейший автономный ЭТК с ВИЭ показан на рис.1, *а*. Согласование источников генерации и потребителей производится через промежуточную шину постоянного тока с напряжением U_{DC}. Аккумуляторная батарея (АКБ) напрямую подключена к шине. Заряд батареи осуществляется энергией, получаемой от солнечных панелей и ветроэнергетической установки и преобразуемой импульсными DC/DC и AC/DC преобразователями. Все преобразователи работают независимо друг от друга.

Однако прямое подключение АКБ к шине постоянного тока быстрее приводит к ее износу [19]. Импульсные токи случайной величины и формы от множества подключенных к шине генераторов и потребителей сокращают срок службы батареи. В зависимости от степени износа АКБ и уровня ее заряда напряжение шины может сильно меняться, из-за чего возникают проблемы со стабильностью работы системы. Практика показывает, что большинство неисправностей автономных сетей заключается именно в износе аккумуляторов [20]. При этом стоимость замены АКБ может составлять до 60 % стоимости всей системы.

Чтобы продлить срок службы АКБ, ее подключают к шине постоянного тока не напрямую, а через двунаправленный DC/DC преобразователь, управляющий процессами заряда и разряда [21]. Преобразователь поддерживает стабильность уровня напряжения шины и контролирует ток батареи. Введение централизованного управления (рис.1, *б*) обеспечивает согласованность работы всех преобразователей. Условием стабильной работы комплекса является баланс мощности генерации $P_{ген}$ и потребления $P_{потр}$, который с учетом потерь $P_{пот}$ имеет вид:

$$P_{ген} - P_{потр} - P_{пот} = 0. \quad (2)$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492
© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

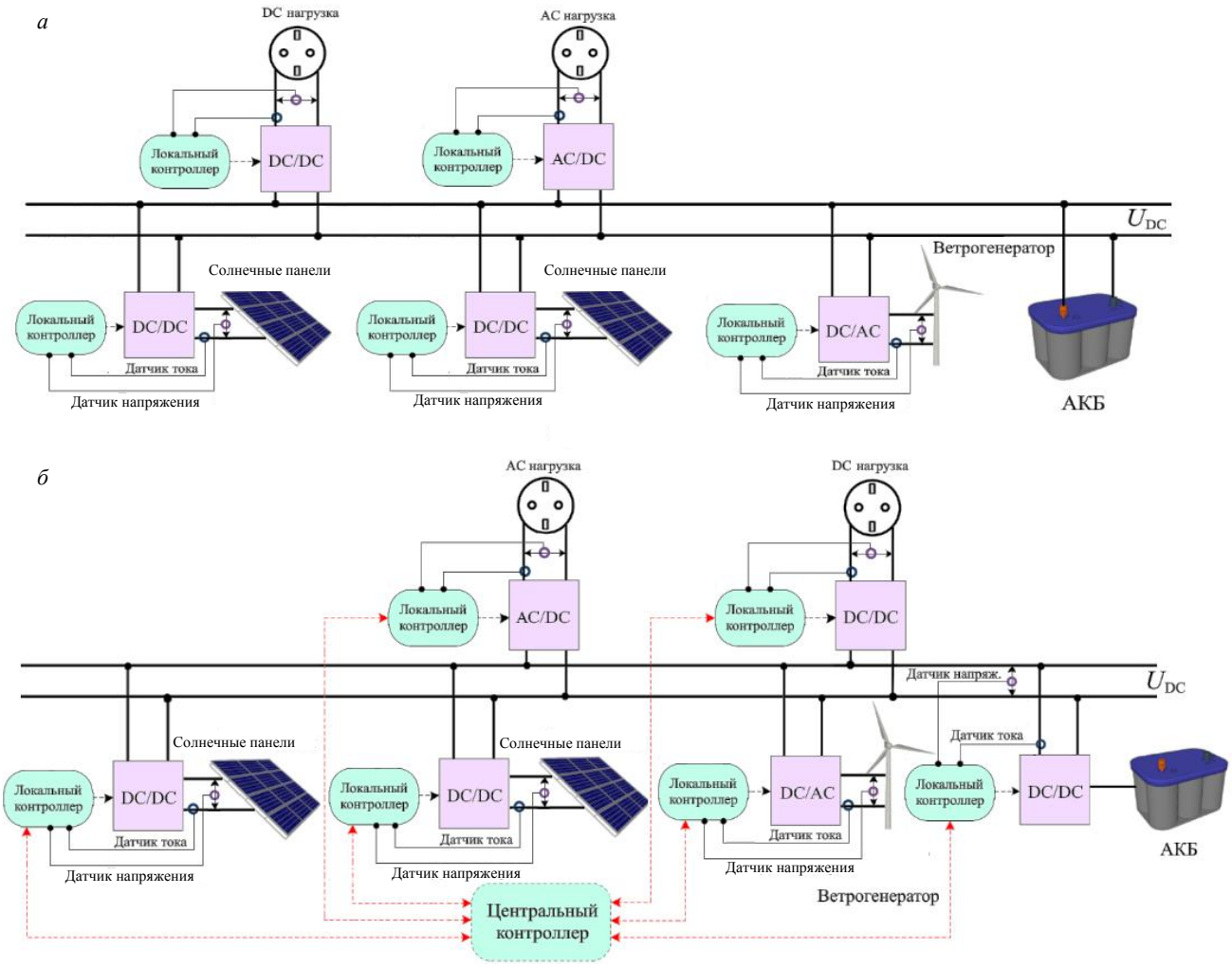


Рис.1. Электротехнический комплекс с ВИЭ: АКБ подключена напрямую (*а*), через двунаправленный DC/DC преобразователь (*б*)

Преобразователи напряжения, подключенные к ВИЭ, работают в режиме отбора максимальной мощности MPPT (англ. maximum power point tracking) [22-24]. В данном режиме их входное сопротивление регулируется таким образом, чтобы получать с ВИЭ максимум мощности [25, 26]. Так, например, рабочая точка солнечной панели с выходной мощностью P_{PV} (рис.2, *а*) будет установлена в положение А, а при изменении объема генерации автоматически переместится в положение В (рис.2, *б*).

В качестве DC/DC преобразователей с MPPT-режимом чаще всего используются повышающие схемы (англ. boost converters [27]). Повышение необходимо, так как выходное напряжение ВИЭ обычно невелико, особенно при низком уровне генерации. Выходной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) преобразователя, работающего в MPPT-режиме, является гипербола (рис.2, *в*), мощность во всех точках которой одинакова (рис.2, *г*). Максимальный выходной ток ограничен током короткого замыкания $I_{КЗ}$ панели. Максимальное выходное напряжение ограничено уровнем $U_{огр}$ защитой от перенапряжения. Выходной ток преобразователя зависит от уровня напряжения шины постоянного тока U_{DC} и обратно пропорционален

$$I_{вых} = \frac{P_{max}}{U_{DC}}. \quad (3)$$

Рассматривая по аналогии работу остальных преобразователей комплекса, можно выявить общие закономерности. Принцип работы двунаправленного DC/DC преобразователя заряда-разряда АКБ описан в работах [28, 29], инвертора [30, 31]. В процессе работы комплекса у каждого из

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

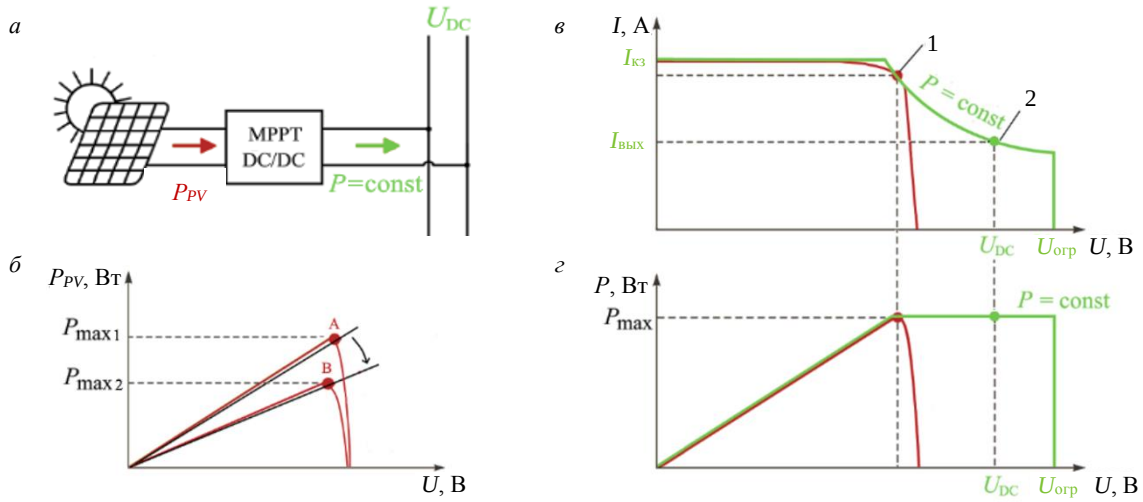


Рис.2. Работа солнечной панели с повышающим преобразователем: *а* – схема; *б* – принцип MPPT; *в* – выходная ВАХ панели и преобразователя; *г* – мощностная характеристика панели и преобразователя
1 – рабочая точка солнечной панели; 2 – преобразователя

преобразователей задана своя рабочая точка. Поскольку все они подключены к общей шине постоянного тока, на положение точек будет влиять уровень напряжения шины U_{DC}.

Нижний предел допустимых значений U_{DC} должен быть выше максимального генерируемого ВИЭ напряжения. Верхний предел ограничен экономическим критерием – с ростом напряжения удорожаются электронные компоненты преобразователей. Вопросу выбора напряжения шины посвящены работы [32-34]. Для бытовых сетей мощностью до 10 кВт наиболее распространенными являются уровни 12, 24 и 48 В [35], для сетей большей мощности – уровни 380 и 400 В [36].

Для подавляющего большинства ЭТК с ВИЭ уровень напряжения шины является жестко заданным. При работе комплекса допускается его отклонение в пределах не более ±10 % от номинального значения. При этом в работах [26, 37] показано, что оптимум напряжения, для которого будут характерны наименьшие потери при энергопередаче, изменяется в зависимости от объемов генерации и потребления. В результате комплексы с жестко заданным уровнем теряют часть передаваемой мощности.

Авторы работ [26, 37] не показали, как реализовать автоматическую настройку уровня напряжения шины на оптимум, поэтому данный вопрос требует изучения. Как мы уже знаем, эффективность работы преобразователей в составе ЭТК зависит от уровня напряжения шины постоянного тока U_{DC}. Располагая математической моделью потерь мощности в каждом преобразователе, эту зависимость можно вычислить. Модель потерь повышающего преобразователя получена в работе [38], понижающего [39], инвертора [40, 41], двунаправленного преобразователя заряда-разряда АКБ [42, 43].

Потери активной мощности в импульсных преобразователях, если известны параметры элементов схемы и рабочая частота преобразования, могут быть сведены к функции от трех переменных

$$P_{loss} = f(U_{вх}, I_{вых}, U_{вых}), \quad (4)$$

где $U_{вх}$, $U_{вых}$ – входное и выходное напряжения преобразователя; $I_{вых}$ – выходной ток преобразователя. Для DC-преобразователей эти переменные характеризуют постоянный ток. Для AC-преобразователей являются действующими значениями фазных токов и напряжений.

Поскольку все преобразователи в рамках рассматриваемого ЭТК подключены к шине постоянного тока, одной из трех переменных будет являться напряжение шины U_{DC}. Переток реактивной мощности в комплексе, благодаря использованию шины постоянного тока и импульсных преобразователей напряжения, практически сведен к нулю. Поэтому расчеты реактивной мощности в дальнейшем не рассматриваются. КПД преобразователя будет связан с величиной активных потерь P_{loss} по формуле

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492
© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

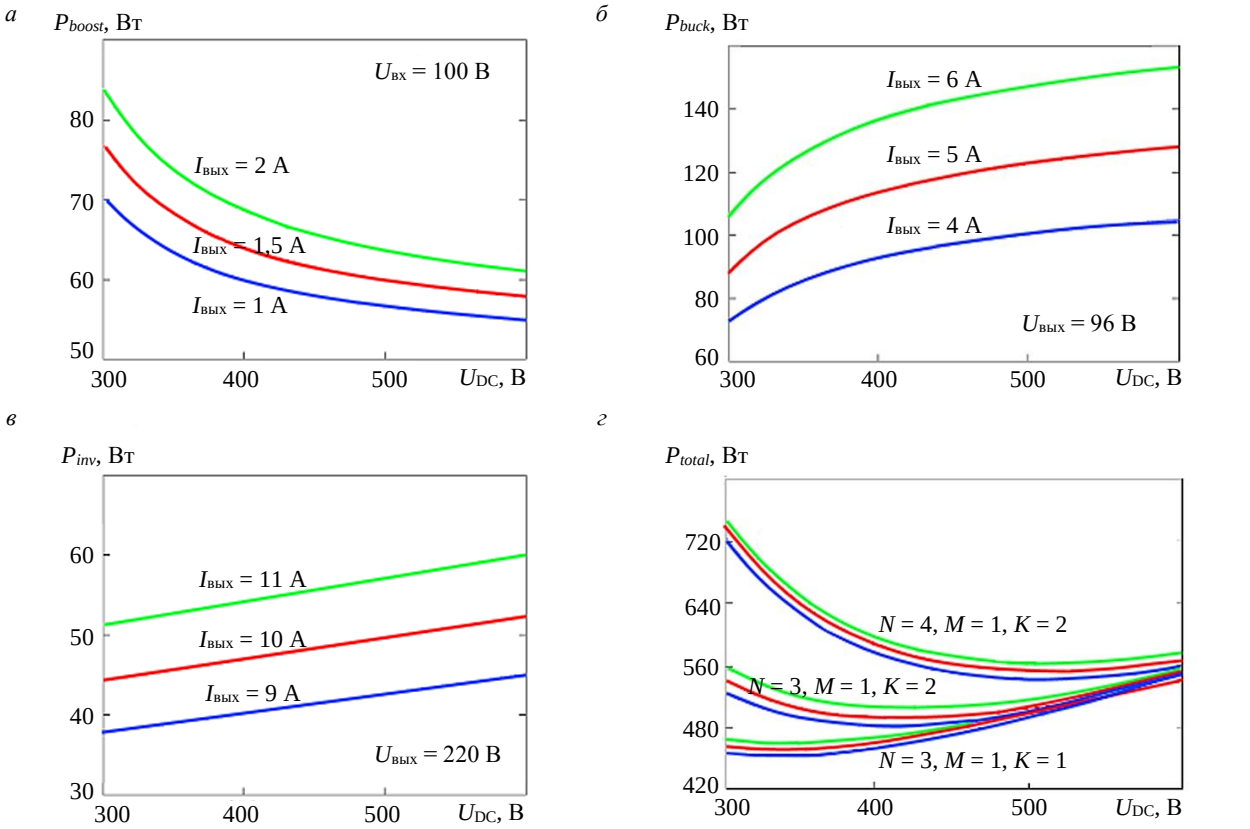


Рис.3. Графики зависимости потерь активной мощности от напряжения шины постоянного тока:
а – повышающего преобразователя; *б* – преобразователя заряда-разряда АКБ; *в* – инвертора; *г* – суммарные потери ЭТК

$$\eta(U_{вх},\ I_{вых},\ U_{вых}) = \frac{1}{1+\dfrac{P_{loss}}{I_{вых}U_{вых}}}. \qquad (5)$$

На основе математических моделей потерь по формуле (4) были построены зависимости P_{loss} от напряжения шины U_{DC} для повышающего преобразователя, преобразователя заряда-разряда АКБ и инвертора (рис.3, *а-в*). Для построения рассматривался ЭТК с суммарной мощностью генерации 4 кВт. Напряжение на выходе ВИЭ было задано равным 100 В постоянного тока, напряжение АКБ – 96 В, действующее напряжение на выходе инвертора – 220 В, диапазон напряжения шины постоянного тока U_{DC} составлял 310-600 В. Графики потерь строились при трех разных нагрузках на преобразователи, т.е. путем задания трех разных значений их выходного тока $I_{вых}$. Потери мощности всей системы будут равны сумме потерь преобразователей:

$$P_{total}(U_{DC}) = NP_{boost}(U_{DC}) + MP_{buck}(U_{DC}) + KP_{inv}(U_{DC}), \qquad (6)$$

где N – число работающих повышающих преобразователей; M – число работающих преобразователей заряда-разряда АКБ; K – число инверторов.

Суммированием графиков потерь преобразователей по формуле (6) определяется график зависимости потерь $P_{total}(U_{DC})$ всего комплекса. Графики потерь $P_{total}(U_{DC})$ строились при разных значениях N, M и K (рис.3, *г*).

Из рис.3, *г* видно, что точка минимума потерь при разном составе комплекса и разной нагрузке на преобразователи будет разной. Проводя настройку уровня напряжения шины U_{DC} на этот минимум в процессе работы комплекса, возможно добиться повышения его энергоэффективности.

Кроме того, потери в системе можно сократить не только варьированием напряжения шины, но и изменением рабочей частоты преобразователей в зависимости от их нагрузки. Активная мощность нагрузки преобразователя

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

$$P = Ef_s, \tag{7}$$

где E – энергия, преобразуемая за один рабочий такт, Дж; f_s – рабочая частота преобразования, Гц.

Рабочая частота влияет на динамические потери, связанные с переключением полупроводниковых элементов. Чем она выше, тем выше потери. Если мощность нагрузки изменяется, то при E = const по формуле (7) рабочая частота также может быть изменена. Таким образом, если нагрузка уменьшается, то КПД преобразователя может быть улучшен снижением его рабочей частоты.

Предлагаемый алгоритм адаптивной регулировки режимов работы ЭТК, повышающий энергоэффективность, основан на оценке активных потерь мощности преобразователей при помощи их математических моделей.

Для проведения расчетов в комплекс добавлен вычислительный блок (ВБ), в памяти которого хранятся модели потерь мощности всех преобразователей (рис.4, *а*). Кроме того, там же хранится массив возможных значений напряжения шины постоянного тока U_{DC}, из которых в результате вычислений определяется наилучшее.

Между локальными контроллерами (ЛК) преобразователей и ВБ установлены каналы связи. Локальные контроллеры при помощи датчиков тока и напряжения проводят измерения переменных, необходимых для расчета потерь, по формулам (4) и (6). По измеренному значению тока ЛК оценивают нагрузку на преобразователь и по формуле (7) настраивают рабочую частоту преобразования.

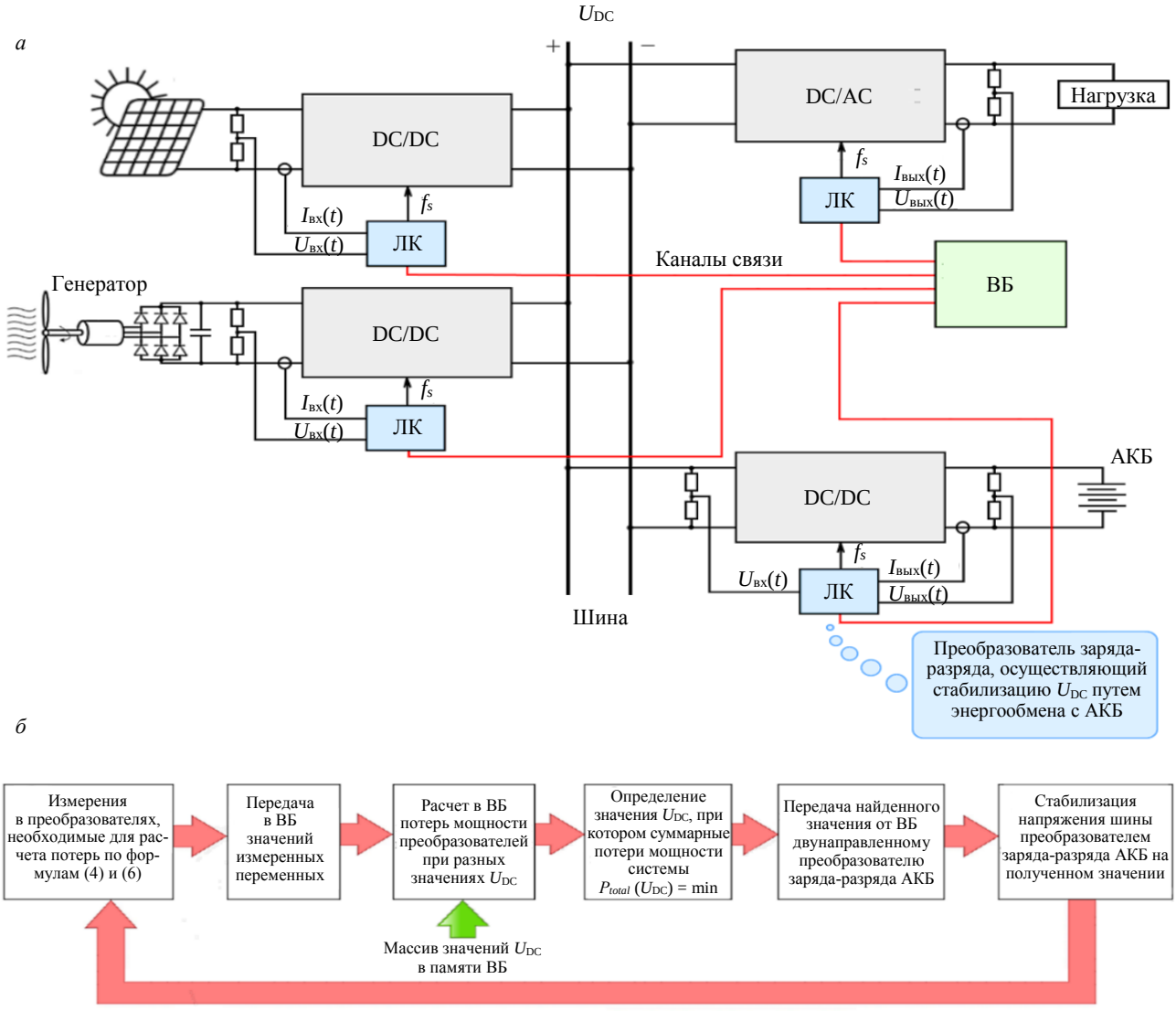


Рис.4. Электротехнический комплекс с поиском оптимального режима работы: *а* – схема; *б* – алгоритм поиска оптимального уровня напряжения шины

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492
© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

Далее измеренные значения переменных через каналы связи передаются в ВБ, который высчитывает потери мощности преобразователей при разных вариантах напряжения шины U_{DC} и выбирает то значение, при котором суммарные рассчитанные потери системы $P_{total}(U_{DC})$ окажутся минимальны. Найденное значение ВБ передает в ЛК преобразователя заряда-разряда АКБ, который стабилизирует напряжение шины U_{DC} на полученном значении. Блок-схема алгоритма представлена на рис.4, *б*. Для проверки предлагаемой идеи в программном комплексе MatLab Simulink была создана имитационная компьютерная модель автономного ЭТК с ВИЭ мощностью 10 кВт.

Модели солнечной панели и АКБ были взяты из работы [44]. Модель ветрогенератора составлена на основе статьи [45], где рассматривалась работа ветроустановки с диодным мостовым выпрямителем. Авторами было показано, что если после выпрямителя включена фильтрующая емкость, то напряжение на выходе выпрямителя в точке максимальной генерируемой мощности P_{max} связано с этой мощностью выражением

$$U_{WT} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}K_V\sqrt[3]{\frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda,\theta)\left(\frac{R}{\lambda}\right)^3}}\right) - U_д, \quad (8)$$

где K_V – конструктивный коэффициент пропорциональности, K_V = 0,69 [45]; ρ – плотность воздуха, ρ = 1,225 кг/м^3; R – длина лопастей ветроустановки; C_p – коэффициент использования энергии ветра, зависящий от быстроходности λ и угла атаки лопасти θ, лежащий в диапазоне 0-0,6; $U_д$ – падение напряжения на диодном выпрямителе.

При этом максимальная снимаемая с ветрогенератора мощность зависит от скорости ветра v

$$P_{max} = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda,\theta). \quad (9)$$

Имитационная компьютерная модель комплекса показана на рис.5. Она включает три массива солнечных панелей и одну ветроэнергетическую установку, выдающую уже выпрямленное

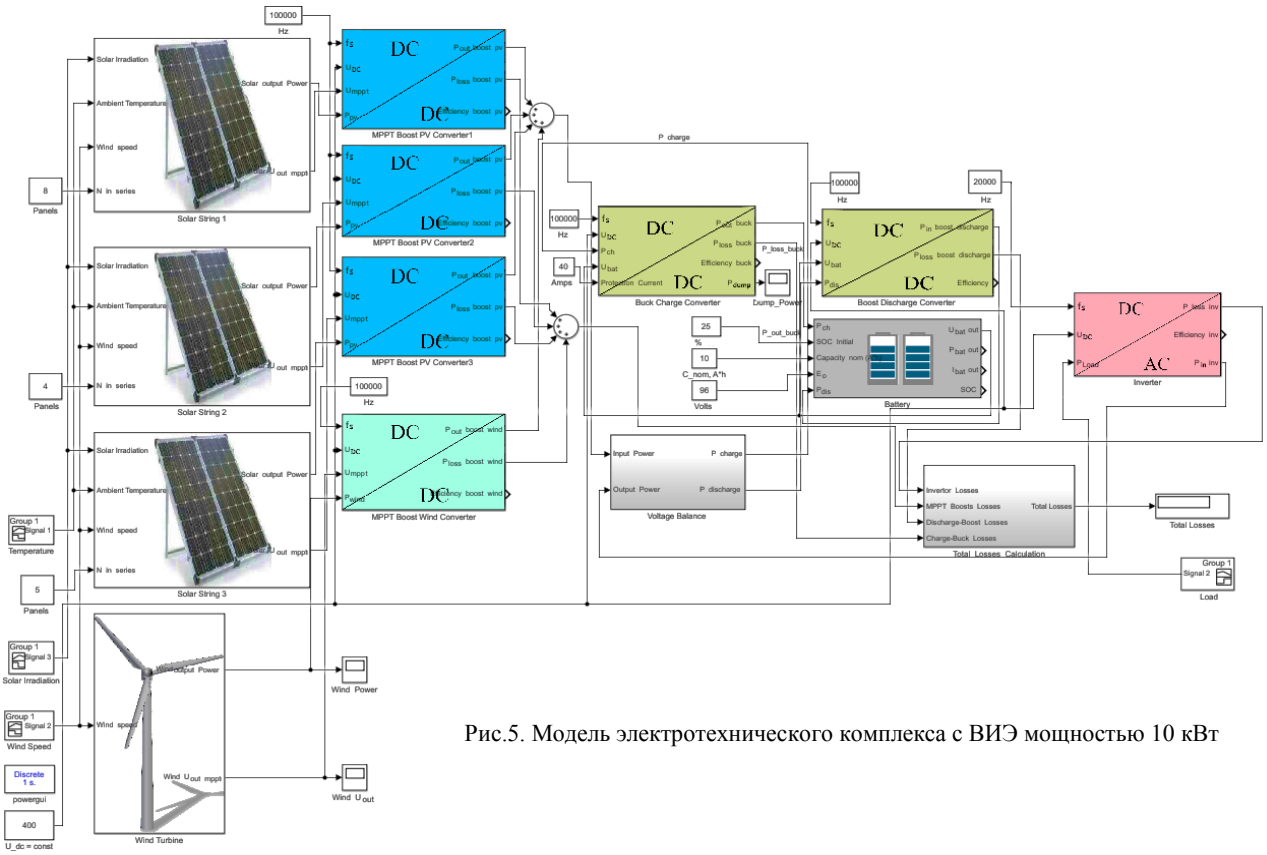


Рис.5. Модель электротехнического комплекса с ВИЭ мощностью 10 кВт

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

напряжение постоянного тока. Потребители имитируются блоком *Load*, питаемым DC/AC преобразователем напряжения. Мощность, снимаемая с возобновляемых источников, преобразуется импульсными DC/DC преобразователями. Выходная мощность преобразователей суммируется, в результате чего определяется суммарная мощность выработки. После этого в блоке *Voltage Balance* производится вычитание потребляемой нагрузками мощности из суммарной мощности выработки. Если разность оказывается положительной, она идет на заряд АБ. Если отрицательной – восполняется путем ее разряда. Двунаправленный преобразователь заряда-разряда батареи представлен двумя DC/DC блоками: *Buck Charge Converter* – осуществляющий заряд и *Boost Charge Converter* – осуществляющий разряд. Параметры моделей ВИЭ и АКБ приведены в табл.1, модели импульсных преобразователей напряжения – в табл.2.

Таблица 1

Параметры моделей ВИЭ и АКБ

Солнечная панель	Ветроэнергетическая установка	АКБ
Номинальная мощность 250 Вт	Номинальная мощность 7500 Вт	Напряжение холостого хода 96 В
Напряжение холостого хода 37,98 В	Напряжение холостого хода 240 В	Емкость 10 А·ч
Ток короткого замыкания 9,04 А	Быстроходность $\lambda = 7$	Внутреннее сопротивление 0,0048 Ом
Напряжение в точке максимальной мощности 30,63 В	Длина лопасти 1,6 м	Допустимый уровень заряда 20-100 %
Ток в точке максимальной мощности 8,79 А	Допустимая скорость ветра 3-14 м/с	Начальный заряд 25 %

Таблица 2

Параметры моделей импульсных преобразователей

Показатели	DC/DC солнечных панелей	DC/DC ветроэнергетической установки	DC/DC заряда-разряда АКБ	DC/AC
Режим работы	MPPT	MPPT	Стабилизация напряжения U_{DC}	Стабилизация напряжения потребителей
Схема	Повышающая (boost converter) [22]	Повышающая (boost converter) [43]	Повышающе-понижающая (buck-boost converter) [28]	Мостовая (full-bridge converter) [30]
Транзисторы				
Тип	MOSFET	MOSFET	MOSFET	IGBT
Рабочая частота	100 кГц	100 кГц	100 кГц	20 кГц
Сопротивление канала/падение напряжения в открытом состоянии	0,002 Ом	0,002 Ом	0,002 Ом	1,8 В
Среднее время переключения	30 нс	30 нс	30 нс	42 нс
Выходная емкость	100 пФ	100 пФ	100 пФ	200 пФ
Пороговое напряжение затвора	12 В	12 В	12 В	12 В
Диоды				
Противо-ЭДС	0,3 В	0,3 В	0,3 В	1 В
Динамическое сопротивление	0,9 Ом	0,9 Ом	0,9 Ом	0,7 Ом
Время обратного восстановления	45 нс	45 нс	45 нс	60 нс
Дроссель				
Индуктивность	70 мкГн	50 мкГн	50 мкГн	30 мГн
Резистивное сопротивление	0,3 Ом	0,2 Ом	0,15 Ом	0,8 Ом
Электролитические конденсаторы				
ESR	0,02 Ом	0,02 Ом	0,02 Ом	0,02 Ом

На вход модели солнечных панелей поступают данные о почасовой интенсивности солнечного излучения (рис.6, *а*) и температуре окружающей среды (рис.6, *б*) на протяжении года. На вход модели ветрогенератора поступают данные о почасовой скорости ветра (рис.6, *в*). Все они представляют собой усредненные за час значения, взятые из метеорологической базы NASA. Для моделирования использовались метеоданные севера Забайкальского края за 2022 год.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492
© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

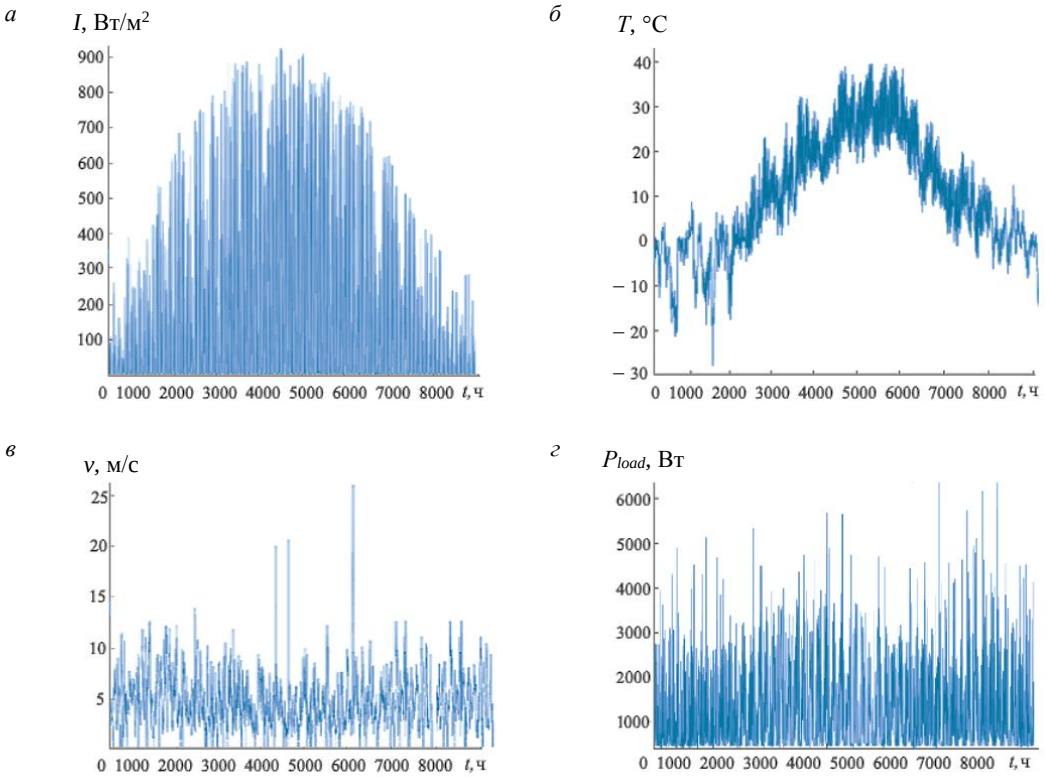


Рис.6. Данные для моделирования работы ЭТК: *а* – интенсивность солнечного излучения; *б* – температура воздуха; *в* – скорость ветра; *г* – почасовой профиль потребления нагрузки

Снимаемая с массивов солнечных панелей мощность поступает на DC/DC преобразователи MPPT *Boost PV Converter*, модель потерь мощности которых составлена на основе формул из работы [38]. Входными данными для модели являются рабочая частота преобразования f_s, напряжение шины постоянного тока U_{DC}, генерируемое напряжение солнечных панелей V_{MPPT} и мощность P_{PV}. Выходные данные – вычисленные потери мощности $P_{loss\ boost\ PV}$, выходная мощность $P_{out\ boost\ PV}$ и КПД преобразования *Efficiency boost PV*.

Снимаемая с ветрогенератора мощность поступает на DC/DC преобразователь MPPT *Boost Wind Converter*, модель потерь которого также основана на работе [38]. Входными данными для модели являются сгенерированная ветроустановкой мощность P_{wind} и напряжение V_{MPPT}, рабочая частота f_s и напряжение шины постоянного тока U_{DC}. Выходные данные – потери $P_{loss\ boost\ wind}$, выходная мощность $P_{out\ boost\ wind}$ и КПД преобразования *Efficiency boost wind*.

Модель потерь мощности DC/AC преобразователя составлена на основе работ [40, 41]. На вход модели поступают данные о рабочей частоте преобразования f_s, почасовом потреблении нагрузки P_{load} (рис.6, *г*), уровне напряжения шины постоянного тока U_{DC}. В качестве нагрузки рассматривался небольшой вахтовый поселок из нескольких жилых сооружений, где основными потребителями являются электроприборы и освещение. Данные о потребляемой мощности брались из базы данных LoadProfileGenerator*. Выходными данными для модели DC/AC преобразователя являются потери мощности $P_{loss\ inv}$, КПД преобразования *Efficiency* и потребляемая с шины постоянного тока мощность $P_{in\ inv}$.

Модель шины постоянного тока представлена блоком *Voltage Balance*. В блоке производится сравнение суммарной мощности выработки *Input Power* и суммарной мощности потребления *Output Power*. Если их разница оказывается больше нуля, то избыточная мощность P_{ch} направляется на заряд АКБ, если меньше, то недостаток мощности P_{dis} будет браться из разряда АКБ.

* LoadProfileGenerator – modeling tool for residential energy consumption. URL: https://www.loadprofilegenerator.de (дата обращения 02.03.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Двунаправленный DC/DC преобразователь заряда-разряда АКБ представлен в модели комплекса блоками *Buck Charge Converter* и *Boost Discharge Converter*. Модель потерь преобразователя в режиме заряда *Buck Charge Converter* составлена на основе работ [39, 42]. В преобразователе имеется защита по току, задающая предельный ток заряда *Protection Current*. Входные данные для модели – мощность заряда P_{ch}, напряжение шины постоянного тока U_{DC}, напряжение АКБ U_{bat} и рабочая частота f_s. Выходные данные – потери мощности $P_{loss\ buck}$, выходная мощность $P_{out\ buck}$, КПД преобразования *Efficiency buck* и рассеиваемая на балластной нагрузке избыточная мощность P_{dump}.

Модель потерь преобразователя в режиме разряда АКБ *Boost Discharge Converter* составлена на основе работы [43]. Входные данные – рабочая частота f_s, напряжение шины постоянного тока U_{DC}, напряжение АКБ U_{bat} и отдаваемая на шину постоянного тока мощность P_{dis}. Выходными данными являются снимаемая с батареи мощность $P_{bat\ dis}$, потери $P_{loss\ boost\ dis}$ и КПД работы *Efficiency*.

Расчет суммарных потерь мощности комплекса осуществляется в блоке *Total Losses Calculation*. На вход блока поступает информация о потерях мощности всех преобразователей, после чего эти потери суммируются.

Результаты. В процессе имитационного компьютерного моделирования была воспроизведена работа комплекса на протяжении года, включающего 8760 ч. Результаты моделирования приведены на рис.7. Чтобы представить осциллограммы в увеличенном масштабе, показана работа комплекса во временном интервале с 2000 по 2600 ч. Выработка от ВИЭ (рис.7, *а*) представлена двумя графиками: P_{PV} – мощность генерации солнечных панелей, P_{WT} – мощность генерации ветроэнергетической установки. График P_{load} – активная мощность потребления нагрузки SOC (англ. state of charge) – уровень заряда АКБ.

Осциллограммы напряжения U_{PV} и тока I_{PV}, генерируемые массивом солнечных панелей, приведены на рис.7, *б*. Осциллограммы U_{WT} и I_{WT} ветрогенератора – на рис.7, *в*. Напряжение и ток заряда-разряда АКБ представлены на рис.7, *г*. Оценка энергоэффективности комплекса производилась по измерению суммарных потерь мощности P_{total}. Первоначально были измерены потери мощности при жестко заданном напряжении шины 400 В и рабочей частоте преобразователей: 100 кГц для DC/DC преобразователей и 20 кГц для DC/AC преобразователя. После этого были измерены потери при настраиваемых на минимум потерях (P_{total} = min) рабочей частоты преобразователей (рис.7, *д*) и напряжении шины (рис.7, *е*). В качестве диапазона значений напряжения шины использовались 370-600 В. Рабочая частота DC/DC преобразователей варьировалась в пределах 20-100 кГц в зависимости от их нагрузки.

График суммарных потерь мощности системы P_{total} приведен на рис.7, *ж*. В результате внедрения предлагаемого технического решения потери комплекса снизились. Для количественной оценки этого снижения было произведено суммирование потерь мощности P_{total} на протяжении 8760 ч, в результате чего определялись полные потери за год. Прирост в энергоэффективности комплексом за год рассчитывался следующим образом:

$$\Delta P_{total} = \left(\frac{P_{total2}}{P_{total1}} - 1 \right) \cdot 100\ \%, \qquad (10)$$

где P_{total1} – суммарные потери активной мощности за год при жестко заданном напряжении шины и рабочей частоте преобразователей; P_{total2} – суммарные потери активной мощности за год при изменяемом напряжении шины и рабочей частоте преобразователей.

Оценка ΔP_{total} показала, что в результате внедрения технического решения потери мощности за год сократились на 2 % при варьировании напряжения шины и на 5 % при одновременном варьировании напряжения шины и рабочей частоты преобразователей. Поскольку потери на протяжении всего срока эксплуатации комплекса равны сумме потерь по годам, сокращение потерь за весь срок службы ЭТК в результате внедрения предлагаемого решения также оценивается в 2-5 %.

Обсуждение результатов. Отмечено повышение энергоэффективности автономного ЭТК с ВИЭ, благодаря адаптивному регулированию режимов его работы. Предлагаемый способ основан на использовании математических моделей потерь мощности преобразователей, поэтому для его осуществления требуется большой объем проводимых вычислений. Специально для этой цели в комплекс был добавлен отдельный ВБ, хранящий в памяти все математические модели. Данный

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492
© В.А.Шпенст, А.А.Бельский, Е.А.Орел, 2023

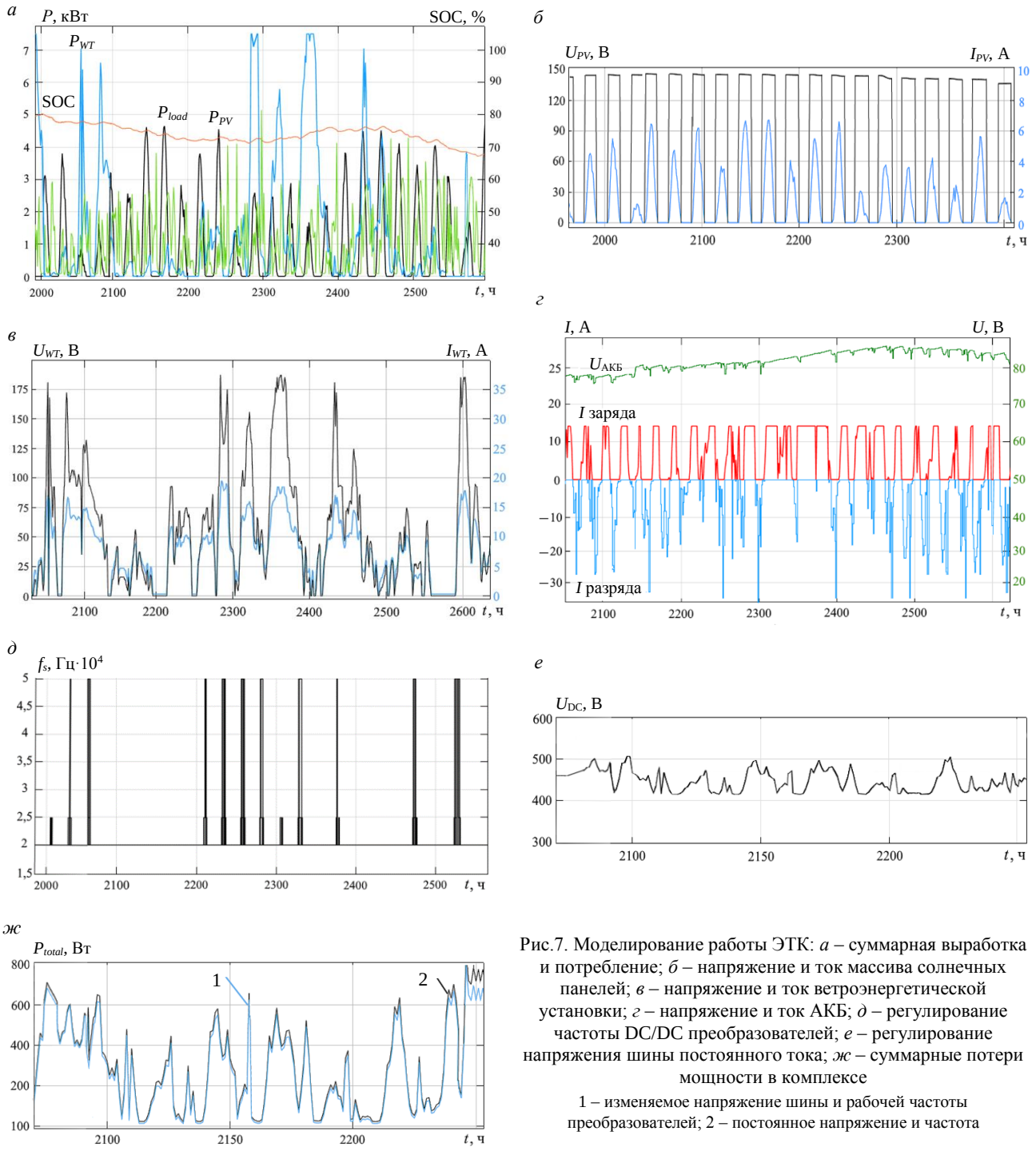


Рис.7. Моделирование работы ЭТК: *а* – суммарная выработка и потребление; *б* – напряжение и ток массива солнечных панелей; *в* – напряжение и ток ветроэнергетической установки; *г* – напряжение и ток АКБ; *д* – регулирование частоты DC/DC преобразователей; *е* – регулирование напряжения шины постоянного тока; *ж* – суммарные потери мощности в комплексе

1 – изменяемое напряжение шины и рабочей частоты преобразователей; 2 – постоянное напряжение и частота

блок связан с преобразователями каналами связи и непрерывно получает от них значения переменных, необходимые для проведения расчетов. Возникают следующие особенности функционирования системы:

• Требуется цифровое управление преобразователями с применением микроконтроллеров (МК) либо программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). При помощи датчиков тока и напряжения они измеряют переменные, необходимые для расчета потерь мощности, и передают их по каналу связи ВБ. На основании измеренного тока проводится регулировка рабочей частоты преобразования.

• Вычислительный блок – это цифровой блок, представляющий собой компьютер или отдельную плату со своим МК либо ПЛИС, в памяти которого хранятся математические модели потерь мощности всех преобразователей.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Повышение энергоэффективности зависит от точности математических моделей. По этой причине на этапе проектирования комплекса желательна калибровка моделей с реальными преобразователями. Электрические схемы и параметры электронных компонентов преобразователей должны быть заранее известны. Проводить замену элементов можно только на полные функциональные аналоги.

• Скорость обмена данными между ВБ и ЛК преобразователей должна согласовываться со скоростью проведения вычислений, т.е. ВБ успевает провести вычисления прежде, чем получит на вход новые значения токов и напряжений преобразователей.

• Из-за перечисленных выше особенностей не получится использовать любые имеющиеся на рынке преобразователи. Для системы требуется целенаправленная разработка преобразователей, которая, впрочем, не отличается высокой сложностью.

Разработанный подход интеллектуального управления позволяет повысить энергоэффективность ЭТК с ВИЭ. К недостаткам следует отнести необходимость использования цифрового управления и добавление каналов связи для обмена данными между преобразователями и ВБ, что ведет к удорожанию комплекса. Кроме того, для системы будет характерна низкая гибкость, поскольку любое изменение ее структуры либо составных элементов будет приводить к несоответствию математической модели, заложенной в ВБ, с реальной работой комплекса. В этом случае в модель необходимо будет вносить правки.

Заключение. Новое время диктует новые требования. Минерально-сырьевой комплекс в современных условиях – это технологичный, эффективный, надежный, безопасный, постоянно совершенствующийся сектор экономики. В нашей стране большинство месторождений природных ископаемых находится в отдаленных, слабонаселенных районах, где нет легкодоступной электроэнергии. Использование топливных генераторов сопряжено с низкой экологичностью и высокой себестоимостью выработки электричества, что препятствует развитию, вынуждает добывающие компании нести постоянные материальные издержки. Использование ВИЭ является современным технологичным решением, способным дать «вторую жизнь» многим объектам добывающей отрасли и подстегнуть развитие новых проектов.

Несмотря на решение транспортных и экологических проблем, нестабильность генерации электроэнергии и слабая развитость систем ее накопления продолжают оставаться одним из главных препятствий для распространения автономных ЭТК с ВИЭ. Одним из путей решения этих проблем является повышение эффективности использования выработанной энергии. Предложено решение по повышению энергоэффективности комплекса путем адаптивного регулирования режимов его работы. В качестве регулируемых параметров рассматривались уровень напряжения промежуточной шины постоянного тока и рабочая частота преобразователей электроэнергии в составе комплекса. В условиях постоянно меняющихся объемов генерации и потребления, характерных для всех энергосистем с ВИЭ, точка оптимума потерь мощности также изменяется. В ходе исследования был разработан алгоритм автонастройки режима работы комплекса, основанный на использовании математических моделей потерь мощности преобразователей. Модели позволяют с учетом объемов генерации и потребления вычислить оптимальный уровень напряжения шины постоянного тока и рабочую частоту преобразователей для сложившихся условий работы.

Результаты показали, что в ЭТК мощностью 10 кВт сокращение потерь активной мощности за год эксплуатации составило порядка 2 % при варьировании напряжения шины и порядка 5 % при одновременном варьировании напряжения шины и рабочей частоты преобразователей.

Направление будущих исследований будет заключаться в оценке энергетической эффективности гибридных ЭТК с ВИЭ и дизельгенераторными установками.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М.* Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 686-700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91

2. *Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю.* Изучение технологических и эксплуатационных особенностей высокотемпературостойких композитных пленок для лазерной маркировки деталей из черных сплавов // Черные металлы. 2023. № 4. С. 74-80. DOI: 10.17580/chm.2023.04.12

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А., Аладьин М.Е.* Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 159-179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159

4. *Gerasimova I.G., Oblova I.S., Golovina E.I.* The Demographic Factor Impact on the Economics of the Arctic Region // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 11. № 117. DOI: 10.3390/resources10110117

5. *Lavrik A., Zhukovskiy Yu., Tcvetkov P.* Optimizing the Size of Autonomous Hybrid Microgrids with Regard to Load Shifting // Energies. 2022. Vol. 14. Iss. 16. № 5059. DOI: 10.3390/en14165059

6. *Samylovskaya E., Makhovikov A., Lutonin A. et al.* Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience // Resources. 2022. Vol. 11. Iss. 3. № 29. DOI: 10.3390/resources11030029

7. *Khalturin A.A., Parfenchik K.D., Shpenst V.A.* Features of Oil Spills Monitoring on the Water Surface by the Russian Federation in the Arctic Region // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 1. № 111. DOI: 10.3390/jmse11010111

8. *Kopteva A.V., Ushkova T.O.* Development of methods for determining the relative weight of physical factors in pipeline paraffinization // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. № 04008. DOI: 10.1051/e3sconf/202126604008

9. *Змиева К.А.* Проблемы энергоснабжения арктических регионов // Российская Арктика. 2020. № 8. С. 5-14. DOI: 10.2441/2658-4255-2020-10086

10. *Лебедева М.А.* Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в регионах Крайнего Севера России // Проблемы развития территории. 2021. Т. 25. № 4. С. 139-155. DOI: 10.15838/ptd.2021.4.114.8

11. *Hongwei Wu, Sechilariu M., Locment F.* Influence of Dynamic Efficiency in the DC Microgrid Power Balance // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 10. № 1563. DOI: 10.3390/en10101563

12. *Мартынов С.А., Масько О.Н., Федоров С.Н.* Перспективные системы управления энергетическим режимом рудно-термических печей // Цветные металлы. 2022. № 4. С. 87-94. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.11

13. *Romasheva N., Dmitrieva D.* Energy Resources Exploitation in the Russian Arctic: Challenges and Prospects for the Sustainable Development of the Ecosystem // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 24. № 8300. DOI: 10.3390/en14248300

14. *Ilinova A., Solovyova V., Yudin S.* Scenario-based forecasting of Russian Arctic energy shelf development // Energy Reports. 2020. Vol. 6. S. 9. P. 1349-1355. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.022

15. *Dastgeer F., Gelani H.E.* A Comparative analysis of system efficiency for AC and DC residential power distribution paradigms // Energy and Buildings. 2017. Vol. 138. P. 648-654. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.077

16. *Elistratov V.V.* Renewable Energy Trends within the Concept of Low-Carbon Development // Applied Solar Energy. 2022. Vol. 58. Iss. 4. P. 594-599. DOI: 10.3103/S0003701X22040077

17. *Rizzato Lede A.M., Molina M.G., Martinez M., Mercado P.E.* Microgrid Architectures for Distributed Generation: A Brief Review // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America), 20-22 September 2017, Quito, Ecuador. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126746

18. *Abdallah W.J., Hashmi K., Faiz M.T. et al.* A Novel Control Method for Active Power Sharing in Renewable-Energy-Based Micro Distribution Networks // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 2. № 1579. DOI: 10.3390/su15021579

19. *Kumar D., Zare F., Ghosh A.* DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 12230-12256. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2705914

20. *Aaron St. Leger.* Demand response impacts on off-grid hybrid photovoltaic-diesel generator microgrids // AIMS Energy. 2015. Vol. 3. Iss. 3. P. 360-376. DOI: 10.3934/energy.2015.3.360

21. *Jiechao Lv, Xiaoli Wang, Guishuo Wang, Yuhou Song.* Research on Control Strategy of Isolated DC Microgrid Based on SOC of Energy Storage System // Electronics. 2021. Vol. 10. Iss. 7. № 834. DOI: 10.3390/electronics10070834

22. *Ayop R., Chee Wei Tan.* Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications // Solar Energy. 2018. Vol. 160. P. 322-335. DOI: 10.1016/j.solener.2017.12.016

23. *Seguel J.L., Seleme Jr S.I., Moráis L.M.F.* Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters Buck and Buck-Boost for autonomous photovoltaic systems // Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. 2021. Vol. 29. № 2. P. 229-244. DOI: 10.4067/S0718-33052021000200229

24. *Hanzaei S.H., Gorji S.A., Ektesabi M.* A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 182229-182239. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028580

25. *Pande J., Nasikkar P., Kotecha K., Varadarajan V.* A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 11. № 1187. DOI: 10.3390/jmse9111187

26. *Belsky A., Dobush V., Ivanchenko D.* Wind-PV-Diesel Hybrid System with flexible DC-bus voltage level // Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 11-13 June 2014, Rakvere, Estonia. IEEE, 2014. P. 181-184. DOI: 10.1109/PQ.2014.6866806

27. *Honadia P.A.A., Barro F.I., Sané M.* Performance Analysis of a Boost Converter with Components Losses // Energy and Power Engineering. 2018. Vol. 10. № 9. P. 399-413. DOI: 10.4236/epe.2018.109025

28. *Yuan-Chih Chang, Hao-Chin Chang, Chien-Yu Huang.* Design and Implementation of the Battery Energy Storage System in DC Micro-Grid Systems // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 6. № 1566. DOI: 10.3390/en11061566

29. *Sayed Kh., Abo-Khalil A.G., Alghamdi A.S.* Optimum Resilient Operation and Control DC Microgrid Based Electric Vehicles Charging Station Powered by Renewable Energy Sources // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 22. № 4240. DOI: 10.3390/en12224240

30. *Ternifi T.Z., Atik L., Bachir G. et al.* Quality improvement of the AC electrical energy produced by a modular inverter dedicated to photovoltaic applications // AIP Conference Proceedings. Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES), 15-18 April 2016, Beirut, Lebanon. AIP Publishing, 2016. Vol. 1758. Iss. 1. № 030048. DOI: 10.1063/1.4959444

31. *Hannan S., Aslam S., Ghayur M.* Design and real-time implementation of SPWM based inverter // International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), 22-23 February 2018, Lahore, Pakistan. IEEE, 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICEET1.2018.8338637

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Castillo-Calzadilla T., Cuesta M.A., Olivares-Rodriguez C. et al.* Is it feasible a massive deployment of low voltage direct current microgrids renewable-based? A technical and social sight // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. № 112198. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112198

33. *Habibi S., Rahimi R., Ferdowsi M., Shamsi P.* DC Bus Voltage Selection for a Grid-Connected Low-Voltage DC Residential Nanogrid Using Real Data with Modified Load Profiles // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 21. № 7001. DOI: 10.3390/en14217001

34. *Siraj K., Khan H.A.* DC distribution for residential power networks – A framework to analyze the impact of voltage levels on energy efficiency // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 944-951. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.04.018

35. *Лукутин Б.В., Муравьев Д.И.* Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределенной солнечной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 6. С. 184-196. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2688

36. *Zhikang Shuai, Junbin Fang, Fenggen Ning, Z. John Shen.* Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 3670-3682. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.096

37. *Elvira D.G., Blaví H.V., Pastor A.C., Salamero L.M.* Efficiency Optimization of a Variable Bus Voltage DC Microgrid // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 11. № 3090. DOI: 10.3390/en11113090

38. *Eichhorn T.* Boost Converter Efficiency Through Accurate Calculations // Power Electronics Technology. 2008. Iss. 9. P. 30-35.

39. *Das N., Kazimierczuk M.K.* Power losses and efficiency of buck PWM DC-DC power converter // Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 23-26 October 2005, Indianapolis, USA. IEEE, 2005. P. 417-423. DOI: 10.1109/EEIC.2005.1566330

40. *Balıkcı A., Azizoğlu B.T., Durbaba E., Akpınar E.* Efficiency Calculation of Inverter for PV Applications Using MATLAB and SPICE // International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 25-27 May 2017, Brasov, Romania. IEEE, 2017. P. 593-598. DOI: 10.1109/OPTIM.2017.7975033

41. *Geetha K., Sreenivasappa B.V.* Power Loss Calculation for IGBT and SiC MOSFET // Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. 2020. Vol. XII. Iss. VIII. P. 378-382. DOI: 10.37896/JXAT12.08/2637

42. *Zheliazkov Y.* Researching the efficiency of buck converter synchronous rectifier // Technology Audit and Production Reserves. 2020. Vol. 4. № 1(54). P. 44-50. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.207893

43. *Hinov N., Arnaudov D., Valchev V., Vuchev S.* Comparative Loss Analysis of Boost and Synchronous Boost DC-DC Converters // XXVI International Scientific Conference Electronics (ET), 13-15 September 2017, Sozopol, Bulgaria. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ET.2017.8124347

44. *Обухов С.Г., Плотников И.А.* Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 38-51.

45. *Flores D.R.L., Gómez J.A.P., Herrera R.S., Alvarado M.S.* Tracking Control of the Maximum Power Point (MPPT) in a Small Wind Turbine (SWT) for Isolated Residential Applications // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. 2013. Vol. 12. Iss. 8. P. 253-261.

***Авторы*: В.А.Шпенст,** *д-р техн. наук, декан, https://orcid.org/0000-0001-6091-6916* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **А.А.Бельский,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0002-2619-1496* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Е.А.Орел,** *аспирант, orel.geny@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4965-0998* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0