ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(6):69-87
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.314.12 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_6_0_69

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Р.Ю. Зимин[1], С.Л. Сержан[1], Д.В. Малеванный[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: zimin_ryu@pers.spmi.ru

Аннотация: Месторождения полезных ископаемых арктического шельфа территориально рассредоточены, удалены от централизованных источников электрической энергии и требуют для разработки автономные источники электроэнергии, не зависящие от поставок топлива, такие как ветрогенераторы или солнечные генераторы. В свою очередь, для повышения эффективности использования установок генерации электроэнергии на возобновляемых источниках необходимо применять современные преобразователи электроэнергии для достижения максимального КПД. С целью обеспечения непрерывной работы генерирующих установок совместно с централизованной сетью необходимо обеспечить полную и мгновенную синхронизацию. Исследования проводились на основе статистических данных по генерации электроэнергии за счет ветряных турбин, а также метода контурных токов и узловых потенциалов для схем DC-DC и DC-AC-преобразователей. Для подтверждения результатов исследования проведено математическое и компьютерное имитационное моделирование бестрансформаторного DC-DC-преобразователя и разработаны системы управления для обеспечения синхронизации автономной энергосистемы на основе возобновляемых источников энергии с единой энергетической системой. Результаты моделирования показали эффективное применение DC-DC-преобразователей и DC-AC-преобразователей для обеспечения заданного уровня напряжения и синхронизации по фазе ветрогенераторной установки автономной системы электроснабжения с единой энергетической системой.

Ключевые слова: арктический шельф, возобновляемые источники энергии, DC-DC-преобразователи, постоянный ток, переменный ток, моделирование систем электроснабжения, генератор управляющих импульсов, ветрогенератор, автономная система электроснабжения, системы автоматического управления.

Для цитирования: *Зимин Р. Ю., Сержан С. Л., Малеванный Д. В.* Применение преобразователей на постоянном и переменном токе в автономных системах электроснабжения на основе ветрогенераторов в условиях арктического шельфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 6. – С. 69–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_6_0_69.

Application of DC/AC converters in self-contained power supply systems based on wind generators in the conditions of the Arctic Shelf

R.Yu. Zimin[1], S.L. Serzhan[1], D.V. Malevannyi[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: zimin_ryu@pers.spmi.ru

Abstract: Mineral deposits of the Arctic Shelf feature territorial distribution and remoteness from the centralized sources of electric power, and need self-contained power supply systems independent of fuel supplies, such as wind or solar generators. In turn, high-performance operation of power-generating plants driven by renewable sources requires advanced electric energy transducers to reach the maximum efficiency. Continuous running of power-generating plants together with the centralized network needs instantaneous and complete synchronization to be ensured. The present study used statistical data on power generation by wind turbines, as well as the method of loop currents and nodal voltages for DC–DC and DC–AC converters. With a view to confirming the studies, the mathematical and computer-aided simulations of a transformerless DC–DC converter were carried out, and the control systems were developed to ensure synchronization of a self-contained power system based on renewable energy sources with the power grid. The modeling proved efficiency of DC–DC and DC–AC converters in provision of a preset voltage level and in phase synchronization of the wind generator of the self-contained power system with the power grid.

Key words: Arctic Shelf, renewable energy sources, DC–DC converters, direct current, alternate current, power supply modeling, control timer, wind generator, self-contained power supply system, automatic control system.

For citation: Zimin R. Yu., Serzhan S. L., Malevannyi D. V. Application of DC/AC converters in self-contained power supply systems based on wind generators in the conditions of the Arctic Shelf. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(6):69-87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_6_0_69.

Введение

В настоящее время во всем мире наблюдается тенденция к увеличению промышленных процессов и появлению новых технологических устройств. Постоянное увеличение потребляемой энергии и связанное с этим негативное воздействие на окружающую среду за счет генерации энергии на различных видах ископаемого топлива приводит к существенным проблемам. Увеличение промышленных процессов в мире ведет к росту спроса на электроэнергию, поскольку электроэнергия играет центральную роль в глобальном процессе развития, таким образом, происходит повышение стоимости электроэнергии. Ископаемое топливо является основным источником энергии. Однако в современных реалиях полагаться только на ископаемое топливо становится проблематично. Ископаемое топливо относится к невозобновляемым источникам энергии, так как его запасы ограничены и постоянно истощаются. Причем возникают сложности и риски при его добыче, транспортировке и логистике, так как расположение региона Арктического шельфа сильно увеличивает экономические затраты на его реализацию [1 – 3].

В дополнение к ограниченности ресурсов и нестабильной рыночной конъюнктуре ископаемое топливо представляет опасность для человечества и окружающей среды — глобальное изменение климата. В этой связи возникает тенденция отказа от ископаемого топлива в качестве первичного энергоносителя. Учитывая данные обстоятельства, становится востребован поиск альтернатив для получения электрической энергии. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) рассматриваются как одно из решений для выработки электроэнергии в условиях арктического шельфа.

Технологии, использующие энергию ветра, становятся все более популярными на электростанциях по целому ряду причин: данные установки имеют значительно больший срок службы, менее вредны для окружающей среды, требуют меньше технического обслуживания и могут генерировать большое количество энергии для удовлетворения потребностей по сравнению с другими видами ВИЭ. ВИЭ доступна каждый день и может быть использована в любой точке мира. Технология, использующая энергию ветра, становится все более популярной в качестве альтернативы электроэнергии, вырабатываемой на основе ископаемого топлива. Ветрогенераторы — отличный пример использования энергии ветра, которая широко применяется по всему миру.

Возобновляемая энергетика развивается слабо. Основная причина — это то, что поступающая энергия от ВИЭ непостоянна и требует постоянной корректировки для исправной работы оборудования. В этой связи устанавливаются DC-DC и DC-AC-преобразователи в систему получения энергии. Разработка комплексного методологического подхода для оценки потенциала ВИЭ в отдельных регионах стран при недостаточности данных, а также его адаптивность к специфическим условиям выбранной территории может представлять перспективный потенциал для развития данного направления исследований.

Структура ветряной системы генерации электроэнергии

Генерация энергии — это процесс получения полезной электрической энергии путем сбора и преобразования энергии, которая уже присутствует в окружающей среде из различных источников. Одним из способов удовлетворения постоянно растущего потребления элект-

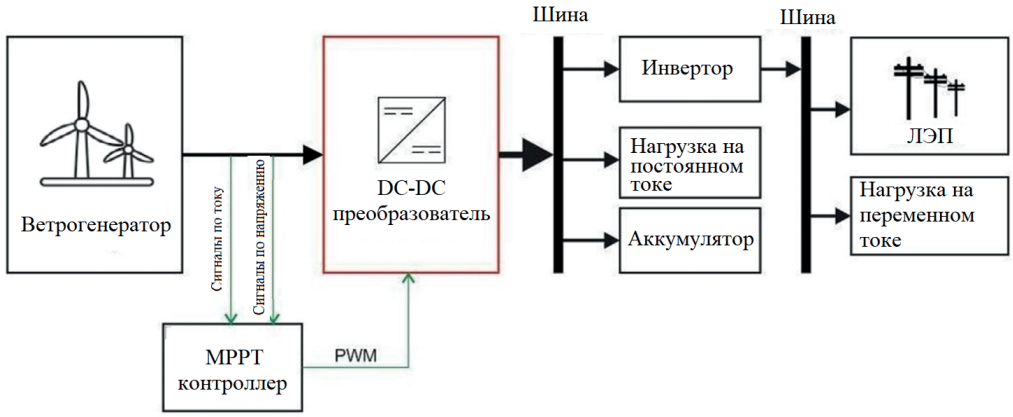

Рис. 1. Структура генерации электроэнергии при помощи ветряной турбины
Fig. 1. The structure of electricity generation using a wind turbine

роэнергии является получение энергии от ветра. Общая система получения ветряной энергии состоит из множества различных устройств и компонентов, включая крыльчатки MPPT-контроллеры (Maximum Power Point Tracking — отслеживание точки максимальной мощности), DC-DC-преобразователи, аккумулирующие батареи, нагрузки (как переменного, так и постоянного тока) и инверторы [3—5]. Общая схема системы получения ветряной энергии показана на рис. 1.

На рис. 1 DC-DC-преобразователь — повышающий преобразователь из постоянного в постоянный ток, MPPT-контроллер — контроллер, отслеживающий точку максимальной мощности, PWM — широтно-импульсная модуляция, ЛЭП — линия электропередач.

Накопление энергии включает в себя процесс преобразования энергии из форм, которые трудно сохранить, в другую форму за счет аккумулирования. Кроме того, аккумуляция также важна, когда избыток электроэнергии вырабатывается из возобновляемых источников энергии, так как генерация происходит непостоянно [6—8].

Ветряные установки доказали, что они могут стать крупнейшими возобновляемым источниками энергии для достижения генерации электроэнергии до 20%. Совершенствование технологии и экономия ископаемого топлива привели к минимизации затрат на генерацию электроэнергии, и это будет продолжаться в ближайшие годы, по мере того как генерация за счет ветрогенераторов будет становиться конкурентоспособной [9].

Современные преобразователи переменного/постоянного и постоянного/постоянного тока предназначены для обеспечения эффективной мощности и обеспечения контролируемого, безопасного и хорошо регулируемого источника питания постоянного тока для различных электронных приборов, устройств и систем. В последнее десятилетие произошли технические изменения и появились новые импульсные регуляторы. Использование преимуществ новых схем и материалов, которых раньше не было, позволило создать данные импульсные регуляторы напряжения. Этот прогресс позволил повысить производительность и улучшить тепловые характеристики, а также одновременно существенно уменьшить габариты, вес и стоимость блоков питания.

На станциях по выработке электроэнергии применяют силовые электронные интерфейсы или преобразователи мощности, такие как DC-DC-преобразователи. Данные устройства необходимы для поддержания постоянного тока в нормальном режиме работы, а также для зарядки аккумуляторных батарей и его дальнейшего использования. Существует множество типов DC-DC-преобразователей, которые могут работать с переключаемым режимом, регулируя нерегулируемое напряжение постоянного тока с преобразованием в соответствующее напряжение использования путем увеличения или уменьшения значения выходного напряжения постоянного тока. Каждый преобразователь требует устройства переключения мощности для включения и выключения с целью согласования нагрузки и увеличения выходной мощности систем [10, 11].

Очень важным требованием является разработка повышающего DC-DC-преобразователя для регулирования низкого и нерегулярного выходного напряжения постоянного тока, поступающего от ветряных турбин [12, 13].

Энергия, вырабатываемая турбинами, на постоянном токе требует преобразования в переменный ток для подачи в сеть потребителям. Из-за погодных изменений, таких как интенсивность ветра и направление его потоков, ветряные

турбины не генерируют электроэнергию на постоянном уровне, что влияет на производительность зарядных станций [14, 15]. Поэтому данная система возобновляемой энергии должна иметь DC-DC-преобразователь и DC-AC-преобразователь, чтобы сделать возможным передачу электроэнергии потребителям на переменном токе.

DC-DC-преобразователь является компонентом автономной системы электроснабжения, использующей в качестве источника электрической энергии ветрогенераторы. При выборе DC-DC-преобразователей необходимо учитывать: высокую эффективность, высокую надежность, низкие потери проводимости, экономическую целесообразность и низкие потери при переключении. Прямым следствием этого является то, что исследователи по всему миру постоянно работают над созданием топологий DC-DC-преобразователей [16—18]. Существует множество топологий, которые были предложены для реализации преобразователя. Некоторые из них — каскадный H-мост, многоуровневый инвертор. Однако существуют некоторые ограничения для получения выходного напряжения с высоким КПД, а также существует проблема с синхронизацией сетей.

В условиях, где важен размер и/или вес, используют конфигурации многоуровневых инверторов, таких как каскадные многоуровневые инверторы H-bridge, где силовые преобразователи играют важную роль в структуре системы. Ветрогенерирующие установки, подключенные к сети, обычно располагаются в отдаленных районах. Преобразователь постоянного тока в постоянный является ключевой частью структуры ветрогенератора [19, 20]. Этот преобразователь обеспечивает гальваническую развязку с помощью высокочастотного (ВЧ) трансформатора. ВЧ-трансформатор также позволяет преобразователю работать на высоких частотах коммутации с изоляцией, что снижает габариты, стоимость и вес. Чтобы избежать высоких коммутационных потерь, связанных с работой на высоких частотах переключения, используется переключение при нулевом токе (ZCS) или переключение при нулевом напряжении (ZVS). Интересным решением является использование конфигураций многоуровневого инвертора (MLI), где силовые преобразователи являются ядром системной архитектуры, такой как конфигурация многоуровневого каскадного инвертора H-bridge (CHBMLI). Данная конфигурация является решением для преобразования высокой мощности от среднего до высокого напряжения [2, 21, 22].

Основные топологии DC-DC-преобразователей

Энергия ветра собирается лопастями ветрогенератора, а затем преобразуется в электрическую энергию. Для получения полезной мощности входной сигнал передается на DC-DC-преобразователь. Это устройство преобразует «плавающее» напряжение постоянного тока в стабилизированное напряжение, необходимое для аккумулирования энергии. Контроллер MPPT одновременно работает с MPP-преобразованием и обеспечивает сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления механизмом переключения DC-DC-преобразователя [23].

Затем выход DC-DC-преобразователя может быть подключен к инвертирующему устройству для подключения к нагрузке переменного тока или может быть использован для питания нагрузок, таких как аккумуляторные батареи или нагрузки постоянного тока.

Поэтому использование силового электронного преобразователя стало лучшим решением проблемы поддержания

постоянного напряжения на выходе [8, 24, 25].

DC-DC-преобразователи можно разделить на два типа: изолированные и неизолированные. Изолированные DC-DC-преобразователи, включая полномостовые, полумостовые, требуют наличие высокочастотного трансформатора, что приводит к высокому коэффициенту усиления напряжения. Более того, уровень напряжения изменяется для различных витков обмоток. Тем не менее, в дополнение к высокой стоимости, высокочастотные трансформаторы приводят к значительным потерям на вихревые токи и повышению напряжения переключения, что объясняется трансформаторной индуктивностью [26, 27]. Широкое использование повышающих преобразователей обусловлено их большой удельной мощностью, более высокими КПД, коэффициентом переходной характеристики при регулировании выходного напряжения, более низким напряжением на элементах устройства, защитой от электромагнитных помех и перенапряжения на основе переключателей высокого напряжения, меньшим размером фильтра и прямым подключением индуктивности на входе DC-DC-преобразователя [28, 29].

Поддержание постоянного напряжения

Одной из проблем в ветряных установках является поддержание требуемого уровня постоянного напряжения из-за нестабильной генерации электроэнергии. Низкое выходное напряжение постоянного тока зависит от широкого спектра переменных: направления потоков ветра, скорости ветра, износа лопастей и ряда других факторов [30, 31]. Данные переменные могут оказывать значительное влияние на низкое выходное напряжение постоянного тока, которое генерируется ветряными установками.

Для решения данной проблемы в системе электроснабжения ветряной установки ставятся перспективные DC-DC-преобразователи.

Синхронизация ветряной установки с централизованной системой электроснабжения

Другой проблемой в ветряной электроустановке является синхронизация с системой электроснабжения. Наибольшее влияние проблема синхронизации оказывает при подключении на параллельную работу с источником ограниченной мощности. Такие явления возникают, как правило, в автономных системах электроснабжения. Из-за резкопеременной нагрузки или пуска мощных электродвигателей могут возникнуть провалы напряжения и частоты, поэтому необходимо при параллельной работе с ветряной станцией подстраивать и регулировать выходное напряжение и частоту на выходе инвертора [23].

Таким образом, при разработке систем электроснабжения с ветряной станцией необходимо создавать системы автоматического регулирования (САР) инвертором (DC-AC) с высоким быстродействием.

Перспективные повышающие DC-DC-преобразователи

Существует несколько структур, повышающих DC-DC-преобразователей, таких как *Zeta*, *Sepic* и *Cuk*. Данные преобразователи имеют высокое напряжение на выходе, низкое напряжение на полупроводниковых устройствах и низкий входной ток [32, 33].

Структура предлагаемого преобразователя показана на рис. 2. Данный преобразователь состоит из трех диодов (D_1, D_2 и D_0), пяти конденсаторов (C_1, C_2, C_3, C_4 и C_0), трех индуктивностей (L_1, L_2 и L_3), МОП-переключателя (S) и резистивной нагрузки (*Load(R)*). Более того,

этот преобразователь может уменьшить напряжение на силовом переключателе и увеличить коэффициент усиления выходного напряжения.

Исходя из режимов работы полупроводниковых компонентов, предлагаемый преобразователь имеет два режима переключения в CCM (режим непрерывного тока). В данной конструкции: I_c — ток конденсатора; I_L — ток на индуктивности; U_C — напряжение конденсатора; U_{in} — входное напряжение, и U_L — напряжение на индуктивности. Чтобы облегчить анализ, сделаны следующие предположения:

- индуктивность и емкость конденсатора достаточно велики;
- уравнение последовательных сопротивлений для конденсаторов и индукторов равно нулю;
- диоды и переключатели идеальны.

Режим переключения I

В режиме переключения I уровень напряжения затвора *Ugs* высокий, поскольку переключатель включен. В течение этого промежутка времени: диоды выключены, индуктивности заряжены; C_3, C_4 и C_0 разряжаются; C_1 и C_2 заряжены. На рис. 3 показан путь тока. Используя законы Кирхгофа для уравнений цепи, получаются следующие соотношения:

$$U_{L1} = U_{in} \quad (1)$$

$$U_{L2} = U_{C3} - U_{C1} \quad (2)$$

$$U_{L3} = U_{C3} + U_{C4} - U_{C2} - U_{C1} \quad (3)$$

$$i_{C1} = I_{L2} + I_{L3} \quad (4)$$

$$i_{C2} = i_{L3} \quad (5)$$

$$i_{C3} = I_{L2} + I_{L3} \quad (6)$$

$$i_{C4} = I_{L3} \quad (7)$$

$$i_{C0} = I_0 . \quad (8)$$

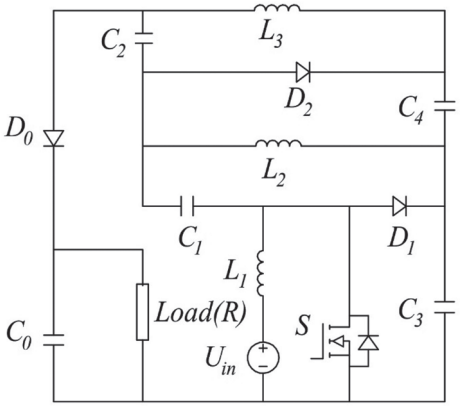

Рис. 2. Структура преобразователя
Fig. 2. Converter structure

Режим переключения II

В режиме II переключатель выключен, а уровень напряжения затвора *Ugs* низкий. В течение этого промежутка времени: диоды включены, индуктивности разряжены; C_3, C_4 и C_0 заряжаются; C_1 и C_2 разряжаются. На рис. 4 показан путь протекания электрического тока.

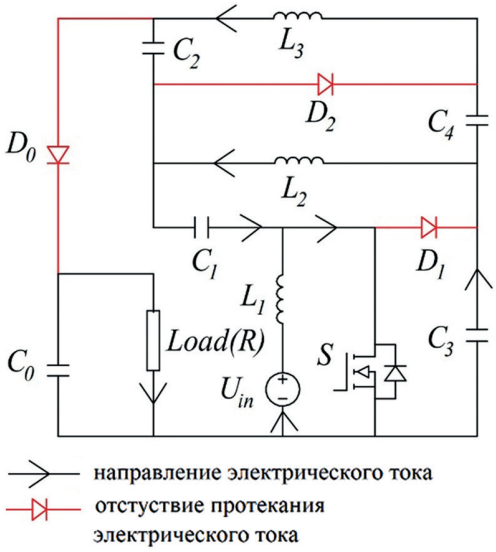

Рис. 3. Схема преобразователей в режиме переключения I
Fig. 3. The circuit of the converters in the switching mode I

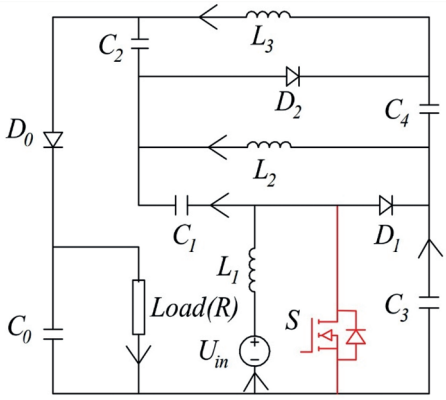

Рис. 4. Схема преобразователей в режиме переключения II

Fig. 4. The circuit of the converters in the switching mode II

Используя законы Кирхгофа для уравнений цепи, получены следующие соотношения:

$$U_{L1} = U_{in} - U_{C3} \quad (9)$$

$$U_{L2} = -U_{C1} = -U_{C4} \quad (10)$$

$$U_{L3} = -U_{C2} \quad (11)$$

$$i_{C1} = i_{C2} + I_{L3} + i_{C4} - I_{L2} \quad (12)$$

$$i_{C3} = I_{L1} - i_{C1} - I_{L2} + i_{C4} \quad (13)$$

$$i_{C0} = i_{C2} + I_{L3} - I_0. \quad (14)$$

Топология преобразователя на основе SEPIC (преобразователь с несимметрично нагруженной первичной индуктивностью) DC-DC-преобразователей.

Конфигурация схемы предлагаемого SEPIC-преобразователя показана на рис. 5.

Преобразователь состоит из источника постоянного напряжения, пяти конденсаторов, трех индуктивностей, переключателя MOSFET, четырех диодов и взаимоиндукции. Напряжение на главном переключателе зажимается конденсатором C_1 и диодом D_1. Это уменьшает потери проводимости, в то время как конденсаторы C_3 и C_4 заряжаются с обеих сторон связанной индуктивностью.

Ток вторичной обмотки не может изменяться одновременно из-за токов индуктора. Поэтому его уравнение тока можно записать в виде

$$i_{Ls} = \frac{i_{Lm} - i_{Lk}}{n}, \quad (15)$$

где i_{Ls} — ток вторичной обмотки, i_{Lm} — ток первичной обмотки, i_{Lk} — ток утечки.

$$n = \frac{N_s}{N_p}, \quad (16)$$

где N_p — первичная обмотка, а N_s — вторичная обмотка.

Минимальное значение индуктивности L и намагничивающей индуктив-

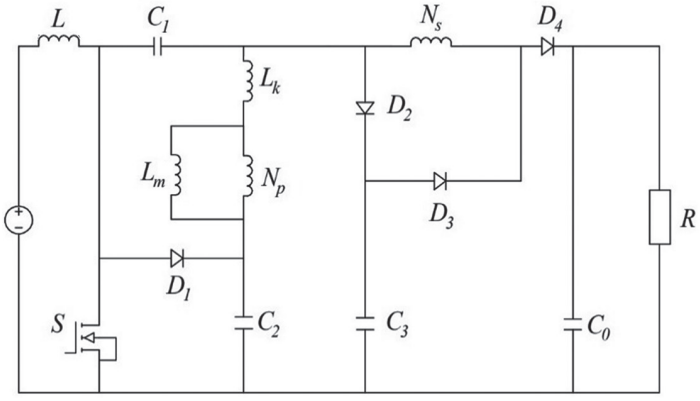

Рис. 5. Конфигурация схемы предлагаемого преобразователя

Fig. 5. Configuration of the proposed converter circuit

ности L_m можно рассчитать следующим образом:

$$L \geq \frac{DR_L}{2M^2 f_s}, \quad L \geq 29{,}7 . \qquad (17)$$

$$L_m \geq \frac{LDR_L}{2LM(1+M)f_s - DR_L}$$

$$L_m \geq 26{,}97uH \qquad (18)$$

Для того чтобы получить устойчивое состояние работы усилителя напряжения, значение всех конденсаторов должно быть достаточно большим, чтобы пренебречь пульсациями напряжения [14, 34, 35].

Способы синхронизации мощных преобразователей

Генератор управляющих импульсов (ГУИ) преобразователя оказывает влияние на работу преобразователя в переходных процессах. В преобразователях для передачи постоянного тока (ППТ) применяют генератор, управляемый напряжением (ГУН) в замкнутом контуре регулирования фазы, который вырабатывает управляющие импульсы с постоянной скважностью. При этом удается добиться удовлетворительной работы в переходных процессах даже при сравнительно слабой примыкающей энергосистеме. В этой главе рассматриваются схемы, принцип устройства и работа в переходных процессах двух ГУИ, принцип действия которых основан на регуляторе частоты управляющих импульсов (РЧУИ). Расчеты режимов выполнены с применением ПО Matlab Simulink [16—18].

Основное назначение ГУИ состоит в выработке управляющих импульсов, подаваемых на вентили преобразователя в нужные моменты времени по отношению к фазам первой гармоники коммутирующего напряжения. Сигнал управления $U_{ком}$ берется из централизованной или автономной энергосистемы при подключении ветрогенератора на параллельную работу. Подходящий ГУИ должен иметь чистый, неискаженный сигнал синхронизирующего напряжения $U_{син}$, который точно совпадает по фазе с первой гармоникой коммутирующего напряжения. Широко применяются два типа ГУИ: один из них основан на индивидуальном пофазном управлении (ИПУ), а другой на генерировании управляющих импульсов с постоянной скважностью (УИПС).

Моделирование и анализ результатов моделирования

Схема синхронизации DC-AC-преобразователя приведена на рис. 6.

В данной схеме коммутирующее напряжение $U_{ком} = \sin(\omega_1 t + \theta_1)$ умножается на сигнал обратной связи $U_{cos} = \cos(\omega_2 t + \theta_2)$. Выходное напряжение $U_{ош}$ можно получить из (4). Первый член представляет ошибку между синхронизирующим напряжением и коммутирующим напряжением из-за разницы между частотами и фазами:

$$U_{ош} = \sin(\omega_1 + \theta_1) \cdot \cos(\omega_2 t + \theta_2) . \quad (19)$$

В установившемся режиме синхронизирующее напряжение равно коммутирующему. При этом $\omega_1 = \omega_2$ и $\theta_1 = \theta_2$. Первая часть в выражении (19) равна нулю, а вторая часть в установившемся режиме представляет собой нежелательную составляющую удвоенной частоты ω_1. Для выделения сигнала ошибки постоянного напряжения применяют низкочастотный фильтр, имеющий передаточную функцию $\omega_c/(s + \omega_c)$. Выходной сигнал подается на интегратор, передаточная функция которого имеет вид $1/sT_i$. Выходной сигнал с интегратора $U_{инт}$ используется для модулирования частоты и фазы синусно-косинусного генератора, который вырабатывает сигнал $U_{син}$. В установившемся режиме сигнал об-

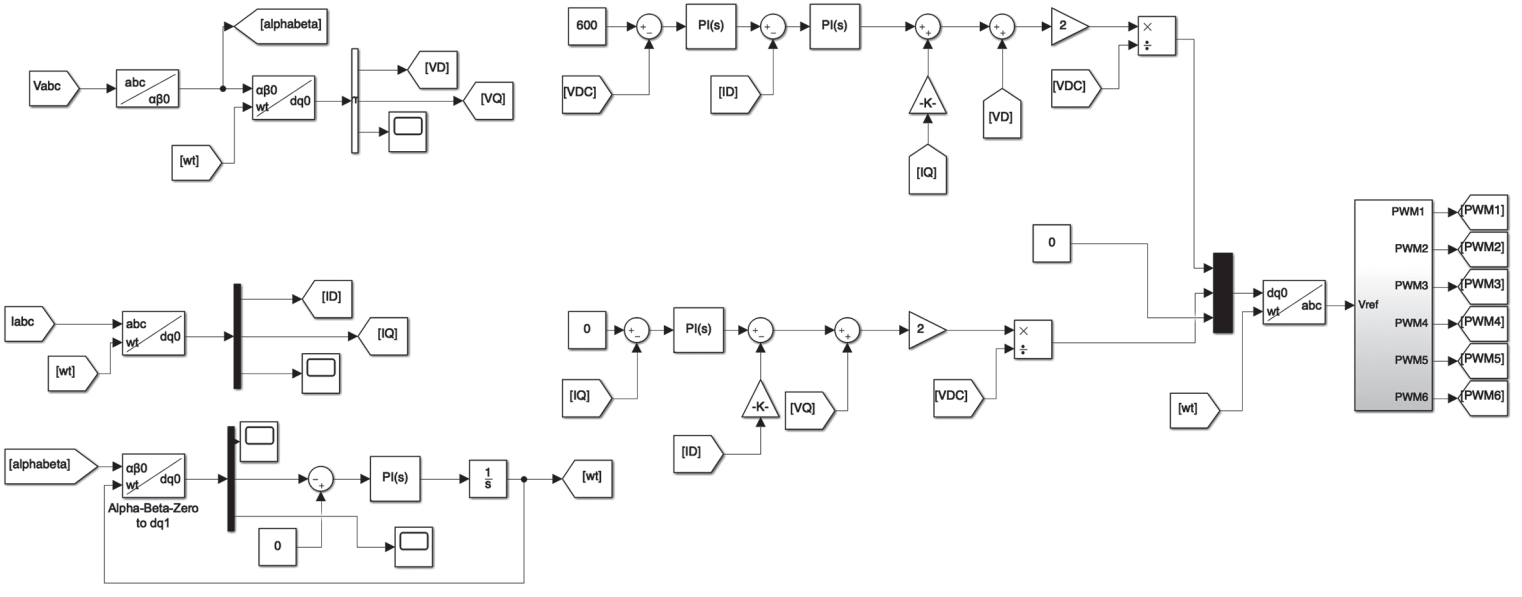

Рис. 6. Модель DC-AC-преобразователя
Fig. 6. DC-AC Converter Model

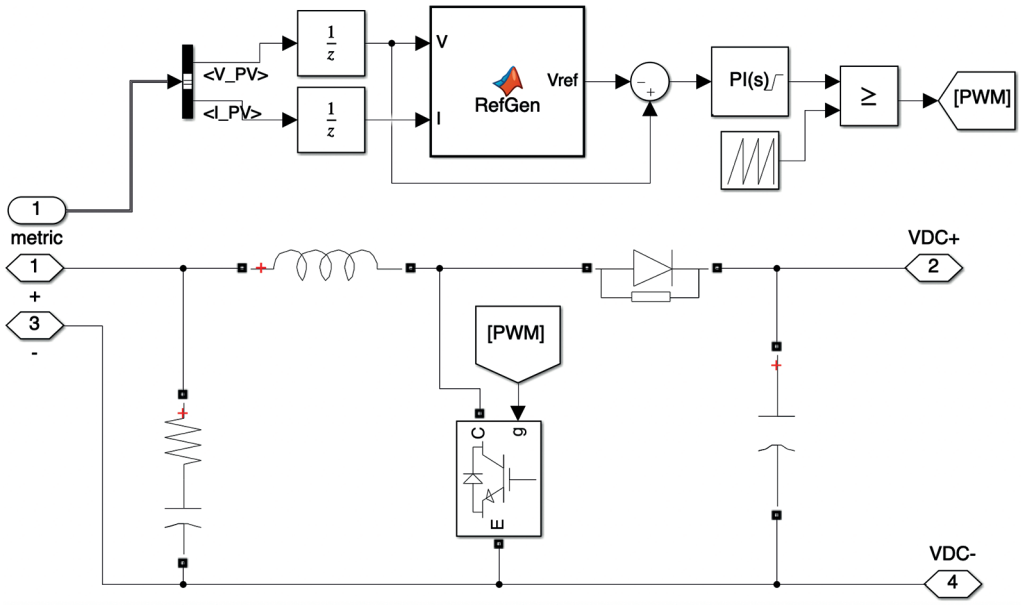

Рис. 7. Математическая имитационная модель DC-DC-преобразователя
Fig. 7. Mathematical simulation model of a DC-DC converter

ратной связи $U_{син}$ будет находиться в той же фазе и иметь ту же частоту, что и коммутирующее напряжение $U_{ком}$. Таким образом, сигнал $U_{син}$ может быть использован как устойчивый, свободный от помех, пригодный для выработки моментов перехода через нуль сигнала, определяющих моменты выдачи управляющих импульсов для ГУИ [19, 20, 36].

Один из возможных методов проектирования заключается в разработке схем управления на основе полупроводниковых элементов малой мощности [22, 37, 38].

Для поддержания требуемого уровня постоянного напряжения при генерации на ветряной установке используют DC-DC-преобразователь; имитационная модель данного преобразователя представлена на рис. 7.

Для стабилизации постоянного напряжения на выходе преобразователя ставится конденсатор, который шунтируется транзистором, управляемым согласно алгоритму:

```
function Uref = RefGen(U,I)
Urefmax=363;
Urefmin=0.0;
Urefinit=300;
deltaUref=1;
persistent Uold Pold Urefold;
dataType = 'double';
if isempty(Uold)
Uold=0;
Pold=0;
Urefold=Urefinit;
end
P= U*I;
dU=U-Uold;
dP=P-Pold;
if dP~=0
if dP<0
if dU<0
Uref = Urefold + deltaUref;
else
Uref = Urefold — deltaUref;
end
else
if dU<0
Uref = Urefold — deltaUref;
```

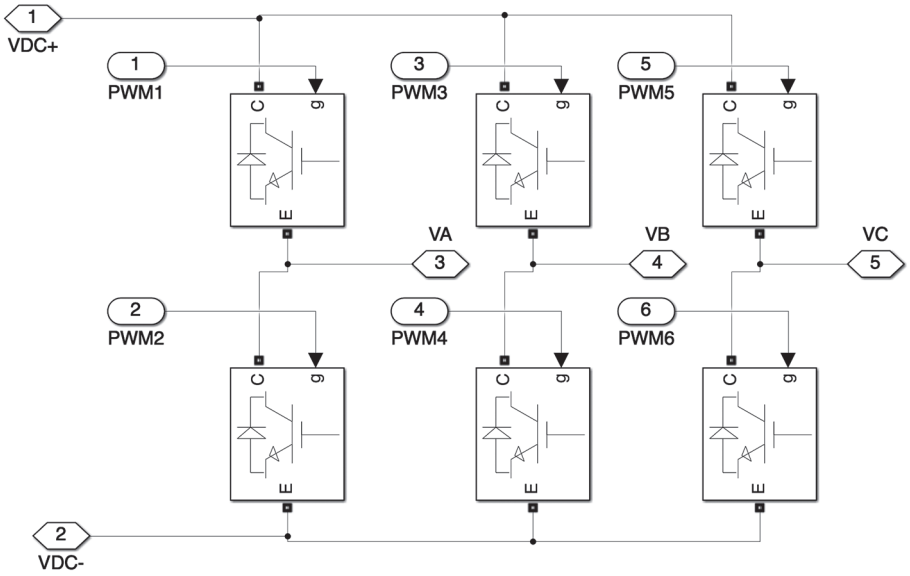

Рис. 8. Инвертор напряжения для связи с централизованной системой электроснабжения
Fig. 8. Voltage inverter for communication with a centralized power supply system

```
else
Uref = Urefold + deltaUref;
end
end
else Uref=Urefold;
end
if Uref>=Urefmax | Uref <= Urefmin
Uref=Urefold;
end
Urefold=Uref;
Uold=U;
Pold=P;
```

По результатам моделирования установлено, что приведенный алгоритм обеспечивает требуемое значение на выходе DC-DC-преобразователя. Выход DC-DC-преобразователя соединен с входом инвертора, представленного на рис. 8.

Система управления инвертором напряжения включает в себя четыре ПИ-

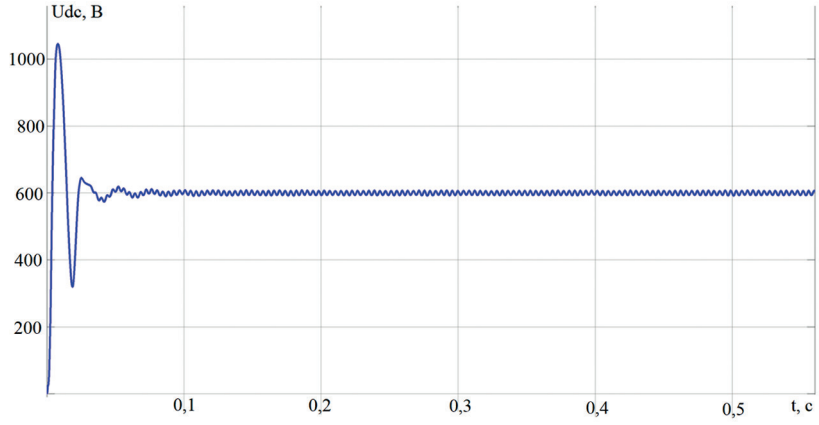

Рис. 9. Напряжение на выходе DC-DC-преобразователя
Fig. 9. Output voltage of the DC-DC converter

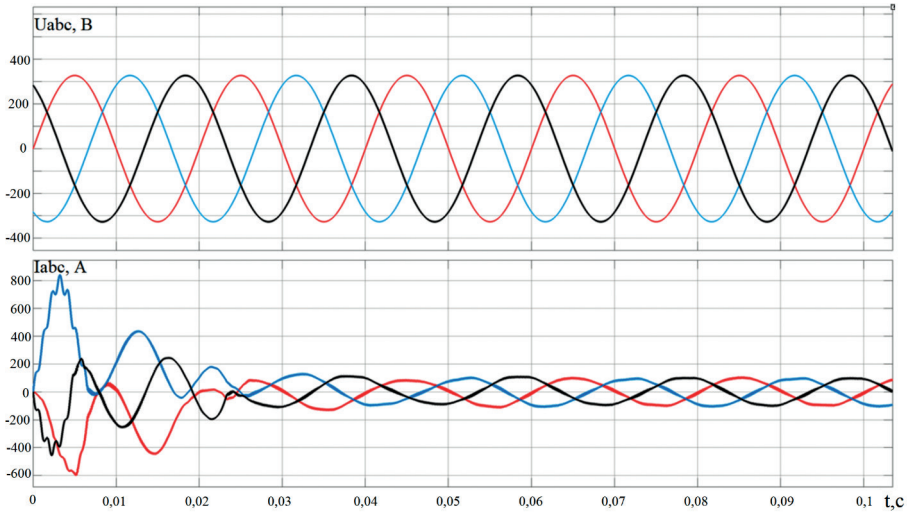

Рис. 10. Напряжение и ток на выходе инвертора ветряной установки
Fig. 10. Voltage and current at the output of the inverter of the wind turbine

регулятора для обеспечения стабильного напряжения и синхронизации автономной системы электроснабжения ветряной электроустановки и централизованной системы электроснабжения. По заданию на выходе DC-DC-преобразователя необходимо напряжение 600 В. С помощью данной системы управления обеспечивается требуемый уровень напряжения (рис. 9).

По результатам моделирования установлено, что требуемый уровень напряжения на выходе достигается менее чем за 0,05 с, тем самым обеспечивается необходимое для синхронизации время регулирования.

Инвертор по реализованной системе управления обеспечивает полную синхронизацию по напряжению и быстродействие, менее чем за 0,03 с, по току. На рис. 10 представлены осциллограммы напряжения и тока на выходе DC-AC-преобразователя (то есть на выходе инвертора напряжения).

Таким образом, установлено, что предлагаемая система управления обеспечивает синхронизацию и поддерживает требуемый уровень напряжения.

Общая структура системы управления и ветряная автономная система электроснабжения с подключением на параллельную работу к централизованной энергосистеме представлена на рис. 11.

Таким образом, по результатам моделирования установлено, что предлагаемая система управления, содержащая DC-DC и DC-AC-преобразователи в автономной системе электроснабжения с источником электрической энергии в виде ветрогенератора, удовлетворяет требованиям заданного уровня выходного напряжения и обеспечивает синхронизацию по фазе с единой энергосистемой.

Заключение

В данной работе предоставлен выбор и расчет параметров DC-DC-преобразователей, применяемых в структуре электрической станции на основе возобновляемых источников энергии. По результатам математического и имитационного моделирования предлагаемый безтрансформаторный DC-DC-преобразователь отличается высоким коэффициентом усиления напряжения без магнитной связи, а также низким напряже-

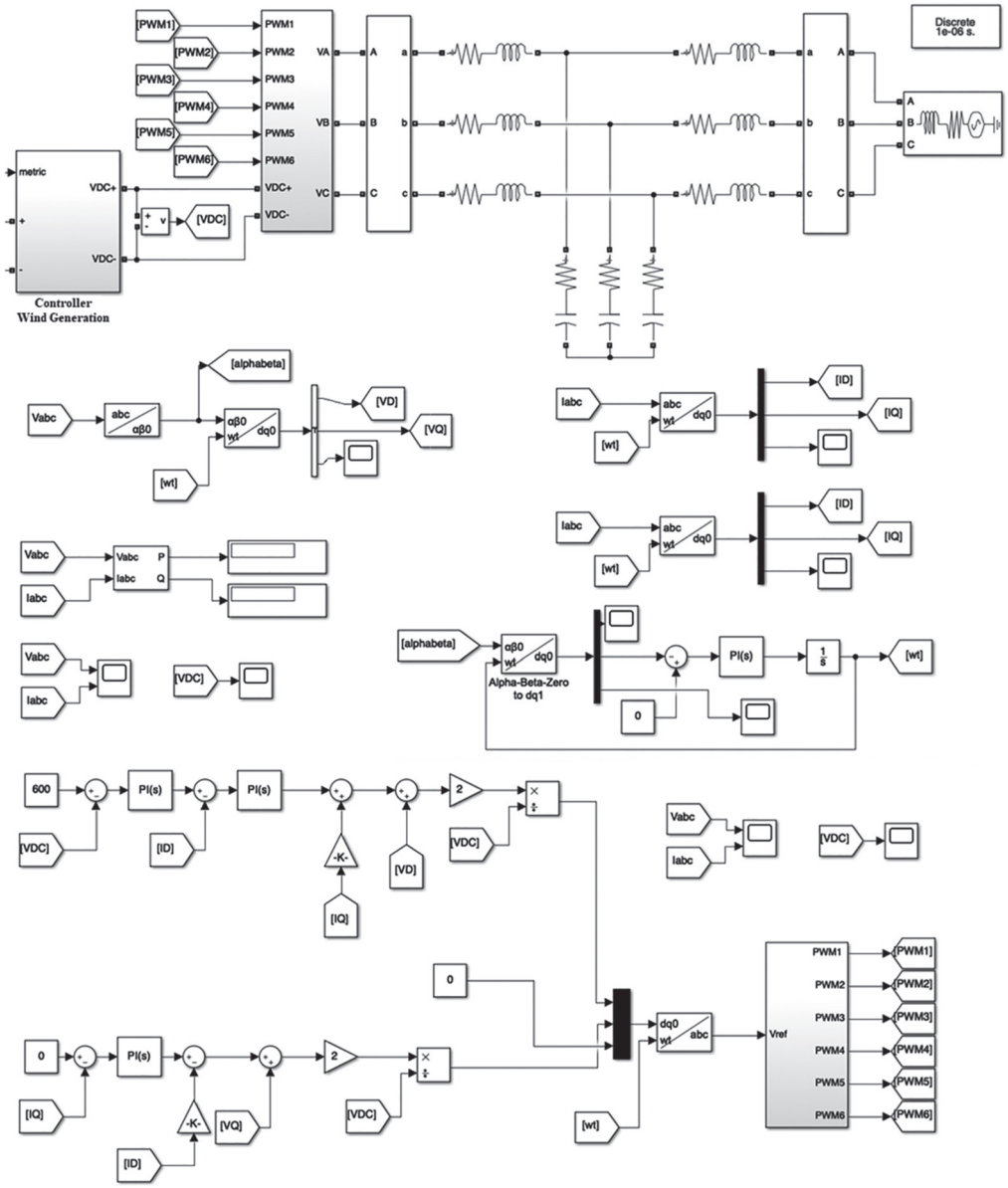

Рис. 11. Математическая и имитационная модель контроллера и инвертора ветряной электроустановки с синхронизируемой и централизованной системой электроснабжения

Fig. 11. Mathematical and simulation model of the controller and inverter of a wind power plant, with a synchronized and centralized power supply system

нием на полупроводниковых элементах преобразователя.

Одним из важнейших элементов исследования является изучение новых схем системы автоматического управления DC-AC-преобразователей для устойчивой работы ветряного генератора.

По результатам моделирования предполагается провести дальнейшие иссле-

дования по повышению эффективности применения ветряных генераторов за счет модернизации алгоритмов управления DC-DC-преобразователей и синхронизации с единой энергосистемой через DC-AC-преобразователи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сержан С. Л.*, *Малеванный Д. В.*, *Федоров Е. В.*, *Дадаян Л. М.* Перспективы применения добычного комплекса с капсулой в условиях добычи шельфовых железомарганцевых конкреций Российской Федерации // Горное оборудование и электромеханика. — 2022. — № 4 (162). — С. 3—11. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-3-11.

2. *Abdelfatah A., Mostafa S.*, *Hatem F. S.* Optimal operational planning of RES and HESS in smart grids considering demand response and DSTATCOM functionality of the interfacing inverters // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 20, article 13209. DOI: 10.3390/su142013209.

3. *Nor Hanisah Baharudin, Tunku Muhammad Nizar Tunku Mansur, Fairuz Abdul Hamid, Rosnazri Ali, Muhammad Irwanto Misrun.*Topologies of DC-DC converter in solar PV applications // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2017, vol. 8, no. 2, pp. 368—374. DOI: 10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374.

4. *Subir Karmakar, Nidhi Mishra, Bhim Singh* FFS modulated VSC with different phaseshifted 12-pulse configured transformers for grid integrated large-scale solar PV plant // Renewable Power Generation. 2021, vol. 14, no. 1, pp. 1746—1754. DOI: 10.1049/iet-rpg.2019.0970.

5. *Seyed Milad Hosseinikavkani, Reza Sedaghati, Amir Ghaedi* A novel topology of nonisolated DC-DC high step up converters for solar PV power plants // Journal of Integrated Circuits and Systems. 2022, vol. 17, no. 2, pp. 1—6. DOI: 10.29292/jics.v17i2.604.

6. *Anwar Al Omar, Pat Wheeler, Pericle Zanchetta, Claudio Burgos-Mellado* A fixed frequency full-bridge three-level DC-DC LCL-type series resonant converter for large scale solar PV plants applications / European Conference on Power Electronics and Applications. 2021. DOI: 10.23919/EPE21ECCEEurope50061.2021.957070715.

7. *Uthirasamy R., Kumar Chinnaiyan V., Vishnukumar S., Karthick A., Mohanavel V., Subramaniam U., Muhibbullah M.* Design of boosted multilevel DC-DC converter for solar photovoltaic system // International Journal of Photoenergy. 2022, vol. 1-23. DOI: 10.1155/2022/1648474.

8. *Amrouayache M.* Proposal of a sizing algorithm for an optimal design of DC/DC converters used in photovoltaic conversion // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI). 2022, vol. 10, no. 3, pp. 534—548. DOI: 10.52549/ijeei.v10i3.3890.

9. *Sikorski A., Falkowski P., Korzeniewski M.* Comparison of two power converter topologies in wind turbine system // Energies. 2021, vol. 14, no. 20, article 6574. DOI: 10.3390/en14206574.

10. *Taghavi M., Delkhosh H.*, *Moghaddam M. P.*, *Fini A. S.* Combined PV-Wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of convertors and demand flexibility // Sustainability. 2021, vol. 14, no. 13, article 7558. DOI: 10.3390/su14137558.

11. *Gang Du, Dongmei Zhao, Xin Liu, Zhiqiang Wu, Chao Li* Decentralized robust dispatch for multi-area AC/DC system considering wind power uncertainty // IET Generation, Transmission & Distribution. 2021, pp. 2710—2720. DOI: 10.1049/gtd2.12209.

12. *Zhenshan Zhu, Dichen Liu, Qingfen Liao, Fei Tang, Jun Jason Zhang, Huaiguang Jiang* Optimal power scheduling for a medium voltage AC/DC hybrid distribution network // Sustainability. 2018, vol. 10, no. 2, article 318. DOI: 10.3390/su10020318.

13. *Kumar Abhishek Singh Kalpana Chaudhary* Decentralized robust dispatch for multi-area AC/DC system considering wind power uncertainty // IET Power Electron. 2021, vol. 14, pp. 302—312. DOI: 10.1049/pel2.1203.

14. *Bilal Naji Alhasnawi, Basil H. Jasim, Amjad Anvari-Moghaddam, Frede Blaabjerg.* A new robust control strategy for parallel operated inverters in green energy applications // Energies. 2020, vol. 13, no. 13, article 3480. DOI: 10.3390/en13133480.

15. *Ibrahim Alhamrouni, Mohamed Salem, Younes Zahraoui, Bazilah Ismail, Awang Jusoh, Tole Sutikno* Multi-input interleaved DC-DC converter for hybrid renewable energy applications // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2022, vol. 11, pp. 1765—1778. DOI: 10.11591/eei.v11i3.3779.

16. *Sangwongwanich Ariya F., Blaabjerg F.* Mitigation of Interharmonics in PV systems with maximum power point tracking modification // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019, vol. 34, no. 9, pp. 8279—8282. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2902880.

17. *Vasudevan R., Ramalakshmi S.* Dynamic stability improvement of power system with VSC-HVDC transmission // International Journal of Engineering & Technology. 2018, vol. 7, pp. 500—503. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.27.18003.

18. *Kai Qu, Gangquan Si, Zeyu Yang, Yuehui Huang, Pai Li* Correlation modeling of multiple wind farms based on piecewise cloud representation and regular vine copulas // Energy Reports. 2020, vol. 6, pp. 289—297. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.239.

19. *Krizsky V. N., Viktorov S. V., Luntovskaya Y. A.* Modeling the transient resistance of trunk pipeline insulation based on measurements of the magnetic induction vector modulus // Journal of Mathematical Models and Computer Simulations. 2023, no. 2, pp. 312—322. DOI: 10.1134/S2070048223020102.

20. *Кризский В. Н., Косарев О. В., Александров П. Н., Лунтовская Я. А.* Математическое моделирование электрического поля внутритрубного диагностического зонда катодно-поляризуемого трубопровода // Записки Горного института. — 2023. — OnlineFirst. — С. 1—10.

21. *Ляхомский А. В., Герасимов А. И.* Моделирование напряжения прикосновения к корпусам электроустановок открытых горных работ при однофазных замыканиях на землю // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 12. — С. 169—178. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_169.

22. *Shepovalov O.* Mandatory characteristics and parameters of photoelectric systems, arrays and modules and methods of their determining // Energy Procedia. 2019, vol. 157, no. 9, pp. 1434—1444. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.308.

23. *Faria J., Pombo J., do Rosário Calado M., Mariano S.* Power management control strategy based on artificial neural networks for standalone PV applications with a hybrid energy storage system // Energies. 2019, vol. 12, no. 5, pp. 1—24. DOI: 10.3390/en12050902.

24. *Xiaobing Kong, Lele Ma, Xiangjie Liu, Mohamed Abdelkarim Abdelbaky* Wind turbine control using nonlinear economic modelpredictive control over all operating regions // Energies. 2020, vol. 13, no. 1, pp. 1—21. DOI: 10.3390/en13010184.

25. *Шклярский Я. Э., Скамьин А. Н.*, Хименес Карризоса М. Энергоэффективность в минерально-сырьевом комплексе // Записки Горного института. — 2023. — Т. 261. — С. 323—324.

26. *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.

27. *Zhukovskiy Y. L., Vasiliev B. Y., Korolev N. A., Malkova Y. M.* Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit // Indonesian Journal of Science and Technology. 2022, vol. 8, no. 1, pp. 65—78.

28. *Moein Taghavi, Hamed Delkhosh, Mohsen Parsa Moghaddam, Alireza Sheikhi Fini* Combined PV-wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of convertors and demand flexibility // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 13, article 7558. DOI: 10.3390/su14137558.

29. *Limberger F., Rümpker G., Lindenfeld M., Deckert H.* Development of a numerical modelling method to predict the seismic signals generated by wind farms // Scientific Reports. 2022, vol. 12, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-022-19799-w.

30. *Ермуханов Р. К.* Проблема освоения шельфовых месторождений России // Устойчивое развитие науки и образования. — 2019. — № 4. — С. 185—188.

31. *Desaulty A. M., Climent D. M., Lefebvre G., Cristiano-Tassi A., Peralta D., Perret S., Urban A., Guerrot C.* Tracing the origin of lithium in Li-ion batteries using lithium isotopes // Nature Communications. 2022, vol. 13, pp. 1—10. DOI: 10.1038/s41467-022-31850-y.

32. *Elistratov V., Denisov R., Konishchev M.* Reducing the Arctic carbon footprint through low-carbon technologies and wind power plants // AIP Conference Proceedings. 2022, vol. 2636, no. 1, article 050004. DOI: 10.1063/5.0104405.

33. *Korolev N., Solovev S.* Monitoring the technical condition of autonomous electrical systems with electric drive // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 140, article 04015. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004015.

34. *Ning Li, Yongquan Zhou, Qifang Luo, Huajuan Huang* Discrete complex-valued code pathfinder algorithm for wind farm layout optimization problem // Energy Conversion and Management X. 2022, vol. 16, no. 9, article 100307. DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100307.

35. *Grigorev E., Nosov V.* Improving quality control methods to test strengthening technologies: a multilevel model of acoustic pulse flow // Applied Sciences (Switzerland). 2022, vol. 12, no. 9, article 4549. DOI: 10.3390/app12094549.

36. *Zhukovskiy Y., Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R.* Assessment of the impact of technological development and scenario forecasting of the sustainable development of the fuel and energy complex // Energies. 2023, vol. 16, no. 7, article 3185. DOI: 10.3390/en16073185.

37. *Ilushin Yu., Martirosyan A.* The development of the soderberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system // Scientific Reports. 2024, vol. 14, article 3501. DOI: 10.1038/s41598-024-52002-w.

38. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. Serzhan S. L., Malevannyi D. V., Fedorov E. V., Dadayan L. M. Prospects of application of a production complex with a capsule in the conditions of mining on the russian federation shelf iron-manganese nodules. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022, no. 4 (162), pp. 3—11. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-3-11.

2. Abdelfatah A., Mostafa S., Hatem F. S. Optimal operational planning of RES and HESS in smart grids considering demand response and DSTATCOM functionality of the interfacing inverters. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 20, article 13209. DOI: 10.3390/su142013209.

3. Nor Hanisah Baharudin, Tunku Muhammad Nizar Tunku Mansur, Fairuz Abdul Hamid, Rosnazri Ali, Muhammad Irwanto Misrun.Topologies of DC-DC converter in solar PV applications. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2017, vol. 8, no. 2, pp. 368—374. DOI: 10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374.

4. Subir Karmakar, Nidhi Mishra, Bhim Singh FFS modulated VSC with different phaseshifted 12-pulse configured transformers for grid integrated large-scale solar PV plant. *Renewable Power Generation*. 2021, vol. 14, no. 1, pp. 1746—1754. DOI: 10.1049/iet-rpg.2019.0970.

5. Seyed Milad Hosseinikavkani, Reza Sedaghati, Amir Ghaedi A novel topology of nonisolated DC-DC high step up converters for solar PV power plants. *Journal of Integrated Circuits and Systems*. 2022, vol. 17, no. 2, pp. 1—6. DOI: 10.29292/jics.v17i2.604.

6. Anwar Al Omar, Pat Wheeler, Pericle Zanchetta, Claudio Burgos-Mellado A fixed frequency full-bridge three-level DC-DC LCL-type series resonant converter for large scale solar PV plants applications. *European Conference on Power Electronics and Applications*. 2021. DOI: 10.23919/EPE21ECCEEurope50061.2021.957070715.

7. Uthirasamy R., Kumar Chinnaiyan V., Vishnukumar S., Karthick A., Mohanavel V., Subramaniam U., Muhibbullah M. Design of boosted multilevel DC-DC converter for solar photovoltaic system. *International Journal of Photoenergy*. 2022, vol. 1-23. DOI: 10.1155/2022/1648474.

8. Amrouayache M. Proposal of a sizing algorithm for an optimal design of DC/DC converters used in photovoltaic conversion. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)*. 2022, vol. 10, no. 3, pp. 534—548. DOI: 10.52549/ijeei.v10i3.3890.

9. Sikorski A., Falkowski P., Korzeniewski M. Comparison of two power converter topologies in wind turbine system. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 20, article 6574. DOI: 10.3390/en14206574.

10. Taghavi M., Delkhosh H., Moghaddam M. P., Fini A. S. Combined PV-Wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of convertors and demand flexibility. *Sustainability*. 2021, vol. 14, no. 13, article 7558. DOI: 10.3390/su14137558.

11. Gang Du, Dongmei Zhao, Xin Liu, Zhiqiang Wu, Chao Li Decentralized robust dispatch for multi-area AC/DC system considering wind power uncertainty. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021, pp. 2710—2720. DOI: 10.1049/gtd2.12209.

12. Zhenshan Zhu, Dichen Liu, Qingfen Liao, Fei Tang, Jun Jason Zhang, Huaiguang Jiang Optimal power scheduling for a medium voltage AC/DC hybrid distribution network. *Sustainability*. 2018, vol. 10, no. 2, article 318. DOI: 10.3390/su10020318.

13. Kumar Abhishek Singh Kalpana Chaudhary Decentralized robust dispatch for multi-area AC/DC system considering wind power uncertainty. *IET Power Electron*. 2021, vol. 14, pp. 302—312. DOI: 10.1049/pel2.1203.

14. Bilal Naji Alhasnawi, Basil H. Jasim, Amjad Anvari-Moghaddam, Frede Blaabjerg. A new robust control strategy for parallel operated inverters in green energy applications. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 13, article 3480. DOI: 10.3390/en13133480.

15. Ibrahim Alhamrouni, Mohamed Salem, Younes Zahraoui, Bazilah Ismail, Awang Jusoh, Tole Sutikno Multi-input interleaved DC-DC converter for hybrid renewable energy applications. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022, vol. 11, pp. 1765—1778. DOI: 10.11591/eei.v11i3.3779.

16. Sangwongwanich Ariya F., Blaabjerg F. Mitigation of Interharmonics in PV systems with maximum power point tracking modification. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019, vol. 34, no. 9, pp. 8279—8282. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2902880.

17. Vasudevan R., Ramalakshmi S. Dynamic stability improvement of power system with VSC-HVDC transmission. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, vol. 7, pp. 500—503. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.27.18003.

18. Kai Qu, Gangquan Si, Zeyu Yang, Yuehui Huang, Pai Li Correlation modeling of multiple wind farms based on piecewise cloud representation and regular vine copulas. *Energy Reports*. 2020, vol. 6, pp. 289—297. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.11.239.

19. Krizsky V. N., Viktorov S. V., Luntovskaya Y. A. Modeling the transient resistance of trunk pipeline insulation based on measurements of the magnetic induction vector modulus. *Journal of Mathematical Models and Computer Simulations*. 2023, no. 2, pp. 312—322. DOI: 10.1134/S2070048223020102.

20. Krizsky V. N., Kosarev O. V., Aleksandrov P. N., Luntovskaya Y. A. Mathematical modeling of the electric field of an in-line diagnostic probe of a cathode-polarized pipeline. *Journal of Mining Institute*. 2023. OnlineFirst, pp. 1—10. [In Russ].

21. Lyakhomskii A. V., Gerasimov A. I. Contact voltage modeling for electrical installation bodies with phase-to-ground fault in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 12, pp. 169—178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_169.

22. Shepovalov O. Mandatory characteristics and parameters of photoelectric systems, arrays and modules and methods of their determining. *Energy Procedia*. 2019, vol. 157, no. 9, pp. 1434—1444. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.308.

23. Faria J., Pombo J., do Rosário Calado M., Mariano S. Power management control strategy based on artificial neural networks for standalone PV applications with a hybrid energy storage system. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 5, pp. 1—24. DOI: 10.3390/en12050902.

24. Xiaobing Kong, Lele Ma, Xiangjie Liu, Mohamed Abdelkarim Abdelbaky Wind turbine control using nonlinear economic modelpredictive control over all operating regions. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 1, pp. 1—21. DOI: 10.3390/en13010184.

25. Shklyarskiy Ya. E., Skamyin A. N., Jiménez Carrizosa M. Energy efficiency in the mineral resources and raw materials complex. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 323—324. [In Russ].

26. Shpenst V. A., Belsky A. A., Orel E. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complex with renewable energy sources by means of adaptive regulation of its operating modes. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 261, pp. 479—492. [In Russ].

27. Zhukovskiy Y. L., Vasiliev B. Y., Korolev N. A., Malkova Y. M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 2022, vol. 8, no. 1, pp. 65—78.

28. Moein Taghavi, Hamed Delkhosh, Mohsen Parsa Moghaddam, Alireza Sheikhi Fini Combined PV-wind hosting capacity enhancement of a hybrid AC/DC distribution network using reactive control of convertors and demand flexibility. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 13, article 7558. DOI: 10.3390/su14137558.

29. Limberger F., Rümpker G., Lindenfeld M., Deckert H. Development of a numerical modelling method to predict the seismic signals generated by wind farms. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-022-19799-w.

30. Ermuhanov R. K. Problem of development of Russian shelf deposits. *Ustoychivoe razvitie nauki i obrazovaniya*. 2019, no. 4, pp. 185—188. [In Russ].

31. Desaulty A. M., Climent D. M., Lefebvre G., Cristiano-Tassi A., Peralta D., Perret S., Urban A., Guerrot C. Tracing the origin of lithium in Li-ion batteries using lithium isotopes. *Nature Communications*. 2022, vol. 13, pp. 1—10. DOI: 10.1038/s41467-022-31850-y.

32. Elistratov V., Denisov R., Konishchev M. Reducing the Arctic carbon footprint through low-carbon technologies and wind power plants. *AIP Conference Proceedings*. 2022, vol. 2636, no. 1, article 050004. DOI: 10.1063/5.0104405.

33. Korolev N., Solovev S. Monitoring the technical condition of autonomous electrical systems with electric drive. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 140, article 04015. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004015.

34. Ning Li, Yongquan Zhou, Qifang Luo, Huajuan Huang Discrete complex-valued code pathfinder algorithm for wind farm layout optimization problem. *Energy Conversion and Management X*. 2022, vol. 16, no. 9, article 100307. DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100307.

35. Grigorev E., Nosov V. Improving quality control methods to test strengthening technologies: a multilevel model of acoustic pulse flow. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022, vol. 12, no. 9, article 4549. DOI: 10.3390/app12094549.

36. Zhukovskiy Y., Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R. Assessment of the impact of technological development and scenario forecasting of the sustainable development of the fuel and energy complex. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 7, article 3185. DOI: 10.3390/en16073185.

37. Ilushin Yu., Martirosyan A. The development of the soderberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 3501. DOI: 10.1038/s41598-024-52002-w.

38. Sychev Yu. A., Kostin V. N., Serikov V. A., Aladin M. E. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 159—179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зимин Роман Юрьевич[1] — канд. техн. наук,
ассистент, e-mail: Zimin_RYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0498-8904,
Сержан Сергей Леонидович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2248-9156,
Малеванный Дмитрий Владимирович[1] — аспирант,
e-mail: s215051@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8597-8002,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Зимин Р.Ю., e-mail: Zimin_RYu@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.Yu. Zimin[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant,
e-mail: Zimin_RYu@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0498-8904,
S.L. Serzhan[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2248-9156,
D.V. Malevannyi [1], Graduate Student,
e-mail: s215051@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8597-8002,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: R.Yu. Zimin, e-mail: Zimin_RYu@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 10.01.2024; получена после рецензии 09.02.2024; принята к печати 10.05.2024.
Received by the editors 10.01.2024; received after the review 09.02.2024; accepted for printing 10.05.2024.