
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.12

EDN ALGZTA

УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В МИКРОСЕТЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВИЭ

Е.С. Андреенков

ORCID: 0000-0002-9928-5354 e-mail: root67@mail.ru

Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске
Смоленск, Россия

Рассматривается система распределенного управления силовыми преобразователями в микросети с шиной постоянного тока и комплексным использованием источников питания возобновляемой энергии. Приводится сравнительный анализ основных методов реализации распределенного управления. Представлена концепция управления потоками мощности и энергии, в рамках которой напряжение шины постоянного тока используется в качестве единственного средства связи между управляемыми компонентами микросети, и которая позволяет реализовать независимое управление работой нескольких источников, в том числе, возобновляемых, в одной микросети с учетом их приоритета. Показан алгоритм, реализующий представленную концепцию управления с пятью состояниями. Рассмотрены модели и режимы работы силовых преобразователей источников и накопителей, реализующие представленную концепцию управления. Для демонстрации работы алгоритма управления по уровню напряжения шины в *Simulink (Matlab)* разработана модель микросети с шиной постоянного тока, тремя источниками и нагрузкой. При этом использована упрощенная модель, в которой не учитываются переходные эффекты при переключениях преобразователей, индуктивности и емкости передающих линий. Представлены результаты моделирования микросети с переходами между несколькими рабочими состояниями. В каждом состоянии обеспечивается баланс мощности и стабильный уровень напряжения, что подтверждает работоспособность предлагаемой стратегии управления. Представленная концепция позволяет реализовать режимы работы источников в зависимости от их приоритета, что особенно актуально для ВИЭ, при этом в каждом состоянии могут работать несколько источников, а использование шины постоянного тока в качестве канала связи обеспечивает максимальную простоту и надежность системы.

Ключевые слова: ВИЭ, микросеть, постоянный ток, распределенная генерация, система управления.

Для цитирования: Андреевков Е.С. Управление силовыми преобразователями в микросетях постоянного тока с ВИЭ // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 4-24. EDN ALGZTA

CONTROL OF POWER CONVERTERS IN DC MICROGRIDS WITH RES

E.S. Andreenkov

ORCID: 0000-0002-9928-5354 e-mail: root67@mail.ru
Smolensk branch of «National Research University «MPEI»
Smolensk, Russia

Abstract. The paper examines a distributed control system for power converters in a microgrid with a DC bus and the integrated use of renewable energy power sources. A comparative analysis of the main methods for implementing distributed control is provided. The concept of power and energy flow control is presented, within which the DC bus voltage is used as the only means of communication between the controlled components of the microgrid, and which allows for independent control of the operation of several sources, including renewable ones, in one microgrid, considering their priority. An algorithm that implements the presented five-state control concept is shown. Models and operating modes of power converters of sources and storage devices that implement the presented control concept are considered. To demonstrate the operation of the control algorithm based on the bus voltage level, simulation of a microgrid with a DC bus, three sources and a load was carried out in the Simulink (Matlab). In this case, a simplified model was used, which did not consider transient effects when switching converters, inductance, and capacitance of transmission lines. The results of modeling a microgrid with transitions between several operating states are presented. In each state, power balance and a stable voltage level are ensured, which confirms the performance of the proposed control strategy. The presented concept makes it possible to implement operating modes of sources depending on their priority, which is especially important for renewable energy sources, while several sources can operate in each state, and the use of a DC bus as a communication channel ensures maximum simplicity and reliability of the system.

Keywords: RES, microgrid, direct current, distributed generation, control system.

For citation: E.S. Andreenkov, “Control of power converters in DC microgrids with RES”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 4-24, 2024. EDN ALGZTA

I. Введение

Современный этап развития электроэнергетики связан с широким внедрением цифровых технологий на разных стадиях оборота электроэнергии: от производства до потребления [1-3]. Применение цифровых технологий призвано повысить эффективность управления энергетической инфра-

структурой, уровень надежности электроснабжения потребителей и качество их обслуживания, а также способствовать развитию децентрализованной генерации [4]. К числу основных факторов развития распределенной генерации относится развитие микросетей, в том числе, на базе возобновляемых источников (ВИЭ) [5]. Актуальность развития данных технологий отражена в *Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года* [6], где технологии распределенной генерации и ВИЭ относятся к числу прорывных. Проблемой на пути широкого внедрения микросетей является высокая себестоимость 1 кВт·ч электрической энергии [7]. Задача повышения эффективности микросетей может быть решена за счет реализации внутри них сетей постоянного тока, которые обладают рядом преимуществ [8, 9]. Как показывают исследования, применение микросетей постоянного тока на изолированных территориях, отдельных предприятиях или зданиях позволяет существенно повысить эффективность энергоснабжения [10, 11].

Устойчивость микросети постоянного тока обеспечивается балансом вырабатываемой и потребляемой электроэнергии. ВИЭ характеризуются неравномерностью графика производства, определяемой климатическими условиями, а для большинства потребителей характерны неравномерные графики потребления, поэтому необходимым элементом микросетей являются аккумуляторные батареи (АБ) и эффективная система управления потоками мощности и энергии [12, 13].

Актуальной является задача разработки системы управления силовыми преобразователями, позволяющей оптимально распределять нагрузку, максимально используя потенциал возобновляемых источников и обеспечивающей стабильность напряжения на шине при минимуме эксплуатационных расходов. Решение описанной задачи стало основной целью данного исследования, в рамках которого рассмотрены основные способы управления микросетями, предложен модернизированный метод управления и проведено компьютерное моделирование микросети с системой управления на базе предложенного метода.

II. Способы управления силовыми преобразователями в микросетях

Различают три основных способа управления преобразователями в микросетях: централизованное, децентрализованное и распределенное.

Централизованное управление [13, 14] может быть реализовано достаточно просто, поскольку центральный контроллер имеет информацию о режиме работы каждого узла в системе, но надежность такой системы зависит от исправности линии связи и контроллера и поэтому невысока. С другой стороны, при децентрализованном управлении [13] каждый источник работает независимо на основе внутренних алгоритмов. Однако, когда каждый из узлов не имеет информации о других узлах в системе, эффективность управления снижается.

Стратегия распределенного управления является более предпочтительной по сравнению с централизованным и децентрализованным управлением, поскольку система может функционировать в случае сбоя одного из узлов. Одним из способов управления микросетью в распределенном режиме является контроль по напряжению шины постоянного тока, когда в качестве линии связи используют саму шину. Управление по напряжению может быть реализовано двумя основными методами: контролем по спаду напряжения [15] и управлением по уровню напряжения [16].

В микросетях с управлением по спаду распределение мощности между силовыми преобразователями обратно пропорционально наклонам их нагрузочных характеристик. Контроль по спаду хорошо подходит для систем с равномерными графиками выработки и потребления электроэнергии. Распределение мощности обеспечивается уже при минимальных отклонениях напряжения на шине питания. Однако управление по спаду имеет ограниченное применение в системах с ВИЭ, от которых потребление должно обеспечиваться в приоритетном порядке. Данная концепция не подразумевает программирование преобразователей, настраиваются только коэффициенты распределения мощности между модулями.

Управление по уровню напряжения основано на контроле дискретных отклонений напряжения на шине, которые называются состояниями и несут информацию о режимах работы источников. Механизм управления по уровню напряжения в системе, состоящей из четырех источников, показан сплошной линией на рис. 1. Состояния рассчитаны на достаточно широкие диапазоны изменений напряжений, чтобы отстроиться от падений напряжения на сопротивлениях линий. Данная стратегия управления имеет два основных недостатка. Количество источников в системе ограничено рабочим диапазоном напряжения на шине и полным сопротивлением линий, а добавление в систему источников с высоким приоритетом требует изменения состояний всех источников с более низким приоритетом. Поэтому управление по уровню напряжения подходит только для небольших систем с ВИЭ, где указанные недостатки не являются принципиальными.

В данной работе предлагается концепция управления, объединяющая достоинства контроля по уровню напряжения и контроля по спаду.

III. Описание концепции управления

Как и в случае управления по уровню напряжения, предлагаемая концепция работает с несколькими состояниями, что позволяет ранжировать источники. Однако в каждом состоянии может работать одновременно несколько источников с управлением по спаду напряжения. Диаграмма состояний данной системы управления показана пунктирной линией на рис. 1. В отличие от системы с контролем по уровню напряжения, напряжение шины здесь плавно снижается до следующего состояния, когда выходной мощно-

сти всех источников в текущем состоянии и более высоких состояниях недостаточны.

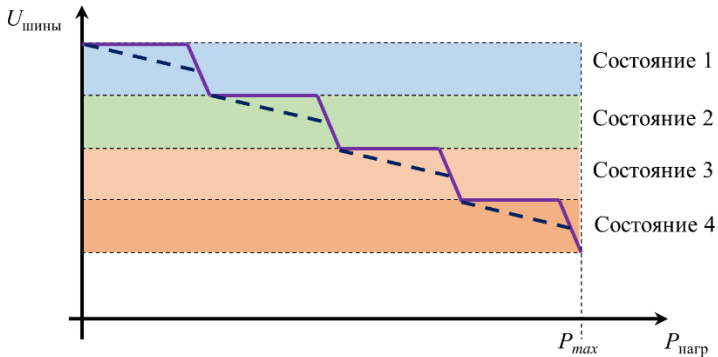


Рис. 1. Диаграмма состояний управления по уровню напряжения

Fig. 1. Voltage level control state diagram

Силовые преобразователи программируются на три режима работы: выключен, работа с постоянным напряжением и работа с постоянной мощностью. Переключения между режимами постоянного напряжения и постоянной мощности происходят при изменении нагрузки и выходной мощности источников и приводят к изменению уровня напряжения шины. Приоритет использования каждого источника зависит от пороговых значений напряжения.

Рассмотрим принцип работы данной схемы управления на примере микросети, показанной на рис. 2 (а). Система содержит ВИЭ, дизель-генератор (ДГ) и нагрузку постоянной мощности. Алгоритм управления подобной системы имеет два рабочих состояния. В состоянии 1 к сети подключен только ВИЭ, а в состоянии 2 к сети подключается и ДГ. Включение ВИЭ устанавливается на пороге U_0 , а ДГ на пороге U_1 (рис. 2 (б)).

Когда мощность нагрузки меньше точки максимальной мощности (MPP) возобновляемого источника (P_{max1}), к сети подключен только силовой преобразователь возобновляемого источника, который работает в режиме постоянного напряжения, регулируя напряжение шины в пределах пороговых значений $U_0 - U_1$. При увеличении тока нагрузки напряжение на шине будет снижаться из-за наклона внешней характеристики преобразователя. Таким образом, при нагрузке $P_{нагр1} < P_{max1}$ система работает в точке А (рис. 2 (б)).

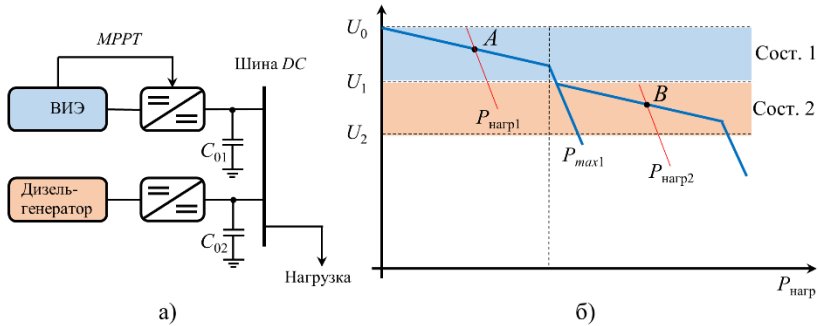


Рис. 2. Система управления с использованием гибридной схемы: структурная схема микросети (а); диаграмма состояний (б)

Fig. 2. Control system using a hybrid scheme: block diagram of a microgrid (a); state diagram (b)

Когда мощность нагрузки превышает MPP возобновляемого источника, увеличиваясь до уровня $P_{нагр2}$, силовой преобразователь ВИЭ переходит в режим постоянной мощности, ограничивая выходную мощность уровнем P_{max1} . Напряжение на шине при этом резко снижается. Выходные конденсаторы преобразователей некоторое время поддерживают напряжение шины постоянного тока, которое определяется выражением:

$$U_{шины}(t) = \sqrt{\frac{2}{C_0} \int_0^t (P_{max1}(t) - P_{нагр1}(t)) dt}. \quad (1)$$

Когда напряжение шины снижается до порогового значения U_1 , к сети подключается силовой преобразователь ДГ для обеспечения баланса мощности. Система работает в точке B .

На рис. 3 показан алгоритм управления, реализующий диаграмму состояний для модернизированной схемы управления с пятью состояниями, причем состояния 1 и 3 содержат подсостояния. В рамках данного алгоритма высший приоритет в системе имеют возобновляемые источники, следующими по приоритету являются АБ и невозобновляемые источники (ДГ).

Входными параметрами являются мощность нагрузки $P_{нагр}$ и заряд аккумуляторов $Q_{АБ}$. Изменение $P_{нагр}$ может вызвать переход между состояниями. Изменение $Q_{АБ}$ не вызывает изменения состояния системы, а только переходы между подсостояниями. Выходными параметрами системы являются мощность ВИЭ, доступная мощность аккумуляторов и мощность ДГ, которые обозначаются как $P_{ВИЭ}$, $P_{АБ}$ и $P_{ген}$ соответственно.

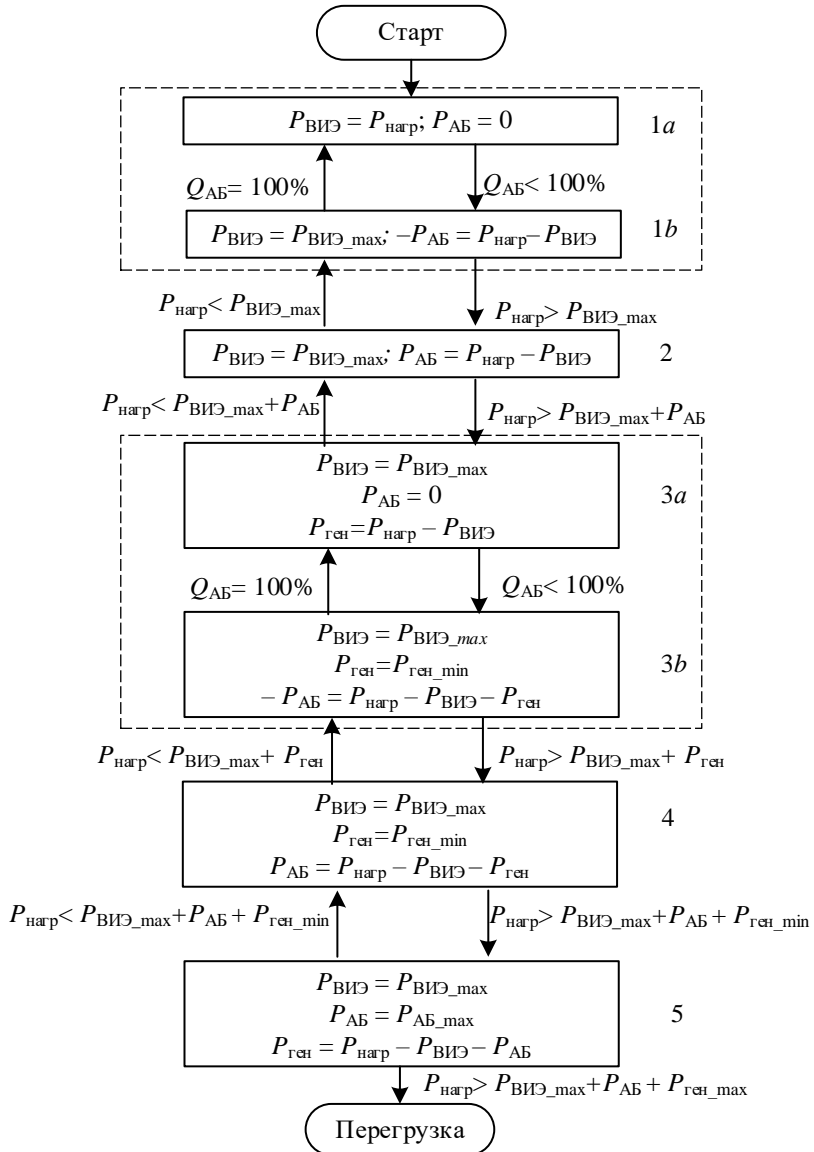


Рис. 3. Алгоритм работы системы управления

Fig. 3. Control system operation algorithm

В состоянии 1 мощность нагрузки меньше доступной мощности ВИЭ, при этом оно включает в себя два подсостояния, которые необходимы для обеспечения возможности заряжать аккумуляторы от возобновляемых источников энергии. В состоянии 1*a* мощность нагрузки распределяется между полностью заряженными аккумуляторами и возобновляемыми источниками по алгоритму спада напряжения. Однако, если аккумуляторы не полностью заряжены, они заряжаются, что соответствует состоянию 1*b*. Это подсостояние находится на границе состояний 1 и 2 и соответствует точке максимальной мощности возобновляемых источников.

В состоянии 2 мощность нагрузки превышает располагаемую мощность ВИЭ, и баланс мощности обеспечивается за счет АБ.

В состоянии 3 мощность нагрузки превышает мощность, доступную от ВИЭ и АБ, поэтому включается ДГ. В состоянии 3*a* генератор работает с мощностью, которая ниже минимальной экономической, поэтому при нормальных условиях система не должна находиться в состоянии 3*a*. Если аккумуляторы не полностью заряжены, они начинают заряжаться, что соответствует состоянию 3*b*. Когда АБ полностью заряжены, они начинают отдавать мощность, обеспечивая переход из состояния 3*a* в состояние 2.

В состоянии 4 мощность нагрузки превышает сумму максимальной мощности ВИЭ и минимальную экономическую мощность ДГ. Баланс обеспечивается за счет энергии, запасенной в накопителях. Если нагрузка превышает максимальную выходную мощность аккумуляторов, мощность ДГ возрастает вплоть до максимальной (состояние 5). Если мощность нагрузки увеличивается и далее, происходит отключение неответственных потребителей, чтобы предотвратить дальнейшее падение напряжения на шине.

Реализация представленного алгоритма управления осуществляется в два этапа. Первый из них заключается в представлении каждого рабочего состояния в виде дискретных диапазонов напряжений. Диаграмма состояний для рассмотренного алгоритма показана на рис. 4. Следует отметить, что диапазон напряжений состояний 1 и 3 шире, чем в других состояниях, что необходимо для того, чтобы различать подсостояния 1*b* и 3*b*. Переход между состояниями 2 и 3 осуществляется по разным кривым, что объясняется инертностью работы ДГ: после запуска он остается включенным до полной зарядки аккумуляторов.

Второй этап реализации алгоритма заключается в определении метода управления в зависимости от состояния системы для преобразователей каждого источника (табл. 1).

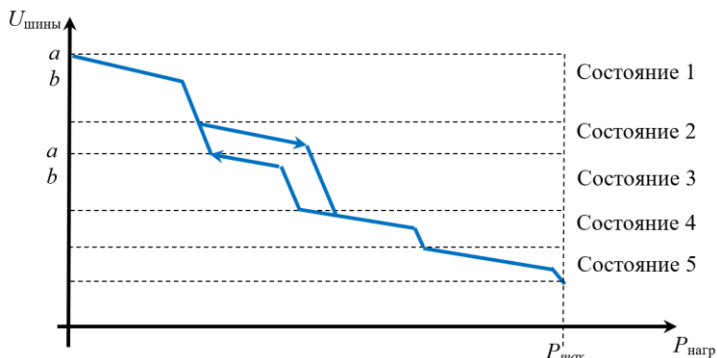


Рис. 4. Диаграмма состояний гибридного закона управления по уровню напряжения

Fig. 4. State diagram of the hybrid control law by voltage level

Таблица 1.

Законы управления источниками для разных состояний

Table 1.

Source control laws for different states

Состояние	ВИЭ	Аккумулятор	ДГ
1a	Контроль по спаду	Отключен	Отключен
1b	Режим P_{\max}	Максимальный заряд	Отключен
2	Режим P_{\max}	Разряд с контролем по спаду	Отключен
3a	Режим P_{\max}	Разряд с контролем по спаду	Режим P_{\min}
3b	Режим P_{\max}	Максимальный заряд	Режим P_{\min}
4	Режим P_{\max}	Разряд с контролем по спаду	Режим P_{\min}
5	Режим P_{\max}	Максимальный разряд	Контроль по спаду

С управлением по рассматриваемой схеме микросеть может содержать больше узлов, чем с управлением по уровню напряжения, поскольку в каждом состоянии могут работать несколько источников. При этом в схему можно добавлять и новые источники, настроив их для работы с существующими диапазонами напряжений.

IV. Реализация алгоритма управления в силовых преобразователях

Режим работы каждого источника определяется уровнем напряжения шины постоянного тока. Силовой преобразователь остается выключенным до тех пор, пока напряжение на шине не опустится ниже порогового значе-

ния. В этот момент преобразователь подключается к сети, выступая в качестве источника постоянного напряжения. Если фактическая выходная мощность источника превышает максимальную мощность, преобразователь ее ограничивает и работает в режиме постоянной максимальной мощности.

На рис. 5 приведена упрощенная модель силового управляемого током DC/DC преобразователя источника, обеспечивающая реализацию указанных режимов работы. Структура управления двухуровневая, включающая в себя внутренний контур управления по току и внешний контур управления по напряжению. Между контурами напряжения и тока включен блок динамического ограничения тока. Поскольку внешний контур напряжения управляет выходной мощностью преобразователя, модель можно упростить путем замены внутреннего токового контура его идеализированной моделью.

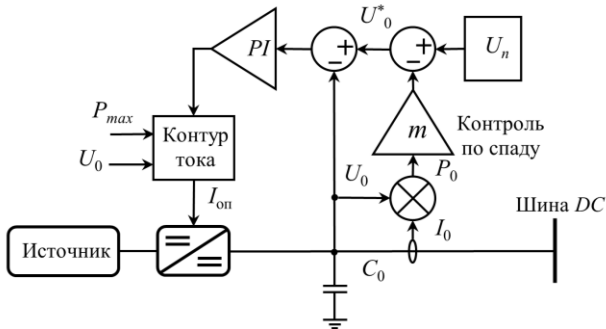


Рис. 5. Упрощенная модель DC/DC преобразователя источника

Fig. 5. Simplified model of DC/DC source converter

В режиме постоянного напряжения пропорционально-интегральный регулятор (PI) стабилизирует выходное напряжение преобразователя на уровне порогового значения, обеспечивая опорный ток для внутреннего контура. В этом режиме реализовано управление по спаду напряжения, позволяющее распределять ток нагрузки с другими силовыми преобразователями, работающими с теми же пороговыми значениями напряжения. Выходное напряжение при этом определяется формулой:

$$U_0 = U_n - mP_0, \quad (2)$$

где U_n – пороговое значение включения преобразователя, P_0 – выходная мощность преобразователя, а m – коэффициент наклона характеристики.

Динамическое ограничение тока используется для реализации отключения и режима постоянной мощности. Когда напряжение на шине превышает пороговое значение, преобразователь должен быть выключен, поскольку для питания нагрузки достаточно преобразователей с более высоким приоритетом использования. В этих условиях PI -регулятор напряжения подает отрицательный опорный сигнал на вход токового контура, что отключает преобразователь.

Режим постоянной мощности осуществляется путем динамической регулировки верхнего предела опорного тока:

$$I_{оп} = P_{max} / U_0, \quad (3)$$

где P_{max} – максимальная мощность возобновляемого источника (точка максимальной мощности) или максимальная мощность разрядки АБ. При изменении P_{max} или напряжения на шине опорный ток изменяется таким образом, чтобы преобразователь обеспечивал максимальную выходную мощность.

Модель повышающего преобразователя в *Simulink (Matlab)* приведена на рис. 6.

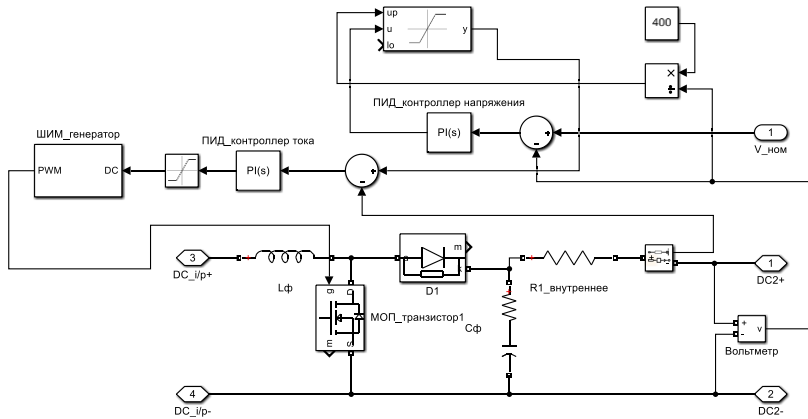


Рис. 6. Модель повышающего DC/DC преобразователя в *Simulink (Matlab)*

Fig. 6. Model of a boost DC/DC converter in the *Simulink (Matlab)*

Преобразователь аккумулятора является двунаправленным, что позволяет накопителям как разряжаться, так и заряжаться. Поэтому имеем две управляющие структуры: для разряда и для заряда. Структура управления, используемая для реализации режимов зарядки, показана на рис. 7.

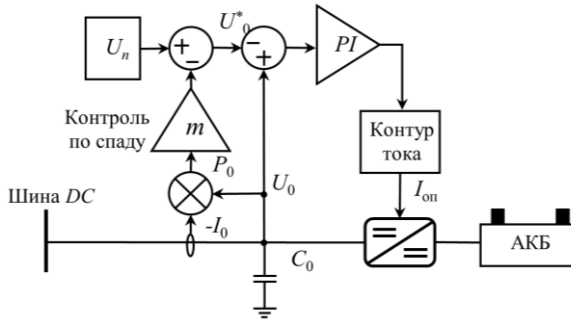


Рис. 7. Упрощенная модель контроллера зарядки аккумулятора

Fig. 7. Simplified model of a battery charging controller

При зарядке преобразователь имеет три режима работы: выключен, постоянное напряжение и предельный заряд. Однако рабочие режимы запускаются повышением напряжения на шине, а не падением напряжения на шине, поскольку в режиме заряда аккумулятора являются нагрузкой для шины, а не источником.

Преобразователь остается выключенным, пока напряжение на шине ниже порога зарядки. Когда напряжение на шине поднимается выше этого порога, указывая на избыточную мощность в системе, преобразователь начинает заряжать АБ, работая в режиме постоянного напряжения. В этом режиме преобразователь накопителя потребляет энергию от системы, и регулирует напряжение шины постоянного тока по следующему закону:

$$U_0 = U_n + mP_0, \quad (4)$$

где U_n – значение напряжения, соответствующее максимальному заряду; m – коэффициент наклона характеристики, который позволяет нескольким накопителям заряжаться одновременно. Согласно (4), напряжение на шине растет по мере увеличения зарядного тока, поскольку в условиях зарядки I_0 является отрицательным.

Модель преобразователя аккумулятора в *Simulink (Matlab)* приведена на рис. 8.

В режиме постоянного напряжения преобразователь накопителя обеспечивает заряд АБ, используя избыточную мощность источников, при условии, что не превышено предельное значение тока зарядки. Это необходимо для того, чтобы предотвратить зарядку аккумуляторов с опасно высокой скоростью. Данный режим работы называется предельным зарядом. Од-

нако использование только напряжения шины постоянного тока для определения режима работы накопителей может привести к повышенному износу АБ. Поэтому, чтобы оптимизировать процессы зарядки и разрядки необходимо, помимо уровня напряжения шины постоянного тока, использовать дополнительную локальную информацию об уровне заряда, температуре и других параметрах батарей.

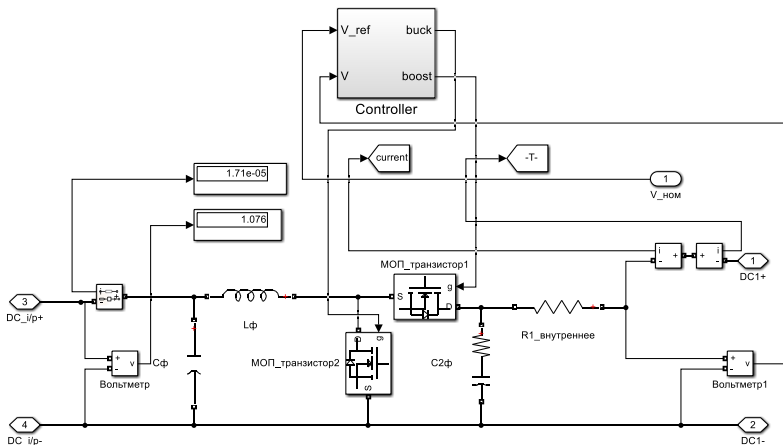


Рис. 8. Модель преобразователя аккумулятора в *Simulink (Matlab)*

Fig. 8. Battery converter model in *Simulink (Matlab)*

V. Расчет пороговых уровней напряжения для системы управления

Приоритет использования источников определяется в соответствии с алгоритмом системы управления (рис. 3), который состоит из ряда рабочих состояний. Так как в данной концепции уровень напряжения шины используется в качестве средства передачи системной информации, надежная работа системы реализуется путем правильного расчета порогов срабатывания. Пороговые значения должны быть определены таким образом, чтобы каждый преобразователь мог обеспечить текущее рабочее состояние системы несмотря на то, что напряжение шины может быть неодинаково на разных участках.

Источники с более высоким приоритетом должны подключаться к сети при более высоких пороговых значениях напряжения, чем источники с более низким приоритетом, поскольку уровень напряжения шины уменьшается при увеличении нагрузки. Накопители с самым высоким приоритетом заряда, напротив, подключаются к системе при самых низких пороговых значениях напряжения, так как процесс заряда приводит к уменьшению

напряжения шины, а не к его увеличению.

Пороговые уровни напряжения рассчитываются, начиная с самого высокого уровня. Каждый последующий уровень рассчитывается из условия, чтобы при активных источниках текущего состояния, падения напряжения в системе, вызванные сопротивлениями линий, не приводили к преждевременному включению источников, следующего состояния. Как правило, верхний пороговый уровень напряжения U_0 устанавливается равным номинальному рабочему напряжению системы. Пороговое напряжение U_n каждого следующего состояния рассчитывается путем вычитания падения напряжения в линиях и абсолютной погрешности измерения:

$$U_n \leq U_{n-1} - \Delta U_{n-1} - U_e, \quad (5)$$

где U_{n-1} – пороговое напряжение предыдущего состояния ($n-1$); ΔU_{n-1} – максимальное падение напряжения, в системе, работающей в состоянии $n-1$; U_e – предел абсолютной погрешности, который учитывает неточность измерений и пульсации напряжения на шине постоянного тока.

Падение напряжения ΔU_{n-1} не должно превышать разницу между уровнем U_{n-1} и минимальным напряжением в точке подключения к системе источника следующего состояния (U_n). Если пороговые значения рассчитаны с учетом наибольшего падения напряжения в каждом рабочем состоянии, уровень напряжения шины всегда будет указывать количество и тип источников, необходимых для соблюдения баланса мощности. При переходном процессе запуска система управления может подключить дополнительный источник к сети, так как начальный пик тока приведет к уменьшению напряжения на шине, но после стабилизации напряжения на шине система его отключит. Кратковременные переходные процессы длительностью порядка 0,1 мс не повлияют на систему управления за счет фильтров в управляющих цепях силовых преобразователей.

VI. Моделирование микросети постоянного тока

Для демонстрации работы представленного алгоритма (рис. 3) управления по уровню напряжения шины постоянного тока произведено имитационное моделирование микросети. При этом использована упрощенная модель, в которой не учитывались переходные эффекты при переключениях преобразователей, индуктивности и емкости передающих линий. Моделируемая микросеть состоит из шины постоянного тока U_{DC} , к которой подключены источники E_1 , E_2 и E_3 и одна нагрузка $R_{нагр}$, как показано на рис. 9, где E_1 – ветрогенератор, E_2 – солнечная панель, а E_3 – аккумулятор. Источники моделируются как источники постоянного напряжения, поскольку их механический момент инерции превышает рассматриваемый период (1,5 с). Номинальное напряжение шины DC 380 В. Линии электропередачи имеют

активное сопротивление $0,2 \text{ Ом/км}$. Индуктивностью и емкостью можно пренебречь, поскольку в сети постоянного тока они не влияют поток мощности в установившемся режиме.

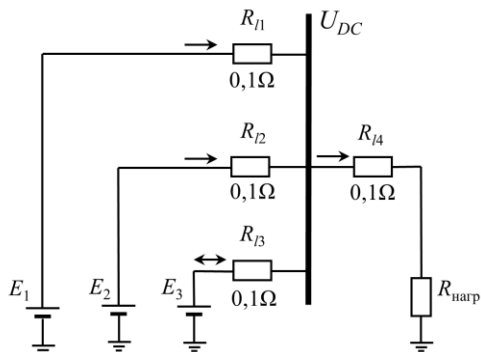


Рис. 9. Схема замещения моделируемой микросети

Fig. 9. Equivalent circuit of the simulated microgrid

Общий вид моделируемой микросети в *Simulink (Matlab)* представлен на рис. 10.

Чтобы предотвратить преждевременный переход системы в следующее состояние из-за падения напряжения на сопротивлениях линий, в моделируемой микросети каждому состоянию в системе соответствует достаточно большой диапазон напряжения. В результате верхние пороговые значения для состояний $1a - 5$ составляют 410 В , 400 В , 380 В , 360 В , 330 В , 340 В , 330 В и 320 В соответственно. Данные пороговые значения выбраны для наглядности. В схемах, реализуемых на практике, пороговые значения должны рассчитываться из условий минимизации колебаний напряжения.

Полоса пропускания пропорционально-интегральных контроллеров напряжения выбрана 1 кГц . Для ограничения максимальной выходной мощности источника в схеме реализовано ограничение тока. Коэффициент спада m установлен равным 1 В/А , чтобы обеспечить распределение мощности, когда возобновляемые источники работают в состоянии $1a$.

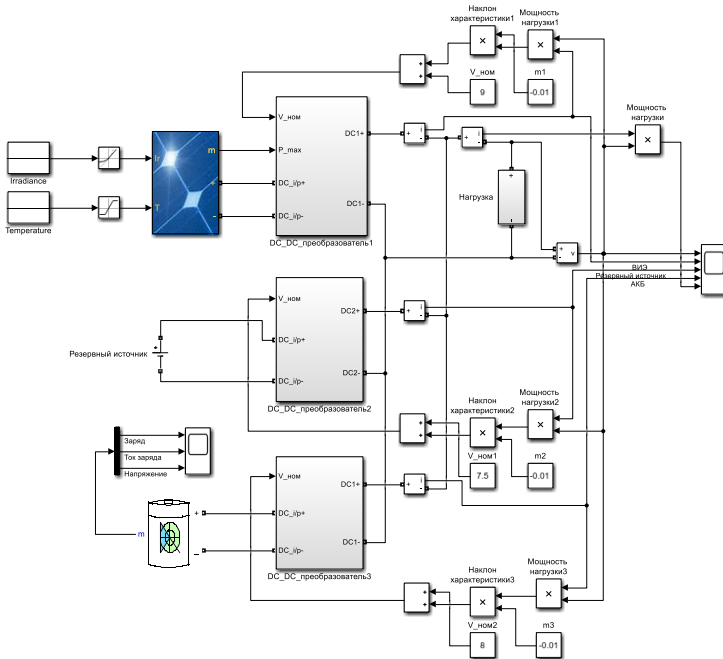


Рис. 10. Модель микросети постоянного тока в Simulink (Matlab)

Fig. 10. DC microgrid model in Simulink (Matlab)

VII. Результаты моделирования

В системе происходят пошаговые изменения нагрузки и максимальной мощности, доступной от ВИЭ, чтобы заставить микросеть делать переходы между рабочими состояниями обеспечивая баланс мощности. Результаты представлены на рис. 11.

Первоначально нагрузка составляет 350 Вт, а максимальная мощность ВИЭ – 600 Вт. Поскольку возобновляемые источники питания способны питать нагрузку, система работает в состоянии 1*b*. Узел накопителей потребляет избыточную мощность от ВИЭ вплоть до их максимальной мощности, обеспечивая напряжение шины на пороге заряда. Результирующий зарядный ток – 0,65 А.

В момент времени $t = 0,25$ мс общая нагрузка увеличивается до 650 Вт. Мощности возобновляемых источников уже недостаточно для питания нагрузки, и DC/DC преобразователь ВИЭ переходит в режим постоянной мощности. Поэтому напряжение на шине снижается до состояния 2. Баланс мощности обеспечивается за счет разряда накопителей током 0,1 А.

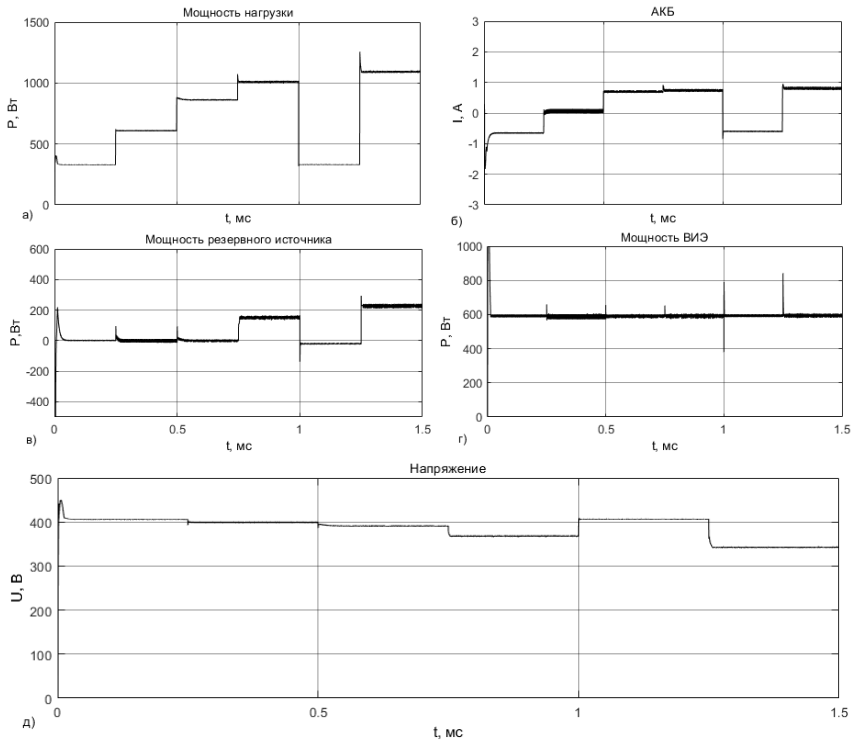


Рис. 11. Результаты имитационного моделирования микросети постоянного тока с гибридной системой управления в *Simulink (Matlab)*: мощность нагрузки (а); ток заряда/разряда накопителей (б); мощность резервного источника (в); мощности ВИЭ (г); напряжения на шине (д)

Fig. 11. Results of simulation of a DC microgrid with a hybrid control system in the *Simulink (Matlab)*: load power (а); charge/discharge current of storage devices (б); backup source power (с); RES power (г); bus voltage (д)

В момент времени $t = 0,5$ мс общая нагрузка увеличивается до 850 Вт. Система продолжает работать в состоянии 2, но ток разряда аккумуляторов увеличивается до 0,7 А.

В момент времени $t = 0,75$ мс общая нагрузка увеличивается до 1000 Вт, превышая мощность всех активных источников на 400 Вт. Система кратковременно пытается обеспечить баланс мощности за счет накопителей, но силовые преобразователи АБ, как и ВИЭ работают в режиме ограничения мощности, в результате чего напряжение на шине резко снижается, и система переходит в состояние 4. В этом состоянии к сети подключается

резервный источник, работая с мощностью 150 Вт. Остальной небаланс мощности (250 Вт) обеспечивается за счет АБ.

В момент времени $t = 1,0$ мс нагрузка снижается до 350 Вт, и система возвращается в исходное состояние.

В момент времени $t = 1,25$ мс нагрузка резко увеличивается до 1100 Вт, и система переходит в состояние 4. Дополнительная мощность нагрузки обеспечивается за счет резервного источника.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что в нормальных условиях баланс мощности в системе поддерживается с помощью предлагаемой системы управления по уровню напряжения шины. Однако для практической реализации необходимо решить еще несколько проблем. При переходах между состояниями напряжение шины имеет тенденцию падать до более низкого состояния, что приводит к кратковременному включению источников с более низким приоритетом. Эта проблема потенциально может быть решена путем использования дополнительных накопителей для стабилизации напряжения шины. При резком уменьшении нагрузки, напротив, появляются пики напряжения. Поэтому следует избегать резких скачков мощности в системе. На практике время запуска резервного генератора составляет несколько секунд. Следовательно, для поддержания баланса мощности в системе на время запуска резервного генератора также необходимы дополнительные устройства, например, накопители на базе суперконденсаторов. Поскольку система основана на силовых электронных преобразователях, ощутимой проблемой является высокочастотная стабильность. Силовые преобразователи имеют отрицательное входное сопротивление на низких частотах в режиме работы с постоянной мощностью. Источники имеют более высокое выходное сопротивление на низких частотах, в силу чего взаимодействие между ними и нагрузками может привести к нестабильности в системе.

VI. Заключение

Разработана концепция распределенного управления источниками и накопителями в системах распределенной генерации с шиной постоянного тока на основе силовой электроники без использования центрального контроллера. Предлагаемая концепция предполагает независимое управление работой силовых преобразователей источников и накопителей: в режиме постоянного напряжения или в режиме максимальной мощности. Изменения мощности нагрузки и максимальной мощности источников приводят к изменениям уровня напряжения на шине постоянного тока, которые, в свою очередь вызывают переключения преобразователей между режимами постоянного напряжения и постоянной мощности. Таким образом, шина постоянного тока используется в качестве канала связи между силовыми преобразователями, позволяя реализовать оптимальный закон управления си-

стемой через распределенное управление каждым узлом. Результаты моделирования показывают работоспособность предлагаемой стратегии управления.

© Андреенков Е.С., 2024

Поступила в редакцию 24.10.2023

Принята к публикации 07.12.2023

Received 24.10.2023

Accepted 07.12.2023

Библиографический список

- [1] Лоскутов А.Б., Куликов А.Л., Илюшин П.В. От плана ГОЭЛРО к цифровизации электроэнергетического комплекса страны // *Электричество*. 2020. № 12. С. 14-30. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-12-14-30
- [2] Бычков Е.В., Васенин А.Б., Крюков О.В. Новые возможности малой энергетики на принципах SMARTGRID // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2019. № 10 (123). С. 40-50.
- [3] Мезенцев С.Д., Лыков А.Н. Реализация цифровой электрической подстанции на базе отечественного оборудования // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 5. С. 229-231. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-229-231
- [4] Трачук А.В., Линдер Н.В. Технологии распределенной генерации: эмпирические оценки факторов применения // *Стратегические решения и риск-менеджмент*. 2018. № 1 (104). С. 32-48. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-1-32-48
- [5] Россихин Д.А. К вопросу об интеграции возобновляемой энергетики в распределительные сети. Организационно-правовой аспект и перспективы развития // *Энергия единой сети*. 2023. № 2 (69). С. 56-63.
- [6] Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2035 г.».
- [7] Некрасов С.А., Грачев И.Д. Возобновляемая энергетика: перспективы корректировки развития энергоснабжения в России // *Проблемы прогнозирования*. 2020. № 1 (178). С. 99-109.
- [8] Шульга Р.Н. Распределенная генерация с использованием ВИЭ в составе мультиагентных систем постоянного тока // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2017. № 5 (109). С. 58-68.
- [9] Королев А. А., Болонов В. О., Окнин Е. П., Тульский В.Н., Силаев М.А., Королев В.М., Шиш К.В. Перспективы электроснабжения с применением технологий постоянного тока в распределительных сетях 0,4-20 кВ // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2022. № 6 (75). С. 14-22.
- [10] Laour M., Akel F., Bendib D., Chikh M. Residential microgrid load management and optimal control in grid connected and islanded mode // 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Dec. 05-08, 2018, Rabat, Morocco: IEEE, 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702847
- [11] Zhao X., Yang G., Bai X., Yang Z., Yang G. Construction of low voltage DC smart buildings with generation-storage-distribution-utilization // 2021 IEEE Sustainable

- Power and Energy Conference (iSPEC), Dec. 23-25, 2021, Nanjing, China: IEEE, 2021. P. 2140-2143. DOI: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735638
- [12] 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. № 5. P. 12230-12256. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2705914
- [13] Домышев А.В., Баракхтенко Е.А., Илюшин П.В. Обзор современных подходов к построению систем мультиагентного управления микросетями // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 3 (78). С. 46-56.
- [14] Dalbon W., Roscia M., Zaninelli D. Hybrid photovoltaic system control for enhancing sustainable energy // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Jul. 21-25, 2002, Chicago, IL, USA: IEEE, 2002. P. 134-139. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043198
- [15] Shehata E.G., Thomas J., Mostafa R.M., Ghalib M.A. An improved droop control for a low voltage DC microgrid operation // 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Dec. 18-20, 2018, Cairo, Egypt: IEEE, 2018. P. 850-855. DOI: 10.1109/MEPCON.2018.8635258
- [16] Chen D., Xu L., Yao L. DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. № 28 (2). P. 637-648. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2241083

References

- [1] A.B. Loskutov, A.L. Kulikov and P.V. Ilyushin, "From the GOELRO plan to digitalization of Russia's electric power complex", *Electricity*, vol. 12, pp. 14-30, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-12-14-30
- [2] E.V. Bychkov, A.B. Vasenin and O.V. Kryukov, "New opportunities small energy principles smartgrid", *Avtomatizaciya i IT v Energetike [Automation and IT in the Energy Sector]*, vol. 10, no. 123, pp. 40-50, 2019 (in Russian)
- [3] S.D. Mezentsev and A.N. Lykov, "Realization of the digital electric substation on the basis of the domestic equipment", *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, vol. 5, pp. 229-231, 2018. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-5-229-231
- [4] A.V. Trachuk and N.V. Linder, "Technologies of the distributed generation: empirical evaluations of the innovations acceptance", *Strategic Decisions and Risk Management*, vol. 1 (104), pp. 32-48, 2018. DOI: 10.17747/2078-8886-2018-1-32-48
- [5] D.A. Rossikhin, "On the issue of integrating renewable energy into distribution networks. Organizational and legal aspect and development prospects", *Energy of Unified Grid*, vol. 2, no. 69, pp. 56-63, 2023.
- [6] Order of the Government of the Russian Federation dated 06.09.2020 no. 1523-r "Ob Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2035 g. [On the Energy Strategy of Russia for the period until 2035]" (in Russian).
- [7] S.A. Nekrasov and I.D. Grachev, "Vozobnovlyаемая energetika: perspektivy korektyrovki razvitiya energosnabzheniya v Rossii [Renewable energy: prospects for adjusting the development of energy supply in Russia]", *Problemy Prognozirovaniya*, vol. 1, no. 178, pp. 99-109, 2020 (in Russian).
- [8] R.N. Shulga, "The distributed generation with use of RES as a part of the multiagency DC systems", *Ènergosbereženie i Vodopodgotovka*, vol. 5 (109), pp. 58-68, 2017.

- [9] A. A. Korolev, V. O. Bolonov, E. P. Oknin, V.N. Tulsy, M.A. Silaev, V.M. Korolev and K.V. Shish, "Outlook for power supply with application of DC technologies in 0,4-20 kV distribution networks", *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 6, no. 75, pp. 14-22, Nov.-Dec. 2022.
- [10] M. Laour, F. Akel, D. Bendib and M. Chikh, "Residential microgrid load management and optimal control in grid connected and islanded mode", in proc. *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Dec. 05-08, 2018, Rabat, Morocco, pp. 1-4. DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702847
- [11] X. Zhao, G. Yang, X. Bai, Z. Yang and G. Yang, "Construction of low voltage DC smart buildings with generation-storage-distribution-utilization", in proc. *2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Dec. 23-25, 2021, Nanjing, China, pp. 2140-2143. DOI: 10.1109/iSPEC53008.2021.9735638
- [12] D. Kumar, F. Zare and A. Ghosh, "DC microgrid technology: System architectures, ac grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12230-12256, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2705914
- [13] A.V. Domyshhev, E.A. Barakhtenko and P.V. Ilyushin, "Review of state-of-the-art approaches to the design of microgrid multi-agent control systems", *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 3, no. 78, pp. 46-56, May-June 2023.
- [14] W. Dalbon, M. Roscia and D. Zaninelli, "Hybrid photovoltaic system control for enhancing sustainable energy", in proc. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Jul. 21-25, 2002, Chicago, IL, USA, pp. 134-139. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043198
- [15] E.G. Shehata, J. Thomas, R.M. Mostafa and M.A. Ghalib, "An Improved Droop Control for a Low Voltage DC Microgrid Operation", in proc. *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Dec. 18-20, 2018, Cairo, Egypt, pp. 850-855. DOI: 10.1109/MEPCON.2018.8635258
- [16] D. Chen, L. Xu and L. Yao, "DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 637-648, Apr. 2013. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2241083.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Андреевков Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент
Филиала «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Российская Федерация.

Evgeniy S. Andreenkov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Smolensk branch of «National Research University «MPEI», Smolensk, Russian Federation.