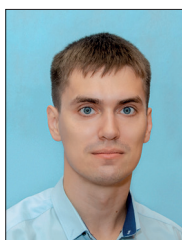


Научная статья

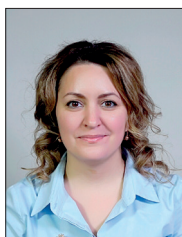
УДК 621.311

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73

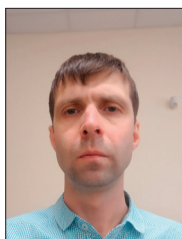
СПОСОБЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ В ДОПУСТИМЫХ ПРЕДЕЛАХ В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРИ РЕЗКОПЕРЕМЕННОМ ХАРАКТЕРЕ НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЯ

**Борис Андреевич Косарев****Boris A. Kosarev**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, научный сотрудник, Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Омск, Россия

**Галина Андреевна Кошук****Galina A. Koshchuk**

старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Дмитрий Викторович Лазарев****Dmitriy V. Lazarev**

аспирант кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Александр Анатольевич Охотников****Aleksandr A. Okhotnikov**

старший преподаватель кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Рустам Нуриманович Хамитов****Rustam N. Khamitov**

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника», Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Актуальность

Перспективным направлением развития отечественной и зарубежной электроэнергетики является распределенная генерация. Распределенная генерация является принципом развития распределительных сетей и сетей внутреннего электроснабжения предприятий с уровнем напряжения до 110 кВ включительно, при котором электростанции с установленной мощностью не более 25 МВт размещаются в непосредственной близости от узлов электропотребления. К причинам распространения такого принципа развития распределительных сетей следует отнести уменьшение потерь на передачу электроэнергии, возможность изолированного или автономного режимов работы энергорайонов и благодаря разнообразию и высокой эффективности генерирующих установок распределенной генерации — возможность использовать любые доступные энергоресурсы, в том числе возобновляемые источники энергии. В условиях распределенной генерации электроснабжение потребителей с резкопеременным характером нагрузки затруднительно, что связано со значительными отклонениями параметров режима и отключением генерирующих установок противоаварийной автоматикой. Причины такой низкой динамической устойчивости генерирующих установок распределенной генерации различны и определяются их принципом действия, конструкцией и некоторыми другими факторами. К основным причинам относятся некорректно заданные алгоритмы работы и уставки противоаварийной автоматики, перегрев первичного двигателя, низкий момент инерции турбины, стохастический характер выработки энергии. К потребителям с резкопеременным характером нагрузки относятся не только крупные промышленные предприятия, но и предприятия связи, некоторые сельскохозяйственные предприятия, нагрузка жилищно-коммунального сектора. Таким образом, резкопеременная нагрузка присутствует во многих сферах деятельности, и решение вопросов организации ее электроснабжения по принципу распределенной генерации является актуальной проблемой.

Цель исследования

Обзор способов поддержания параметров режима системы электроснабжения с объектами распределенной генерации и потребителями, обладающими резкопеременным характером нагрузки.

Методы исследования

Исследования проведены с использованием теории переходных электрохимических процессов, теории электропередачи, экспериментальных результатов.

Результаты

Выполнен обзор способов поддержания параметров режима системы электроснабжения с распределенными источниками энергии в допустимых пределах при резкопеременном характере нагрузки потребителей.

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

Для цитирования: Косарев Б. А., Кошук Г. А., Лазарев Д. В., Охотников А. А., Хамитов Р. Н. Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 64-73. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73>.

Ключевые слова

накопитель электрической энергии, резкопеременная нагрузка, сглаживание профиля мощности, толчковая нагрузка, распределенная генерация, генерирующая установка, вторичное регулирование, первичное регулирование, объект распределенной генерации, график нагрузки потребителя

Original article

METHODS FOR MAINTAINING VOLTAGE AND FREQUENCY VALUES WITHIN ACCEPTABLE LIMITS IN CONDITIONS OF DISTRIBUTED GENERATION WITH A SHARPLY VARIABLE NATURE OF THE LOAD OF THE CONSUMER

Relevance

A promising direction for the development of domestic and foreign electric power industry is distributed generation. Distributed generation is a principle for the development of distribution networks and internal power supply networks of enterprises with a voltage level of up to 110 kV inclusive, in which power plants with an installed capacity of not more than 25 MW are located in close proximity to power consumption nodes. The reasons for the spread of this principle of development of distribution networks include the reduction of losses in the transmission of electricity, the possibility of isolated or autonomous modes of operation of energy districts, and due to the variety and high efficiency of distributed generation generating plants, the ability to use any available energy resources, including renewable energy sources. In conditions of distributed generation, power supply to consumers with a sharply variable nature of the load is difficult, which is associated with significant deviations of the mode parameters and shutdown of generating plants by emergency automatics. The reasons for such a low dynamic stability of generating installations of distributed generation are different and are determined by their operating principle, design and some other factors. The main reasons include incorrectly set operation algorithms and settings of emergency automatics, overheating of the primary engine, low moment of inertia of the turbine, and stochastic nature of power generation. Consumers with a sharply variable nature of the load include not only large industrial enterprises, but also communications enterprises, some agricultural enterprises, and the load of the housing and communal sector. Thus, a sharply variable load is present in many areas of activity and solving the issues of organizing its power supply according to the principle of distributed generation is an urgent problem.

Aim of research

Review of ways to maintain the mode parameters of the power supply system with distributed generation facilities and consumers with a sharply variable nature of the load.

Research methods

The studies were carried out using the theory of transient electromechanical processes, the theory of power transmission, and experimental results.

Results

A review is made of ways to maintain the mode parameters of a power supply system with distributed energy sources within acceptable limits with a sharply variable nature of the load of consumers.

Acknowledgments: The work was carried out according to the State Assignment of the Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (State Registration Number of the Project 122011200349-3).

Ключевые слова

electrical energy storage device, sharply variable load, power profile smoothing, shock load, distributed generation, generating plant, secondary regulation, primary regulation, distributed generation object, consumer load schedule

For citation: Kosarev B. A., Koshchuk G. A., Lazarev D. V., Okhotnikov A. A., Khamitov R. N. Sposoby podderzhaniya znacheniy napryazheniya i chastoty v dopustimyykh predelakh v usloviyakh raspredelennoy generatsii pri rezkoperemennom kharaktere nagruzki potrebitelya [Methods for Maintaining Voltage and Frequency Values within Acceptable Limits in Conditions of Distributed Generation with a Shaply Variable Nature of the Load of the Consumer]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy* — *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 64-73 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73>.

Введение

Электрическая нагрузка потребителя не является величиной постоянной и изменяется во времени из-за непостоянства режима работы электроприемников или их отключения и включения в ходе выполнения технологического цикла, коммутаций в сети и др. На рисунке 1 представлены виды индивидуальных графиков нагрузки потребителей с точки зрения регулярности ($t_{\text{ц}}$ — время технологического цикла; $t_{\text{р}}$ — время работы задействованных в цикле электроприемников; $t_{\text{о}}$ — время отключения).

Показанные на рисунке 1 варианты изменения электропотребления потребителя во времени соответствуют отклонениям и колебаниям напряжения в точке питания от мощной электросистемы. Такие отклонения и колебания напряжения могут быть рассчитаны при помощи следующей формулы:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_0 + Q \cdot x_0}{U_{\text{ном}}} \cdot L, \quad (1)$$

где ΔU — потери напряжения в линии электропередачи;

P — активная мощность;

Q — реактивная мощность;

r_0 — активное сопротивление;

x_0 — реактивное сопротивление;

L — длина линии;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение.

Из формулы (1) следует, что скачкообразное изменение величины питаемой нагрузки приводит к увеличению или уменьшению потерь напряжения в линии электропередачи.

Исходя из выражения (1) выполним расчет колебаний напряжения в точке питания нагрузки при ее резкпеременном характере. При расчете используем следующие значения параметров электропередачи: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ; $L = 1$ км; $r_0 = 1,91$ Ом; $x_0 = 0,299$ Ом; $\cos \varphi = 0,9$. Питание осуществляется по одноцепной воздушной линии электропередачи, в которой допустимая токовая нагрузка

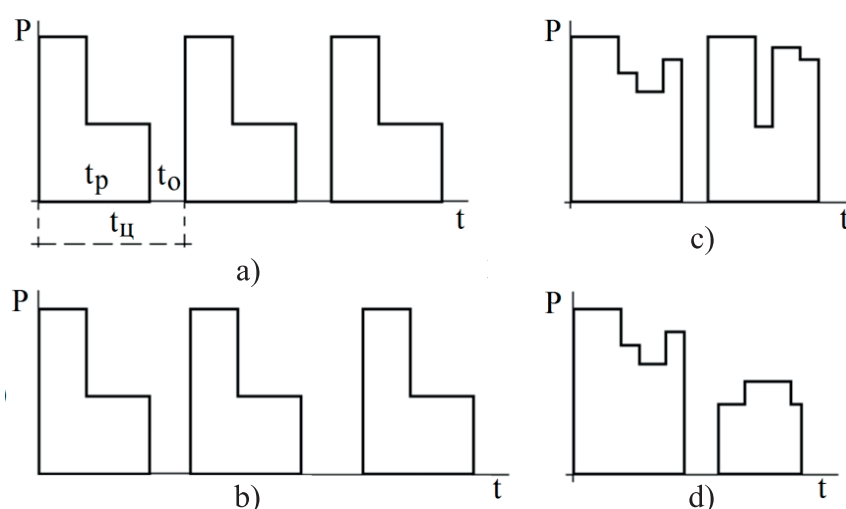


Рисунок 1. Виды индивидуальных графиков нагрузки потребителей [1]: периодический (а), циклический (б), нециклический (с), нерегулярный (д)

Figure 1. Types of individual consumer load schedules [1]: periodic (a), cyclic (b), non-cyclic (c), irregular (d)

фазного провода 100 А. Вторичное регулирование напряжения отсутствует. Результаты расчета представлены в виде таблицы 1.

В таблице 1: P_0 , P_t — значения активной мощности при сбросе и набросе нагрузки; ΔU_0 и ΔU_t — потери напряжения в линии электропередачи при сбросе и набросе нагрузки; δU — размах изменения напряжения.

Из таблицы 1 следует, что с увеличением амплитуды колебаний мощности увеличивается размах изменения напряжения в точке питания потребителя с резкопеременным характером нагрузки.

Если питание нагрузки потребителя осуществляется от автономной (изолированной) системы электроснабжения с распределенными источниками энергии (РИЭ) или находящейся в островном режиме работы системы электроснабжения с РИЭ, тогда существенные изменения электропотребления могут быть причиной не только отклонений и колебаний напряжения, но и частоты.

При синхронной генерации в основе расчета таких колебаний лежит уравнение, описывающее переходные электро-механические процессы:

$$J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} + D \cdot \Delta \omega = P_{\text{ПД}} - P_{\text{ЭМ}}, \quad (2)$$

где J — момент инерции ротора;

ω — угловая частота вращения ротора;

D — демпфирующий коэффициент;

$\Delta \omega$ — отклонение угловой частоты вращения ротора;

$P_{\text{ПД}}$ — механическая мощность первичного двигателя;

$P_{\text{ЭМ}}$ — электромагнитная мощность генератора.

Из выражения (2) следует, что реакция генерирующей установки (ГУ) на скачкообразное изменение нагрузки зависит от момента инерции ротора и демпфирующего коэффициента. Демпфирующий коэффициент символизирует в выражении (2) систему автоматического управления (САУ) ГУ.

При электронной генерации (ГУ инверторного включения) реакция ГУ на скачкообразное изменение нагрузки будет зависеть только от САУ ГУ.

Перспективным направлением развития электроэнергетики является распределенная генерация.

Распределенная генерация (РГ) — электрогенерирующая система, состоящая из одного или нескольких объектов распределенной генерации, подключаемых к распределительным сетям или сетям внутреннего электроснабжения потребителей электроэнергии на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлам электропотребления [2].

Таблица 1. Размах изменения напряжения

Table 1. Voltage swing

P_0 , кВт	P_t , кВт	ΔU_0 , В	ΔU_t , В	δU , %
5	10	344,22	688,43	3,44
5	15	344,22	1032,65	6,88
5	20	344,22	1376,86	10,33
5	25	344,22	1721,08	13,77
5	30	344,22	2065,30	17,21
5	35	344,22	2409,51	20,65
5	40	344,22	2753,73	24,10
5	45	344,22	3097,94	27,54
5	50	344,22	3442,16	30,98

Объект распределенной генерации — электростанция, состоящая из одной или нескольких генерирующих установок, подключаемая к распределительным сетям или сетям внутреннего электрообеспечения потребителей электроэнергии на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлам электропотребления, работающая параллельно с электроэнергетической системой или в изолированном (автономном) и островном режимах, имеющая в точке общего присоединения суммарную установленную мощность, не превышающую 25 МВт включительно, использующая для производства всех видов энергии любые первичные источники энергии, включая возобновляемые [2].

В условиях РГ при резкопеременном характере нагрузки потребителя малая протяженность линий электропередачи уменьшает колебания напряжения (выражение (1)), но ограничение по установленной мощности ГУ РГ снижает их динамическую устойчивость (выражение (2)).

Резкопеременная нагрузка присутствует во многих сферах деятельности, и решение вопросов организации ее электроснабжения по принципу РГ является актуальной проблемой.

Целью работы является обзор способов поддержания параметров режима системы электроснабжения с объектами РГ и потребителями, обладающими резкопеременным характером нагрузки.

Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах

Рассмотрим способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах.

Обязательным условием поддержания напряжения и частоты в сети в допустимых пределах является первичное регулирование, т.е. работа устройств автоматического регулирования возбуждения

(АРВ) и автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) синхронных генераторов электростанций. Для синхронного генератора реакция на резкопеременный характер нагрузки будет определяться наклоном регулировочных характеристик АРВ и АРЧВ, способом питания АРВ и пр.

Учитывая неизменное увеличение числа генерирующих установок инверторного включения, следует отметить в качестве первичного регулирования и алгоритмы управления сетевыми инверторами [3]. В основе управления сетевыми инверторами лежит принцип имитации синхронного генератора (droop method), поэтому реакция на скачкообразное изменение величины питаемой нагрузки будет определяться наклоном регулировочных характеристик по напряжению и частоте.

Рассмотрим способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах при вторичном регулировании.

Для поддержания отклонений и колебаний напряжения в допустимых пределах используются различные аппаратные и оперативные мероприятия.

В точке питания нескольких мощных электроприемников или потребителей существует возможность сглаживания группового графика нагрузки путем разнесения во времени максимумов их энергопотребления, а, значит, и уменьшения отклонений и колебаний напряжения. В точке питания потребителя с резкопеременным характером нагрузки или мощного электроприемника с повторно-кратковременным или кратковременным режимом работы такая возможность отсутствует.

Вопрос маневрирования графиками нагрузки предприятий подробно рассмотрен в работе [4]. Дифференцированный по зонам суток тариф на электроэнергию стимулирует потребителей сглаживать

профиль мощности. В качестве решения проблемы предложено смещать график нагрузки из зоны штрафного электропотребления в зону льготного электропотребления. Показано, что наиболее эффективное сглаживание графика нагрузки энергосистемы происходит при формировании индивидуальных графиков нагрузки потребителей по критерию наименьшей максимальной мощности.

Регулирование напряжения на шинах электростанций и подстанций по определенному закону (встречное регулирование напряжения, 5–8 % от номинального) осуществляют при помощи изменения коэффициента трансформации силовых трансформаторов [5]. Для этого трансформаторы оснащают устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), в том числе устройствами автоматического регулирования (АРН). Дискретность регулирования напряжения устройством РПН составляет 1,25–2,50 %, а диапазон регулирования ± 10 –16 % от номинального напряжения. При автоматическом регулировании напряжения в устройстве предусматривается зона нечувствительности, которая позволяет избегать слишком частых переключений РПН при работе мощных электроприемников. В силовых трансформаторах 6–20/0,4 кВ используется устройство переключения без возбуждения (ПБВ) с диапазоном регулирования напряжения ± 5 % и дискретностью 2,5 %.

Также в регулировании напряжения может участвовать вольтодобавочный трансформатор (ВДТ). Вторичная обмотка ВДТ последовательно подключается к вторичной обмотке силового трансформатора, как правило, автотрансформатора. ВДТ может выполнять функции РПН при его отсутствии на силовом трансформаторе. Линейные регулировочные трансформаторы (ЛРТ) используют при регулировании напряжения на линии электропередачи.

Применение установок продольной компенсации (УПК) позволяет уменьшить при возрастании тока в линии отклонение напряжения за счет компенсации индуктивного сопротивления емкостным. Последовательное включение УПК эффективно при больших значениях коэффициента реактивной мощности.

Вопрос применения УПК для компенсации реактивной мощности исследован в работе [6]. Для автоматического снижения колебаний и отклонений напряжения у электроприемников применяется продольная емкостная компенсация. Показано уменьшение размаха изменения напряжения в точке питания потребителя с резкопеременным характером нагрузки при помощи компенсации реактивной мощности. К недостаткам УПК относятся увеличение токов короткого замыкания из-за компенсации индуктивного сопротивления сети емкостным сопротивлением продольной конденсаторной батареи и необходимость защиты продольной конденсаторной батареи ее шунтированием.

Одним из эффективных способов поддержания параметров режима в допустимых пределах является использование накопителей электрической энергии (НЭЭ). [7–9]. НЭЭ получает энергию от сети при отсутствии резкопеременной нагрузки. При возобновлении питания резкопеременной нагрузки НЭЭ сглаживает профиль мощности. Очевидно, что для непрерывных технологических циклов такой способ является эффективным, если заряд НЭЭ будет осуществляться от автономного источника энергии малой мощности. В этом случае обязательным условием является восстановление уровня заряда НЭЭ за время отключения или сброса питаемой нагрузки.

Следует отметить несколько технических решений, касающихся сглаживания профиля мощности потребителя при

помощи НЭЭ и стабилизации параметров режима.

Практический интерес представляет устройство сглаживания пиков потребления электроэнергии [10]. Устройство работает по принципу разряда накопителя электроэнергии в часы пиковых нагрузок и заряда накопителя при сбросе нагрузки. К недостаткам устройства следует отнести невозможность сглаживания профиля мощности потребителя, если пиковому потреблению предшествовало прерывание внешнего электроснабжения, и уровень заряда накопителя недостаточен для компенсации увеличения электропотребления в течение всего временного интервала наброса нагрузки, а также невозможность уменьшения потребителем суммарной нагрузки на внешнюю систему электроснабжения.

В работе [11] описано применение НЭЭ для регулирования уровня генераторного напряжения. К шине генераторного напряжения (к ней подключены ГУ источников РГ) подключен управляемый накопитель электрической энергии НЭЭ. При достижении напряжением значения, ниже которого ГУ будут отключены релейной защитой (отключен генераторный выключатель), НЭЭ выдает реактивную мощность в сеть. Время выдачи мощности НЭЭ должно быть не меньше окончания самозапусков электродвигателей.

Обеспечение динамической устойчивости ГУ источников РГ при возникновении аварийных возмущений в сети рассмотрено в работе [12] и реализуются регулированием потребляемых и генерируемых активных мощностей. Потребление активной мощности регулируется подключением к шинам напряжения генератора переменного активного сопротивления (способ уменьшить скорость вращения ротора генератора). Генерация активной мощности регулируется подключением к шинам напряже-

ния генератора блока высоковольтных конденсаторов или НЭЭ (способ увеличить скорость вращения ротора генератора).

В работе [13] предложена САУ, регулирующая параметры режима промышленных энергорайонов с источниками РГ.

Задача изобретения — разработка системы автоматического ограничения снижения напряжения (АОСН), учитывающей особенности промышленных энергорайонов с источниками РГ. Система предотвращает снижение напряжения на шинах питающих подстанций до значений, при которых возникает «лавина напряжения» (не допустимых по условиям устойчивости). Система осуществляет для поддержания уровня напряжения следующие управляющие воздействия: автоматическое изменение коэффициентов трансформации силовых трансформаторов, форсировку выдачи реактивной мощности средствами компенсации реактивной мощности (батареи статических конденсаторов и др.), увеличение загрузки ГУ источников РГ по реактивной мощности и (или) активной мощности, отключение и включение нагрузок потребителей (в определенной последовательности и определенного объема). Выбор управляющих воздействий для каждого схемно-режимных условий осуществляется системой АОСН на основании результатов предварительного имитационного моделирования. Время осуществления управляющих воздействий АОСН составляет десятые доли секунды, что соответствует скорости развития «лавины напряжения» в энергорайонах с высокой долей двигательной нагрузки и источниками РГ.

Выводы

По результатам исследований выполнен обзор способов поддержания пара-

метров режима системы электроснабжения с распределенными источниками энергии в допустимых пределах при резкoпеременном характере нагрузки потребителей. К таким способам относятся маневрирование графиками нагрузки потребителей, автоматическое регулирование напряжения на шинах электростанций и подстанций, применение уста-

новок продольной компенсации или других устройств компенсации реактивной мощности, накопителей электрической энергии. Применение накопителей является перспективным способом регулирования параметров режима, однако для его распространения должны быть улучшены технико-экономические показатели установок.

Список источников

1. Султанов Г.А., Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Современные технологии проектирования систем электроснабжения // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 52. С. 224–228.

2. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Краткий словарь современной электроэнергетики. Нижний Новгород: ООО «Научно-издательский центр «21 век», 2021. 414 с. ISBN 978-5-6045837-7-7.

3. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrero J. M. A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 15935–15955. 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142810.

4. Чаус О.В. Исследование регулировочных возможностей промышленных потребителей по снижению максимума электрической нагрузки // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апреля 2008 года. Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2008. С. 172–174.

5. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.

6. Бакшаева Н.С., Вальц И.А. Анализ колебаний напряжения в системах электроснабжения с потребителями с резкoпеременной нагрузкой // Проблемы региональной энергетики. 2019. № 3(44). С. 1–16.

7. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Нестеренко Г.Б., Пранкевич Г.А. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. № 6 (148). С. 76–87. doi: 10.46920/2409-5516_2020_6148_76. EDN: YBOUHF.

8. Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопи-

телей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 4(37). С. 26–33. EDN: JSSGMJ.

9. Пат. 216305 РФ, МПК F 03 B 13/00, F 03 D 9/11, H 02 S 10/10. Устройство для сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции / С.В. Кривальцевич, Б.А. Косарев. 2022112680, Заявлено 05.05.2022; Оpubл. 27.01.2023. Бюл. No 3.

10. Пат. 200180 РФ, МПК H 02 J 3/06. Устройство сглаживания пиков потребления электроэнергии / К.А. Самойлов, А.И. Орлов. 2019143054, Заявлено 18.12.2019; Оpubл. 08.10.2020. Бюл. No 28.

11. Пат. 2721477 РФ, МПК H 02 J 3/28. Система управления накопителями электрической энергии для расширения области допустимых режимов генерирующих установок источников распределенной генерации при провалах напряжения / П.В. Илюшин, А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов. 2019139313, Заявлено 03.12.2019; Оpubл. 19.05.2020. Бюл. No 14.

12. Пат. 2576652 РФ, МПК H 02 P 9/08. Способ управления переходными электро механическими процессами в электроэнергетических системах / П.В. Илюшин, В.А. Макеечев, О.А. Суханов. 2014128322/07, Заявлено 11.07.2014; Оpubл. 10.03.2016. Бюл. 7.

13. Пат. 2715339 РФ, МПК G 05 F 1/30, H 02 H 3/24. Система автоматического ограничения снижения напряжения в промышленных энерго районах 6–220 кВ с источниками распределенной генерации / П.В. Илюшин, А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов. 2019138242, Заявлено 27.11.2019; Оpubл. 27.02.2020. Бюл. 6.

References

1. Sultanov G.A., Sazykin V.G., Kudryakov A.G. Sovremennye tekhnologii proektirovaniya sistem elektrosnabzheniya [Modern Technologies for Designing Power Supply Systems]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo univer-*

siteta — *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2015, No. 52, pp. 224–228. [in Russian].

2. Papkov B.V., Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Kratkii slovar' sovremennoi elektroenergetiki* [Brief Dictionary of Modern Electric Power Industry]. Nizhnii Novgorod, OOO «Nauchno-izdatel'skii tsentr «21 vek», 2021. 414 p. ISBN 978-5-6045837-7-7. [in Russian].

3. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrero J. M. A Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids. *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 15935–15955. 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142810.

4. Chaus O.V. Issledovanie regulirovochnykh vozmozhnostei promyshlennykh potrebiteli po snizheniyu maksimuma elektricheskoi nagruzki [Study of the Regulation Capabilities of Industrial Consumers to Reduce the Maximum Electrical Load]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, magistrantov i molodykh uchenykh «Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya»*, Gomel, 28–29 aprelya 2008 goda [Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference of Students, Masters and Young Scientists «Research and Development in the Field of Mechanical Engineering, Energy and Management», Gomel, April 28–29, 2008]. Gomel, Gomel'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni P.O. Sukhogo, 2008, pp. 172–174. [in Russian].

5. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. *Osobennosti raschetov rezhimov v energoraiionakh s raspredelennoi generatsiei* [Peculiarities of Regime Calculations in Energy Regions with Distributed Generation]. N. Novgorod: NIU RANKhiGS, 2018. 280 p. [in Russian].

6. Bakshaeva N.S., Val'ts I.A. Analiz kolebaniy napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya s potrebitelyami s rezkoperemennoi nagruzkoj [Analysis of Voltage Fluctuations in Power Supply Systems with Consumers with Sharply Variable Load]. *Problemy regional'noi energetiki — Problems of Regional Power Engineering*, 2019, No. 3 (44), pp. 1–16. [in Russian].

7. Zyryanov V.M., Kir'yanova N.G., Korotkov I.Yu., Nesterenko G.B., Prankevich G.A. *Sistemy nakopleniya energii: rossiiskii i zarubezhnyi opyt* [Energy Storage Systems: Russian and International

Experience]. *Energeticheskaya politika — Energy Policy*, 2020, No. 6 (148), pp. 76–87. doi: 10.46920/2409-5516_2020_6148_76. EDN: YBOUHF. [in Russian].

8. Ilyushin P.V., Kulikov A.L., Berezovskii P.K. Effektivnoe ispol'zovanie nakopitelei elektricheskoi energii dlya predotvrashcheniya otklyuchenii ob'ektov raspredelennoi generatsii pri kratkovremennykh otkloneniyakh chastoty [Effective Application of Electric Energy Storage for Prevention of Distributed Generation Units Tripping due to Short-Time Frequency Deviations]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya — Relay Protection and Automation*, 2019, No. 4 (37), pp. 26–33. EDN: JSSGMJ. [in Russian].

9. Krivaltsevich S. V., Kosarev B. A. *Ustroystvo dlya sglazhivaniya profilya moshchnosti KV-radiostantsii* [HF Radio Power Profile Smoothing Device]. Patent RF, No. 216305, 2023 [in Russian].

10. Samoylov K.A., Orlov A.I. *Ustroystvo sglazhivaniya pikov potrebleniya elektroenergii* [Device for Smoothing the Peaks of Electricity Consumption]. Patent RF, No. 200180, 2020. [in Russian].

11. Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Loskutov A. A. *Sistema upravleniya nakopitelyami elektricheskoy energii dlya rasshireniya oblasti dopustimyykh rezhimov generiruyushchikh ustanovok istochnikov raspredelennoy generatsii pri provalakh napryazheniya* [The Control System for Electric Energy Storage Devices to Expand the Range of Permissible Modes of Generating Installations of Distributed Generation Sources in Case of Voltage Dips]. Patent RF, No. 2721477, 2020. [in Russian].

12. Ilyushin P. V., Makeychev V. A., Sukhanov O. A. *Sposob upravleniya perekhodnymi elektromekhanicheskimi protsessami v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Method for Controlling Transient Electromechanical Processes in Electric Power Systems]. Patent RF, No. 2576652, 2016. [in Russian].

13. Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Loskutov A. A. *Sistema avtomaticheskogo ogranicheniya snizheniya napryazheniya v promyshlennykh energorayonakh 6-220 kV s istochnikami raspredelennoy generatsii* [System for Automatic Limitation of Voltage Reduction in Industrial Energy Districts 6-220 kV with Sources of Distributed Generation]. Patent RF, No. 2715339, 2020. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 02.10.2023.

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 02.10.2023.