

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.26 / L94

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С КОМБИНИРОВАННЫМ СОСТАВОМ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Червонченко С.С., Фролов В.Я.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
sergeychervonchenko@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Проанализировать научно-техническую информацию и практический опыт особенностей функционирования автономных электротехнических комплексов с асинхронными электродвигателями в составе. Разработать математическую модель автономного электротехнического комплекса (далее - ЭТК) буровой установки с наличием в составе активного выпрямителя, инвертора с управлением широтно-импульсными сигналами, а также комбинированными источниками резервного питания – аккумуляторной батареей и дизель-генераторной установкой. Установить влияние и целесообразность использования комбинированного состава источников резервного питания на надежную работу и возможность преодоления провала напряжения, вызванного резким ростом нагрузки, в установившемся режиме работы ЭТК. *МЕТОДЫ.* Для успешного выполнения поставленных задач в работе использованы методы математического моделирования систем, электроснабжения, имитационного моделирования, применены теории автоматического управления, автоматизированного электропривода, электрических цепей. Для создания математической компьютерной модели и для обработки данных, полученных аналитическим путем, использовался программный комплекс MATLAB со встроенной средой графического моделирования Simulink. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы исследования. Приведены критерии выбора состава источников резервного питания. Разработаны математические и имитационные модели автономного ЭТК по схеме «источник питания-преобразователь частоты-промышленная нагрузка», учитывающие влияние нелинейной нагрузки на заданные показатели качества электроэнергии. Разработана структура автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом источников резервного питания, позволяющая преодолеть провал напряжения в сети, вызванный резким набросом нагрузки, с обеспечением требуемых показателей качества электроэнергии. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложена новая структура построения источников резервного питания в автономных электротехнических комплексах буровых установок, позволяющая эффективно преодолеть аварийные набросы нагрузки в электрической системе. Применение аккумуляторной батареи позволяет повысить порог перегрузки основной дизель-генераторной установки с регламентируемых ГОСТ Р 53987-2010 с 30% до 60%, а также обеспечить надежное подключение резервной дизель-генераторной установки без прерывания технологических процессов.

Ключевые слова: провал напряжения; аккумуляторная батарея; дизель-генераторная установка; автономный комплекс; активный выпрямитель; управляемый инвертор.

Благодарности: Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта 20-38-90038.

Для цитирования: Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 90-104. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104.

RESEARCH OF THE OPERATION OF AN AUTONOMOUS ELECTRICAL COMPLEX WITH A COMBINED COMPOSITION OF BACKUP POWER SOURCES

SS. Chervonchenko¹, VYA. Frolov¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia
sergeychervonchenko@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* To analyze scientific and technical information and practical experience of the functioning of autonomous electrical complexes with asynchronous electric motors in the composition. To develop a mathematical model of an autonomous electrical complex of a drilling rig with the presence of an active rectifier, an inverter with pulse-width control signals, as well as combined backup power sources – a battery and a diesel generator set. To establish the influence and expediency of using a combined composition of backup power sources on reliable operation and the possibility of overcoming the voltage failure caused by a sharp increase in load in the steady-state operation of an autonomous electrical complex. *METHODS.* For the successful fulfillment of the tasks set, this study applied the methods of mathematical modeling of power supply systems, methods of simulation modeling, the theories of automatic control, automated electric drive, and electrical circuits. Also, in research used the MATLAB software package with the built-in Simulink graphic modeling environment to create a mathematical computer model and to process the data obtained analytically. *RESULTS.* The article describes the relevance of the research topic. The study provides criteria for choosing the composition of backup power sources. Mathematical and simulation models of an autonomous ETC have been developed according to the “power source-frequency converter-industrial load” scheme, taking into account the influence of a non-linear load on the specified power quality indicators. The study has developed the structure of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources, which allows to overcome the voltage drop in the network caused by a sharp load surge, while ensuring the required indicators of electricity quality. *CONCLUSIONS.* The use of a rechargeable battery makes it possible to increase the overload threshold of the main diesel generator set regulated by GOST R 53987-2010 from 30% to 60%, as well as to ensure reliable connection of a backup diesel generator set without interrupting technological processes.

Keywords: Voltage failure; battery; diesel generator set; autonomous complex; active rectifier; controlled inverter.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90038.

For citation: Chervonchenko SS, Frolov VYA. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):90-104. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104.

Введение

Автономный электротехнический комплекс – это комплекс технического оборудования, включающий в свой состав источники электрической энергии, распределительные устройства, распределительные сети и потребителей электроэнергии, объединенных общей системой управления, и выполняющий задачу обеспечения потребителей электрической энергией требуемого количества и качества во всех режимах функционирования объекта электроснабжения.

Степень разработанности темы исследования

Научным и практическим исследованиям в области устойчивой работы автономных электротехнических комплексов посвящены работы многих ученых, в том числе Абрамовича Б.Н., Пронина М.В., Сулова К.В., Меньшова Б.Г., Шонина О.Б. Также особое внимание уделяется разработкам различных инновационных методов оптимизации автономных систем электроснабжения учеными В.В. Елистратовым, И.Ю. Ивановой, Д.Н. Карамовым. Однако, несмотря на значительный объем работ в данной области, в работах всех вышеперечисленных авторов не уделяется должного внимания анализу переходных процессов в автономных системах при провалах напряжения в различных режимах (запуск либо установившийся режим), с различным составом преобразовательного устройства, а также с различными источниками резервного питания.

Научная новизна

Обоснована эффективность использования комбинированного состава источников резервного питания, а также алгоритма их использования в автономных электротехнических комплексах для наиболее эффективного преодоления провалов напряжения с учетом оптимизации технических и финансовых затрат на основе разработанных математических моделей ЭТК.

Практическая новизна

Разработана структура автономного электротехнического комплекса, позволяющая наиболее эффективно преодолеть провалы напряжения, а также обеспечить переход от основного источника питания к резервному с обеспечением непрерывности технологических процессов, а также повышением в 2 раза допустимой перегрузки системы.

Автономные электротехнические комплексы используются в отдаленных районах, куда провести централизованное электроснабжение технически сложно и экономически невыгодно [1,2]. Районы с децентрализованным (автономным) электроснабжением находятся преимущественно на севере и северо-востоке Российской Федерации и занимают порядка 60% процентов территории страны. Именно на эти территории приходится добыча около 70% нефти, 90% природного газа, 90% драгоценных металлов и камней [3]. Согласно имеющимся данным [4], в изолированных районах общее количество источников генерации составляет примерно 5000 шт., суммарной мощностью около 2500 МВт.

Системы автономного электроснабжения могут быть разделены по нескольким категориям в зависимости от критериев оценки:

1. По назначению и характеру потребителей:

- обеспечивающие электроснабжение технологических потребителей (промышленное производство и т.п.);
- обеспечивающие вспомогательные потребности промышленных объектов (производственные и коммунально-бытовые нужды).

2. По режиму работы:

- основные - электростанции с наработкой за год более 3000 часов, с числом пусков за год менее 20, временем непрерывной работы более 350 часов, временем пуска и приема 100 % нагрузки до 30 минут;
- резервные - электростанции с наработкой за год от 200 до 3000 часов, числом пусков от 20 до 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки не более 5 минут;
- аварийные - электростанции с наработкой за год до 200 часов, числом пусков за год свыше 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки от 5 до 30 секунд. Предназначены для аварийного электроснабжения потребителей 1 категории (особой группы), для которых перерыв в электроснабжении допустим только на время действия АВР, при отключении основного или резервного источника питания.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ-7), электрифицированные буровые установки (с электрическим приводом основных исполнительных механизмов) при бурении на глубину более 4500 м и в сложных геологических условиях на меньшую глубину, а также буровые установки на море относятся к потребителям первой категории. Соответственно для потребителей первой и первой особой категорий должно выполняться условие по электроснабжению от двух независимых источников питания, причем перерыв в электроснабжении допускается только на время автоматического ввода резервного питания.

Особенности автономных систем электроснабжения

Автономные электротехнические комплексы – это системы, у которых электрофизические параметры источников энергии и потребителей, входящих в комплекс, соизмеримы [5].

Согласно ГОСТ Р 53987-2010 мощность автономных электростанций делится на несколько типов:

- Длительная мощность — это максимальная мощность электроагрегата при работе на постоянную нагрузку без ограничения времени работы за год с перерывами на техническое обслуживание.

- Основная мощность – это максимальная мощность электроагрегата при работе на переменную нагрузку без ограничения времени работы в течение года с перерывами на техническое обслуживание. Выбирается с запасом 30% по отношению к мощности нагрузки, причем использование 100% мощности генератора ограничено по времени, на которое дополнительно накладываются перерывы на техническое обслуживание

установки.

- Аварийная резервная мощность – это максимальная полезная мощность, которую электроагрегат может развивать в определенных условиях эксплуатации при работе на изменяющуюся электрическую нагрузку и обеспечивать ее в течение 200 ч в год с перерывами на техническое обслуживание.

Автономные системы электроснабжения описываются следующими характерными условиями работы:

- неравномерность графика электрической нагрузки, которая влияет на агрегатный состав источников питания [6]. Условно-постоянная часть графика электрической нагрузки может составлять, как правило, до 30%. В связи с этим необходимо выбирать мощность и количество агрегатов электростанции таким образом, чтобы было обеспечено максимально эффективное соотношение между количеством потребителей электроэнергии и источников питания;

- ограниченные ресурсы по вариативности мощности. В централизованной энергосистеме, в отличие от автономной, присутствует значительное количество источников, что обеспечивает достаточные возможности для маневра генерирующими мощностями;

- электроагрегаты таких систем вследствие постоянной изменчивости режимов работы имеют гораздо меньший ресурс работы по сравнению с электрическими станциями большой энергетики, поэтому данные электроагрегаты, основываясь на инструкции заводов-изготовителей, требуют частого проведения технического обслуживания. А так как для потребителей в автономных системах добывающей промышленности необходимо бесперебойное электроснабжение вследствие их категоричности и непрерывности технологических процессов, то необходимо предусматривать соответствующие технические решения по обеспечению электроснабжения потребителей от других источников;

- соизмеримость величины мощности потребителей с источниками питания, что накладывает определенные ограничения на величину мощности потребителя, подключаемого к автономной системе;

- наличие мощных потребителей (асинхронных и синхронных электрических двигателей), пусковые токи которых от 2-3 до 7 раз превышают номинальный ток;

- наличие нелинейных элементов. Нелинейная нагрузка приводит к возникновению тока в нулевом проводе, что приводит к его нагреву и может быть причиной пожаров и т.п. Потому в данных электроустановках необходимо использовать нейтральный провод большего сечения, чем фазные;

- возможная несимметричность нагрузки по фазам. В автономной системе практически невозможно обеспечить симметричную нагрузку по фазам, что связано с относительно незначительным количеством потребителей и разностью их установленных мощностей. Заводы-изготовители источников питания автономных систем электроснабжения допускают перекас фаз до 20%, однако нормативно-техническая документация подразумевает допустимое отклонение коэффициента несимметрии – 2%, предельное – 4%;

- построение структуры электроснабжения автономных электротехнических комплексов (в основном радиальные схемы) [7]. Магистральные схемы не применяются из-за соизмеримой мощности нагрузки и источников, кольцевые из-за невозможности в реализации и сложности настройки защит.

Выбор количества и мощности дизель-электрических агрегатов

Выбор дизель-электрических агрегатов [8] для электротехнических комплексов с электроприводами как переменного, так и постоянного тока, как правило, должен производиться с учетом возможности автоматизированного запуска за минимально короткое время и способности агрегата работать длительное время без обслуживающего персонала, что соответствует 3 степени автоматизации дизель-электрических агрегатов.

Необходимая мощность электрического комплекса рассчитывается по общей расчетной максимальной нагрузке (1), создаваемой потребителями:

$$P_{\max}^{\text{расч}} = \frac{P_{\max} k_{\text{потерь}}}{k_{\text{с.н.}}} \quad (1)$$

где P_{\max} - суммарная мощность нагрузки, кВт; $k_{\text{потерь}}$ – коэффициент потерь мощности ($k_{\text{потерь}}=1,05-1,10$); $k_{\text{с.н.}}$ – коэффициент потерь мощности на собственные нужды ($0,95 \div 0,97$).

Суммарная установленная мощность рабочих дизель-генераторов должна быть

больше или равна максимальной расчетной нагрузке $P_{\max}^{\text{расч}}$ с учетом собственных нужд станции и потерь мощности в электросетях, так как работа электростанции с большой недогрузкой недопустима. Дизельные двигатели не допускают длительную работу на нагрузках менее 25÷30% их номинальной мощности.

Общее количество дизель-генераторов, устанавливаемых в постоянно действующих ДЭС, определяется в соответствии с графиками нагрузок и принятой схемой электроснабжения, а также числом рабочих и резервных агрегатов. Мощность резервного агрегата принимается равной мощности рабочего. В отдельных случаях, при технико-экономических обоснованиях, допускается установка нескольких резервных агрегатов, либо агрегата с меньшей мощностью.

Особенности выбора и применения дизель-генераторов в автономных электротехнических комплексах:

- необходимо учитывать, что стоимость оборудования ДЭС достаточно высока, необходимо выносить потребителей I и II категории особой группы на отдельную секцию шин, чтобы минимизировать установленную мощность ДЭС и, соответственно, финансовые затраты;

- при питании от ДЭС индуктивные сопротивления ДЭС x_d и x_q гораздо больше, чем x_k трансформатора, поэтому короткие замыкания сопровождаются провалом напряжения и частоты, ударный ток КЗ гораздо меньше, соответственно, меньше и установившееся значение тока КЗ. Поэтому для таких систем должна быть предусмотрена максимальная токовая защита (МТЗ) с пуском по минимальному напряжению и автоматический выключатель должен иметь встроенный нулевой расцепитель и независимый расцепитель.

Проблемы провалов напряжения в автономных электротехнических комплексах

Одним из важнейших вопросов надежного электроснабжения является обеспечение потребителей качественной электроэнергией. От качества электрической энергии зависит производительность поставляемого оборудования и эффективность его функционирования. Все показатели качества электроэнергии в электрических сетях устанавливаются отраслевыми стандартами и другими нормативными документами. Различные показатели качества электроэнергии по-разному влияют на работу технических систем.

Согласно ГОСТ 32144-2013, провал напряжения – это временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения. Провалы напряжения бывают симметричными и несимметричными. При симметричном провале происходит одинаковое снижение напряжения в сети во всех фазах, причиной являются трехфазные короткие замыкания либо пуск мощных трехфазных потребителей. К несимметричным относятся все остальные типы провалов, в основном они вызываются неравномерным подключением нагрузки по фазам либо однофазными и двухфазными короткими замыканиями [9].

Возникновению провалов напряжения в электрических сетях способствуют множество факторов [10-12]. Это и высокий уровень загрязнения изоляции, механические повреждения, прикосновение к токоведущим частям сторонними предметами, а также природными воздействиями, такими как удары молний, ошибки обслуживающего персонала. При включении мощных потребителей электроэнергии, пуске асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором происходит снижение (провалы) частоты и напряжения источника [13]. Это отражается на характере работы остальных потребителей. Снижение напряжения в системе ниже допустимого уровня может дополнительно привести к отключению контакторов нулевой защитой (защитой по минимальному напряжению). Также провалы напряжения могут возникать из-за запуска мощных приемников на предприятии или, например, на соседнем производстве в той же распределительной сети, из-за работы устройства автоматики повторного включения, изменения нагрузки оперативными либо технологическими переключениями.

Проблема обеспечения непрерывного режима электроснабжения автономных электрических сетей ограниченной мощности в основном связана с удаленностью сложившихся перспективных месторождений от централизованных энергосистем, территориальной рассредоточенностью производственных объектов и непрерывностью основных технологических процессов.

Не всегда удается улучшить качественные характеристики сети, чтобы исключить провалы напряжения. Причем в автономных системах электроснабжения технические, технологические, экономические, географические, климатические факторы оказывают

влияние на выбор типов (технологий) применяемых источников резервного питания. Важную роль здесь играет взаимодействие и слаженная работа средств технологической автоматизации с автоматикой системы электроснабжения.

Провалы напряжения даже небольшой длительности могут приводить к огромным ущербам для предприятий и отраслей промышленности, в которых присутствуют непрерывные технологические процессы. Для производств, где основу оборудования составляют электродвигатели, провал напряжения приводит к уменьшению величины момента и скорости вращения двигателей, что особенно негативно сказывается на предприятиях с непрерывным производственным процессом. Вдобавок при временном снижении напряжения возможен перегрев обмоток двигателей вследствие повышения потребляемого тока.

Чувствительны к провалам напряжения и магнитные пускатели, точнее их катушки, которые выполняют удерживающую функцию. При провале величиной ниже 80% от номинального напряжения магнитный пускатель размыкается, тем самым прерывается электроснабжение непосредственно преобразователя и размыкается электрическая цепь.

Различают следующие устройства и способы, защищающие электрооборудование от провалов напряжения: преодоление провалов системой электропривода, устройство защиты от потери питания, маховик, статический источник бесперебойного питания (ИБП), динамический компенсатор искажений напряжения, статический компенсатор (СТАТКОМ), параллельно работающая ДЭС, повышающий преобразователь, активный фильтр и бестрансформаторный последовательный усилитель [14-16].

Материалы и методы

В качестве основной нагрузки автономного электротехнического комплекса буровой установки для исследования таких режимов взят один из наиболее распространенных в добывающей промышленности электродвигателей - 5AMH315M2, расчетные параметры которого приведены в формулах 2 – 11.

Полная мощность электродвигателя S_n , кВА (2):

$$S_n = \frac{P_n}{\cos f \cdot \frac{\eta}{100}} \quad (2)$$

где P_n - номинальная мощность электродвигателя, $P_n=250$ кВт;

$\cos f$ – коэффициент мощности, $\cos f=0,92$;

η – коэффициент полезного действия, $\eta=95,5$ %.

$$S_n = \frac{250}{0,92 \cdot \frac{95,5}{100}} = 284,5 \text{ кВА}$$

Номинальное скольжение sn (3):

$$sn = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3)$$

где n_1 – синхронная частота вращения, $n_1=3000$ об/мин;

n – номинальная частота вращения, $n=2975$ об/мин.

$$sn = \frac{3000 - 2975}{3000} = 0,0083$$

Номинальный ток обмотки статора I_{1n} , А: (4):

$$I_{1n} = \frac{P_n}{m_1 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos f} \quad (4)$$

где m_1 – число фаз, $m_1=3$;

U_1 – фазное напряжение электродвигателя, $U_1=220$ В;

$$I_{1n} = \frac{250000}{3 \cdot 220 \cdot 0,955 \cdot 0,92} = 431 \text{ А}$$

Предварительное активное сопротивление статора r_{10} , Ом: (5):

$$r_{10} = \frac{U_1 \cdot I_{1n} \cdot \cos f - \frac{M_n \cdot \omega}{m_1 \cdot p}}{I_{1n}^2} \quad (5)$$

где M_n – номинальный момент электродвигателя, $M_n=803 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
 ω – угловая частота, $\omega=314 \text{ рад/с}$;
 p – количество пар полюсов, $p=1$.

$$r_{10} = \frac{220 \cdot 431 \cdot 0,92 - \frac{803 \cdot 314}{3 \cdot 1}}{431^2} = 0,017 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление ротора r_2 , Ом: (6):

$$r_2 = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot sn}{M_n \cdot \omega \cdot c_1^2} \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{3 \cdot 1 \cdot 220^2 \cdot 0,0083}{803 \cdot 314 \cdot 1,034^2} = 0,0043 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение sm : (7):

$$sm = \frac{sn}{A} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A}) \quad (7)$$

где A – расчетный коэффициент, $A=0,907$;

λ – коэффициент магнитной проводимости, $\lambda=2,5$;

$$sm = \frac{0,0083}{0,907} \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 0,907}) = 0,044$$

Активное сопротивление статора r_1 , Ом: (8):

$$r_1 = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot \lambda \cdot M_n} - \frac{c_1 \cdot r_2}{sm} \quad (8)$$

$$r_1 = \frac{3 \cdot 1 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 2,5 \cdot 803} - \frac{1,054 \cdot 0,0043}{0,044} = 0,012 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора x_k , Ом: (9):

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{c_1 \cdot r_2}{sm}\right)^2 - r_1^2} \quad (9)$$

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{1,054 \cdot 0,0043}{0,044}\right)^2 - 0,012^2} = 0,102 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания x_m , Ом: (10):

$$x_m = \frac{1}{c_1 \cdot I_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos f^2}{U_1} - b(sn)}} \quad (10)$$

где $b(sn)$ – реактивная составляющая комплексной проводимости, $b(sn)=0,301$;

$$x_m = \frac{1}{1,054 \cdot 431 \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,92^2}{220} - 0,301}} = 1,968 \text{ Ом}$$

Индуктивность цепи намагничивания L_μ , Гн: (11):

$$L_\mu = \frac{x_m}{\omega} \quad (11)$$

$$L_\mu = \frac{1,968}{314} = 0,0063 \text{ Гн}$$

Произведем выбор емкости аккумуляторной батареи САБ, Ач (12):

$$C_{\text{АБ}} \geq \frac{I_{\text{АБ}} \cdot t_{\text{АБ}}}{K_g \cdot K_p} \quad (12)$$

где $I_{\text{АБ}}$ – ток, потребляемый от АБ в период нагрузки, А;

$t_{\text{АБ}}$ – время работы АБ в период нагрузки, $t_{\text{АБ}} = 0,5 \text{ ч}$, учитывая особенности работы и ответственность потребителей, а также время запуска резервной дизель-генераторной установки;

Kg – коэффициент доступной емкости, 0,9...1 о.е.;

Kp – коэффициент глубины разряда аккумулятора, 0,5...0,7 о.е.

Величина тока, потребляемого от АБ в период нагрузки I_{AB} , А (13):

$$I_{AB} = \frac{P_{нагр}}{\eta_{и} \cdot U_{AB}} \quad (13)$$

где $P_{нагр}$ – средняя мощность нагрузки, Вт;

$\eta_{и}$ – КПД преобразования постоянного тока в переменный с помощью инвертора, 0,9...0,95;

U_{AB} – номинальное напряжение АБ, В.

$$I_{AB} = \frac{500000}{0,93 \cdot 380} = 1414,8 \text{ А}$$

$$C_{AB} \geq \frac{1414,8 \cdot 0,5}{0,95 \cdot 0,6} = 1241 \text{ Ач}$$

Исходя из полученного значения необходимой величины емкости аккумуляторной батареи 1241 Ач, принимается ближайшее значение из каталогов заводов-изготовителей в 1500 Ач (12 OPzS 1500).

Согласно ГОСТ Р 53987-2010, номинальная (основная) мощность генераторов переменного тока выбирается с запасом 30% по отношению к мощности нагрузки. Так как в качестве обобщенной нагрузки автономного электротехнического комплекса буровой установки принимаются два электродвигателя 5AMH315M2, суммарной мощностью 500 кВт. Следовательно, номинальная мощность основного источника питания должна быть не меньше 650 кВт.

Процесс провала напряжения, что соответствует застреванию оборудования в глубоких слоях земли, моделируется блоком «Step», который подает в определенный период времени сигнал на наброс нагрузки на электродвигатели. Величина задаваемой нагрузки различна и зависит от показателей трех измеряемых параметров: ток статора, скорость вращения ротора и электромагнитный момент на валу ротора.

Для исследования провалов напряжения и поиска оптимального состава источников резервного питания в программном комплексе *MATLAB/Simulink* строится математическая модель автономного электротехнического комплекса, представленная на рисунке 1. Модель состоит из следующих основных элементов:

- основной источник питания – дизель-генераторная установка;
- резервные источники питания – аккумуляторная батарея и дизель-генераторная установка;
- активный выпрямитель с системой управления;
- управляемый инвертор с ШИМ;
- нагрузка – два асинхронных электродвигателя с измерительными блоками.

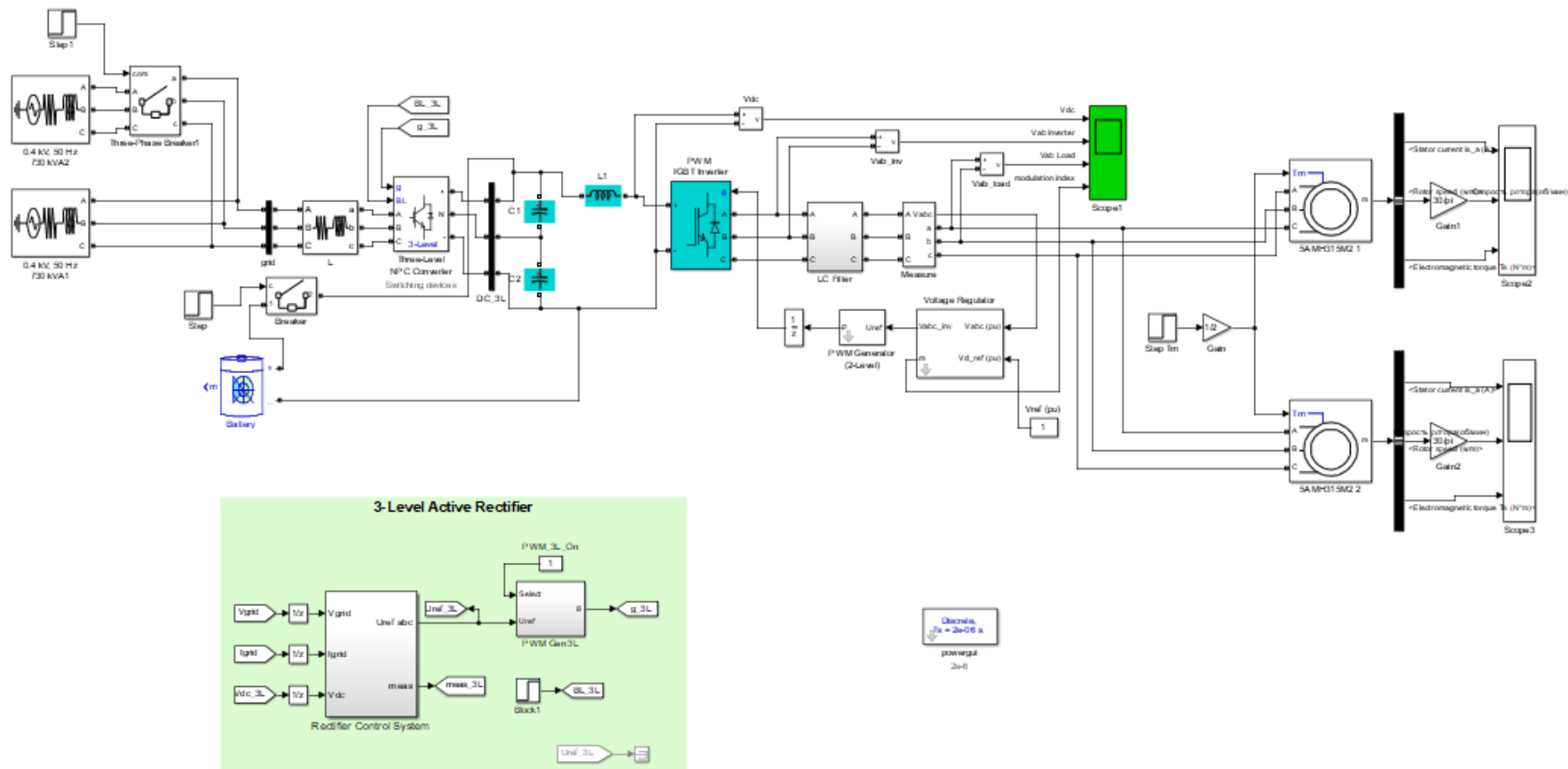


Рис. 1. Модель автономного электротехнического комплекса с двумя электродвигателями и резервными источниками питания и активным выпрямителем напряжения.

Fig. 1. Model of an autonomous electrical complex with two electric motors and backup power sources and an active voltage rectifier.

Результаты и обсуждение

В начальный момент времени происходит запуск двух электродвигателей основной нагрузки 5AMH315M2, которые выходят на номинальную скорость вращения примерно через 2 секунды и продолжают работать в таком режиме ещё 1 секунду для исключения влияния каких-либо колебаний переходных процессов на результаты моделирования. В момент времени $t=3$ секунды от блока «Step» поступает управляющее воздействие на наброс нагрузки в виде увеличения электромагнитного момента на валу двух электродвигателей. В тот же момент времени $t=3$ секунды происходит подключение аккумуляторной батареи, а также команда на запуск резервной дизель-генераторной установки. Процесс запуска и разгона ДГУ имитируется блоком задержки, подключение в сеть происходит в момент времени $t=5$ секунд и режим работы продолжается до временной отметки $t=8$ секунд. Результаты моделирования представлены на рисунках 2-5.

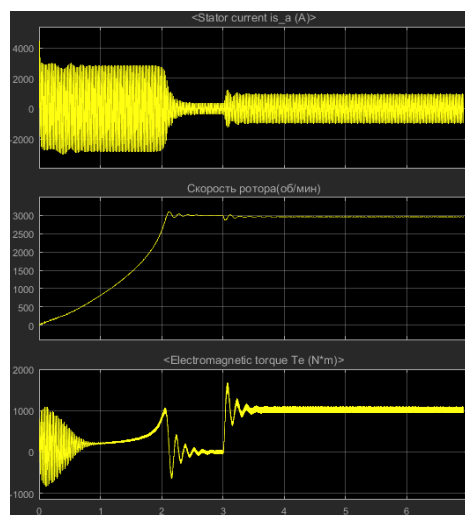


Рис. 2. Наброс нагрузки $T_m=1000$ Н·м в момент времени $t=3$ секунды. *Fig. 2. Load surge $T_m=1000$ N·m at time $t=3$ seconds.*

Верхний график на рисунке 2 показывает изменение величины силы тока на статоре. Видно, что во время разгона двигателя ток максимальный, затем снижается до номинального значения и в момент наброса нагрузки при $t=3$ секунды происходит увеличение до значения примерно 1200 А. На втором графике представлена скорость вращения ротора электродвигателя, и так как скорость держится на уровне 3000 об/мин, можно сделать вывод об успешном преодолении наброса нагрузки величиной $T_m=1000$ Н·м. Нижний график показывает величину электромагнитного момента, приложенного к электродвигателю.

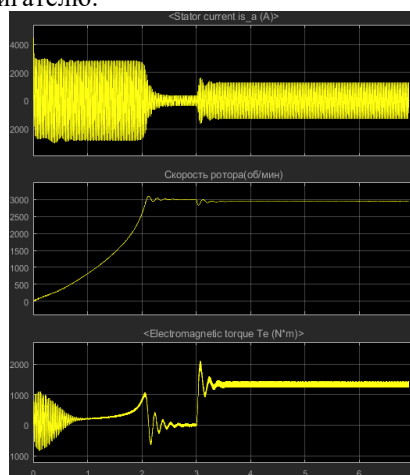


Рис. 3. Наброс нагрузки $T_m=1300$ Н·м в момент времени $t=3$ секунды. *Fig. 3. Load surge $T_m=1300$ N·m at time $t=3$ seconds.*

На верхнем графике видно, что ток статора во время наброса нагрузки 130% от номинальной мощности двигателя достигает значения порядка 1750 А. Скорость

вращения двигателя остается в пределах номинального значения. Соответственно система успешно преодолела данный наброс нагрузки.

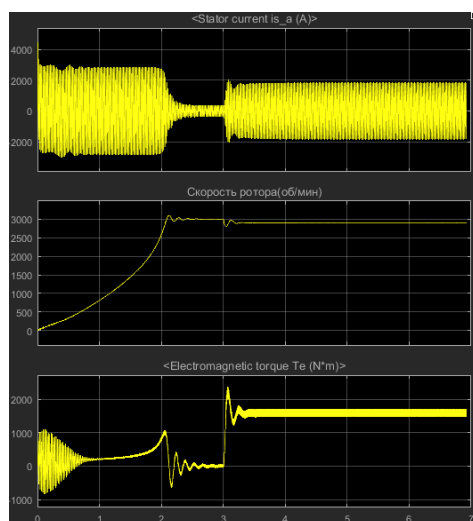


Рис. 4. Наброс нагрузки $T_m=1600$ Н·м в момент времени $t=3$ секунды.

Fig. 4. Load surge $T_m=1600$ N·m at time $t=3$ seconds.

Первый график показывает, что ток статора в установившемся режиме с дополнительной нагрузкой $T_m=1600$ Н·м составляет приблизительно 2000 А. Скорость вращения ротора немного уменьшилась, но система в целом проходит данный утяжеленный режим.

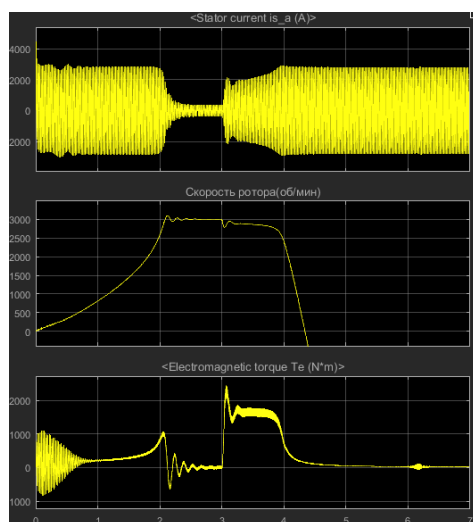


Рис. 5. Наброс нагрузки $T_m=1700$ Н·м в момент времени $t=3$ секунды.

Fig. 5. Load surge $T_m=1700$ N·m at time $t=3$ seconds.

На первом графике видно, что после наброса нагрузки ток статора начинает увеличиваться к пусковым значениям, тем самым показывая, что системе не хватает мощности для нормальной работы с соответствующей нагрузкой. Скорость вращения ротора уже через секунду после наброса нагрузки показывает резкое падение к нулевым значениям, что характерно режиму с застреванием нагрузочных технологических механизмов. Соответственно такая величина нагрузки является критичной для комбинированного состава источников резервного питания с предложенными техническими характеристиками.

Сравнение проведенных расчетов режимов (рис. 2-5) в соответствии с выбранным алгоритмом действий и предложенным составом источников резервного питания показывает, что работа аккумуляторной батареи в переходный процесс переключения между основной и резервной дизель-генераторными установками позволяет преодолеть провал напряжения, вызванный резким набросом нагрузки.

Согласно представленным ранее расчетам АБ емкость аккумуляторной батареи

выбирается на непродолжительный режим работы, процесс активного разряда принимается длительностью $t=0,5$ ч, для обеспечения непрерывности технологического процесса при переключениях между источниками питания, длительность которого несколько секунд, но требует от АБ высоких емкостных характеристик. И как видно из рисунков, наибольшая нагрузка на валу двигателя во время разгона составляет примерно $T_m=1000$ Н·м, принимаем что это величина соответствует номинальной мощности нагрузки, так как именно пусковой режим является наиболее тяжелым для электродвигателей. Согласно ГОСТ Р 53987-2010, номинальная (основная) мощность генераторов переменного тока выбирается с запасом 30% по отношению к мощности нагрузки. Как видно из рисунка 3, увеличение мощности нагрузки на 30% не приводит к провалу напряжения, что отобразилось бы на снижении скорости вращения электродвигателя нагрузки. В момент наброса нагрузки $t=3$ секунды происходит некоторое снижение скорости вращения, однако включение аккумуляторной батареи предотвращает дальнейшее ухудшение режима.

Согласно графикам, представленным на рисунке 4, предлагаемый комбинированный состав источников резервного питания помогает преодолеть наброс нагрузки в 60% от номинальной мощности системы, что в два раза выше чем предельная заявленная перегрузочная способность генераторов. Как видно из второго графика на рисунке 4, снижение скорости вращения электродвигателя, а равно как и провал напряжения в системе, останавливается, а затем и компенсируется работой аккумуляторной батареи, которая поддерживает нормальный режим в течение 2 секунд перегрузки, пока запускается резервный дизель-генератор, и который потом берет на себя всю основную нагрузку.

В то же время повышение нагрузки выше 60 % (рис. 5) является критичным для аккумуляторной батареи, емкость которой уже не способна обеспечить требуемые параметры системы, и батарея разряжается быстрее чем за 2 секунды, не успевая «передать» нагрузку на резервную дизель-генераторную установку.

Сравнение результатов данного исследования с результатами аналогичных исследований

В работе (Шонин О.Б., Иванова Т.С. Обеспечение устойчивой работы частотно-регулируемого привода шахтной подъемной установки при провалах напряжения / О.Б. Шонин, Т.С. Иванова // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 6. С. 53-67) для преодоления провалов напряжения оборудования добывающей промышленности предлагается к использованию суперконденсатор с системой управления. Данное устройство рассчитано на поддержание рабочего состояния нагрузки мощностью 315 кВт. Длительность провала напряжения взята 100 мс или 0,1 секунду. Однако в большинстве случаев в добывающей промышленности из-за особенностей работы провалы напряжения более длительные, а нагрузка при этом может превышать примерно в 2 раза установленную мощность электродвигателей. Применительно использования суперконденсатора в текущей работе можно сделать вывод, что данное устройство не сможет обеспечить требуемые параметры по мощности в системе, учитывая переходный режим длительностью 2 секунды при переключении между основной и резервной дизель-генераторными установками.

В другой работе (Шонин О.Б. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети / О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 11(2). С. 507-519) предлагается преодолевать провалы напряжения с помощью использования модернизированной системы управления асинхронного электропривода. Исследуется провал напряжения в установившемся режиме, после разгона электродвигателя. Данный способ позволяет компенсировать провал напряжения величиной 100% и длительностью 1 секунда. Однако в текущей работе исследуются провалы напряжения в более мощных двигателях, и такое техническое решение для высокомоментных двигателей применимо только как дополнительный способ совместно с резервным источником питания.

Выводы

Предложена новая структура построения источников резервного питания в автономных электротехнических комплексах буровых установок, позволяющая эффективно преодолеть аварийные набросы нагрузки в системе, которые приводят к провалам напряжения.

Применение аккумуляторной батареи позволяет повысить порог перегрузки основной дизель-генераторной установки с регламентируемых ГОСТ 30% до 60%, а также

обеспечить надежное подключение резервной дизель-генераторной установки без прерывания технологических процессов.

Применительно к автономным электротехническим комплексам добывающей промышленности такая комбинированная структура источников резервного питания подходящих аналогов не имеет, редко встречается применение схожих систем для питания бытовых потребителей.

Представлено сравнение предложенного состава источников питания и способа преодоления провалов напряжения с другими известными и предлагаемыми вариантами, доказана большая универсальность и эффективность.

Литература

1.Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П. Развитие малой энергетики на северо-востоке России: проблемы, эффективность, приоритеты // Труды Международной научно-практической конференции «Малая энергетика – 2006», 21-24 ноября 2006 г., Москва. М.: ОАО «Малая энергетика», 2006. 370 с.

2.Tan Y., Meegahapola L., Muttaqi K. M. A review of technical challenges in planning and operation of remote area power supply systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. V.38. pp. 876–889.

3.Башмаков И.А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. 2017. № 2. С. 46-53.

4.Елистратов В. В. Энергетическое снабжение изолированных территорий России // Академия энергетики. 2015. № 4(66). С.26-33.

5.Mazidi P., Sanz Bobi M.A. Strategic maintenance scheduling in an islanded microgrid with distributed energy resources // Electric Power Systems Research. 2017. V. 148. pp. 171-182.

6.Черемисин В.В. Исследование и построение суточных графиков активных нагрузок на шинах подстанции // Прорывные научные исследования как двигатель науки. Уфа: ООО «Агентство международных исследований». 2017. С. 214-216.

7.Akbari K., Rahmani E., Abbasi A., et al. Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2016. V.30. pp.1077-1086.

8.Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // Фундаментальные исследования. 2015. № 4. С. 61-66.

9.Ma L., Zhou Q. Voltage Dip Evaluation Index Based on Voltage Dip Matrix // 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017, pp. 1327-1330, doi: 10.1109/ICISCE.2017.276.

10.Червонченко С.С., Фролов В.Я. Анализ провала напряжения буровой установки, подключенной к локальной энергетической сети // VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020. Санкт-Петербургский горный университет. 2020. С. 630-634.

11.Bagheri A., Bollen M.H.J., Gu I.Y.H. Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model // Electric Power Systems Research. 2018. (154). pp. 319–328.

12.Chervonchenko S.S., Frolov V. YA. Analysis of the voltage drop of a drilling rig connected to a local energy network // Journal of Physics: Conference Series. 2021. №1753.

13.Besselmann T.J., Cortinovis A., Van de Moortel S., et al. Increasing the Robustness of Large Electric Driven Compressor Systems During Voltage Dips // IEEE Transactions on Industry Applications, V. 54. no. 2. pp. 1460-1468, March-April 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2781638.

14.Kadu A.D., Debre P., Juneja R, et al. Application of STATCOM for harmonic mitigation and power factor improvement using direct current control technique // 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118013.

15.Katic V.A., Stanisavljevic A.M. Novel voltage dip detection algorithm using harmonics in the dip's transient stage // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 351-356, doi: 10.1109/IECON.2017.8216063.

16.Ngom I., Member S., Badara A., et al. An Improved Control for DC-Link Fluctuation during Voltage Dip based on DFIG // 2018 9th International Renewable Energy

Авторы публикации

Червонченко Сергей Сергеевич – аспирант, инженер-исследователь Высшей школы электроэнергетических систем, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого.

Фролов Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, профессор Высшей школы электроэнергетических систем, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого.

References

1. Ivanova IYu, Tuguzova TF, Popov S.P. Razvitie maloi energetiki na severo-vostoke Rossii: problemy, effektivnost', priority. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Malaya energetika – 2006»*, 21-24 noyabrya 2006, Moskva. M.: OAO «Malaya energetika», 2006: 370.
2. Tan Y, Meegahapola L, Muttaqi K M. A review of technical challenges in planning and operation of remote area power supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V.38. pp. 876–889.
3. Bashmakov IA. Povyshenie effektivnosti energosnabzheniya v severnykh regionakh Rossii. *Energoberezhenie*. 2017; 2:46-53.
4. Elistratov VV. Energeticheskoe snabzhenie izolirovannykh territorii Rossii. *Akademiya energetiki*. 2015; 4(66):26-33.
5. Mazidi P, Sanz Bobi M A. Strategic maintenance scheduling in an islanded microgrid with distributed energy resources. *Electric Power Systems Research*. 2017. V.148. pp. 171-182.
6. Cheremisin VV. Issledovanie i postroenie sutochnykh grafikov aktivnykh nagruzok na shinakh podstantsii. Proryvnye nauchnye issledovaniya kak dvigatel' nauki. Ufa: OOO «Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy». 2017:214-216.
7. Akbari K, Rahmani E, Abbasi A, et al. Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2016. V.30. pp.1077-1086.
8. Dmitrienko VN, Lukutin BV. Vybór moshchnosti generiruyushchego oborudovaniya avtonomnoi solnechno-dizel'noi elektrostantsii megavattного класса. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;4: 61-66.
9. Ma L, Zhou Q. Voltage Dip Evaluation Index Based on Voltage Dip Matrix. *2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2017, pp. 1327-1330, doi: 10.1109/ICISCE.2017.276.
10. Chervonchenko SS, Frolov VYA. Analysis of the voltage fall of a drilling rig connected to a local energy network. VII International Scientific and Practical Conference “Innovations and Prospects for the Development of Mining Engineering and Electromechanics: IPDME-2020. St. Petersburg Mining University. 2020; 630-634.
11. Bagheri A, Bollen MHJ, Gu IYH. Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model. *Electric Power Systems Research*. 2018. (154). pp. 319–328.
12. Chervonchenko S.S., Frolov V.YA. Analysis of the voltage drop of a drilling rig connected to a local energy network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. №1753.
13. Besselmann TJ, Cortinovis A, Van de Moortel S, et al. Increasing the Robustness of Large Electric Driven Compressor Systems During Voltage Dips. *IEEE Transactions on Industry Applications*, V. 54. no. 2, pp. 1460-1468, March-April 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2781638.
14. Kadu AD, Debre P, Juneja R, et al. Application of STATCOM for harmonic mitigation and power factor improvement using direct current control technique. *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118013.
15. Katic VA, Stanisavljevic AM. Novel voltage dip detection algorithm using harmonics in the dip's transient stage. *IECON 2017. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 351-356, doi: 10.1109/IECON.2017.8216063.
16. Ngom I, Member S, Badara A, et al. An Improved Control for DC-Link Fluctuation

during Voltage Dip based on DFIG. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC.2018.8362458.

Authors of the publication

Sergey S. Chervonchenko –Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.

Vladimir Ya. Frolov – Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.

Получено

07.06.2022 г.

Отредактировано

27.06.2022 г.

Принято

08.07.2022 г.