ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения

С.С.ЧЕРВОНЧЕНКО✉, В.Я.ФРОЛОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Червонченко С.С., Фролов В.Я. Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 470-478. EDN MGAPVA

Аннотация. В статье рассматриваются аварийные режимы работы автономного электротехнического комплекса буровой установки. Раскрывается понятие провала напряжения и его влияние на технологический процесс промышленных предприятий. Представлено описание использующихся в электроснабжении промышленных предприятий способов и методов преодоления провалов напряжения и набросов нагрузки в автономных энергосистемах, из которых можно выделить ускоренный подъем ответственного оборудования для недопущения аварийных режимов, а также применение резервных накопителей, как правило аккумуляторных батарей. Разработан алгоритм взаимодействия аккумуляторной батареи и дизель-генераторной установки как резервных источников питания во время различных режимов работы электродвигателя с учетом набросов нагрузки, позволяющий успешно преодолеть провалы напряжения в системе как в переходном, так и в установившемся режимах. Предложен комбинированный метод устранения провала напряжения, особенностью которого является применение комбинированной структуры источников резервного питания в составе дизель-генераторной установки и аккумуляторной батареи, действующий на основании предложенного алгоритма взаимодействия в автономных электротехнических комплексах. Способ позволяет преодолеть резкие набросы нагрузки и провалы напряжения, вызванные дефицитом резервной мощности в электрической системе. Применение аккумуляторной батареи в качестве переходного элемента позволяет переключиться между основным и резервным источниками питания без остановки технологического и расширить порог перегрузки автономного электротехнического комплекса до 60 %. При использовании комбинированного метода повышается энергоэффективность автономного комплекса вследствие уменьшения количества аварийного отключения оборудования, прерываний технологического процесса и дополнительного расхода электроэнергии.

***Ключевые слова*:** энергоэффективность; провал напряжения; генератор; буровая установка; резервное питание

Благодарность. Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту FSEG-2023-0012.

Поступила: 12.03.2023 ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 19.07.2023*** ***Опубликована: 19.07.2023***

Введение. Системы автономного электроснабжения высокой мощности, удаленные от высоковольтных электрических сетей, получают питание, в основном, от автономных электростанций с двумя дизель-генераторными установками, одна из которых является основной, а другая – резервной [1-3]. Применение автономных электротехнических комплексов распространено в районах Дальнего Востока и Крайнего Севера, куда по экономическим и техническим причинам трудно провести централизованное электроснабжение. На удаленные изолированные энергорайоны приходится 60 % территории РФ с обширными запасами полезных ископаемых: 70 % нефти, 90 % природного газа, 90 % драгоценных металлов и камней. В изолированных районах общее количество источников генерации составляет примерно 5000 с суммарной мощностью около 2500 МВт.

Автономные электротехнические комплексы разделяются по следующим критериям [4].

• Назначение и характер потребителей: для применения в электроснабжении основных технологических потребителей (промышленное производство и т.п.); для обеспечения электроснабжения вспомогательных потребностей промышленных объектов (производственные и коммунально-бытовые нужды).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 470-478
© С.С.Червонченко, В.Я.Фролов, 2023

• По режиму работы: основные – энергокомплексы с наработкой за год более 3000 ч, с числом пусков за год менее 20, временем непрерывной работы более 350 ч, временем пуска и приема 100 % нагрузки до 30 мин; резервные – энергокомплексы с наработкой за год от 200 до 3000 ч, числом пусков от 20 до 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки не более 5 мин; аварийные – энергокомплексы с наработкой за год до 200 ч, числом пусков за год свыше 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки от 5 до 30 сек. Аварийные энергокомплексы используются для аварийного электроснабжения потребителей первой категории и первой категории особой группы, для которых перерыв в электроснабжении допустим только на время действия АВР, при отключении основного или резервного источника питания.

• По типу первичных двигателей: дизельные; газопоршневые; газотурбинные; микротурбинные; комбинированные с возобновляемыми источниками энергии.

В системах с низкой мощностью нагрузки резервным источником питания является, как правило, аккумуляторная батарея [5]. В таких изолированных системах особое внимание необходимо уделять показателям качества электроэнергии, от которого зависят работоспособность, надежность и эффективность функционирования оборудования [6].

Провал напряжения по ГОСТ 32144-2013 – это уменьшение напряжения в электрической сети ниже порогового значения 0,9 до минимального 0,1 от номинальной величины напряжения. Характеризуется такими параметрами как глубина провала и его длительность [7, 8]. После провала напряжения через промежуток времени от 10 мс должно идти восстановление напряжения до значения 90 % и выше от номинального. Падение напряжения ниже 0,1 от номинального на определенный промежуток времени является кратковременным прерыванием питания. Однако провалы являются наиболее критичными аварийными нарушениями, которые приводят к отключениям, перегрузке и выходу из строя электрооборудования генераторов и потребителей электроэнергии.

Из-за коротких электрических связей, отсутствия возможности маневра мощностями, а также небольшего резерва мощности, системы автономного электроснабжения чувствительны к провалам напряжения. Также на работоспособность энергокомплексов оказывают большое влияние высокий уровень загрязнения изоляции на производствах со стадией дробления/измельчения руды, несанкционированное прикосновение к токоведущим частям предметами, ошибки при операционном обслуживании персонала, природные факторы, например, удары молний. Запуск высокомощных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором приводит к снижению частоты и, соответственно, провалам напряжения в изолированных электрических сетях, что оказывает непосредственное влияние на режим работы других потребителей [9]. При уменьшении величины напряжения в электрической сети ниже допустимого по ГОСТу уровня, возможно отключение защитой по минимальному напряжению контакторов электродвигателей [10]. При этом, что актуально для добывающей промышленности, провалы напряжения могут происходить из-за различных аварийных ситуаций ввиду особенностей работы электротехнических комплексов, таких как застревание оборудования во время выполнения буровых работ и т.п. [11]. Провал напряжения может быть также вызван возникновением и окончанием короткого замыкания или резким увеличением значения протекающего тока в электросистеме или электроустановке, подключенной к электросети, а также отключением источников питания [12, 13].

Для автономных электротехнических комплексов можно выделить три основные причины возникновения провалов напряжения: аварийное отключение источников питания; резкое увеличение нагрузки, вызванное внешними технологическими обстоятельствами; короткие замыкания в системе.

При бурении скважин довольно часто происходят прихваты бурового инструмента. Одной из причин, ведущей к прихвату бурильных колонн, является провал напряжения и неспособность преодолеть прихват, а также последующее отключение электроэнергии. Для преодоления данных аварийных режимов, на долю которых приходится существенный процент общего количества аварийных ситуаций, требуются значительное время (минимум 4 ч) и свободные резервные мощности в изолированной электрической сети. Для компенсации негативного влияния провалов напряжения на непрерывные технологические процессы промышленных предприятий добывающей промышленности и повышения надежности и устойчивости изолированных сетей электроснабжения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.С.Червонченко, В.Я.Фролов, 2023

требуется разработка комплексных способов защиты, учитывающих различные возмущения в системах питания электроприводов буровых установок [14, 15].

Главными сложностями при решении проблем электроснабжения удаленных автономных систем энергоснабжения промышленных предприятий являются удаленное расположение месторождений полезных ископаемых от централизованных энергосистем, распределенное расположение производственных объектов в пределах одного ГОКа (до 10 км) и непрерывный технологический процесс, нарушение которого ведет к значительным экономическим затратам предприятия [16].

Анализ литературы и практического опыта различных промышленных предприятий в ликвидации провалов напряжения позволяет выделить основные и самые распространенные способы и устройства: накопители энергии (источники бесперебойного питания, аккумуляторные батареи), активный фильтр, статический компенсатор (СТАТКОМ), повышающий преобразователь и маховик [17-19].

В системах электропривода буровых установок при провалах напряжения снижается скорость вращения бурильной колонны, а из-за большой глубины земных пород и относительно небольшого момента инерции происходит моментальный (до 2-3 с) «прихват» механизмов. Соответственно, в условиях ограничения получения дополнительной мощности из внешней сети поиск способов преодоления провалов напряжения в изолированных системах с помощью задействования резервов имеющегося оборудования за короткий промежуток времени актуален для минимизации убытков и повышения надежности электроснабжения предприятий [20, 21]. Ликвидация каждого «прихвата» требует повторного запуска технологического процесса, что занимает до 4 ч и требует значительного расхода электроэнергии и финансовых ресурсов [22].

Комбинированный метод [23, 24] рассматривается на примере буровой установки, установленной на золоторудном месторождении в Магаданской обл. По статистике на данном месторождении за 2022 г. зафиксировано в среднем по 19 аварийных отключений на каждую из восьми буровых установок. Время повторного восстановления технологического режима составляет 4 ч. С учетом того, что мощность буровой установки составляет 500 кВт, а приблизительная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой на дизель-генераторной установке (ДГУ) – 25 руб., суммарные годовые дополнительные затраты на электроэнергию составляют 7,6 млн руб. Таким образом, очевидно, что задача по повышению энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения имеет важное прикладное и научное значение [25].

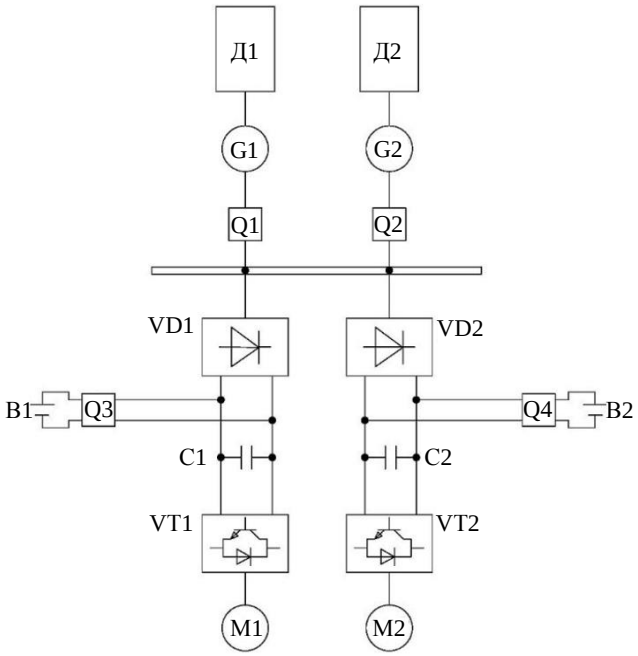


Рис.1. Принципиальная схема автономного электротехнического комплекса (составлено авторами)

Методы. На рис.1 представлена принципиальная схема автономного электротехнического комплекса, состоящая из дизель-генераторов, выключателей, частотного преобразователя и асинхронных электродвигателей нагрузки [26-28]. На схеме (рис.1) использованы следующие обозначения: Д1-G1, Д2-G2 – дизель-генераторы; Q1, Q2, Q3, Q4 – коммутационные аппараты; VD1, VD2 – выпрямители в составе частотного преобразователя; B1, B2 – аккумуляторные батареи; C1, C2 – конденсаторы (фильтры) в составе частотного преобразователя; VT1, VT2 – управляемые igbt-транзисторы в составе преобразователя частоты; M1, M2 – электродвигатели нагрузки.

Буровая установка находится на значительном расстоянии от основного энергокомплекса (около 3 км), потому питание приходит от собственной дизель-генераторной установки, расположенной в непосредственной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 470-478
© С.С.Червонченко, В.Я.Фролов, 2023

близости от потребителя [29]. В качестве звена постоянного тока частотного преобразователя используются неуправляемые выпрямители [30, 31].

В данном электротехническом комплексе используются двухполюсные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором 5AMH315M2 мощностью 250 кВт, основные параметры которого приведены ниже [32]: полная мощность электродвигателя 284,5 кВА; номинальное скольжение 0,0083 %; номинальный ток обмотки статора 431 А; предварительное активное сопротивление статора 0,017 Ом; активное сопротивление ротора 0,0043 Ом; критическое скольжение 0,044 %; активное сопротивление статора 0,012 Ом; индуктивное сопротивление рассеяния статора 0,102 Ом; индуктивное сопротивление цепи намагничивания 1,968 Ом; индуктивность цепи намагничивания 0,0063 Гн.

Приведенные расчетные параметры используются для моделирования электродвигателей в программном комплексе Simulink [33]. Применяется стандартный блок Asynchronous Machine.

В качестве дополнительного резервного источника питания в электротехническом комплексе предусматривается стационарная малообслуживаемая свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (OPzS). Применение данного типа аккумуляторной батареи обусловлено большим опытом эксплуатации, высокой надежностью и низкой стоимостью по сравнению с другими типами АБ, например, литий-ионной [34].

Емкость аккумуляторной батареи рассчитывается по формуле

$$C_{\text{АБ}} \geq \frac{I_{\text{АБ}} t_{\text{АБ}}}{K_g K_p}, \quad (1)$$

где $I_{\text{АБ}}$ – величина тока, потребляемого аккумуляторной батареей во время нагрузки, А; $t_{\text{АБ}}$ – промежуток времени работы аккумуляторной батареи во время нагрузки, $t_{\text{АБ}} = 0{,}5$ ч с учетом особенностей работы и категорийности потребителей; K_g – коэффициент доступной емкости, K_g = 0,9-1 о.е.; K_p – коэффициент глубины разряда аккумуляторной батареи, K_p = 0,5-0,7 о.е.

Величина тока, потребляемого от аккумуляторной батареи во время нагрузки

$$I_{\text{АБ}} = \frac{P_{\text{нагр}}}{\eta_{\text{и}} U_{\text{АБ}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{нагр}}$ – средняя величина мощности нагрузки, Вт; $\eta_{\text{и}}$ – КПД преобразования постоянного тока в переменный с помощью инвертора, $\eta_{\text{и}}$ = 0,9-0,95; $U_{\text{АБ}}$ – номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В;

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

$$C_{\text{АБ}} \geq \frac{1414{,}8 \cdot 0{,}5}{0{,}95 \cdot 0{,}6} = 1241 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Время работы аккумуляторной батареи и, соответственно, расчетная емкость приняты, исходя из требуемого времени обеспечения надежности электроснабжения, по критерию вероятной предельной длительности провала напряжения с учетом необходимого резерва для ликвидации набросов нагрузки значительной величины.

Исходя из расчетов (1), (2), для дальнейшего исследования провала напряжения выбирается ближайшая величина емкости аккумуляторной батареи по данным заводских каталогов – 1500 А·ч (тип 12 OPzS 1500) со следующими параметрами: напряжение одного элемента – 2 В; внутреннее сопротивление – 0,21 мОм; тип – свинцово-кислотная; вид положительного электрода – трубчатая пластина.

Расчет необходимой мощности дизель-генераторов проведен по ГОСТ Р 53987-2010, согласно которому длительная мощность автономных дизель-генераторов переменного тока выбирается с резервом 30 % от величины установленной мощности нагрузки. Установленная мощность

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.С.Червонченко, В.Я.Фролов, 2023

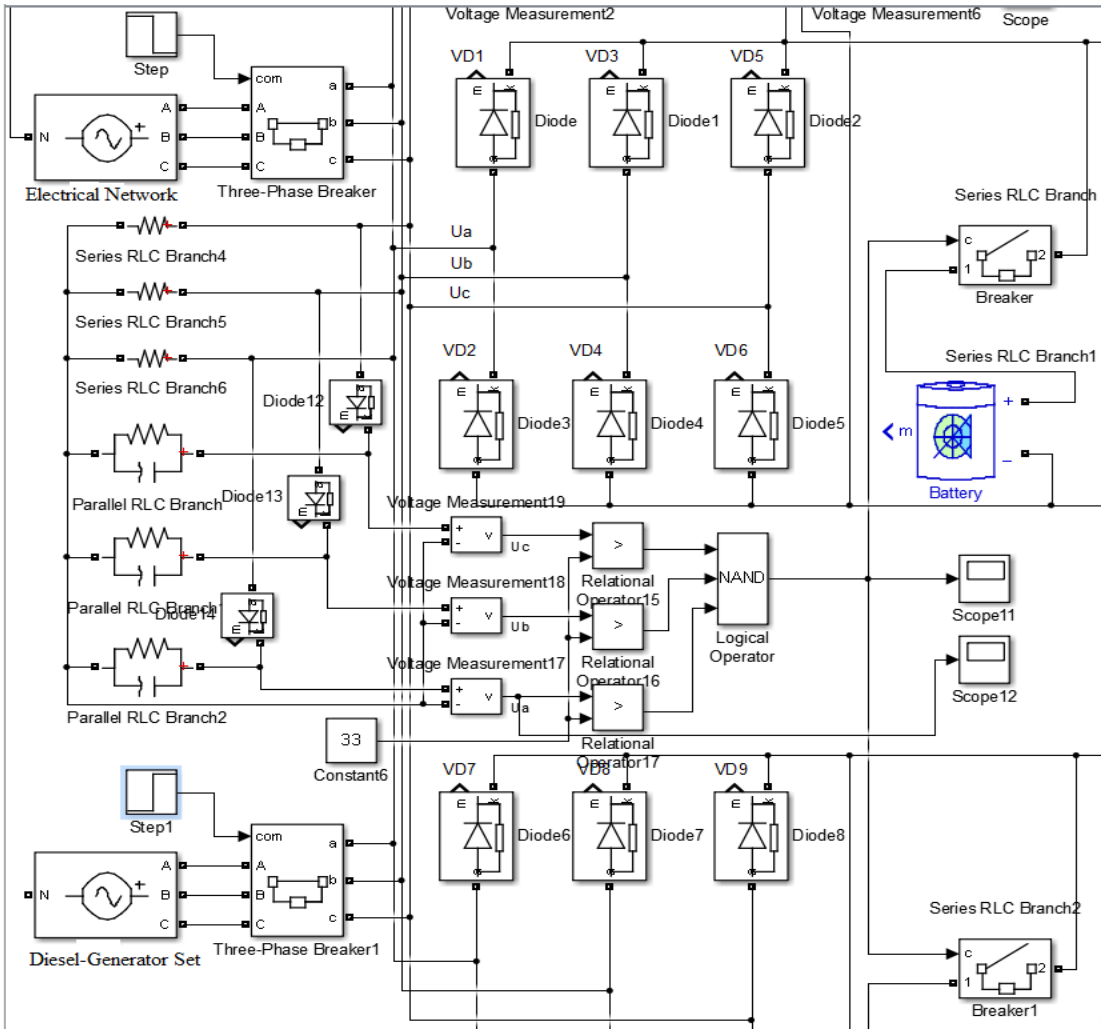


Рис.2. Компьютерная модель комбинированного состава источников резервного питания

нагрузки автономного электротехнического комплекса составляет 500 кВт от двух электродвигателей 5АМН315М2 мощностью 250 кВт. Согласно ГОСТ Р 53987-2010 величина расчетной мощности дизель-генераторной установки должна быть не менее 500·1,3 = 650 кВт.

На рис.2 представлена компьютерная модель комбинированного состава источников резервного питания (дизель-генераторная установка и аккумуляторная батарея) в составе автономного электротехнического комплекса буровой установки в программном комплексе Simulink.

Для обеспечения надежного электроснабжения и непрерывности технологических процессов предлагается рассмотреть комбинированную совместную работу различных источников резервного питания путем введения соответствующего алгоритма (рис.3) [35, 36].

Алгоритм комбинированного метода устранения провалов напряжения заключается в следующем: в установившемся режиме работы электродвигателей при питании от одной основной дизель-генераторной установки происходит резкое увеличение (наброс) нагрузки на вал. Например, для буровых колонн – застревание в твердых подземных породах. Соответственно при набросе нагрузки автоматическая система управления посылает два параллельных управляющих сигнала: первый на запуск резервного дизель-генератора, который будет готов к приему нагрузки после выхода на номинальные обороты (примерно 3 с), второй на моментальное подключение дополнительного источника резервного питания – аккумуляторной батареи. Задача данной аккумуляторной батареи – обеспечить кратковременный прием нагрузки совместно с основным дизель-генератором путем выдачи пиковой мощности – бесшовный переход с поддержанием необходимого уровня величины напряжения в сети до разгона, выхода на номинальные обороты и приема нагрузки резервного дизель-генератора [37]. Затем происходит отключение аккумуляторной батареи, нагрузка распределяется между двумя (основным и резервным) ДГУ.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 470-478
© С.С.Червонченко, В.Я.Фролов, 2023

Далее выполняется компьютерное моделирование процесса провала напряжения и его устранения с помощью описанного выше алгоритма взаимодействия дизель-генераторной установки и аккумуляторной батареи в программном комплексе MatLab Simulink.

В процессе моделирования разгон электродвигателей длится 3 с до момента выхода на номинальную скорость вращения времени, затем происходит резкий наброс нагрузки. Согласно алгоритму (рис.3) в момент времени t = 3 с происходит подключение аккумуляторной батареи. Одновременно от управляющего воздействия запускается резервная дизель-генераторная установка. Далее в момент времени t = 5 с происходит перевод питания на запустившуюся резервную дизель-генераторную установку и режим работы продолжается до t = 8 с.

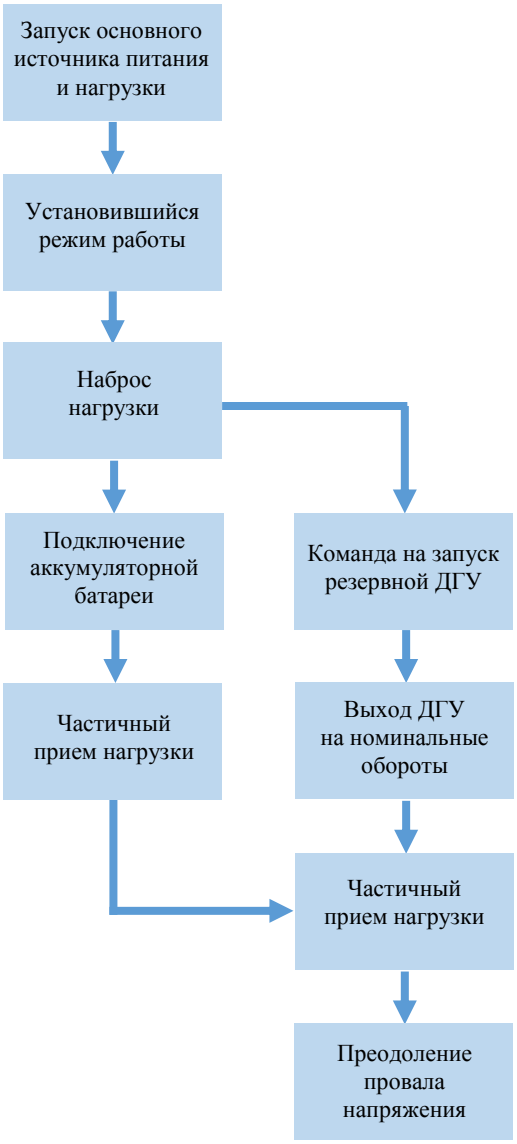


Рис.3. Алгоритм подключения источников резервного питания (составлено авторами)

Обсуждение результатов. Выполнено моделирование режимов с различными величинами наброса нагрузки. На рис.4 приведены графики при набросе нагрузки 1600 Н·м.

Во время разгона электродвигателя наибольшая величина нагрузки составляет 1000 Н·м, соответственно данное значение принимаем в качестве номинальной мощности электродвигателя.

Согласно проведенным расчетам, при набросе нагрузке 30 % сохраняется работоспособный режим работы электросистемы с минимальным отклонением значения напряжения (в допустимых пределах по ГОСТу), при этом скорость вращения электродвигателя не уменьшается. При таком значении нагрузки величина тока статора составляет примерно 1750 А.

Данные, приведенные на рис.4, показывают, что совместная работа предложенного состава источников резервного питания, а именно дизель-генераторная установка и аккумуляторная батарея, на основе предложенного алгоритма управления позволяет преодолеть наброс нагрузки 60 % от номинальной мощности основного дизель-генератора без прерывания технологических процессов. Из рис.4, *б* видно, что при включении аккумуляторной батареи скорость вращения электродвигателя поддерживается в допустимом диапазоне и необходимом временном промежутке (3 с) для запуска, разгона и подключения резервной дизель-генераторной батареи.

Дальнейшие расчеты были выполнены для исследования режима работы при набросе нагрузки 65 и 70 % от номинальной мощности системы. При таком режиме расчетная емкость аккумуляторной батареи не в состоянии обеспечить плавное перенос нагрузки на резервную дизель-генераторную установку, так как происходит разряд батареи за 2 с. При этом ток статора достигает максимальных (пусковых) значений, что свидетельствует о перегрузке автономного электротехнического комплекса. Также практически моментально происходит замедление вращения электродвигателей. В таком случае по стандартной методике необходимо применить экстренный подъем буровых механизмов для сохранения оборудования и минимизации финансовых затрат.

Проведены аналогичные исследования режимов работы автономного электротехнического комплекса при набросах нагрузки различной величины с увеличенной емкостью свинцово-кислотной аккумуляторной батареи до значения 2500 А·ч.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.С.Червонченко, В.Я.Фролов, 2023

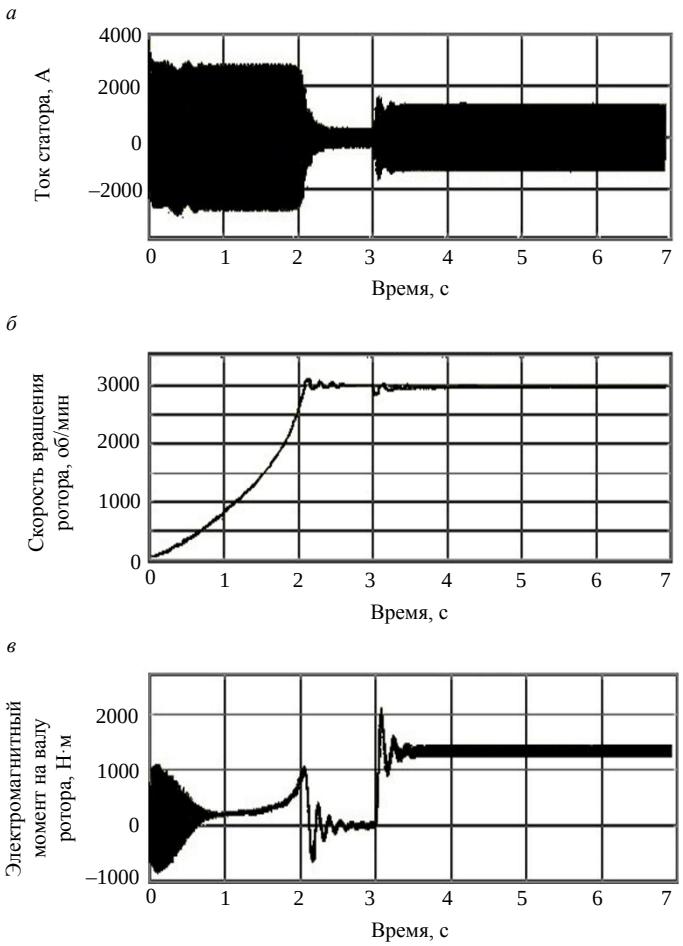


Рис.4. Графики при набросе нагрузки 1600 Н·м:
а – ток статора, А; *б* – скорость вращения ротора, об/мин;
в – электромагнитный момент на валу ротора, Н·м

С набросом нагрузки T_m = 1650 Н·м энергосистема, в том числе числе аккумуляторная батарея, справляется. Скорость вращения двигателей слегка замедляется, но без влияния на непрерывный технологический процесс. Соответственно, при увеличении емкости аккумуляторной батареи с 1500 до 2500 А·ч (на 66 %) расширяется порог перегрузки и работоспособности системы на 3,1 % (с 1600 до 1650 Н·м). По сравнению со значением по ГОСТу перегрузочная способность энергокомплекса выросла до 65 %.

Дополнительно был проработан режим с набросом нагрузки 70 % (T_m = = 1700 Н·м) от номинального значения мощности дизель-генератора. Результаты показывают, что для аккумуляторной батареи с увеличенной емкостью данная нагрузка является критичной, электродвигатели уходят в резкое замедление (скорость вращения равна 0 об/мин через 1,2 с после наброса нагрузки) и не обеспечивается поддержание технологического процесса.

Полученные результаты показывают, что при увеличении емкости аккумуляторной батареи сверх расчетного значения не обеспечивается значительное улучшение характеристик автономного электротехнического комплекса для способности энергосистемы преодолевать провалы напряжения. Наблюдается явная несоизмеримость затраченных ресурсов на достигнутые технические результаты.

Заключение. В результате применения комбинированной структуры источников резервного питания, действующих на основании предложенного алгоритма взаимодействия для преодоления возникающих провалов напряжения в автономных электротехнических комплексах буровых установок, установлено, что применение аккумуляторной батареи позволяет повысить на 23 % допустимую величину перегрузочной способности системы при одновременном обеспечении непрерывности технологического процесса и переключениях между основной и резервной дизель-генераторной установкой при провалах напряжения.

В то же время увеличение емкости аккумуляторной батареи на 66 % относительно полученной расчетной величины (с 1500 до 2500 А·ч) позволяет увеличить максимальную величину наброса нагрузки, с которой справляется автономная система электроснабжения при провале напряжения, на 3,1 % (с 1600 до 1650 Н·м).

Показано, что при применении комбинированного состава источников резервного питания совместно с алгоритмом взаимодействия уменьшается количество отключений, повторных запусков и, соответственно, дополнительный расход электроэнергии. Совместные результаты приводят к уменьшению операционных затрат и повышению энергоэффективности комплекса.

Доказано, что при увеличении емкости аккумуляторной батареи сверх расчетного значения не обеспечивается значительное улучшение характеристик автономного электротехнического комплекса для способности энергосистемы преодолевать провалы напряжения. Данное решение приводит к увеличенным капитальным затратам без должного технического и экономического эффекта.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D.* A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research // Electric Power Systems Research. 2015. Vol. 121. P. 89-100. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.12.010

2. *Tavares B., Soares F.J.* An innovative approach for distribution network reinforcement planning: Using DER flexibility to minimize investment under uncertainty // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 183. № 106272. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106272

3. *Gouin V., Alvarez-Hérault M.-C., Raison B.* Innovative planning method for the construction of electrical distribution network master plans // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2017. Vol. 10. P. 84-91. DOI: 10.1016/j.segan.2017.03.004

4. *Yu Yang, Fan Jinfu, Wang Zhongjie et al.* A dynamic ensemble method for residential short-term load forecasting // Alexandria Engineering Journal. 2023. Vol. 63. P. 75-88. DOI: 10.1016/j.aej.2022.07.050

5. *Bo Yang, Junting Wang, Yixuan Chen et al.* Optimal sizing and placement of energy storage system in power grids: A state-of-the-art one-stop handbook // Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 32. № 101814. DOI: 10.1016/j.est.2020.101814

6. *Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф.* Развитие возобновляемой энергетики на востоке России в первой половине XXI века на фоне общероссийских тенденций // Энергетическая политика. 2016. Вып. 3. С. 66-73.

7. *Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Богомолов И.И.* Провалы напряжения в системах электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. 2018. Вып. 12. С. 7-12.

8. *Ершов С.В., Пигалов М.С.* Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. 2017. Вып. 12-1. С. 95-104.

9. *Zarenia O., Salehpour M.J., Ghaedi R., Shafie-Khah M.* Markov-Based Reliability Assessment for Distribution Systems Considering Failure Rates // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 10018-10031. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3240778

10. *Postigo Marcos F., Domingo C.M., San Román T.G.* Improving distribution network resilience through automation, distributed energy resources, and undergrounding // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 141. № 108116. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108116

11. *Prathapaneni D.R., Detroja K.P.* An integrated framework for optimal planning and operation schedule of microgrid under uncertainty // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2019. Vol. 19. № 100232. DOI: 10.1016/j.segan.2019.100232

12. *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. 2018. Vol. 54. Iss. 2. P. 1460-1468. DOI: 10.1109/TIA.2017.2781638

13. *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. Vol. 154. P. 319-328. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.09.004

14. *Rastgou A., Moshtagh J., Bahramara S.* Improved harmony search algorithm for electrical distribution network expansion planning in the presence of distributed generators // Energy. 2018. Vol. 151. P. 178-202. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.030

15. *Kandasamy M., Thangavel R.., Arumugam T. et al.* Strategic incorporation of DSTATCOM and distributed generations in balanced and unbalanced radial power distribution networks considering time varying loads // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 4345-4359. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.03.076

16. *Zhukovskiy Yu.L., Kovalchuk M.S., Batueva D.E., Senchilo N.D.* Development of an Algorithm for Regulating the Load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption within the Framework of Application of the Demand Response // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 13801. DOI: 10.3390/su132413801

17. *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, 23-24 апреля 2020, Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. С. 630-634.

18. *Gukovskiy Yu.L., Sychev Yu.A., Pelenev D.N.* The Automatic Correction of Selective Action of Relay Protection System against Single Phase Earth Faults In Electrical Networks of Mining Enterprises // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 5. P. 833-838.

19. *Belsky A.A., Glukhanich D.Y., Carrizosa M.J., Starshaia V.V.* Analysis of specifications of solar photovoltaic panels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 159. № 112239. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112239

20. *Barelli L., Bidini G., Pelosi D. et al.* Comparative analysis of AC and DC bus configurations for flywheel-battery HESS integration in residential micro-grids // Energy. 2020. Vol. 204. № 117939. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117939

21. *Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б.* Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети // Известия Тульского государственного университета. 2016. Вып. 11-2. С. 507-519.

22. *Bardanov A.I., Solovev S.V., Alvarez R. et al.* Upgrading the Power Capacity of a Three-Conductor MVAC Line by Converting to DC // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 3. № 1080. DOI: 10.3390/en15031080

23. *Муньос-Гихоса Х.М., Крыльцов С.Б., Соловьев С.В.* Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6-10 кВ // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 229-238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229

24. *Iakovleva E.V., Guerra D.D.* Improving the efficiency of the use of photovoltaic stations in the republic of Cuba // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1753. № 012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012056

25. *Васильков О.С., Батуева Д.Е., Хомяков К.А., Паляницин П.С.* Выравнивание графика нагрузки предприятий за счет применения гибридных накопителей электроэнергии // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 1 (43). С. 27-34. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-43-1-27-34

26. *Абрамович Б.Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31

27. *Abramovich B., Sychev Yu.A., Pelenev D.N.* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Iss. 5. № 052027. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052027

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

28. *Васильев Ю.Б., Шпенст В.А., Калашников О.В., Ульянов Г.Н.* Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электроснабжения промышленных электротехнических комплексов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 41-49. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

29. *Forcan J., Forcan M.* Optimal placement of remote-controlled switches in distribution networks considering load forecasting // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2022. Vol. 30. № 100600. DOI: 10.1016/j.segan.2021.100600

30. *Ngom I., Mboup A.B., Thiaw L. et al.* An Improved Control for DC-Link Fluctuation during Voltage Dip based on DFIG // 9th International Renewable Energy Congress (IREC), 20-22 March 2018, Hammamet, Tunisia. IEEE, 2018. P. 1-6. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362458

31. *Pazouki E., Sozer Y., De Abreu-Garcia J.A.* Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Operation of Nonisolated DC-DC Converters // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. Iss. 1. P. 310-320. DOI: 10.1109/TIA.2017.2751547

32. *Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Koteleva N.I.* About increasing informativity of diagnostic system of asynchronous electric motor by extracting additional information from values of consumed current parameter // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. Iss. 3. № 032158. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032158

33. *Malarev V.I., Kopteva A.V., Nogtev R.A.* Electric Drive Simulation for Drilling Machine Spinner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194. Iss. 5. № 052012. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052012

34. *Savard C., Iakovleva E., Ivanchenko D., Rassõlkin A.* Accessible Battery Model with Aging Dependency // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 12. № 3493. DOI: 10.3390/en14123493

35. *Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е.* Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 115-126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7

36. *Zhukovskiy Yu.L., Batueva D.E., Buldysko A.D. et al.* Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 17. № 5268. DOI: 10.3390/en14175268

37. *Akbari K., Rahmani E., Abbasi A., Askari M.-R.* Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2016. Vol. 30. Iss. 2. P. 1077-1086. DOI: 10.3233/IFS-151883

***Авторы*: С.С.Червонченко,** *аспирант, sergeychervonchenko@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-2839-9068* (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*), **В.Я.Фролов,** *д-р техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0002-1744-4375* (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0