

## Научная статья

УДК 621.313: 621.874

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-13-30

Токарев Иван Сергеевич, Шклярский Ярослав Элиевич, Скворцов Иван Владимирович\*, Васильков Олег Сергеевич

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

\*E-mail: si-28@mail.ru

**АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ****Информация о статье**

Поступила:

15 марта 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 апреля 2024 г.

Принята к печати:

15 мая 2024 г.

Опубликована:

06 июня 2024 г.

**Ключевые слова:**

электротехнический комплекс, провалы напряжения, система накопления электроэнергии, параметры суперконденсатора, алгоритм выбора, конфигурация подключения

**Аннотация.**

Работа электротехнических комплексов промышленных предприятий нередко характеризуется нарушениями показателей качества электроэнергии, в частности, продолжительными изменениями характеристик напряжения и случайными событиями, описываемыми сильными и спонтанно возникающими колебаниями формы питающего напряжения. В данной статье особое внимание уделено провалам напряжения, возникающим в питающей сети завода по производству сжиженного природного газа и являющихся причиной останова непрерывного технологического процесса. Основной причиной возникновения провалов напряжения для выбранного объекта исследования являются атмосферные перенапряжения и, как следствие, короткие замыкания на стороне внешнего электроснабжения. В работе рассмотрены основные способы нивелирования провалов напряжения, использующие как программные средства комплекса, так и аппаратную часть. В качестве решения для данного объекта предложена установка системы накопления энергии на базе суперконденсаторов, подключаемая к звену постоянного тока электропривода. Авторами разработан новый подход к выбору данных накопителей, в основе которого лежат выявленные математические зависимости количества единиц суперконденсаторов от их номинальной емкости и напряжения, влияния конфигурации соединения накопителей внутри системы на ее окончательные показатели, а также номинальных параметров рассматриваемого объекта и характеристик провалов напряжения. По полученным данным сформирован алгоритм определения суперконденсатора с требуемыми номинальными параметрами, удовлетворяющими критериям технической и экономической эффективности для рассматриваемого объекта. В целях достижения универсальности написанного алгоритма выбора системы накопления на базе суперконденсаторов были проведены опыты по выявлению аналогичных математических зависимостей при различных уровнях напряжения и мощности электротехнических комплексов.

**Для цитирования:** Токарев И.С., Шклярский Я.Э., Скворцов И.В., Васильков О.С. Алгоритм выбора параметров суперконденсатора в составе системы накопления энергии электротехнического комплекса при провалах напряжения // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 13-30. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-13-30, EDN: IDFJMK

**Введение.** Бесперебойная поставка электроэнергии качества, соответствующего требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», является одним из важнейших факторов, влияющих на

нормальный режим работы технологического оборудования, приемников электроэнергии и энергетических систем, а также повышение их эффективности. Помимо вышеописанных факторов, бесперебойность электроснабжения также связана с качеством электроэнергии [1, 2], так как, согласно

ПУЭ, нормальным считается режим, при котором электроприемник бесперебойно обеспечивается электроэнергией в требуемом количестве и нормированного качества [3].

Продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события – это две категории, на которые подразделяют волатильность параметров электропитания в узле передачи электрической энергии пользователю электрической сети, относящихся к частоте, значениям и форме напряжения, а также симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения [4]. Характеризу-

т трехфазовых системах характеризуются снижением напряжения меньше 5% от номинального значения во всех фазах [7]. Если хотя бы в одной фазе величина остаточного напряжения не снизилась до указанной величины, то ситуацию рассматривают как провал напряжения. Провалы напряжения (Рис. 1) обычно характеризуются снижением напряжения ниже предельно допустимого значения, равного  $0,9U_{ном}$  [8]. Согласно ГОСТ 32144-2013, провал напряжения определяется как электромагнитная помеха, к ведущим параметрам интенсивности протекания которой относят глубину провала напряжения ( $\delta U_{п}$ ) и длительность ( $\Delta t_{п}$ ). Длительность провала напряжения может быть до 1 минуты. Момент начала провала напряжения в трехфазных сетях принято считать тогда, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового (предельно допустимого) значения начала провала напряжения, за окончание данного явления принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового (предельно допустимого) значения окончания провала напряжения. Более того, можно выделить три периода времени в динамическом процессе провала напряжения:

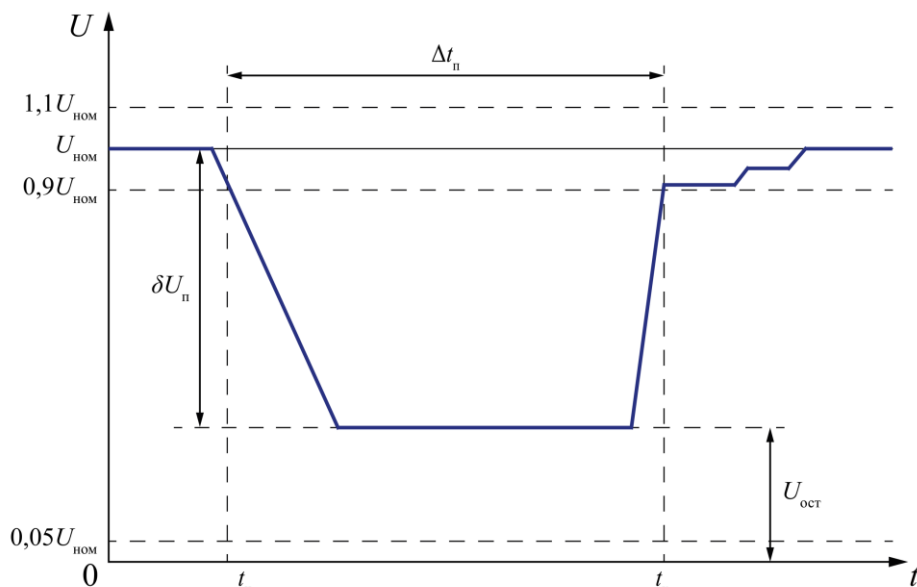


Рис. 1. Кривая провала напряжения в одной из фаз трехфазной сети [1]  
Fig. 1. The voltage dip curve in one of the phases of a three-phase network [1]

ческом процессе провала напряжения: время, за которое напряжение снижается с  $U_{ном}$  до  $U_{ост}$ ; время присутствия в сети сниженного напряжения  $U_{ост}$ ; время, за которое напряжение возрастает до нормального значения  $U_{ном}$ . Глубина провала напряжения определяется как разность между номинальным значением напряжения и минимальным среднеквадратическим значением напряжения в течение времени действия провала напряжения [9].

емые, в основе своей, влиянием нелинейных нагрузок и их изменениями, продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания определяются как длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений. Случайные же события представляют собой серьезные и непредвиденные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных [5]. Внешние воздействия (плохие погодные условия, воздействия третьей стороны, не являющейся пользователем электрической энергии) или повреждения оборудования эксплуататора сети, имеющие непредсказуемый характер, являются основными источниками случайных событий изменения напряжения [6].

Говоря о случайных событиях, начать необходимо с описания таких событий, как прерывания и провалы напряжения. Прерывания напряжения в

На Рис. 1 представлено изменение во времени среднеквадратичного значения напряжения в одной из фаз при провале напряжения длительностью  $\Delta t_{п}$ .

Причинами, по которым возникают провалы напряжения в распределительных сетях низкого и среднего напряжения, являются короткие замыкания (КЗ) и включение в сеть нагрузки большой мощности [10]. Возникающие КЗ связаны с неблагоприятными атмосферными условиями, схлесты-

Таблица 1. Провалы и прерывания напряжения в питающей сети 110 кВ комплекса СПГ за 2019-2023 года [составлено авторами]

Table 1. Voltage dips and interruptions in the 110 kV supply network of the LNG complex for 2019-2023 [compiled by the authors]

Год / Вид нарушения электроснабжения	2019	2020	2021	2022	2023
Провалы	1	2	6	5	12
Прерывания	–	3	1	2	5
Общее кол-во	1	5	7	7	17

ванием и обрывами проводов, а также рядом других факторов. При протекании тока КЗ возникает дополнительное падение напряжения в линии электропередачи, вследствие чего в точке подключения нагрузки снижается напряжение. Разделение провалов напряжения на симметричные и несимметричные вызвано природой их возникновения [11]. Причиной появления симметричных провалов, во время которых напряжение снижается с одинаковым темпом на всех фазах, являются трехфазные КЗ или прямые пуски электрических машин большой мощности. В остальных случаях возникают несимметричные провалы напряжения, вызванные атмосферными перенапряжениями, однофазными или двухфазными короткими замыканиями. Также на тип провала напряжения может влиять режим нейтрали или способы соединения обмоток трансформаторов в сети [12].

При классификации провалов напряжения обычно используют несколько распространенных методов, одними из которых являются метод симметричных составляющих и ABC метод [13, 14]. Первый имеет более общий характер и основан на измеренных данных о симметричных составляющих фазных напряжений, в дальнейшем используемых для расчета режима работы сети. Второй метод получил большее распространение в связи с тем, что в нем рассматриваются группировки A-G провалов напряжения, отличающиеся между собой амплитудой и углом сдвига фаз между ними и позволяющие определить связь между причиной воз-

никновения аварии и конфигурацией сети.

**Воздействие провалов напряжения на работу частотно-регулируемого привода в непрерывном технологическом процессе.** Как было сказано в предыдущих разделах, кратковременные провалы напряжения, имеющие длительность от 50 до 200 мс и характеризующиеся изменением напряжения от 10% до 40% от номинального, могут воздействовать на работу частотно-регулируемого электропривода (ЧРП), находящегося в составе непрерывного технологического процесса, останов которого повлечет за собой брак продукции, простой производства и дополнительные финансовые издержки на перезапуск производства [15]. Применение ЧРП в современных технологических процессах на сегодняшний день уже не является чем-то необычным или новым. Тренд на повышение энергоэффективности [16, 17] и следование принципам энергосбережения на производстве требует использовать самые современные и эффективные методы преобразования электроэнергии в механическую и наоборот. Стабильность работы ЧРП сильно зависит от уровня питающего напряжения. В процессе провала напряжения, появившегося в питающей сети и вызванного чаще всего коротким замыканием, в звене постоянного тока (ЗПТ) напряжение может упасть ниже заранее установленного минимально допустимого значения, что приведет к срабатыванию защиты минимального напряжения (ЗМН), которая встроена в преобразователь частоты (ПЧ) [18]. Результатом срабатывания данной

Таблица 2. Глубина и длительность провалов напряжения по фазам на стороне питающей сети 110 кВ за 2023 год [составлено авторами]

Table 2. The depth and duration of voltage dips in phases on the side of the 110 kV supply network for 2023 [compiled by the authors]

№ события	Дата	Фазы	Длительность провала (прерывания) напряжения $\Delta t_{п}$ , с	Величина остаточного напряжения $U_{ост}$ , о.е. от $U_{ном}$
1	07.04	A, B	0,4	$0,85U_{ном}$
2	18.04	A, B	0,16	$0,77U_{ном}$
3	25.04	A, B	0,5	$0,9U_{ном}$
		C		$0,8U_{ном}$
4	25.04	A, B	0,5	$0,9U_{ном}$
		C		$0,8U_{ном}$
5	24.06	A, B	2,7	$0,81U_{ном}$
6	30.06	A, B, C	1	$0,7U_{ном}$
		A		$0,54U_{ном}$
7	01.07	B	0,13	$0,86U_{ном}$
		C		$0,87U_{ном}$
8	04.07 I с.ш.	B	0,144	$0,62U_{ном}$
9	04.07 II с.ш.	B	0,144	$0,57U_{ном}$
		C		$0,9U_{ном}$
10	08.07	A, B, C	0,079	$0,54U_{ном}$
11	08.07	A, B, C	0,68	$0,79U_{ном}$
12	08.07	A, B, C	0,019	$0,89U_{ном}$

защиты станет останов двигателя, и, следовательно, всего технологического процесса, если речь идет о важном потребителе, влияющем на всю цепочку в целом. Обычно, порогом срабатывания ЗМН установлена величина, равная 70% от  $U_{ном}$ .

Симметричные и несимметричные провалы напряжения, фиксируемые на вводах 110 кВ комплекса СПГ, приводят к останову высокотехнологичного оборудования, имеющего определенные требования к качеству электроэнергии, и снижению производительности комплекса в целом. Электропитание СПГ завода осуществляется по схеме от подстанции (ПС) 110 кВ по двум независимым вводам. В частности, электропитание первого ввода реализуется по ВЛ-110 кВ с отпайкой на ПС, а второго также по ВЛ-110 кВ. Согласно статистике (Таблица 1), за 2019-2023 годы произошло 36 аварий (провалов и прерываний напряжения), причиной которых стали короткие замыкания в питающей сети 110 кВ, вызванные сложными погодными условиями на данном участке сети (атмосферные перенапряжения, схлестывание проводов).

Перенапряжения в зависимости от причины возникновения можно разделить на внутренние и атмосферные (грозовые) [19]. Различные коммутации в электрических сетях являются основной причиной для возникновения внутренних перенапряжений, а атмосферные возникают вследствие ударов молнии. Подробнее рассмотрим именно атмосферные перенапряжения в связи с тем, что они являются практически главной причиной нарушений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на рассматриваемом комплексе СПГ. Разряды молнии между облаком и землей являются источником атмосферных (грозовых) перенапряжений, возникающих в электроэнергетических системах. При прямом попадании молнии в линию или в открытое распределительное устройство (ОРУ) наблюдаются наибольшие грозовые перенапряжения [20]. Переносимый молнией заряд, имеющий амплитуду свыше миллиона вольт и длительность до 100 мкс, является опасным для изоляции электрооборудования любого номинального напряжения. Перекрытие изоляции, ее дальнейший пробой и последующее возникновение короткого замыкания происходит после атмосферного перенапряжения в том случае, если появившееся напряжение в линии превышает электрическую прочность изоляции в какой-либо точке линии или подстанции [21, 22].

Качественно заземленные грозозащитные тросы для воздушных линий и установленные на территории ОРУ молниеотводы являются основным средством защиты от перенапряжений на указанных объектах. Установка ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН) является одним из направлений для повышения эффективности эксплуатации линейной изоляции при грозовых поражениях, при этом экономически целесообразной на сегодняшний день становится установка ОПН на двухцепных ЛЭП, аварии на которых приводят к большому ущербу [23].

Несмотря на корректную работу систем АПВ и АВР, аварийное отключение хотя бы одного из пи-

тающих вводов 110 кВ также приводит к работе технологической защиты производственного и компрессорного оборудования и последующему останову выпуска продукции. Снижение производительности комплекса СПГ на 10...15% от плановой фактически зависит от интенсивности грозовой активности. В Таблице 2 представлены статистические данные о провалах напряжения за 2023 год.

**Методы обеспечения бесперебойной работы технологического оборудования при нарушениях ПКЭ.** Рассмотренные примеры технологического оборудования, попадающие под влияние нарушений ПКЭ, иллюстрируют значимость проблемы возникновения провалов напряжения в распределительных сетях предприятий. В настоящее время существует несколько стратегий по противодействию влиянию провалов напряжения на работу важнейших электротехнических комплексов в технологических установках критической инфраструктуры производства. Первая стратегия включает мероприятия, направленные на оптимизацию питающей сети в целях обеспечения наименьшей области распространения, минимальной частоты и глубины провалов напряжения [24]. Действия второй стратегии аккумулируются на работе собственных средств ЧРП на преодоление провала напряжения [25].

Одним из способов по снижению влияния провалов напряжения, вызванных короткими замыканиями в месте присоединения нагрузки, является деление собственной электросети производства высокого напряжения на независимые контуры. Такой подход удобен в применении на этапе формирования предприятия и проектирования сети электропитания, которая будет учитывать нарушения ПКЭ в питающей сети. Подключение критически важных потребителей к электропитанию от станции собственных нужд (ЭСН) также может рассматриваться в качестве защиты электроустановок от провалов и прерываний напряжения. Возведенная таким образом локальная энергосистема защищена от воздействий внешней сети и, следовательно, от нарушений ПКЭ [26]. Устройства автоматического включения резервного источника питания (АВР) традиционно применяют в сетях для обеспечения защиты потребителей от прерываний напряжения. Для повышения быстродействия срабатывания АВР были разработаны устройства быстродействующего АВР (БАВР) [27]. Вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) (линейный регулятор) может быть использован для поддержания напряжения в точке присоединения нагрузки [28]. Установка источников бесперебойного питания (ИБП), построенных на базе аккумуляторных батарей (АКБ) или резервных дизель-генераторных устройств (ДГУ), также может быть использована в целях обеспечения нормальной работы технологической установки при снижении напряжения [29]. Возможностью быстро отдать аккумулируемую энергию обладает ряд других накопителей, использующих для этого энергию электрического поля – суперконденсаторы, магнитного поля – сверхпроводящие индуктивности и запаасающие механиче-

скую энергию вращения – маховики. Суперконденсаторы и сверхпроводящие катушки индуктивности в составе динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН), в котором помимо накопителей присутствуют силовые преобразователи и трансформаторы, при регистрации провала напряжения формируют токи первичной обмотки трансформатора с целью формирования недостающего уровня напряжения на вторичной обмотке [30].

Анализ рассмотренных способов повышения качества электроэнергии в точке присоединения потребителя, согласно второй стратегии, показал, что всех их объединяет необходимость установки дополнительного оборудования, подключения в функционирующие схемы агрегатов и налаживания цепочек обслуживания устройств, что может быть причиной выбора иных решений.

Возможность поддержания напряжения на заданном уровне, обеспечивающем нормальный режим работы ответственного электротехнического комплекса, может обеспечить активный выпрямитель, введенный в состав ЧРП. Иным методом повысить устойчивость электропривода к провалам напряжения является применение импедансного Z-инвертора, особенность которого состоит в повышении напряжения в ЗПТ ввиду накопления энергии в индуктивных и емкостных элементах симметричного моста (соединенные крест-накрест два конденсатора и две катушки индуктивности) [31]. Еще один способ обеспечения управляемости электропривода в ситуации нарушения ПКЭ основан на преобразовании кинетической энергии, имеющейся во вращающихся массах двигателя и приводного механизма, в электроэнергию для заряда конденсатора в ЗПТ и обеспечении, близком к номинальному, напряжения в цепи постоянного тока. Существует метод, основанный на снижении механической мощности на валу двигателя за счет плавного уменьшения частоты вращения, которое в свою очередь уменьшает электромагнитный момент и позволяет двигателю работать на пониженном напряжении во время кратковременных провалов. Также есть исследования, изучающие применение режима ослабленного поля, использующего специальные алгоритмы управления для ослабления потока сцепления ротора и увеличения  $q$ -составляющей тока статора, в целях поддержания требуемого электромагнитного момента [32]. Помимо этого, можно применить поддержку выбега двигателя, реализуемую за счет формирования минимальных токов статора, и покрытие потерь энергии за счет кинетической энергии вращающегося механизма, для последующего быстрого вывода на номинальный режим при восстановлении питания от централизованного источника [33].

Недостатком алгоритмических методов является малая глубина провала напряжения (до 15%) при номинальной нагрузочной мощности, при которой способы, базирующиеся на проведении изменений в управлении ЧРП, способны обеспечивать управляемость электропривода на всей длительности нарушения ПКЭ. Более того, в ряде случаев требуется внедрение новых блоков в систему управле-

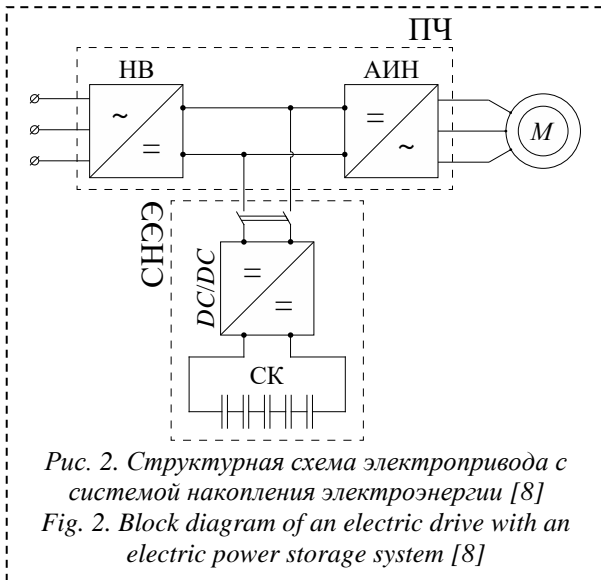
ния, что, безусловно, ведет к усложнению схемы, а также снижает устойчивость всей системы.

Анализ всех описанных способов нивелирования провалов и прерываний напряжения показал, что ввиду особенностей технологического процесса рассматриваемого ЧРП компрессора по жесткому поддержанию требуемых параметров, останов которого влечет за собой многомиллионные убытки на недоотпуск продукции и затраты на повторный запуск всего комплекса СПГ, наибольший интерес вызывает использование средств накопления энергии, подключаемых в ЗПТ, для обеспечения непрерывной работы при любых параметрах глубины и длительности провалов напряжения.

**Построение факторной модели для определения конфигурации СНЭЭ.** Одним из способов предотвращения останова электродвигателя и обеспечение его устойчивой работы во время кратковременных прерываний напряжения питания является применение системы накопления энергии (СНЭЭ), которая может быть выполнена как на базе аккумуляторной батареи, так и на основе конденсаторов большой емкости – суперконденсаторов (ионисторов) [34]. Также возможно использование гибридной СНЭЭ, включающей в свой состав оба вида накопителя. Подключенная к ЗПТ с правильно выбранной емкостью накопителя, СНЭЭ обеспечит безаварийную работу ЧРП во время провалов напряжения на заданное время [35]. Задачи, которые стоят перед авторами в данном исследовании – исследование зависимости общего количества применяемых суперконденсаторов (СК) в СНЭЭ от параметров напряжения и емкости единичных элементов, а также номинальных параметров поддерживаемого объекта, и создание алгоритма выбора ионистора, подходящего для исследуемого электротехнического комплекса и удовлетворяющего критериям максимальной технической (количество используемых конденсаторов) и экономической (общая стоимость системы накопления) эффективности.

Исходя из параметров электропривода (ЭП), основными факторами, по которым осуществляется выбор СНЭЭ на базе СК, являются: электрическая потребляемая мощность  $P_{эл}$  (кВт), питающее напряжение  $U_c$  (кВ), максимальное  $U_{dc\ max}$  (кВ) и минимальное (остаточное)  $U_{dc\ min}$  (кВ) значения напряжения в ЗПТ, ток в ЗПТ  $I_{dc}$  (А), длительность провала напряжения  $t_n$  (с), глубина провала напряжения  $\delta U_n$  (%), а также энергия  $W_{эл}$  (Дж), требующаяся электротехническому комплексу для нормальной работы за время нарушения ПКЭ. На Рис. 2 показана структурная схема подключения СНЭЭ в ЗПТ ПЧ.

Потребляемая мощность  $P_{эл}$  и время провала напряжения  $t_n$  определяют энергию  $W_{эл}$ , которую необходимо запасти СНЭЭ для обеспечения электроэнергией электропривода. Глубина провала напряжения  $\delta U_n$  и уставка ЗМН в ПЧ влияет на формирование минимально допустимого напряжения в ЗПТ  $U_{dc\ min}$ . Выведем формулу расчета емкости суперконденсатора  $C$  (Ф) через энергию электрического поля:



$$W_{эл} = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (1)$$

Количество энергии  $W_{эл}$ , требуемое для работы ЧРП за время провала напряжения  $t_{п}$ , определяется следующим образом:

$$W_{эл} = \frac{C \cdot U_{dc\ max}^2}{2} - \frac{C \cdot U_{dc\ min}^2}{2} \quad (3)$$

Умножим на 2 обе части уравнения и раскроем  $W_{эл}, U_{dc\ max}, U_{dc\ min}$ :

$$2 \cdot P_{эл} \cdot t_{п} = C \cdot (\sqrt{2} \cdot U_c)^2 - C \cdot (0,7 \cdot \sqrt{2} \cdot U_c)^2 \quad (4)$$

Выразим C:

$$C = \frac{2 \cdot P_{эл} \cdot t_{п}}{2 \cdot U_c^2 - 0,7^2 \cdot 2 \cdot U_c^2} = \frac{P_{эл} \cdot t_{п}}{0,51 \cdot U_c^2} \quad (5)$$

Таким образом, выведенная формула отражает зависимость емкости конденсатора от электрической мощности, времени провала, коэффициента изменения напряжения в ЗПТ и напряжения сети.

Для рассматриваемого электротехнического комплекса при мощности  $P_{эл} = 10,3$  МВт, напряжении сети  $U_c = 6,6$  кВ и времени провала  $t_{п} = 5$  с емкость суперконденсатора составит  $C = 2,32$  Ф.

Параметры, по которым была рассчитана емкость необходимого для работы СК, также являются основными факторами, служащими критерием выбора единичных СК, из которых составляется общий модуль. Техническими характеристиками, по которым осуществляется выбор единичных СК, являются: номинальное напряжение  $u_{ск}$  (В), номи-

Таблица 3. Основные технические характеристики рассматриваемых единичных суперконденсаторов [5]  
Table 3. The main technical characteristics of the considered single supercapacitors [5]

№ п/п	Наименование	Цена	Емкость	Номинальное напряжение
		<i>p</i> , руб.		
1	2	3	4	5
1	СКФ-3-2В7	108	3	2,7
2	СКФ-5-2В7	117	5	2,7
3	СКФ-6-2В7	142	6	2,7
...				
25	СКФ-3000-3В0	7 500	3 000	3
26	СКФ-3400-3В0	8 460	3 400	3

$$W_{эл} = P_{эл} \cdot t_{п} \quad (2)$$

Разность энергий электрического поля при (10-20%)  $U_{dc\ max} = \sqrt{2} \cdot k \cdot U_c$  и  $U_{dc\ min} = 0,7 \cdot \sqrt{2} \cdot U_c$ , где 0,7 – уставка срабатывания ЗМН в ПЧ;  $k$  – коэффициент запаса (1,05-1,1), приравняем к  $W_{эл}$ .

Тогда получим:

нальная емкость  $c_{ск}$  (Ф) и цена за единицу  $p$  (руб.). Величина первого параметра влияет на количество последовательно соединенных СК в схеме для достижения требуемого напряжения нагрузки, при этом в обратной зависимости находится второй параметр, который при последовательном соединении уменьшается в  $n$  раз, где  $n$  – количество последовательно соединенных СК.

Следовательно, для получения необходимой величины емкости, рассчитанной по формуле (5), необходимо последовательно соединенные линии СК подключить между собой параллельно. Последний из перечисленных факторов влияет на общую стоимость модуля батареи СК.

Далее рассмотрим пример того, как различные приведенные факторы влияют на конечный выбор топологии решения. В Таблице 3 приведены основные харак-

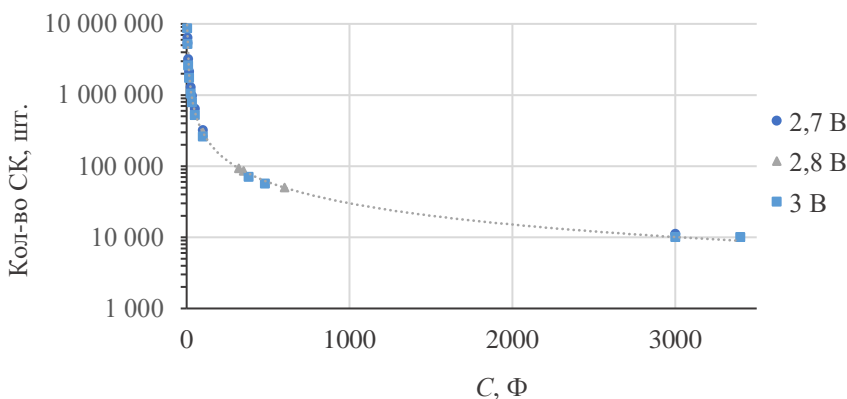


Рис. 3. Кривые зависимости количества СК от емкости при разных уровнях напряжения [составлено авторами]  
Fig. 3. Curves of the dependence of the number of SC on the capacitance at different voltage levels [compiled by the authors]

Таблица 4. Результаты расчетов модулей СК, получаемых из единичных СК [составлено авторами]  
 Table 4. The results of calculations of SC modules obtained from single SC [compiled by the authors]

№ п/п	Наименование	Кол-во последовательно соединенных СК	Эквивалентная емкость последовательно соединенных СК	Кол-во параллельно соединенных линий с последовательно соединенными СК	Общее кол-во СК в модуле	Общая стоимость модуля
		тыс. шт.	$F$	шт.	тыс. шт.	млн руб.
1	2	3	4	5	6	7
1	СКФ-3000-3В0	3,334	0,900	3	10,002	75,02
2	СКФ-3400-3В0	3,334	1,020	3	10,002	84,62
3	СКФ-3000-2В7	3,704	0,810	3	11,112	74,41
...						
25	СКФ-3-3В0	3,334	0,001	2 579	8 598,386	1 006,01
26	СКФ-3-2В7	3,704	0,001	2 865	10 611,960	1 146,09

теристики единичных суперконденсаторов фирмы «Феникс», которые будут использоваться в расчете. Для дальнейшего ориентирования по приведенным таблицам необходимо разъяснить структуру построения наименования каждого конденсатора, где СКФ означает «суперконденсатор Феникс», число - # - обозначает номинальную емкость, на которую спроектирован СК, а - #В# иллюстрирует номинальное напряжение выбранного СК. Например, модель СКФ-3-2В7 имеет емкость 3 Ф и напряжение 2,7 В.

В Таблице 4 показаны результаты расчетов модулей СК из СК в Таблице 3, при этом в столбце 3 приведено количество последовательно соединенных СК для получения нужного напряжения, затем параллельно соединенных ветвей (столбец 5) для увеличения общей емкости (столбец 4), сниженной в связи с последовательно соединенными конденсаторами. В итоге будет получено количество единичных СК (столбец 6), необходимое для покрытия требуемой энергии электротехнического комплекса за время провала напряжения. Помимо этого, рассчитана общая стоимость каждого получившегося модуля исходя из цены за применяемый СК.

Результаты расчетов специально были отсортированы по возрастанию от наименьшего общего количества используемых СК к наибольшему для того, чтобы показать, что в общем и целом при увеличении номинальной емкости итоговое количество суперконденсаторов уменьшается, что также ведет к снижению общей стоимости всего модуля. Однако результаты расчетов для СКФ-3000-3В0 и

СКФ-3400-3В0 иллюстрируют то, что, несмотря на разницу в 400 Ф номинальной емкости, количество применяемых СК в модуле одинаково для обоих случаев (вызвано это спецификой подсчета параллельно соединенных линий СК, которых должно быть целое количество), что позволяет, так как це-

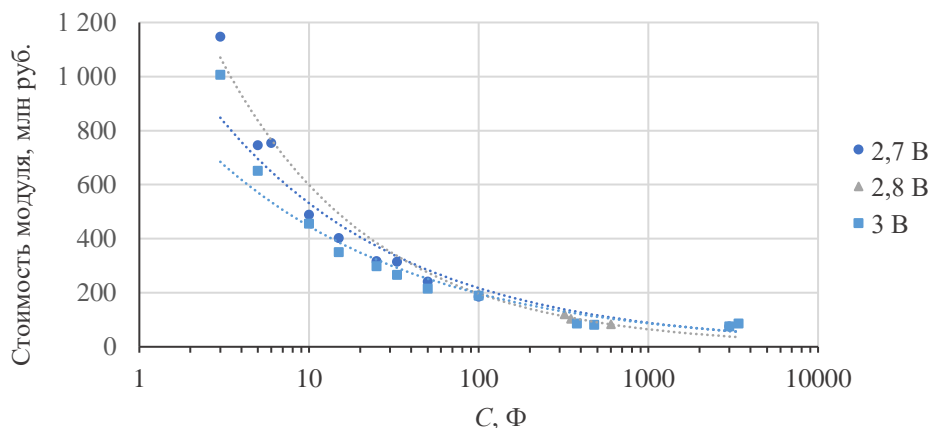


Рис. 4. Кривые зависимости стоимости итогового модуля от емкости при разных уровнях номинального напряжения [составлено авторами]  
 Fig. 4. Curves of dependence of the cost of the final module on the capacity at different levels of rated voltage [compiled by the authors]

на за единицу СКФ-3000-3В0 ниже чем за СКФ-3400-3В0, спроектировать требуемую по техническим параметрам, напряжению в ЗПТ и емкости, но меньшую по стоимости систему. На Рис. 3 изображено изменение количества суперконденсаторов в зависимости от их номинального напряжения и величины емкости.

Анализируя полученные результаты из Таблицы 4 и их графическую интерпретацию на Рис. 3, можно сделать вывод, что в теории выбрать и собрать данные модули СК возможно в контексте решения проблемы провалов напряжения рассматриваемого электротехнического комплекса, при этом одним из лучших вариантов по таким критериям, как количество используемых СК, косвенно влияющих на сложность сборки и массогабаритные характеристики модуля, а также итоговая стоимость в выборке из Таблицы 4, является СКФ - 3000-3В0. Также график на Рис. 3 показывает, что

скорость изменения количества необходимых конденсаторов при увеличении номинальной емкости постепенно снижается, формируя экспоненциальную зависимость количества от емкости. Это доказывает, что зависимость между указанными параметрами нелинейная и требует детального рассмотрения.

Тем не менее, применение СНЭЭ с использованием СК напряжением 2,7-3 В в системе ЧРП, имеющей  $U_{зпт} = 10$  кВ, приводит к использованию огромного числа устройств (от 10 тыс. до 10 млн шт.), вызванному повышением уровня напряжения до требуемого значения и последующим восстановлением сниженной емкости, реализация которой крайне сомнительна.

На Рис. 4 показаны изменения общей стоимости составного модуля СК, требуемого для обеспечения необходимой энергией рассматриваемой нагрузки в течение 5 секунд. Согласно данным графикам, наблюдается экспоненциальная зависимость между стоимостью и емкостью единичного используемого суперконденсатора. Видно, что при малых значениях емкости разница между стоимостью модулей при номинальном напряжении одного СК 2,7 В и 3 В существенная в связи с тем, что, даже несмотря на меньшую цену СК на 2,7 В, в связи с меньшей величиной напряжения, данные элементы для получения  $U_{зпт}$  нужно использовать в большем количестве, чем те, чье номинальное напряжение выше. Однако при дальнейшем увеличении емкости скорость изменения стоимости постепенно снижается, и разница между СК на 2,7 В и 3 В выравнивается.

Проведем еще один расчет требуемой СНЭЭ для исследуемого ЭП, взяв за единицу элемента

этой системы составные СК компании Феникс (Таблица 5), отличающиеся от представленных в Таблице 3 повышенным номинальным напряжением и в ряде случаев большей емкостью. Стоит отметить, что ввиду коммерческой тайны производителя суперконденсаторов некоторые СК (отмечены курсивом) имеют приблизительную цену, принятую на основе цен схожих по характеристикам других СК.

Аналогично единичным СК, в таблице произведена сортировка по уровням напряжений для лучшего понимания характеристик и цен на каждую модель. Также выполним расчет (Таблица 6) требуемого количества составных СК для поддержания напряжения на номинальном уровне в рассматриваемом электротехническом комплексе во время нарушения ПКЭ и отсортируем полученные результаты по возрастанию общего количества составных СК в модуле.

По результатам расчетов построим зависимости (Рис. 5) количества применяемых составных СК в итоговом модуле от их емкости для разного диапазона напряжений.

При анализе полученных зависимостей подтверждаются результаты предыдущего расчета, в котором при повышении номинального напряжения снижается количество применяемых СК и их номинальная величина емкости. Так как нам известна стоимость каждого составного СК, представленного в Таблице 6, построим зависимости (Рис. 6) общей стоимости необходимых модулей при разных емкостях и диапазонах напряжения, входящих в состав составных СК.

Делая обобщенный вывод по полученным кри-

Таблица 5. Основные технические характеристики составных суперконденсаторов [5]

Table 5. Main technical characteristics of composite supercapacitors [5]

№ п/п	Наименование	Цена	Емкость	Номинальное напряжение
		<i>p</i> , тыс. руб.	<i>c</i> , Ф	<i>u</i> , В
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1	МСК-360-11	20 500	360	11,5
2	МСК-770-14	59 000	770	14
3	МСК-385-14	33 100	385	14
...				
94	МСК-0,6-450	123 000	0,6	450
95	МСК-0,37-750	159 900	0,37	750

Таблица 6. Результаты расчетов модулей СК, получаемых из составных СК [составлено авторами]

Table 6. The results of calculations of SC modules obtained from composite SC [compiled by the authors]

№ п/п	Наименование	Кол-во последовательно соединенных СК	Эквивалентная емкость последовательно соединенных СК	Кол-во параллельно соединенных линий с последовательно соединенными СК	Общее кол-во СК в модуле	Общая стоимость модуля
		шт.	<i>F</i>	шт.	шт.	млн руб.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	МСК-20-425	24	0,83	3	72	28,80
2	МСК-55-144	70	0,79	3	210	47,25
3	МСК-4-420	24	0,16	15	360	88,56
...						
94	МСК-2,5-27	371	0,01	345	127 995	1 062,36
95	МСК-0,5-27	371	0,001	1722	638 862	4 599,81



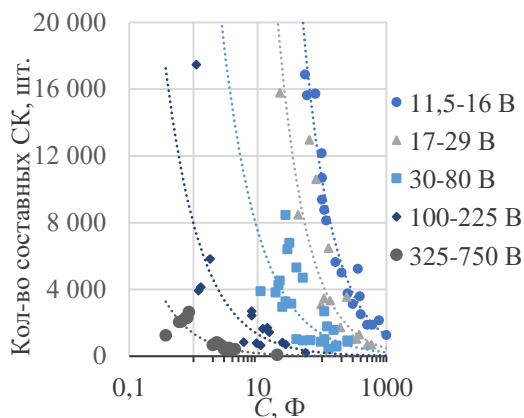


Рис. 5. Кривые зависимости количества составных СК от емкости при разных диапазонах напряжения [составлено авторами]

Fig. 5. Curves of dependence of the number of composite SC on capacitance at different voltage ranges [compiled by the authors]

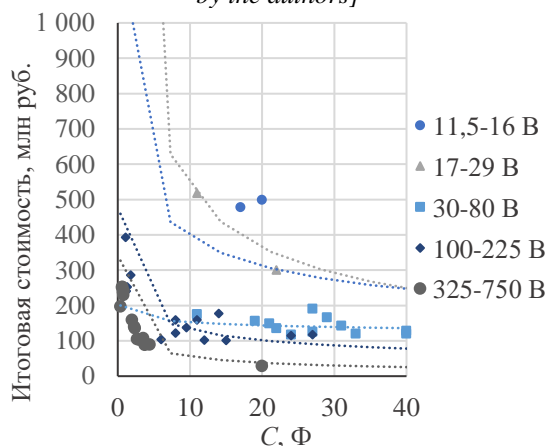


Рис. 6. Кривые зависимости стоимости итогового модуля составных СК от емкости при разных уровнях номинального напряжения [составлено авторами]

Fig. 6. Curves of dependence of the cost of the final module of composite SC on capacity at different levels of rated voltage [compiled by the authors]

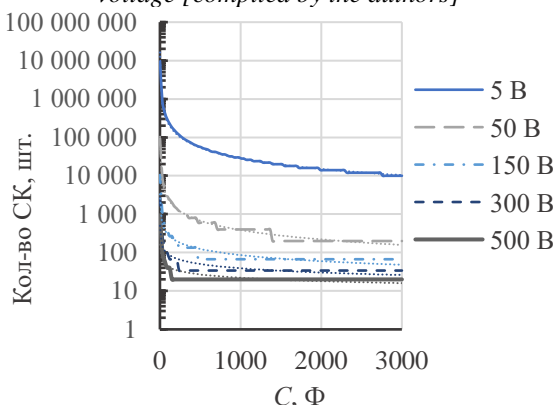


Рис. 7. Графики зависимости количества СК от номинальной емкости при напряжении 5 В, 50 В, 150 В, 300 В и 500 В [составлено авторами]

Fig. 7. Graphs of the dependence of the number of SC on the rated capacity at a voltage of 5 V, 50 V, 150 V, 300 V and 500 V [compiled by the authors]

вым (Рис. 3-6), основанным на реальных моделях СК, стоит отметить, что повышение величины но-

минального напряжения каждого отдельного элемента экспоненциально влияет на количество используемых в целом ионисторов, а это, в свою очередь, на конечную стоимость всей системы. Полученные графики построены на основе известных моделей СК компании «Феникс» с целью учета не только технических, но и экономических характеристик.

В заключительном эксперименте по исследованию зависимости количества используемых суперконденсаторов от их номинального напряжения и емкости не будет привязки к конкретным моделям СК производства существующей компании. В связи с этим можно зафиксировать какой-то из параметров (напряжение или емкость) и рассмотреть, как меняется количество применяемых СК с шагом в 10 Ф или 5 В соответственно. На Рис. 7 показаны кривые, отражающие зависимость итогового количества СК от их номинальной емкости при различных фиксированных значениях напряжения. В данном случае были выбраны 5 ступеней напряжения, от 5 В до 500 В.

Исследуя область между графиками 5 В и 500 В, видно, что при повышении величины номинального напряжения, во-первых, снижается количество применяемых СК, что было доказано в прошлых экспериментах, во-вторых, заметна нелинейная зависимость напряжения и того значения номинальной емкости, при котором дальнейшее ее увеличение не влияет на количество используемых СК. Это позволяет сделать вывод, что существует такая конфигурация параметров напряжения и емкости одного СК, при которой достигается более эффективное как с технической, так и с экономической точки зрения применение СНЭЭ. В конечном итоге будет применено наименьшее возможное количество СК, что позволит снизить потери мощности, рассеиваемой на внутреннем сопротивлении конденсаторов, и снизить стоимость всей системы накопления. Отчасти вид таких кривых, что на Рис. 7, получается в связи с правилами подключения суперконденсаторов друг с другом, в которых предусмотрено строгое следование очередности соединения: сначала только последовательное соединение для увеличения напряжения, а затем полученные линии из последовательно набранных конденсаторов соединяют параллельно для получения необходимой емкости. В данном случае получается, что количество элементов в параллельных линиях не может быть разным, иначе в последней линии было бы меньшее количество СК, что все равно бы позволило достичь требуемой емкости. К последней параллельной линии, имеющей иное количество суперконденсаторов, будет приложено большее напряжение, чем то, на которое они были собраны, что недопустимо.

Проведем обратный эксперимент относительно того, который был представлен на Рис. 7. Теперь пройдем по всем значениям напряжения от 1 В до 500 В с разными фиксированными параметрами емкости 3 Ф, 60 Ф, 900 Ф, 1800 Ф, 3000 Ф. Получившиеся кривые проиллюстрированы на Рис. 8.

Анализируя полученные зависимости, заметим, что 3 из 5 графиков в определенный момент «сливаются» в один. Действительно, кривые, получен-

не была бы выбрана в диапазоне от 900 Ф до 3000 Ф, количество применяемых конденсаторов не изменилась, при этом были бы различны их техниче-

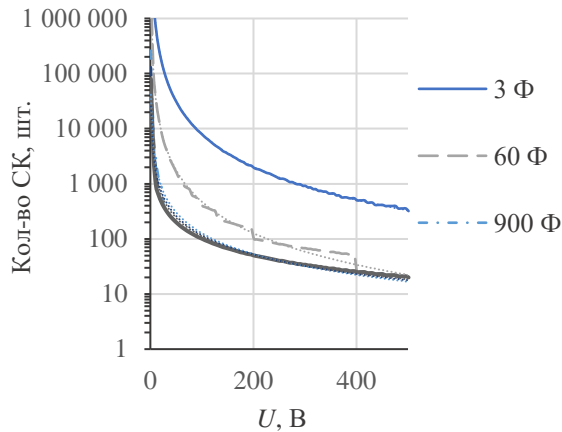


Рис. 8. Графики зависимости количества СК от номинального напряжения при разной емкости [составлено авторами]  
 Fig. 8. Graphs of the dependence of the number of SC on the rated voltage at different capacities [compiled by the authors]

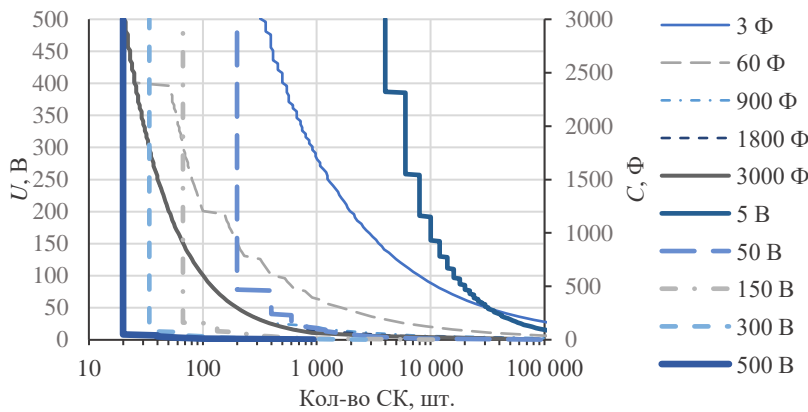


Рис. 9. Графики зависимости номинального напряжения и емкости от итогового количества применяемых СК [составлено авторами]  
 Fig. 9. Graphs of the dependence of the rated voltage and capacitance on the total number of SCS used [compiled by the authors]

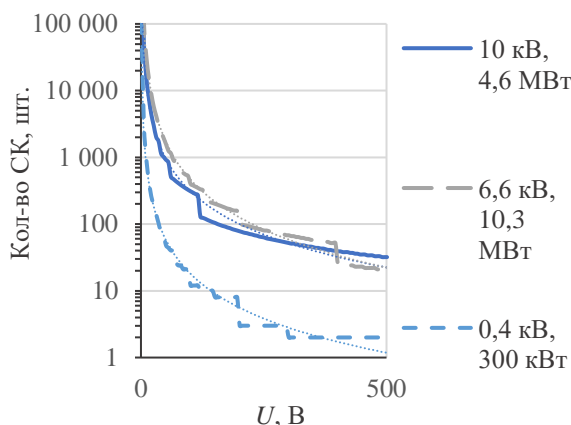


Рис. 10. Графики зависимости количества СК для различных ЭП от напряжения, при  $C_{ном} = 60 \text{ Ф}$  [составлено авторами]  
 Fig. 10. Graphs of the dependence of the number of SC for different ED from voltage, at  $C_{ном} = 60 \text{ F}$  [compiled by the authors]

ные при емкости 900, 1800 и 3000 Ф, при значениях напряжения 25 В и больше имеют одинаковое количество СК. Другими словами, какая бы емкость

технические и стоимостные характеристики. При сравнении графиков (Рис. 7 и 8) видно, что ширина промежутка между крайними кривыми 3 Ф и 3000 Ф (Рис. 8) меньше, чем ширина промежутка между кривыми 5 В и 500 В (рисунок 7). Можно сделать вывод, что скорость снижения итогового количества СК больше в том случае, когда изменяется в сторону увеличения номинальное напряжение отдельного суперконденсатора, чем тогда, когда повышается его емкость. Это объясняется двумя факторами: во-первых, в формуле энергии электрического поля энергия зависит от квадрата напряжения конденсатора, в то время как с емкостью связь в первой степени; во-вторых, использование описанной ранее стратегии подключения элементов в схеме.

Построив зависимости номинального напряжения и номинальной емкости отдельного СК от их итогового количества относительно графиков, полученных на Рис. 7 и 8, получим кривые, проиллюстрированные на Рис. 9. Точки пересечения графиков напряжения и емкости показывают разницу между скоростью достижения одного и того же количества применяемых СК при неодинаковых подходах к изменению номинальных параметров конденсатора.

Все эксперименты, которые были проведены в рамках данной работы, относились исключительно к конкретной нагрузке, параметры которой предоставили основу для расчета СНЭЭ. Однако этот электромеханический комплекс имеет большую мощность и напряжение 6,6 кВ, что задает некоторую специфичность выводам, полученным ранее. В этой связи необходимо проверить выраженные зависимости на обобщенных объектах различной мощности и, что немаловажно, различного напряжения. Двигатели по номинальному напряжению делятся на низковольтные и высоковольтные. В последнюю категорию входит уже рассмотренный электропривод, и эксперименты, проведенные в рамках данного сегмента, скорее всего, покажут аналогичные

результаты. Отличие напряжений больше, чем в 16 раз дает основание провести исследования, направленные на подтверждение полученных ранее выводов. Возможно, для низковольтных двигателей влияние величины номинального напряжения СК будет не таким «очевидным», и наоборот, такие факторы, как конфигурация подключения в схеме и номинальная емкость, станут определяющими в данном уровне напряжения.

Для реализации данных зависимостей необходимо выбрать параметры объектов, исследуемых в данном вопросе. Как и в случае с электроприводом на 10,3 МВт, для двух других объектов будет получена требуемая емкость, необходимая для нивели-

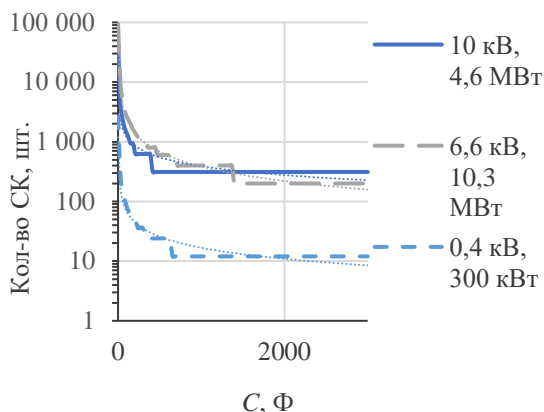


Рис. 11. Графики зависимости количества СК для различных ЭП от емкости, при  $U_{ном} = 50$  В [составлено авторами]

Fig. 11. Graphs of the dependence of the number of SC for different ED from capacity, at  $U_{ном} = 50$  В [compiled by the authors]

рования провала напряжения глубиной до 30% и продолжительностью 5 с. В Таблице 7 представлены характеристики электроприводов, рассматриваемые в данном анализе.

Помимо ЭП на 10,3 МВт для сравнения были взяты ЭП с меньшей мощностью, но на более вы-

Таблица 7. Характеристики номинального напряжения, мощности и емкости СНЭЭ электроприводов [24]  
Table 7. Characteristics of the rated voltage, power and capacity of PSS electric drives [24]

Наименование объекта	$U_{ном},$ кВ	$P_{ном},$ кВт	$C_{СНЭЭ},$ Ф
ЭП 10 кВ, 4,6 МВт	10	4600	0,45
ЭП 6,6 кВ, 10,3 МВт	6,6	10300	2,32
ЭП 0,4 кВ, 300 кВт	0,4	300	18,38

сокое напряжение, и низковольтный ЭП, обладающий большой мощностью для своего уровня напряжения. Благодаря тому, что расчетная емкость обратно пропорциональна квадрату номинального напряжения привода, были получены такие разные величины данного параметра в Таблице 7. Для построения графиков, изображенных на Рис. 10 и 11, были взяты кривые при номинальной емкости 60 Ф и при номинальном напряжении 50 В.

Делая вывод по полученным кривым, можно сказать, что номинальное напряжение и мощность электротехнического комплекса, рассматриваемого в качестве объекта применения СНЭЭ на базе суперконденсаторов, хоть и влияет на величину тре-

буемой емкости, но фактически варьирование номинальной величины напряжения отдельного конденсатора демонстрирует большее множество вариантов для изменения конечного количества СК.

**Алгоритм выбора суперконденсаторов.** На основе полученных математических зависимостей, проиллюстрированных ранее, был сформирован алгоритм, позволяющий определить наименование и характеристики того суперконденсатора из общей базы данных, который удовлетворял бы заданным параметрам исследуемого объекта и отвечал поставленным технико-экономическим критериям выбора. Так как алгоритм требует детального описания, он был разделен на две части. На Рис. 12 представлена 1 часть алгоритма. Начало алгоритма сопровождается вводом начальных данных:  $P_{ЭП}$  – мощность ЭП, для которого будут осуществляться расчеты и подбор СК;  $U_c$  – номинальное напряжение ЭП;  $t_n$  – максимальная длительность провала напряжения, за которое СНЭЭ должна поддерживать работу ЭП;  $\delta U_y$  – величина остаточного напряжения в относительных единицах, ниже которого ЭП перестает поддерживать нормальный режим работы;  $k$  – коэффициент запаса, используемый для учета колебаний напряжения в ЗПТ. После ввода необходимых начальных данных – основных параметров ЭП и характеристик провала напряжения – производится расчет следующих параметров:  $U_{ЗПТmax} = \sqrt{2} \cdot k \cdot U_c$  – номинальное напряжение в ЗПТ с учетом коэффициента запаса;  $I_{ЗПТ} = P_{ЭП} / U_{ЗПТmax}$  – номинальный ток в ЗПТ;  $C_{тр}$  – требуемая емкость СНЭЭ, необходимая для накопления энергии в том количестве, которого будет достаточно для поддержания ЭП в работе, рассчитывается по формуле (5). Следующим этапом является загрузка базы данных СК в алгоритм, содержащей такие параметры как:  $N_{СК}$  – общее количество СК в базе;  $U_{СК}$  – номинальное напряжение СК;  $i_{СК}$  – максимальный разрядный ток СК;  $c_{СК}$  – емкость СК;  $p_{СК}$  – цена СК. После первых

трех этапов в описываемом алгоритме начинается цикл.

Целью данного цикла является перебор всех СК в базе данных для получения таких параметров, как:  $n_{ски}$  – число последовательно соединенных  $i$ -ых СК для достижения напряжения  $U_{ЗПТmax}$ ;  $U_{экви}$  – суммарное напряжение последовательно соединенных  $i$ -ых СК;  $C_{экви}$  – эквивалентная емкость последовательно соединенных  $i$ -ых СК. Алгоритм сначала высчитывает нужное  $n_{ски}$ , затем производит расчет результирующей емкости  $C_{экви}$ , далее сравнивает полученную емкость с величиной  $C_{тр}$  и, если условие не выполняется, то производится параллельное подключение к существующей линии из

последовательно соединенных ионистров идентичной линии для увеличения не выполняющего условие параметра. После того, как условие с емкостью будет выполнено, рассчитывается суммарное количество СК во всех линиях  $q_{ски}$  и затем производится проверка удовлетворения условию  $i_{ски} \geq I_{ЗПТ}$ . Выполнившие условие  $i$ -ые конденсаторы записываются в отдельную базу данных и цикл повторяется, пока не будут просчитаны и проверены все элементы из общего массива СК. Таким образом, на данном этапе алгоритма отбрасываются все те  $i$ -ые СК, имеющие максимальный разрядный ток меньше тока в ЗПТ, а значит, не имеющие возможности дальнейшего участия в выборе СК для СНЭЭ рассматриваемого ЭП. На Рис. 13 показана вторая

часть алгоритма выбора ионистора.

Вторая часть алгоритма начинается с построения зависимостей вида  $q_{ски} = f(c)$  при фиксированном значении  $u_{ски}$  для каждого  $i$ -го СК, отобранного на предыдущем этапе, при этом берутся все значения емкости от  $c_{ск\ min}$  до  $c_{ск\ max}$  из первоначальной базы данных. Затем по построенным кривым осуществляется отбор десяти  $ij$ -ых конденсаторов, имеющих наименьшее число используемых элементов в СНЭЭ. На данном этапе алгоритм реализовал поиск наиболее оптимального по количеству элементов решения, и в случае, когда общая стоимость как критерий выбора не важна, необходимо произвести поиск того  $ij$ -го СК, который бы удовлетворял условию наименьшего значения пара-



Рис. 12. Алгоритм выбора суперконденсатора, часть 1 [составлено авторами]  
 Fig. 12. Supercapacitor selection algorithm, part 1 [compiled by the authors]

метра  $q_{ckij}$  и на этом алгоритм будет завершен. В случае, когда необходимо также учесть и критерий наименьшей стоимости получаемой СНЭЭ, среди десяти отобранных  $ij$ -ых СК выбирается тот, чья общая стоимость  $T_{ckij}$  будет наименьшей. На этом алгоритм можно считать завершенным.

**Вывод.** В рамках данной работы была рассмотрена структура электротехнического комплекса

что в рамках рассматриваемого электротехнического комплекса наиболее подходящим решением для выполнения задачи поддержания непрерывности технологического процесса является использование СНЭЭ на базе суперконденсаторов. На основе параметров единичных СК были построены зависимости итогового количества применяемых СК в СНЭЭ от напряжения при постоянной емкости и от

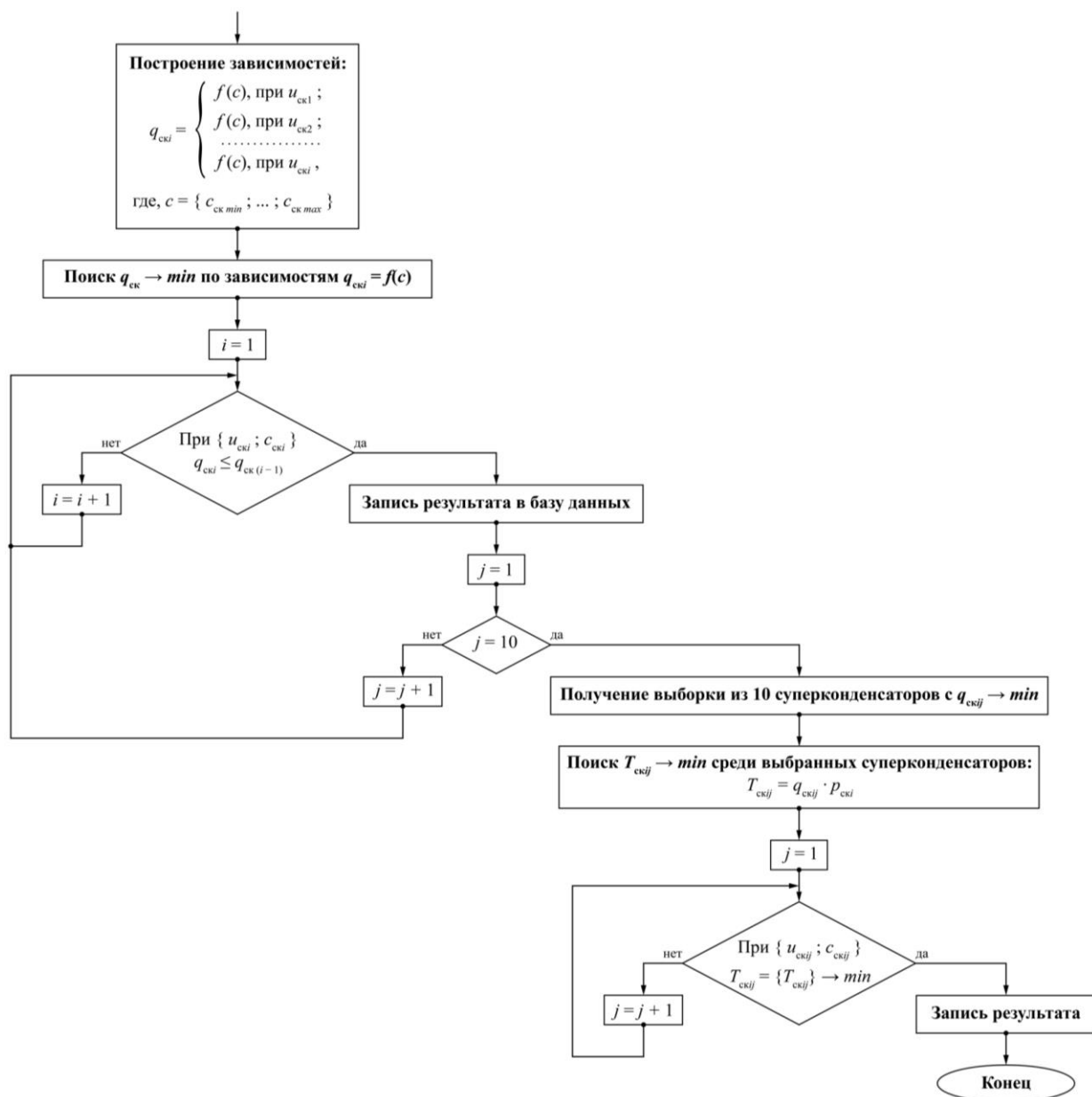


Рис. 13. Алгоритм выбора суперконденсатора, часть 2 [составлено авторами]

Fig. 13. Supercapacitor selection algorithm, part 2 [compiled by the authors]

СПГ завода. Проанализированы особенности работы объекта при нарушениях ПКЭ, описаны основные причины их возникновения. Особое внимание было уделено провалам напряжения, являющимся основной причиной аварийного останова технологического процесса завода. Рассмотрены возможные варианты решения данной проблемы посредством как изменения схемы электроснабжения, введения ЭСН и накопителей электроэнергии, так и программных способов, основанных на управлении параметрами ЭП в процессе снижения уровня напряжения питающей сети. Сделан вывод о том,

емкости при постоянном напряжении и по полученным характеристикам сделан вывод о том, что в основе принципа выбора СК для построения СНЭЭ в первую очередь необходимо опираться на параметр номинального напряжения единичного ионистора, нежели его номинальной емкости. Данные зависимости, что также было приведено в работе, распространяются на все уровни напряжения и мощности. Взяв за основу порядок выбора суперконденсаторов, авторы разработали алгоритм, позволяющий, задавшись параметрами электротехнического комплекса и характеристиками провала

напряжения, выбрать СК, удовлетворяющий критериям эффективности: техническим – максимальный разрядный ток и наименьшее количество применяемых СК в СНЭЭ; экономическому – наименьшая стоимость СНЭЭ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарычев А. Н., Скамьин А. Н., Добуш Ю. В. [и др.] Оценка надежности потребителей с учетом влияния показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2022. № 5(74). С. 74–79. EDN GUVSDN.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ. 7-е изд. - Раздел 1, Глава 1.2 (Утв. Приказом Минэнерго России от 20.05.2003 № 187). М. : ЭНАС, 2003.
3. Бирюлин В. И., Куделина Д. В., Брежнев И. В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 109–121. EDN SYNKNP.
4. Суперконденсаторы ФЕНИКС [Электронный ресурс] / ООО «Ультраконденсаторы Феникс»; студия Триас; Москва. 2023. URL: <https://www.ultracapacitor.ru/catalog/superkondensator-y-feniks/> (дата обращения: 25.01.2024).
5. Абдулкеримов С. А., Назиров Х. Б., Камолов М. М. [и др.] Экспериментальное исследование, анализ и оценка показателей качества электроэнергии в электрической сети 0,4кВ образовательного учреждения // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2018. № 3(43). С. 16–20. EDN VNQAKJ.
6. 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.
7. Шпиганович А. Н., Шпиганович А. А., Богомолов И. И. Провалы напряжения в системах электроснабжения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 12. С. 7–12.
8. Мартъянов А. С. Определение оптимальной энергии накопителя для снижения чувствительности погружных электродвигателей добычи нефти к провалам напряжения // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6, № 3. С. 55–61. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-55-61. EDN YNQDKH.
9. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Нгуен В. Х. Применение накопителей энергии и управляемых установок распределенной генерации для снижения провалов напряжения в сетевом энергетическом кластере // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 2(38). С. 38–43. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-38-43. EDN UYRVSA.
10. Каширин Д. Е., Павлов В. В. К вопросу повышения качественных характеристик электроснабжения контактной сети // *Наука и инновации: векторы развития : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. Сборник научных статей*. В 2-х книгах, Барнаул, 24–25 октября 2018 года. Книга 2. Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2018. С. 28–31. – EDN ZDLCRN.
12. Лосев Ф. А., Сушков В. В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // *Омский научный вестник*. 2018. № 4(160). С. 94–98. DOI 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98. EDN UZEKWC.
12. Климаш В. С., Петухов А. В. Исследование устойчивости электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии к провалам напряжения в сети электроснабжения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 3. С. 184–190. DOI 10.24412/2071-6168-2022-3-184-190. EDN KNAPTJ.
13. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для вузов. 12-е изд., испр. и доп. М. : Издательство Юрайт, 2023. 831 с.
14. Anderson T. Nisson D. Test and evaluation of voltage dip immunity. *Inst. Elteknik: STRI*, 2002. 122 p.
15. Димукашева Г. Е., Зекрин Б. Р., Кириллов Р. В. [и др.] Анализ устойчивости частотно-регулируемого асинхронного привода магистрального насосного агрегата // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2022. Т. 18, № 3–4. С. 13–22. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-13-22. EDN SWBWXJ.
16. Шпенст В. А., Бельский А. А., Орел Е. А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // *Записки Горного института*. 2023. Т. 261. С. 479–492.
17. 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.
18. Барданов А. И. Обеспечение бесперебойной работы частотно-регулируемого электропривода при провалах напряжения в распределительной сети предприятия. 2018.
19. Гульков Ю. В., Турышева А. В. Снижение влияния грозových перенапряжений на электрическую изоляцию воздушных линий электропередач 6 (10) кВ // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 5. С. 452–458.
20. Оржанова Ж., Боканова А., Исабеков Ж. Атмосферные перенапряжения в силовых трансформаторах и защита от перенапряжений //

Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2023. № 4(127). С. 427–436. DOI: 10.52167/1609-1817-20213-307-4-427-436. EDN IXMWGI.

21. Илюшин П. В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети // Библиотечка электротехника. 2020. № 8(260). С. 1–116. EDN CMJIBM.

22. Энгватова В. В., Гайдамашко А. И., Степанян А. Р. Основные факторы надежной работы электрооборудования буровых установок // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2019. №. 1. С. 176–184.

23. Пириева Н. М., Тагизаде Л. Н. Ограничители перенапряжения и защита трансформаторов от перенапряжений // Вестник науки. 2024. Т. 3, № 1(70). С. 772–778. EDN JCSUVZ.

24. Барданов А. И. Провалы напряжения в сетях электроснабжения и методы борьбы с ними // Главный энергетик. 2019. № 3. С. 32–45. EDN VVCAJT.

25. Червоненко А. П., Котин Д. А. Устройство компенсации провалов напряжения с накопителем энергии и функцией безударного перевода нагрузки // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 10. С. 87–96. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-87-96.

26. Гладких Т. Д. Модели надежности электроснабжения объектов нефтедобычи // Омский научный вестник. 2021. № 3(177). С. 59–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-59-63. EDN FGNULY.

27. Задворнов Д. О., Каракозова В. А., Тоскунов В. А., Христин И. О. Автоматическая система компенсации искажений (перепадов) напряжения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 2(89). С. 34–44. EDN IODDAF.

28. Фетисов Л. В., Роженцова Н. В., Булатов О. А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. №. 11–12. С. 99–106.

29. Абрамович Б. Н., Богданов И. А. Повышение эффективности автономных

электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 40–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

30. Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. Energies. 2021. 14(16). DOI: 10.3390/en14165059.

31. Шонин О. Б., Салов Р. А. Динамические свойства Z-инвертора в составе частотно-регулируемого привода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 6. С. 73–81. EDN ZFIAOH.

32. Шонин О. Б., Новожилов Н. Г., Крыльцов С. Б. Определение параметров кривой устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2017. №. 1. С. 120–127.

33. Бабенков П. С., Барышников Е. В., Волошин В. В. [и др.] Применение дизель-роторных источников бесперебойного питания для резервного электроснабжения объектов АПК // Молодежная наука - развитию агропромышленного комплекса : Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Курск, 03–04 декабря 2020 года. Часть 4. Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2020. С. 3–7. EDN RLТJBY.

34. Савина Н. В., Лисогурская Л. Н., Лисогурский И. А. Накопители электрической энергии как средство повышения надежности и экономичности функционирования электрической сети // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. №. 2–1 (92). С. 63–70.

35. Мелехина В. С., Воронин А. Н., Ожegov А. Н. Сравнение типов систем накопления электрической энергии для улучшения показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения // Общество. Наука. Инновации (НПК-2022) : Сборник статей XXII Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах, Киров, 11–29 апреля 2022 года. Том 2. Киров : Вятский государственный университет, 2022. С. 371–375. EDN JQWSNR.

© 2024 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Токарев Иван Сергеевич**, кандидат техн. наук, старший преподаватель кафедры общей электротехники, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, 2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2172-3830>, i.s.tokarev@gmail.com

**Шклярский Ярослав Элиевич**, доктор техн. наук, заведующий кафедрой общей электротехники, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8803-9898>, Shklyarskiy\_YaE@pers.spmi.ru

**Скворцов Иван Владимирович**, магистрант 2 курса кафедры электроэнергетики и электромеханики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0329-0843>, si-28@mail.ru

**Васильков Олег Сергеевич**, кандидат техн. наук, ассистент кафедры общей электротехники, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, 2), Vasilkov\_OS@pers.spmi.ru.

*Заявленный вклад авторов:*

Токарев Иван Сергеевич – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; анализ результатов.

Шклярский Ярослав Элиевич – постановка исследовательской задачи; концептуализация исследования; выводы.

Скворцов Иван Владимирович – разработка алгоритма выбора суперконденсаторов; обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных; написание текста.

Васильков Олег Сергеевич – разработка модели исследования; концептуализация исследования; анализ результатов; выводы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-13-30

**Ivan S. Tokarev, Yaroslav E. Shklyarsky, Ivan V. Skvortsov\*, Oleg S. Vasilkov\***

Saint-Petersburg Mining University

\*E-mail: si-28@mail.ru

## AN ALGORITHM FOR SELECTING THE PARAMETERS OF A SUPERCAPACITOR AS PART OF AN ENERGY STORAGE SYSTEM OF AN ELECTRICAL COMPLEX IN CASE OF VOLTAGE DIPS

### *Abstract.*

*The operation of electrical complexes of industrial enterprises is often characterized by violations of electricity quality indicators, in particular, prolonged changes in voltage characteristics and random events described by strong and spontaneously occurring fluctuations in the shape of the supply voltage. In this article, special attention is paid to voltage dips that occur in the supply network of a liquefied natural gas plant and are the reason for the shutdown of a continuous technological process. The main cause of voltage failures for the selected object of study are atmospheric overvoltages and, as a result, short circuits on the side of external power supply. The paper considers the main methods of leveling voltage dips using both the software tools of the complex and the hardware. As a solution for this object, the installation of an energy storage system based on supercapacitors connected to a direct current link of an electric drive is proposed. The authors have developed a new approach to the selection of these drives, which is based on the revealed mathematical dependencies of the number of supercapacitor units on their nominal capacity and voltage, the influence of the configuration of the connection of the drives inside the system on its final performance, as well as the nominal parameters of the object under consideration and the characteristics of voltage dips. Based on the data obtained, an algorithm for determining a supercapacitor with the required nominal parameters that meet the criteria of technical and economic efficiency for the object under consideration has been formed. In order to achieve the universality of the written algorithm for selecting a storage system based on supercapacitors, experiments were conducted to identify similar mathematical dependencies at different voltage and power levels of electrical complexes.*



### **Article info**

*Received:*

15 March 2024

*Accepted for publication:*

15 April 2024

*Accepted:*

15 May 2024

*Published:*

06 June 2024

**Keywords:** *electrical engineering complex, voltage dips, power storage system, super capacitor parameters, selection algorithm, connection configuration.*

**For citation:** Tokarev I.S., Shklyarsky Ya.E., Skvortsov I.V., Vasilkov O.S. An algorithm for selecting the parameters of a supercapacitor as part of an energy storage system of an electrical complex in case of voltage dips. Mining Equipment and Electromechanics, 2024; 2(172):13-30 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-13-30, EDN: IDFJMK



## REFERENCES

1. Nazarychev A.N., Skamin A.N., Dobush Yu.V. [et al.] Assessment of consumer reliability taking into account the influence of electricity quality indicators in power supply systems. *Electric power. Transmission and distribution*. 2022; 5(74):74–79. EDN GUVSDN.
2. Rules for the installation of electrical installations (PUE. 7th ed. Section 1, Chapter 1.2 (Approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 05/20/2003 No. 187). Moscow: ENAS; 2003.
3. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Brezhnev I.V. Investigation of problems of electricity quality in networks with a voltage of 0.4 KV. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2022; 14(1(53)):109–121. EDN SYNKNP.
4. PHOENIX Supercapacitors [Electronic resource] / Phoenix Ultracapacitors LLC; Trias Studio; Moscow. 2023. URL: <https://www.ultracapacitor.ru/catalog/superkondensator-y-feniks/> (date of access: 01/25/2024).
5. Abdulkirimov S.A., Nazirov H.B., Kamolov M.M. [et al.] Experimental research, analysis and evaluation of electricity quality indicators in the 0.4kV electric grid of an educational institution. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. 2018; 3(43):16–20. EDN VNQAKJ.
6. Shklyarsky Ya.E., Batueva D.E. Development of an algorithm for selecting modes of operation of an electric power supply complex with a wind-diesel power plant. *Notes of the Mining Institute*. 2022; 253:115–126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7.
7. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Bogomolov I.I. Voltage failures in power supply systems. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2018; 12:7–12.
8. Martianov A.S. Determination of the optimal energy storage for reducing the sensitivity of submersible electric motors of oil production to voltage failures. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2018; 6(3):55–61. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-55-61. EDN YNQDKH.
9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguyen V.H. The use of energy storage devices and controlled distributed generation installations to reduce voltage dips in a grid energy cluster. *Systems. Methods. Technologies*. 2018; 2(38):38–43. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-38-43. EDN UYRVSA.
10. Kashirin D.E., Pavlov V.V. On the issue of improving the quality characteristics of the power supply of the contact network. *Science and innovation: vectors of development : Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Collection of scientific articles*. In 2 books. Barnaul, October 24–25, 2018. Vol. 2. Barnaul: Altai State Agrarian University; 2018. Pp. 28–31. EDN ZDLCRN.
11. Losev F.A., Sushkov V.V. Development of methods and algorithms for assessing the effect of asymmetric voltage dips on the stability of the asynchronous electric motor load node of oil fields. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 4(160):94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98. EDN UZEKWC.
12. Klimash V.S., Petukhov A.V. Investigation of the stability of the electrotechnical complex of a woodworking line to voltage failures in the power supply network. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2022; 3:184–190. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-184-190. EDN KHAPTJ.
13. Bessonov L.A. Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 vols . Vol. 1. Electric circuits : textbook for universities. 12th ed., ispr. and add. Moscow: Yurait Publishing House; 2023. 831 p.
14. Anderson T., Nisson D. Test and evaluation of voltage dip immunity. Inst. Elteknik: STRI; 2002. 122 p.
15. Dimukasheva G.E., Zekrin B.R., Kirillov R.V. [etc.] Stability analysis of the frequency-controlled asynchronous drive of the main pumping unit. *Electrical engineering and information complexes and systems*. 2022; 18:3–4:13–22. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-13-22. EDN SWBWXJ.
16. Shpenst V.A., Belsky A.A., Orel E.A. Improving the energy efficiency of an autonomous electrotechnical complex with renewable energy sources based on adaptive adjustment of operating modes. *Journal of Mining Institute*. 2023; 261:479–492.
17. Chervonchenko S.S., Frolov V.Ya. Improving the energy efficiency of an autonomous power supply system of a drilling rig during voltage failures. *Journal of Mining Institute*. 2023; 261:470–478.
18. Bardanov A.I. Ensuring uninterrupted operation of a frequency-controlled electric drive in case of voltage failures in the distribution network of the enterprise. 2018.
19. Gulkov Yu.V., Turysheva A.V. Reducing the effect of lightning overvoltages on the electrical insulation of overhead power lines of 6 (10) kV. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2021; 5:452–458.
20. Orzhanova J., Bakanova A., Isabekov J. Atmospheric overvoltages in power transformers and surge protection. *Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshepaev*. 2023; 4(127):427–436. DOI: 10.52167/1609-1817-20213-307-4-427-436. EDN IXMWGI.
21. Ilyushin P.V. Prospects of application and problematic issues of integration of distributed energy sources into electric networks. *Bibliotekha elektrotehnika*. 2020; 8(260):1–116. EDN CMJIBM.
22. Engovatova V.V., Gaidamashko A.I., Stepanyan A.R. The main factors of reliable operation of electrical equipment of drilling rigs. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2019; 1:176–184.
23. Pirieva N.M., Tagizade N.M. Surge arresters and protection of transformers from overvoltage. *Bulletin of Science*. 2024; 3(1(70)):772–778. EDN IJCUVZ.

24. Bardanov A.I. Voltage failures in power supply networks and methods of combating them. *Chief power engineer*. 2019; 3:32–45. EDN VVCAJT.

25. Chervonenko A.P., Kotin D.A. A device for compensating voltage dips with an energy storage device and a shockless load transfer function. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2022; 15(10):87–96. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-87-96.

26. Chervonenko A.P., Kotin D.A. A device for compensating voltage dips with an energy storage device and a shockless load transfer function. *Izv. SPbGETU "LETI"*. 2022; 15(10):87–96. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-87-96.

27. Automatic compensation system for voltage distortions (differences) / Zadvornov D.O., Karakozova V.A., Toskunov V.A., Khristich I.O. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2021; 2(89):34–44. EDN IODDAF.

28. Fetisov L.V., Rozhentsova N.V., Bulatov O.A. Improving the quality of electric energy in low voltage networks. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2018; 20(11–12):99–106.

29. Abramovich B.N., Bogdanov I.A. Improving the efficiency of autonomous electrotechnical complexes of oil and gas enterprises. *Notes of the Mining Institute*. 2021; 249:408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

30. Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tevetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*. 2021; 14(16). DOI: 10.3390/en14165059.

31. Shonin O.B., Salov R.A. Dynamic properties of a Z-inverter as part of a frequency-controlled drive.

*Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2017; 6:73–81. EDN ZFIAOH.

32. Shonin O.B., Novozhilov N.G., Kryltsov S.B. Determination of parameters of the stability curve of a frequency-controlled drive in case of voltage failures in the network. *Proceedings of the Central Research Institute named after akad. A.N. Krylova*. 2017; 1:120–127.

33. Babenkov P.S., Baryshnikov E.V., Voloshin V.V. [et al.] The use of diesel-rotor uninterruptible power supplies for backup power supply of agricultural facilities. *Youth science – development of the agro-industrial complex : Materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Kursk, December 03-04, 2020. Volume Part 4. Kursk: Kursk State Agricultural Academy named after I.I. Ivanov; 2020. Pp. 3–7. EDN RLTJBY.

34. Savina N.V., Lisogurskaya L.N., Lisogursky I.A. Electric energy storage as a means of improving the reliability and efficiency of the electric grid. *International Scientific Research Journal*. 2020; 2-1 (92). Pp. 63–70.

35. Melekhina V.S., Voronin A.N., Ozhegov A.N. Comparison of types of electric energy storage systems for improving the quality of electricity in power supply systems. *Society. Science. Innovations (NPC-2022) : Collection of articles of the XXII All-Russian Scientific and Practical Conference*. In 2 volumes, Kirov, April 11–29, 2022. Vol. 2. Kirov: Vyatka State University, 2022. Pp. 371–375. EDN JQWSNR.

© 2024 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Ivan S. Tokarev**, Sc. In Engineering, Senior Lecturer at the Department of General Electrical Engineering, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, (199106, Russia, St. Petersburg, 21st V.O. line, 2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2172-3830>, [i.s.tokarev@gmail.com](mailto:i.s.tokarev@gmail.com)

**Yaroslav E. Shklyarsky**, Dr. Sc. in Engineering, Head of the Department of General Electrical Engineering, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, (199106, Russia, St. Petersburg, 21st V.O. line, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8803-9898>, [Shklyarskiy\\_YaE@pers.spmi.ru](mailto:Shklyarskiy_YaE@pers.spmi.ru)

**Ivan V. Skvortsov**, 2nd year undergraduate student of the Department of Electric Power Engineering and Electromechanics, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, (199106, Russia, St. Petersburg, 21st V.O. line, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0329-0843>, [si-28@mail.ru](mailto:si-28@mail.ru)

**Oleg S. Vasilkov**, Sc. In Engineering, Assistant of the Department of General Electrical Engineering, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, (199106, Russia, St. Petersburg, 21st V.O. line, 2), [Vasilkov\\_OS@pers.spmi.ru](mailto:Vasilkov_OS@pers.spmi.ru).

Contribution of the authors:

Ivan S. Tokarev – formulation of a research problem; scientific management; analysis of the results.

Yaroslav E. Shklyarsky – formulation of a research problem; conceptualization of research; conclusions.

Ivan V. Skvortsov – development of an algorithm for selecting supercapacitors; review of relevant literature; data collection and analysis; writing a text.

Oleg S. Vasilkov – development of a research model; conceptualization of research; analysis of the results; conclusions.

Authors have read and approved the final manuscript.

