

Устройство компенсации провалов напряжения с накопителем энергии и функцией безударного перевода нагрузки

А. П. Червоненко, Д. А. Котин✉

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

✉ d.kotin@corp.nstu.ru

Аннотация. Посвящена разработке имитационной модели устройства компенсации провалов напряжения, содержащего накопитель электрической энергии. Предлагаемый алгоритм управления позволяет минимизировать ударный момент и бросок тока двигателя при переводе нагрузки в случае возникновения аварийной ситуации. Рассматриваемая система управления реализует алгоритм автоматического согласования фаз ЭДС двигателя и напряжения инвертора, который позволяет «безударно» переводить нагрузку с одного источника питания на другой. При этом электрический угол напряжения инвертора согласуется по фазе с затухающей ЭДС двигателя. ЭДС вычислялась с выделением амплитуды, фазы и частоты с помощью разработанного авторами наблюдателя. В результате получена работоспособная имитационная модель устройства быстродействующего автоматического ввода резерва с накопителем энергии. В заключении авторы приводят переходные процессы, подтверждающие работоспособность предложенных подходов.

Ключевые слова: устройства компенсации провалов напряжения, быстродействующий автоматический ввод резерва, безударный перевод нагрузки

Для цитирования: 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.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Voltage Dips Compensator with Energy Storage and Load Soft Switching Function

A. P. Chervonenko, D. A. Kotin✉

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

✉ d.kotin@corp.nstu.ru

Abstract. This work is devoted to the development of a simulation model of a voltage drop compensation device containing an electric energy storage device. The proposed control algorithm makes it possible to minimize the shock moment and the current surge of the motor when transferring the load in the event of an emergency. The control system considered in the work implements an algorithm for automatic phase matching of the EMF of the motor and the voltage of the inverter, which allows soft switching function transferring the load from one power source to another. In this case, the electric voltage angle of the inverter is phase-consistent with the decrease EMF of the motor. The calculation of EMF with the allocation of amplitude, phase and frequency is carried out with the help of an observer developed by the authors. As a result, a workable simulation model of a high-speed automatic reserve input device with an energy storage device was obtained. In conclusion, the authors cite transients that confirm the operability of the proposed approaches.

Keywords: voltage dips compensator, fast automatic transfer switching, load soft switching

For citation: Chervonenko A. P., Kotin D. A. Voltage Dips Compensator with Energy Storage and Load Soft Switching Function // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 10. P. 87–96. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-87-96.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Статья посвящена разработке имитационной модели устройства компенсации провалов напряжения. Часто при решении задач, связанных с возникновением перебоев в системах электроснабжения используют автоматический ввод резерва. Многими исследователями достаточно подробно рассмотрен вопрос как имитационного моделирования подобных систем, так и использования накопителей в системах электроснабжения в целом.

Применение компьютерного моделирования в работе К. Р. Бахтеева [1] наглядно демонстрирует, что использование накопителей электроэнергии, таких как аккумуляторные батареи и суперконденсаторы, совместно с синхронным генератором позволяет улучшить качество электроснабжения крупных промышленных потребителей при провалах напряжения различной длительности. В публикации представлена имитационная модель аккумуляторной батареи большой мощности, которая работает через стабилизатор напряжения, инвертор и трансформатор, выдавая запасенную энергию на шины промышленного потребителя. В том числе рассматривается процесс распределения энергии – на форсировку возбуждения синхронного генератора и на выдачу энергии. В работе К. Р. Бахтеева большее внимание уделяется непосредственно процессу включения накопителя в электроэнергетической системе, а рассматриваемая нагрузка носит резистивный характер.

Не меньший интерес представляют результаты, представленные в статье Ю. Н. Булатова [2], который использовал для имитационного моделирования среду MatLab. Моделировался отдельный район электроснабжения нетяговых потребителей установленной мощности. Накопители электроэнергии представлены стандартным блоком Battery пакета SimPowerSystems. Рассматривая вопросы, связанные с использованием накопителей энергии для электроснабжения нетяговых потребителей, было выявлено, что постоянно подключенные накопители на шинах постоянного тока позволяют значительно уменьшить глубину провала напряжения при временном отключении основного питания.

Нужно отметить, что зачастую устройства быстрого действия автоматического ввода ре-

зерва применяются в тех случаях, когда речь идет о работе ответственных объектов или чувствительных потребителей. В статье Мартынова А. С. [3] демонстрируется решение актуальной задачи расчета обоснованных границ применения накопителей энергии с целью снижения чувствительности к провалам напряжения при различных параметрах технологического комплекса нефтяных скважин с установкой электроприводного центробежного насоса. На примере показано обоснование необходимости применения накопителей энергии для скважин, оборудованных установками данного типа.

Нужно отметить, что зарубежные авторы также проявляют интерес к исследованию влияния провалов напряжения на работу оборудования. Коллективом авторов В. Ф. Мендес, К. В. де Соуза, С. Р. Силва [4] анализируется поведение машины двойного питания при провалах сбалансированного напряжения. Полученные результаты, в том числе и экспериментальные, полезны при разработке алгоритмов для улучшения поддержки ветровой электростанции во время сбоев в электросети.

Еще одним зарубежным исследователем, Тилли А. [5], применяется метод моделирования в системе асинхронного генератора с двойным питанием при падениях напряжения. Автор рассматривает вопросы управления токами статора/ротора асинхронного генератора при неисправностях напряжения сети. В результате моделирования подтверждается улучшение отклика асинхронной машины с двойным питанием при серьезных сбоях в электросети.

В настоящей статье в качестве резервного источника питания для нагрузки рассматривается накопитель электрической энергии.

Научно-техническая задача, решаемая здесь, сводится к разработке метода имитационного моделирования устройства быстрого действия автоматического ввода резерва с накопителем энергии, обеспечивающего функцию безударности перевода нагрузки при учете состояний напряжения резервного источника и ЭДС двигателя.

Основные сферы применения накопителей связаны с обеспечением бесперебойного питания особо важных объектов, демпфированием колебаний

мощности, повышением надежности и качественных показателей систем электроснабжения [6].

Накопитель энергии в разрабатываемой имитационной модели используется в качестве первичного резервного источника питания.

Есть сеть переменного тока, нагрузка в виде электродвигателя работающего на насосный агрегат, функционирование электромеханической системы осуществляется в штатном режиме. Место включения накопителя – это потенциально аварийный участок системы электроснабжения ответственного потребителя энергии (в исследуемом случае – это место подключения секционного выключателя). Накопитель находится в режиме «ожидания», заряжается в то время, когда работа идет штатно. Во время возникновения аварийной ситуации накопитель включается в работу и выдает энергию в питающую сеть. Наблюдается процесс замещения электрической сети взамен основной сети, отключенной аварийно.

Сущность метода заключается в организации перевода нагрузки на накопитель энергии при возникновении аварии.

Постановка задачи. Цель статьи состоит в разработке алгоритма перевода нагрузки на накопитель энергии, обеспечивающего функцию безударного переключения. Для достижения данной цели необходимо разработать систему управления, организующую процесс согласования фаз затухающей ЭДС двигателя и напряжения инвертора; разработать имитационную модель системы электроснабжения; результатами исследования имитационной модели подтвердить корректность работы предложенного алгоритма.

Основная часть статьи. В варианте использования накопителя электрической энергии в качестве первичного резервного источника питания, как и в случае перевода нагрузки на резервную сеть, должны выполняться все режимы синхронизации подключения. Т. е. в нормальном режиме работы устройство с накопителем должно следить за работой сети, в которую он может включиться. В конечном счете, здесь применима логика работы системы быстрого действия автоматического ввода резерва (БАВР) («коридор включения», предсказание состояния выбегающей ЭДС двигателя и т. д.).

По достижении разряда накопителя нагрузка переводится на резервную сеть. Это можно осуществить, как минимум, двумя вариантами. Первый связан с использованием выключателя, подобного используемым выключателям основ-

ной или резервной сети. Второй вариант связан с закрытием инвертора, остановкой его работы, что приведет к завершению процессов перетока энергии.

Алгоритм разрабатываемого устройства следующий. При возникновении аварии в системе электроснабжения ответственного потребителя, основная сеть выключается и в работу вступает накопитель энергии, замещающий питающую сеть. Как только заряд накопителя становится недостаточным для обеспечения функционирования потребителя в номинальном режиме работы, нагрузка переводится на резервную сеть (в статье авторами не демонстрируется перевод с накопителя на резервную сеть, но данный процесс, естественно, должен подразумеваться). При восстановлении «аварийной» сети работа возобновляется в штатном режиме, а разряженный накопитель заряжается. Обычно накопитель и резервная сеть одновременно не работают (для поддержания нормальной работы нагрузки в коммутационно-переходных режимах это допускается).

Технический смысл предложенного алгоритма действий:

1. Компенсировать кратковременные пропажи напряжения питания.
2. Обеспечение антидребезга системы электроснабжения тогда, когда технически не рационально осуществлять перевод нагрузки с основной сети на резервную.

Естественно, ввиду ограниченной энергоемкости накопителем полностью заменить питающую сеть не представляется возможным. Для питания двигателя от накопителя потребуется не один накопитель, а каскад из них. Речь идет о схеме последовательно-параллельного соединения накопителей между собой, чтобы, с одной стороны, получить нужное напряжение, а с другой – обеспечить требуемую энергоемкость.

В качестве нагрузки выбран электродвигатель, мощность которого составляет 1 МВт. Выбор данного типа нагрузки основывается на соображениях о том, что электропривод – самый массовый и, в конечном счете, суммарно самый мощный потребитель электрической энергии в системах электроснабжения типовых промышленных предприятий и отрасли ЖКХ.

На рис. 1 представлена структурная схема системы электроснабжения со встроенным накопителем энергии, представленным идеализированной батареей и звеном постоянного тока. Вклю-

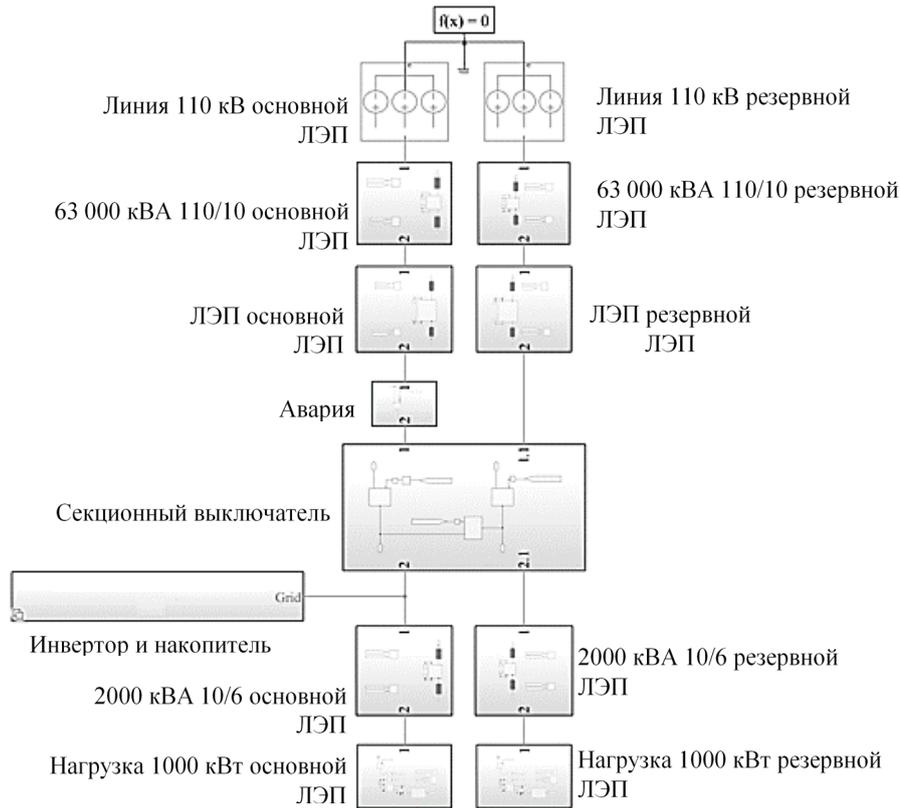


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения
Fig. 1. Block diagram of the power supply system

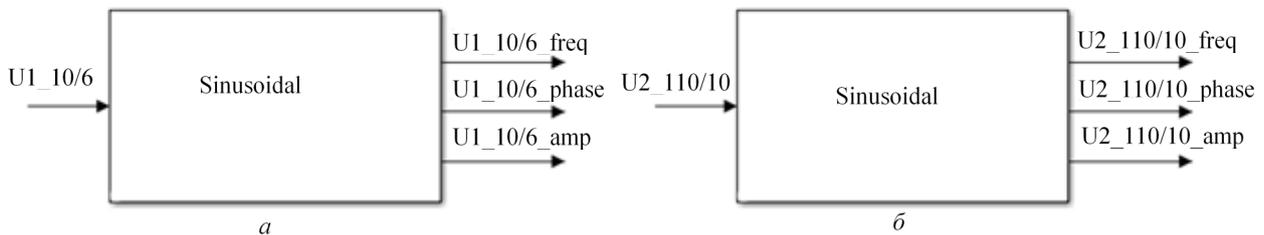


Рис. 2. Подсистема выделения частоты, фазы и амплитуды из измеряемых напряжений
Fig. 2. Subsystem of frequency, phase and amplitude extraction from measured voltages

чение инвертора в сеть происходит в соответствии с сигналом системы управления (СУ).

Аварийная ситуация в системе электроснабжения создается искусственно, отключением вторичной обмотки трансформатора 100/10 кВ после линии электропередач от основной нагрузки. Время возникновения аварийной ситуации – 2 с от начала моделирования. При этом определение этой аварийной ситуации и дальнейшее управление технологическим процессом осуществляется при помощи структуры СУ (рис. 2–6).

В соответствии с рис. 2 осуществляется идентификация сигналов частоты, фазы и амплитуды из трехфазных сигналов датчиков напряжений первичной обмотки трансформатора 10/6 кВ (рис. 2, а) и вторичной обмотки трансформатора 110/10 за линией электропередач (рис. 2, б).

На рис. 3–5 представлена подсистема управления логикой перевода нагрузки с основной сети на накопитель. Основные этапы логики в соответствии с рис. 4:

1. Блок системы управления имеет 6 выходных сигналов (trigger, to_invertor, section_main_off, initial_phase, initial_amp, initial_freq), которые на старте моделирования устанавливаются в нулевые начальные значения (блок «Старт»).

2. Если входная переменная amp < 0.95, что означает снижение амплитуды напряжения основной сети на 5 % и более, состояние меняется на блок «drop_detected» и выходная переменная trigger устанавливается в значение 1, что в свою очередь означает обнаружение просадки напряжения основной сети.

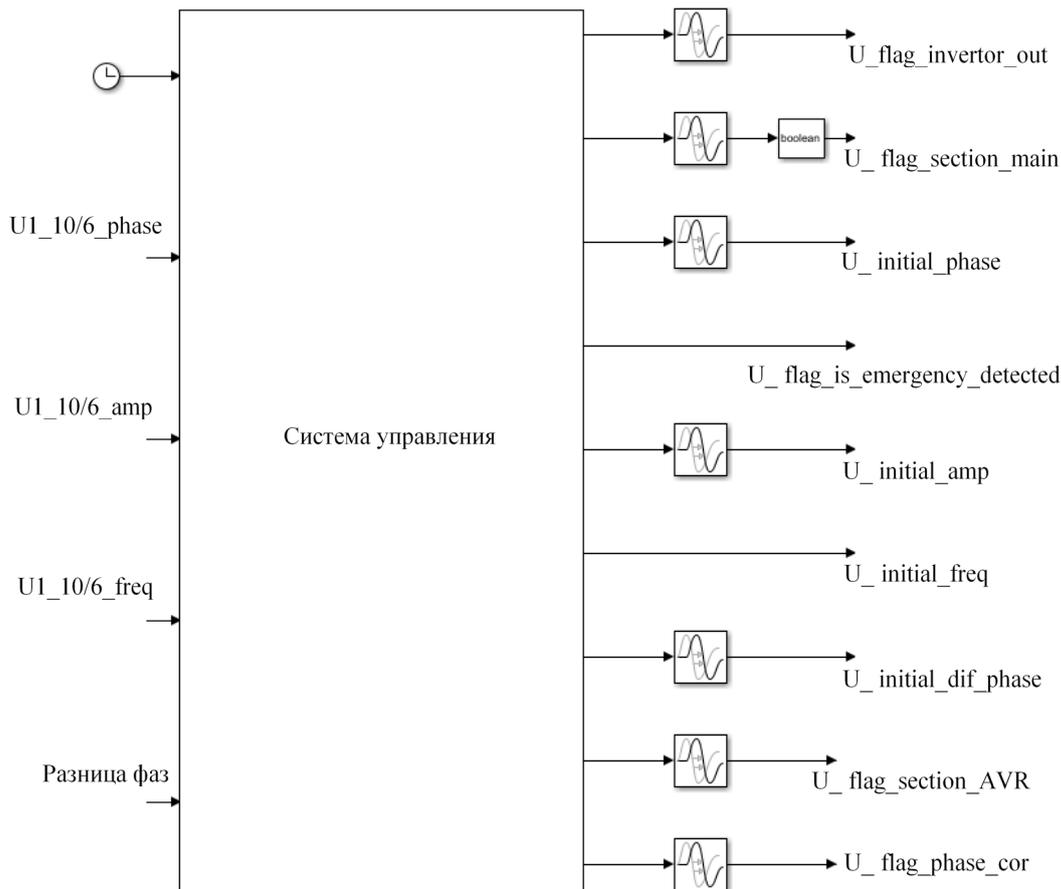


Рис. 3. Подсистема управления логикой перевода нагрузки с основной сети на накопитель
 Fig. 3. Subsystem for controlling the logic of the load switching from the main power grid to the storage device

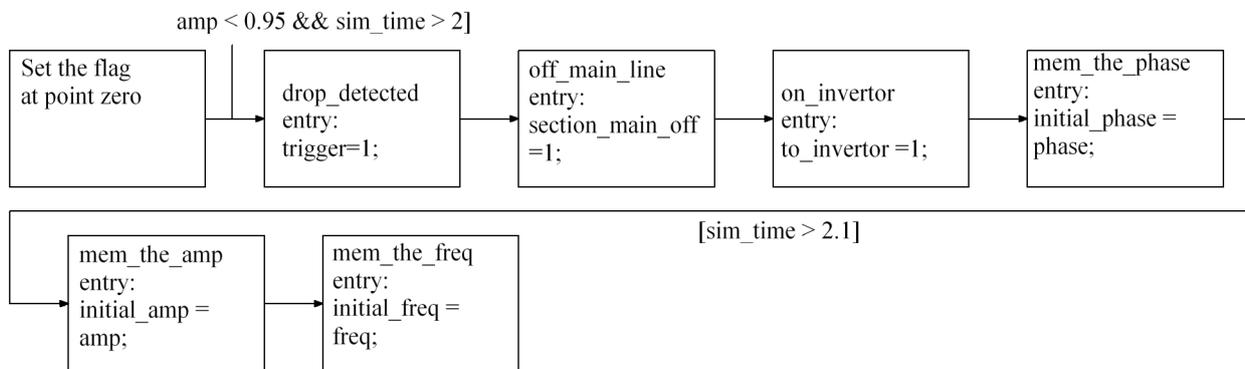


Рис. 4. Содержание логики управления накопителем
 Fig. 4. Contents of the storage device control logic

3. По обнаружении просадки выполняется блок `off_main_line`. Переменная `section_main_off` устанавливается в значение 1, тем самым отключая трансформатор 10/6 кВ основной (аварийной) сети. Тем самым двигатель и насос переходят в состоянии выбега.

4. Далее инвертор и накопитель подключаются к выбегающей нагрузке. Важно, чтобы напряжение на выходе синусного фильтра инвертора заранее было синхронизировано по фазе с ЭДС выбегающей нагрузки. Это осуществляется под-

системой, представленной на рис. 7. Для текущего эксперимента время включения выбрано 2.1 с.

5. Для дальнейшего восстановления амплитуды, частоты и фазы напряжения на выходе синусного фильтра инвертора блоки `mem_the_phase`, `mem_the_amp` и `mem_the_freq` фиксируют начальные значения фазы, амплитуды и частоты соответственно при включении накопителя в питающую сеть.

В соответствии с рис. 5 и 6 формируется линейно возрастающие амплитуда и частота напряжения инвертора вплоть до номинальных значе-

нию и току статора двигателя в относительных единицах, а также напряжения на выходе синусного фильтра и напряжение первичной обмотки трансформатора 10/6 кВ также в относительных единицах. Дополнительно представлены графики сигналов задания частоты и амплитуды выходно-

го напряжения инвертора. Расчет синусного фильтра выполнен в относительных единицах [7].

В промежуток с 2 по 2.1 с осуществляется синхронизация фазы напряжения инвертора с фазой ЭДС выбегающей нагрузки. С момента времени 2.1 с и до конца моделирования осуществляется разгон двигателя.

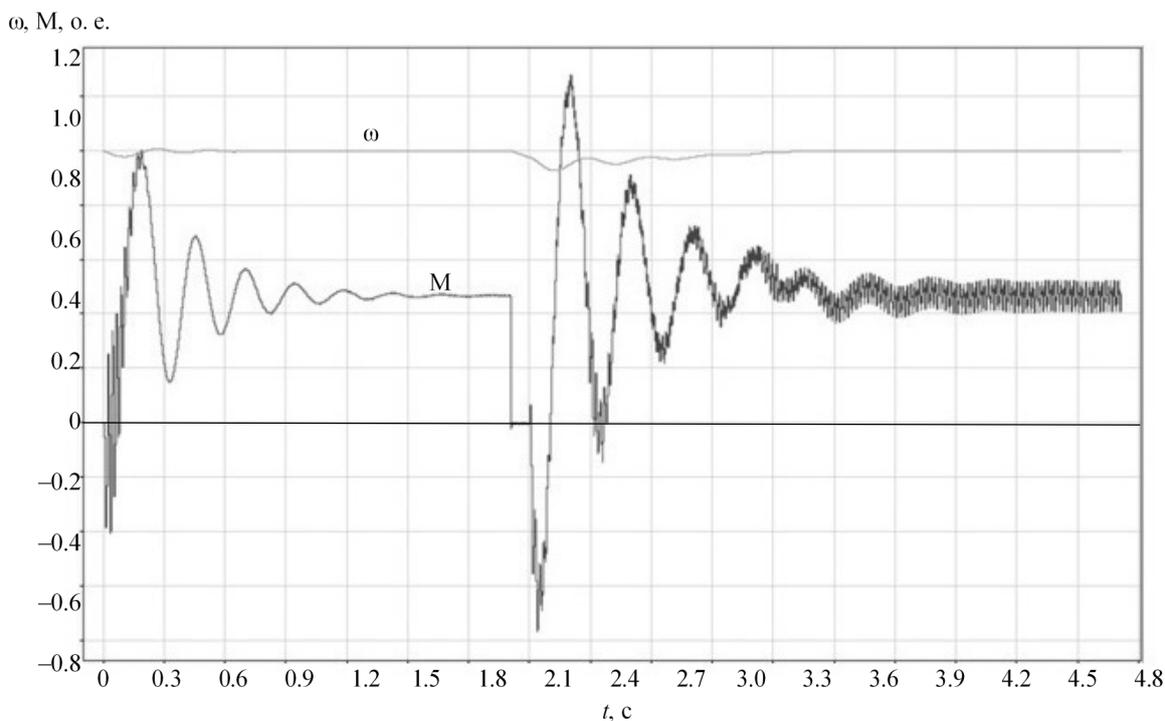


Рис. 9. Момент и частота вращения двигателя
Fig. 9. Motor torque and speed

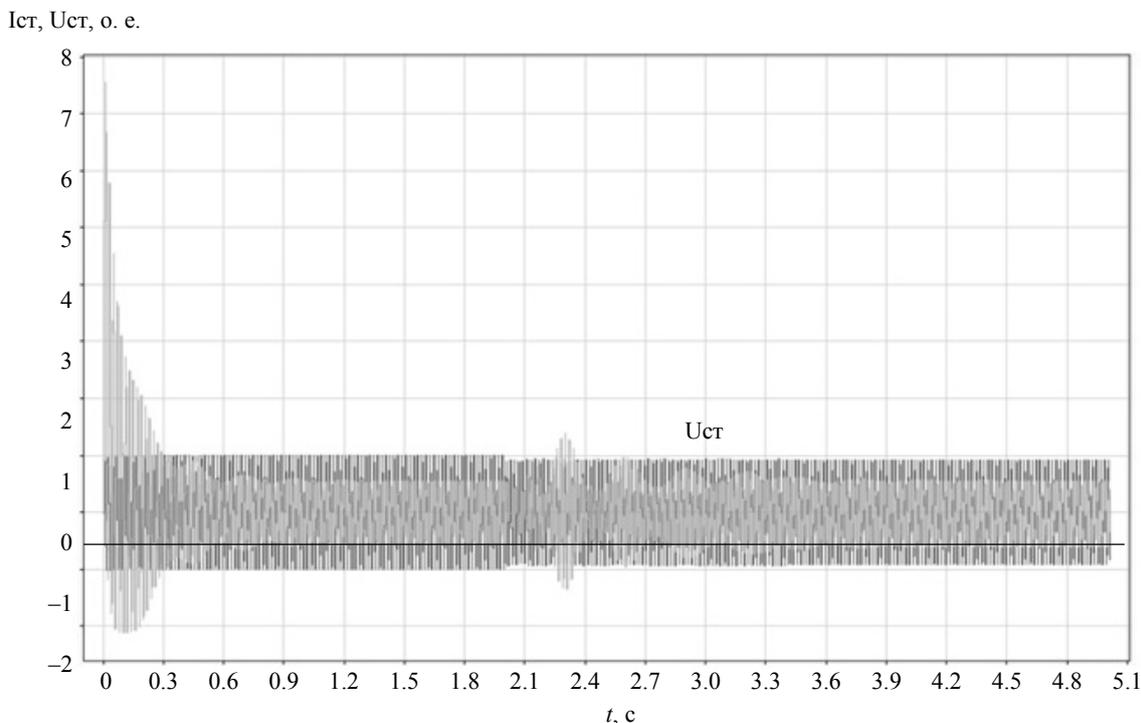


Рис. 10. Напряжение и ток статора двигателя
Fig. 10. Motor stator voltage and current

U_{инв}, U_{1_10/6}, о. е.

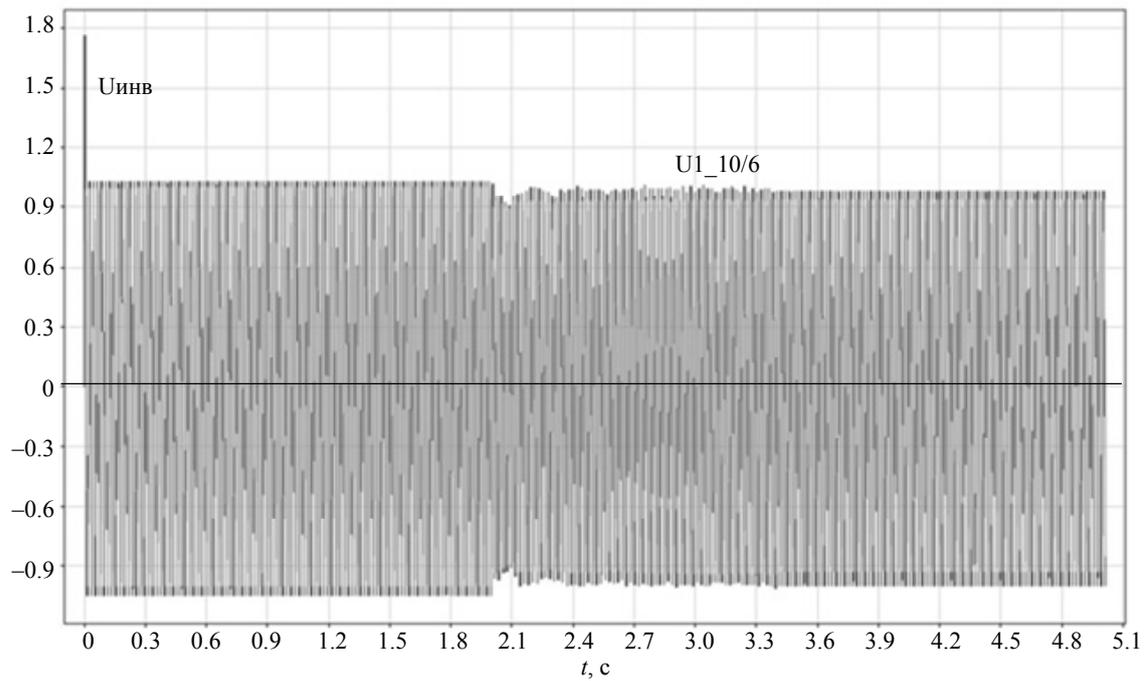


Рис. 11. Напряжения на выходе синусного фильтра (U_{инв}) и на первичной обмотке трансформатора (U_{1_10/6}) 10/6 кВ
Fig. 11. The voltage at the output of the sine-filter (U_{инв}) and the voltage at the primary winding of the transformer 10/6 kV (U_{1_10/6})

U_{ramp_freq}, Гц, U_{ramp_amp}, о.е.

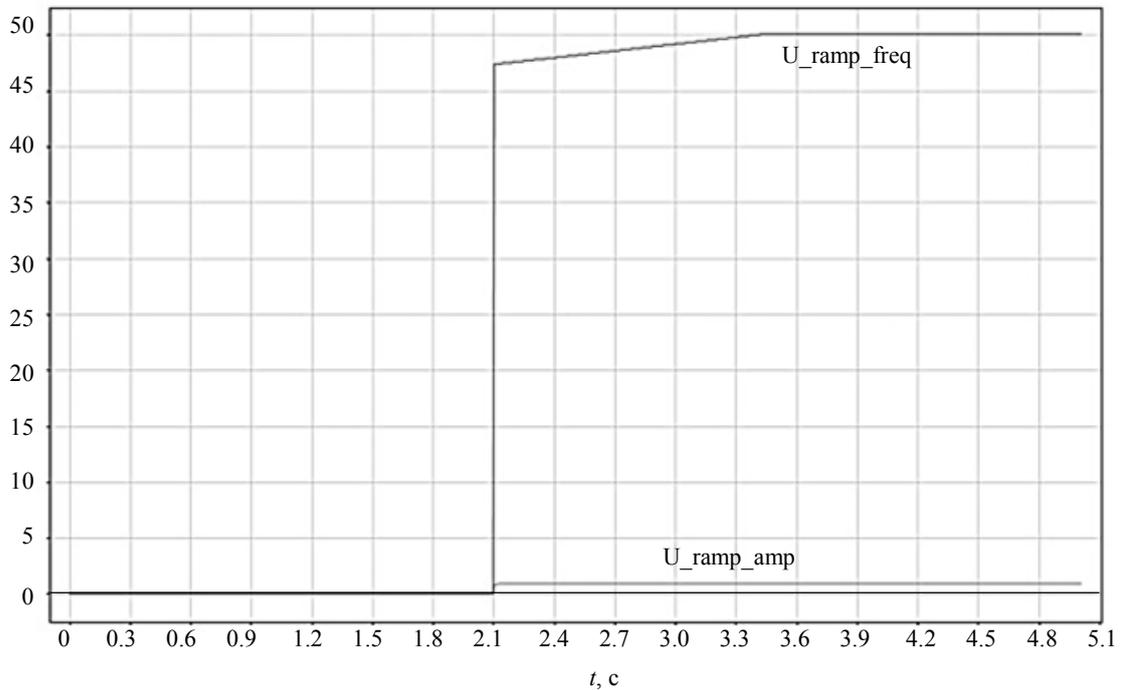


Рис. 12. Сигнал задания частоты и амплитуды напряжения инвертора
Fig. 12. Reference signal for the frequency and amplitude of the inverter voltage

Обсуждение результатов.

1. Общее время моделирования составляет 5 с. В промежуток времени с 0 по 2 с подготовлена система электроснабжения, а именно основ-

ные координаты состояния системы приведены в установившиеся номинальные значения. В момент времени $t = 2$ с реализована аварийная ситуация, при этом в последующие 0.1 с двигатель

осуществляет выбег, частота вращения уменьшается, а $M = 0$. Напряжение на первичной обмотке трансформатора соответствует по форме ЭДС двигателя.

2. На рис. 11 в промежуток с 2 по 2.1 с фаза напряжения инвертора синхронизирована с фазой ЭДС выбегающей нагрузки.

3. Вследствие точной синхронизации ударный момент и бросок тока не превышают 1.22 от номинального значения момента и тока статора двигателя.

4. С момента времени 2.1 с и до конца моделирования осуществляется разгон двигателя до номинальной частоты вращения средствами инвертора и накопителя энергии в соответствии с законом частотного регулирования. При этом ввиду кратковременности разгона (порядка 1.5 с) динамический момент при разгоне имеет колебательный характер и не может быть устранен без применения векторных законов регулирования.

5. В установившемся значении переходного процесса по моменту электродвигателя при пита-

нии его от накопителя энергии – инвертора, его пульсация не превышает 15 % в соответствии с расчетом синусного фильтра.

Выводы и заключение. Таким образом, в статье предложен алгоритм управления устройством компенсации провалов напряжения. Компенсация неидеальностей и возмущений в питающей сети реализуется за счет использования накопителя электрической энергии в его структуре. По форме полученных переходных процессов можно констатировать работоспособность исследуемой системы с технически приемлемыми показателями качества. В рассмотренной модели накопитель является первичным резервным источником. На взгляд авторов, стадия перевода нагрузки на накопитель значима и трудоемка, вследствие чего данный вопрос и рассматривался. Но, разумеется, ввиду невозможности поддержания нормальной работы системы от накопителя в длительном режиме должен осуществляться последующий перевод нагрузки на резервную сеть.

Список литературы

1. Бахтеев К. Р., Федотов А. И., Мисбахов Р. Ш. Моделирование использования накопителей электроэнергии совместно с синхронным генератором для повышения качества электроэнергии промышленных потребителей // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 24–25 окт. 2018 г. / под ред. Л. А. Потапова, А. Ю. Дракина. Ч. 1. Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 2018. С. 18–21. doi: 10.30987/conferencearticle_5c19e5e39a6be6.96618825.

2. 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.

3. Мартыанов 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.

4. Behavior of doubly-fed induction generator during symmetrical voltage dips – Experimental results / V. F. Mendes, C. V. De Sousa, S. R. Silva, B. Rabelo, S. Krauss, W. W. Hofmann // IEEE Intern. Symp. on Industrial Electronics: 2010. Bari: Politecnico di Bari, 2010. P. 2345–2350. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637739.

5. Tilli A., Conficoni C., Hashemi A. State reference design and saturated control of doubly-fed induction generators under voltage dips // Intern. J. of Control. 2017. Vol. 90, no. 4. P. 834–854. doi: 10.1080/00207179.2016.1215528.

6. Латипов С. Т. Накопители электроэнергии как средство предотвращения нарушений электроснабжения // Молодой ученый. 2017. № 16 (150). С. 187–189.

7. Инженерная методика расчета синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ / В. М. Берестов, В. В. Вдовин, С. С. Доманов, В. В. Панкратов, Г. Г. Ситников // Электроприводы переменного тока: Тр. Междунар. пятнадцатой науч.-техн. конф. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», 2012. С. 167–171.

Информация об авторах

Червоненко Андрей Павлович – аспирант кафедры «Электропривода и автоматизации промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Новосибирский государственный технический университет, пр-т К. Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Россия.
E-mail: andrey-guitar@bk.ru

Котин Денис Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривода и автоматизации промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Новосибирский государственный технический университет, пр-т К. Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Россия.

E-mail: d.kotin@corp.nstu.ru

References

1. Bahteev K. R., Fedotov A. I., Misbahov R. SH. Modelirovanie ispol'zovaniya nakopitelej elektroenergii sovmestno s sinhronnym generatorom dlya povysheniya kachestva elektroenergii promyshlennykh potrebitelej // SAPR i modelirovanie v sovremennoj elektronike: sb. nauch. tr. II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Bryansk, 24–25 okt. 2018 g. / pod red. L. A. Potapova, A. YU. Drakina. CH. 1. Bryansk: Bryanskij gos. tekhn. un-t, 2018. S. 18–21. doi: 10.30987/conferencearticle_5c19e5e39a6be6.96618825. (In Russ.).
2. Bulatov YU. N., Kryukov A. V., Nguen V. H. Prime-nenie nakopitelej energii i upravlyaemykh ustanovok raspredelennoj generacii dlya snizheniya provalov napryazheniya v setevom energeticheskom klastere // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2018. № 2 (38). S. 38–43. doi: 10.18324/2077-5415-2018-2-38-43. (In Russ.).
3. Mart'yanov A. S. Opredelenie optimal'noj energii nakopitelya dlya snizheniya chuvstvitel'nosti pogruzhnykh elektrodvigatelej dobychi nefi k provalam napryazheniya // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. 2018. T. 6, № 3. S. 55–61. doi: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-55-61. (In Russ.).
4. Behavior of doubly-fed induction generator during symmetrical voltage dips – Experimental results / V. F. Mendes, C. V. De Sousa, S. R. Silva, B. Rabelo, S. Krauss, W. W. Hofmann // IEEE Intern. Symp. on Industrial Electronics: 2010. Bari: Politecnico di Bari, 2010. P. 2345–2350. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637739;
5. Tilli A., Conficoni C., Hashemi A. State reference design and saturated control of doubly-fed induction generators under voltage dips // Intern. J. of Control. 2017. Vol. 90, no 4. P. 834–854. doi: 10.1080/00207179.2016.1215528;
6. Latipov S. T. Nakopiteli elektroenergii kak sredstvo predotvrashcheniya narushenij elektro-snabzheniya // Molodoj uchenyj. 2017. № 16 (150). S. 187–189. (In Russ.).
7. Inzhenernaya metodika rascheta sinusnykh fil'trov dlya aktivnykh vypryamitelej i invertorov napryazheniya s SHIM / V. M. Berestov, V. V. Vdovin, S. S. Domanov, V. V. Pankratov, G. G. Sitnikov // Elektroprivody peremennogo toka: Tr. Mezhdunar. pyatnadcatoj nauch.-tekhn. konf. Ekaterinburg: FGAOU VPO «UrFU imeni pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'cina», 2012. S. 167–171. (In Russ.).

Information about the authors

Andrey P. Chervonenko – Post-Graduate Student of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk.

E-mail: andrey-guitar@bk.ru

Denis A. Kotin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk.

E-mail: d.kotin@corp.nstu.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2022; принята к публикации после рецензирования 02.11.2022; опубликована онлайн 25.12.2022.

Submitted 26.09.2022; accepted 02.11.2022; published online 25.12.2022.
