

УДК 621.3.064

Е.Г. Лиске, Д.С. Сельменева, Д.Е. ШевцовНовосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ ВКЛЮЧЕНИИ
КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ**

В данной статье сделан обзор традиционных способов снижения бросков тока при включении батареи конденсаторов. Выявлены основные недостатки представленных способов и предложен альтернативный метод – управляемая коммутация. Рассмотренный метод управляемой коммутации позволяет значительно уменьшить амплитуду бросков тока при включении конденсаторной батареи за счет последовательной пофазной коммутации фаз выключателя по заданному алгоритму при переходе синусоиды тока через ноль. На базе модели электрической сети 6(10) кВ системы электроснабжения, разработанной в программном комплексе MatLab/Simulink, которая включает в себя источник бесконечной мощности, линию с распределенными и сосредоточенными параметрами, вакуумный выключатель и реактивную нагрузку в виде конденсаторной батареи, носящую емкостной характер, подобран алгоритм управляемого включения конденсаторной батареи. При подобранном алгоритме броски тока не превышают двух крат от номинального тока. Данный алгоритм предназначен для сетей низкого класса напряжения. Для таких сетей распространено использование режима с изолированной нейтралью, соответственно подобранный алгоритм имеет свои особенности при коммутации батареи конденсаторов. Рассмотрено влияние различных факторов на величину бросков тока, таких как напряжение сети, мощность нагрузки и параметры кабельной линии. Представленные факторы оказывают не столь значительные изменения бросков тока и не всегда могут быть применимы с точки зрения экономических соображений. Основным фактором, оказывающим влияние на амплитуду бросков тока при включении конденсаторной батареи, является остаточный заряд на конденсаторе, который служит причиной изменения алгоритма.

Ключевые слова: управляемая коммутация, батарея конденсаторов, бросок тока, остаточный заряд.

E.G. Liske, D.S. Selmeneva, D.E. Shevtsov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**RESEARCH OF TRANSITION PROCESS AT THE CONTROLLED
INCLUSION OF CAPASITOR BANK**

In this article, an overview is given of the traditional ways to reduce current surges when the capacitor bank is turned on. The main shortcomings of the presented methods are revealed and an alternative method is proposed – controlled switching. The considered method of controlled commutation allows to significantly reduce the amplitude of current surges when the capacitor battery is switched on

due to sequential phase-by-phase switching of the switch phases according to a given algorithm when the current sinusoid passes through zero. Based on the electric network model 6 (10) kV of the power supply system developed in the MatLab / Simulink software package, which includes a source of infinite power, a line with distributed and lumped parameters, a vacuum switch and a reactive load in the form of a capacitor bank, as capacitive loads, The algorithm for controlled switching-on of the capacitor bank is chosen. With the algorithm selected, current surges do not exceed two times the rated current. This algorithm is designed for low voltage networks. For such networks, the use of a mode with isolated neutral is common, the appropriately chosen algorithm has its own peculiarities when capacitor banks is switching. The influence of various factors on the magnitude of current surges, such as network voltage, load power and cable line parameters, is considered. The factors presented are not so significant decreases in current surges and cannot always be applied from the point of view of economic considerations. The main factor affecting the amplitude of current surges when the capacitor bank is switched on is the residual charge on the capacitor, which causes the algorithm to change.

Keywords: controlled switching, capacitor bank, inrush current, residual charge.

Введение. Включение шунтирующих конденсаторов, шунтирующих реакторов и мощных трансформаторов может сопровождаться большими перенапряжениями, или большими бросками токов. Амплитуда переходных процессов зависит от точки на кривых токов или напряжений, в которых происходит размыкание и замыкание контактов выключателей. В неконтролируемой ситуации коммутация раньше или позже случается в наихудшей для этого точке кривой.

Включение конденсаторных батарей в электрическую сеть может сопровождаться значительными бросками тока. Скачок тока при коммутации конденсатора может возникнуть при его разряде, а также при включении при условии остаточного заряда [1, 2]. Такие броски тока влекут за собой негативное влияние на электрическую сеть:

- 1) динамические усилия, которые вызывают быстрое старение и износ изоляции;
- 2) перенапряжения в сети;
- 3) ложное срабатывание релейной защиты, повышенную сложность отстройки защиты от бросков тока, для чего производится вынужденное загрубление защиты [3, 4].

Для ограничения амплитуды переходных процессов при коммутации принимают такие традиционные контрмеры, как предвключаемые резисторы, демпфирующие реакторы или резисторы, а также введение выдержки времени перед повторным включением конденсатора для снижения остаточного заряда. Кроме того, можно усилить изоляцию системы и оборудования для выдерживания нагрузок [5].

Предвключаемый резистор представляет собой устройство подавления апериодической составляющей тока в линейных выключате-

лях, которое встраивают в тело высоковольтного выключателя. Предвключаемый резистор включается последовательно с вспомогательными контактами выключателя и вводится в работу в процессе включения линии электропередачи на время порядка полупериода промышленной частоты. Включение линии, оснащенной шунтирующим реактором, приводит к возникновению апериодической составляющей в реакторе и линейном выключателе с малой амплитудой и быстрым ее затуханием. Недостатком этого устройства является большая энергия, выделяемая в предвключаемом резисторе при включении линии с коротким замыканием. В этом случае резистор должен поглотить без собственного разрушения энергию, выделяемую в нем до момента его шунтирования главными контактами выключателя [6].

Токи переходных процессов, наблюдающиеся во время коммутации, и пусковые токи, вызванные неисправностями шунтирующей конденсаторной установки, можно ограничивать при помощи демпфирующего реактора, последовательно соединенного с конденсаторной установкой. Демпфирующие реакторы можно сравнить с последовательными реакторами, имеющими малое реактивное сопротивление. Однако требования по силе напряжения зачастую выше, чем для последовательных реакторов. Также они контролируют резонансную частоту системы, вызываемую добавлением батарей конденсаторов [7, 8].

Демпфирующие сопротивления – это класс сопротивлений, предназначенных для ограничения тока в электрической цепи и предотвращения роста силы тока или напряжения свыше установленных пределов. Фильтрующие (демпирующие) резисторы ограничивают пусковой ток до 3,5-кратного от номинального значения. Они широко применяются для ограничения пускового тока при запуске трансформаторов. Кроме того, фильтрующие резисторы используются для запуска в работу конденсаторов, дроссельных катушек в компенсаторных устройствах [9, 10].

После отключения батареи конденсаторов в соответствии с ПУЭ [11] необходимо выждать время до её разрядки перед повторным включением в работу. В случае, когда необходимо оперативно компенсировать реактивную мощность, данное ограничение может оказаться неприемлемым [12].

Указанные решения могут быть малоэффективными, ненадежными и дорогими и в конечном счете не позволяют решить проблему кардинально. В настоящее время в мире имеются исследования и выполнен ряд разработок устройств управляемой коммутации, позволяющие решить проблему бросков тока. Однако основная часть данных исследований применима лишь для оборудования высших классов напряжений (от 110 кВ и выше). Поэтому возникает необходимость проведения исследований управляемой коммутации в электрических сетях 6–10 кВ.

1. Особенности управляемой коммутации. Концепция управляемой коммутации заключается в последовательной коммутации полюсов выключателя по заданному алгоритму. Такая коммутация позволяет предотвратить появление опасных бросков тока, высокочастотных перенапряжений и увеличивать коммутационный ресурс оборудования.

На примере емкостной нагрузки управляемое включение представляет собой процесс замыкания контактов выключателя в строго определенный момент времени с опережением момента перехода напряжения источника через ноль:

$$T_{\text{cont}} = T_{\text{zero}} - T_m - (T_{\text{closing}} - T_{\text{prestriking}}) = T_{\text{zero}} - T_m - T_{\text{making}}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлен принцип управляемого включения индуктивной нагрузки. Оптимальным временем включения является пик напряжения при условии, что время предпробоев при включении меньше полупериода. Контроллер задерживает команду на включение на некоторое время T_{total} , которое является суммой времени реакции контроллера T_w и преднамеренной задержки времени синхронизации T_{cont} .

Контроллер вводит задержку T_{cont} относительно соответствующего перехода напряжения источника через ноль, которая рассчитывается по (1) с учетом времени включения выключателя T_{closing} и времени предпробоев $T_{\text{prestriking}}$. Ток начинает течь в момент времени t_{make} . Интервал T_m определяется временем t_{make} и следующим за ним временем перехода напряжения источника через ноль.

Время включения T_{closing} есть интервал времени от момента подачи питания на катушку включения выключателя до момента механического касания контактов. Время предпробоев при включении $T_{\text{prestriking}}$ –

это интервал времени между моментом начала предпробоев и моментом механического касания контактов. Время T_{making} является промежутком времени от момента подачи питания на катушку включения до момента начала предпробоев t_{make} [13].

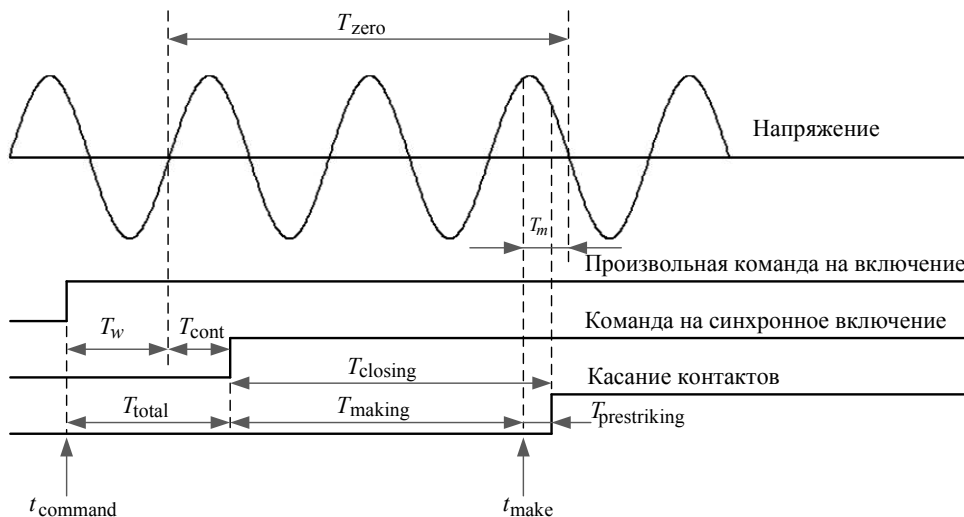


Рис. 1. Принцип управляемого включения

2. Алгоритм управляемого включения. Разработана модель управляемого включения, выполненная в программном комплексе MatLab/Simulink, которая позволяет моделировать сложные электроэнергетические системы, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Общий вид разработанной модели отражен на рис. 2.

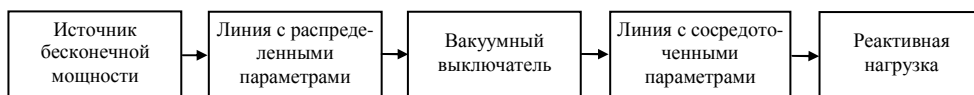


Рис. 2. Блок-схема разработанной модели

Ниже представлены осциллограммы токов при управляемом и неуправляемом включении конденсаторной батареи (рис. 3, 4).

В ходе моделирования определена оптимальная последовательность включения фаз СВ–А. Для сети с изолированной нейтралью включение по алгоритму СВ–А подразумевает коммутацию первых фаз при переходе линейного напряжения через ноль, третьей – при минимальном фазном напряжении [14].

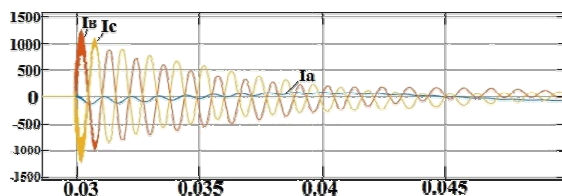


Рис. 3. Неуправляемое включение конденсаторной батареи

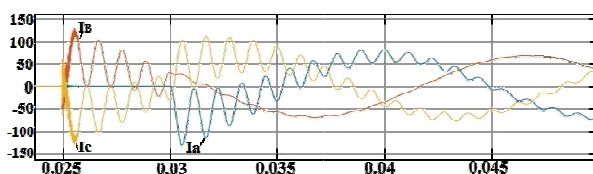


Рис. 4. Управляемое включение конденсаторной батареи

Во время управляемого включения кратности бросков тока уменьшились в 9,8 раз.

3. Факторы, влияющие на величину бросков тока. Основными факторами, оказывающими влияние на амплитуду бросков тока при включении конденсаторной батареи, являются остаточный заряд на конденсаторе и момент замыкания контактов выключателя [15]. На рис. 5 показаны максимальные значения бросков тока при включении конденсаторной батареи без учёта остаточного заряда в зависимости от момента коммутации. Они достигают значения в $20 \cdot I_{ном}$.

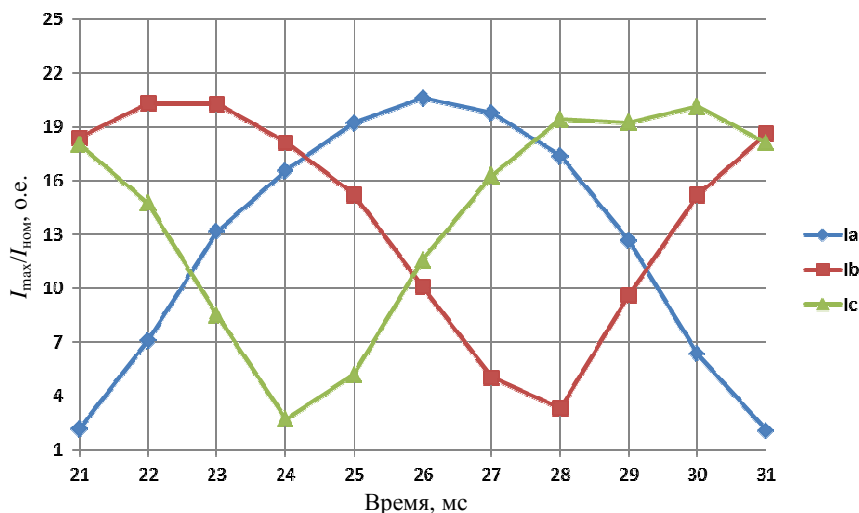


Рис. 5. Максимальные уровни бросков тока при включении конденсаторной батареи 500 кВар без учёта остаточного заряда

На рис. 6 показаны максимальные значения бросков тока при включении конденсаторной батареи с учётом остаточного заряда. Броски в этом случае достигают значения до $47 \cdot I_{\text{НОМ}}$, т.е. остаточный заряд увеличивает броски тока в 2,35 раза.

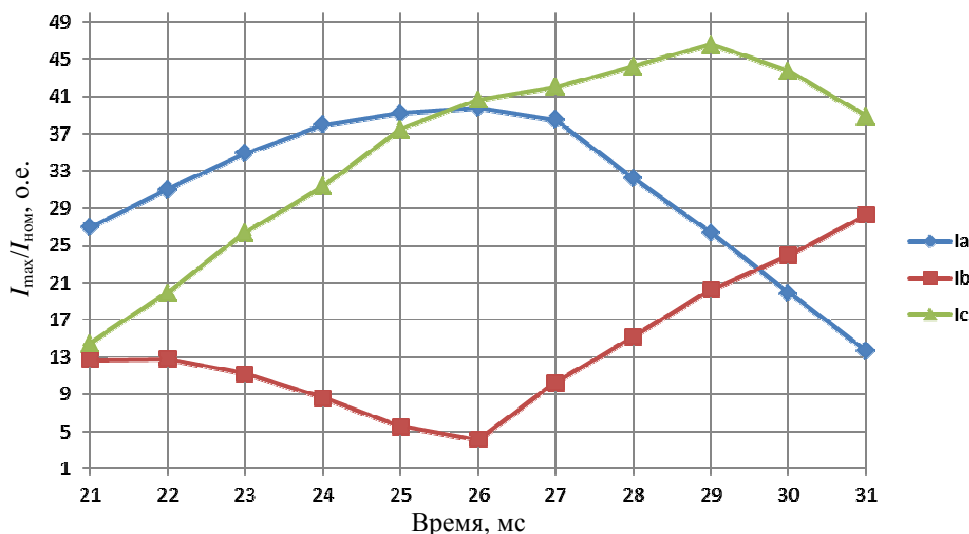


Рис. 6. Максимальные уровни бросков тока при включении конденсаторной батареи 500 кВар с учётом остаточного заряда

Рассмотрим другие факторы, которые могут повлиять на величину бросков тока.

Напряжение сети. С увеличением напряжения сети броски тока при включении конденсаторной батареи увеличиваются. Повышенное напряжение сети увеличивает величину остаточного заряда на конденсаторе, что, в свою очередь, вызовет увеличение бросков тока. Зависимость кратности тока от напряжения представлена на рис. 7.

Мощность нагрузки. При установке более мощной батареи конденсаторов броски тока также имеют тенденцию к увеличению. Влияние величины мощности нагрузки на броски тока изображено на рис. 8.

Параметры кабельной линии. Изменим длину кабельной линии. Чем длиннее кабельная линия электропередачи, связывающая выключатель и конденсаторную батарею, тем меньшее значение принимают броски тока. Это связано с тем, что при увеличении длины увеличивается активно-индуктивное сопротивление цепи, оказывающее ограничивающее действие на переходной ток. Зависимость данного процесса представлена на рис. 9.

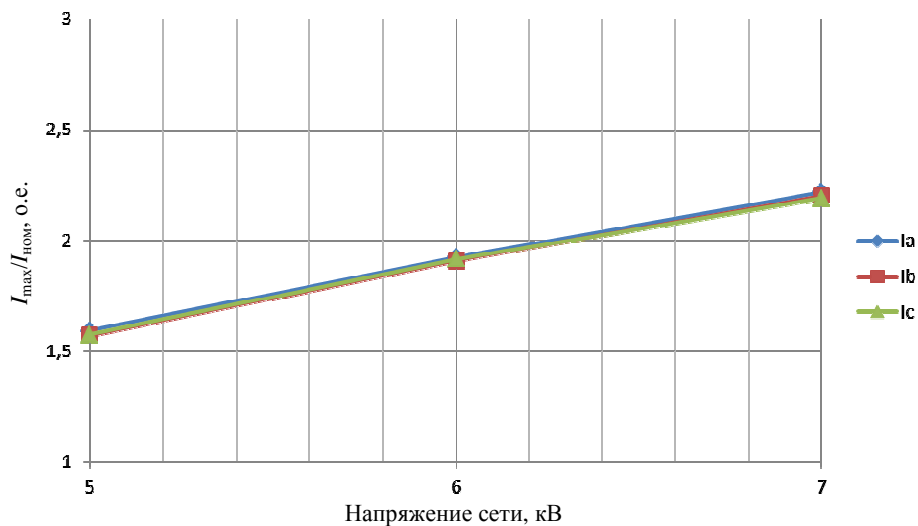


Рис. 7. Влияние величины напряжения сети на броски тока

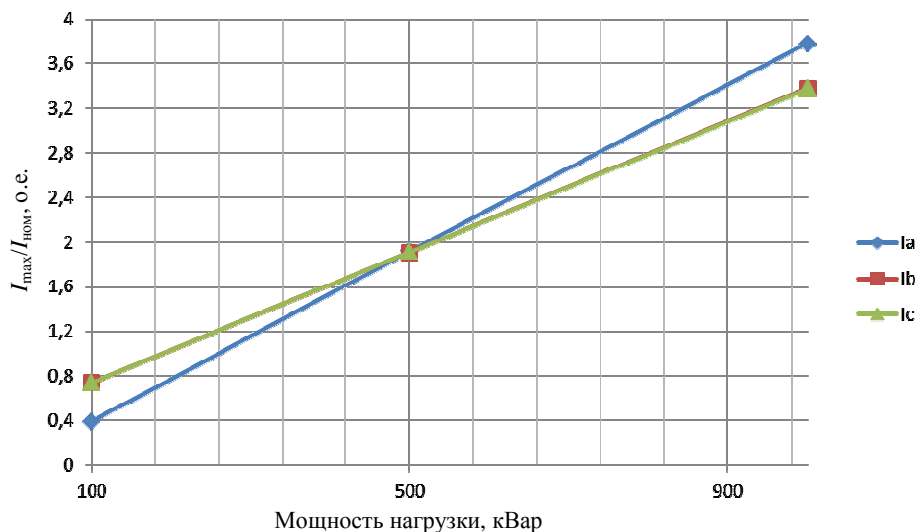


Рис. 8. Влияние мощности нагрузки на броски тока

Рассмотренные факторы так или иначе оказывают влияние на величину бросков тока. Регулируя напряжение системы, мощность нагрузки или параметры кабельной линии, можно оказать дополнительное воздействие на значение бросков тока. Дополняя положительное влияние подобранного алгоритма включения конденсаторной батареи, можно ещё больше снизить амплитуду бросков.

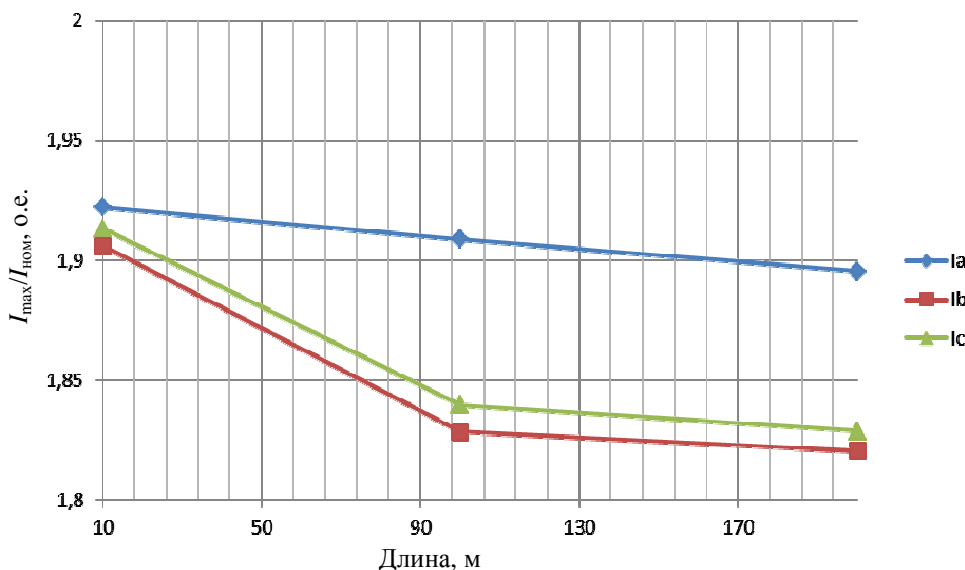


Рис. 9. Влияние длины кабельной линии электропередачи между выключателем и нагрузкой на броски тока

Выводы. Применение традиционных способов снижения бросков тока в большинстве случаев оказывается неэффективным или экономически невыгодным.

Принципиально иным способом снижения негативного воздействия переходных процессов является использование управляемой коммутации.

Разработан алгоритм включения конденсаторной батареи. По полученным зависимостям можно отметить эффективность использования управляемой коммутации и сделать вывод, что использование указанного метода применительно к конденсаторной батарее позволит задействовать уже существующие на станциях установки и поможет сократить расходы на введение нового оборудования.

Рассмотрено влияние ряда факторов на величину бросков тока. Основным фактором, оказывающим влияние на амплитуду бросков тока при включении батареи конденсаторов, является остаточный заряд на конденсаторе, который служит причиной изменения алгоритма.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития НГТУ, проект С-18.

Библиографический список

1. Белкин Г.С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения // *Электротехника*. – 2005. – № 12. – С. 3–9.

2. Управляемая коммутация выключателем с контроллером Switchsync [Электронный ресурс]. – URL: <http://leg.co.ua/stati/podstancii/upravlyаемaya-kommutaciya-vyklyuchatelem-s-kontrollerom-switchsync.html> (дата обращения: 03.03.2017).

3. Working group 13.04. Shunt capacitor bank switching stresses and test methods (1st part) // *Electra*. – 1999. – № 182. – P. 165–189.

4. Smith L.M. A practical approach in substation capacitor bank applications to calculating, limiting and reducing the effects of transient currents // *IEEE Transactions on industry applications*. – 1995. – Vol. 31, iss. 4. – P. 721–724.

5. Лебедев И.А. Исследование процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки и разработка технических требований к синхронным вакуумным выключателям: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2012. – 142 с.

6. Устройство подавления апериодической составляющей в токе линейного выключателя: пат. Рос. Федерация № 117707 [Электронный ресурс] / В.Е. Качесов. – БИ, 2012, № 18. – URL: <http://poleznaya-model.ru/model/11/117707.html> (дата обращения: 03.03.2017).

7. Инновационное электротехническое оборудование CleverReactor. Демпфирующие реакторы [Электронный ресурс]. – URL: <http://cleverreactor.com/product/dempfirijushie-reaktori> (дата обращения: 03.03.2017).

8. HPS Hammond Power Solution. Демпфирующий реактор для батарей конденсаторов [Электронный ресурс]. – URL: <http://eu.hammondpowersolutions.com/ru/product/демпирующий-реактор-для-батарей-кон/> (дата обращения: 03.03.2017).

9. NER Надёжные энергетические решения. Демпфирующие резисторы [Электронный ресурс]. – URL: <http://ner.spb.ru/dempfer-resistor> (дата обращения: 03.03.2017).

10. Компания Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH. Фильтрующие резисторы [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.jatlas.ru/node/347> (дата обращения: 03.03.2017).

11. Правила устройства электроустановок (утв. Мин-вом энергетики РФ 08.07.2002). – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2011. – 552 с.

12. Шишкин С.А. Разряд конденсаторных батарей установок компенсации реактивной мощности // Силовая электроника. – 2006. – № 2. – С. 50–52.

13. Павлюченко Д.А., Шевцов Д.Е. Особенности управляемой коммутации при нормальных и аварийных режимах в электрических сетях среднего напряжения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 41–44.

14. Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers – benefits and economic aspects // CIGRE Technical Brochure. – 2004. – № 262. – 34 p.

15. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ. – СПб.: Терция, 2004. – 188 с.

References

1. Belkin G.S. Primenenie samoupravliaemykh apparatov (apparatov, obladaiushchikh «intellektom») dlia kommutatsii tsepei vysokogo napriazheniia [Use of self-governed devices (the devices having "intelligence") for switching of chains of high voltage]. *Elektrotehnika*, 2005, no. 12, pp. 3-9.

2. Upravliaemaia kommutatsiia vyklychatelem s kontrollerom Switchsync [Controlled switching by the switch with the Switchsync controller], available at: <http://leg.co.ua/stati/podstancii/upravlyaemaya-kommutaciya-vyklychatelem-s-kontrollerom-switchsync.html> (accessed 03 March 2017).

3. Working group 13.04. Shunt capacitor bank switching stresses and test methods (1st part). *Electra*, 1999, no. 182, pp. 165-189.

4. Smith L.M. A practical approach in substation capacitor bank applications to calculating, limiting and reducing the effects of transient currents. *IEEE Transactions on industry applications*, 1995, vol. 31, iss. 4, pp. 721-724.

5. Lebedev I.A. Issledovanie protsessov kommutatsii vakuumnymi vyklyuchateliami induktivnoi nagruzki i razrabotka tekhnicheskikh trebovanii k sinkhronnym vakuumnym vyklyuchateliam [Research of processes of switching by vacuum switches of inductive loading and develop-

ment of technical requirements to synchronous vacuum switches]. Ph.D. thesis. Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012. 142 p.

6. Kachesov V.E. Ustroistvo podavleniia aperiodicheskoi sostavliaiushchei v toke lineinogo vykliuchatel'ia [The device of suppression of an aperiodic component in current of the linear switch]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 117707 (2012), available at: <http://poleznayamodel.ru/model/11/117707.html> (accessed 03 March 2017).

7. Innovatsionnoe elektrotekhnicheskoe oborudovanie CleverReactor. Dempfiruiushchie reaktory [Innovative electrotechnical equipment CleverReactor. The damping reactors], available at: <http://cleverreactor.com/product/dempfiruiushchie-reaktori> (accessed 03 March 2017).

8. HPS Hammond Power Solution. Dempfiruiushchii reaktor dlia batarei kondensatorov [HPS Hammond Power Solution. The damping reactor for batteries of condensers], available at: <http://eu.hammondpower-solutions.com/ru/product/демпфирующий-реактор-для-батареи-кон/> (accessed 03 March 2017).

9. NER Nadezhnye energeticheskie resheniia. Dempfiruiushchie rezistory [NER Reliable power decisions. The damping resistors], available at: <http://ner.spb.ru/dempfer-resistor> (accessed 03 March 2017).

10. Kompaniia Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH. Fil'truiushchie rezistory [Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH company. The filtering resistors], available at: <http://www.jatlas.ru/node/347> (accessed 03 March 2017).

11. Pravila ustroistva elektroustanovok (utverzhdeno Ministerstvom energetiki RF 08.07.2002) [Regulations for electrical installation (it is approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation 08.07.2002)]. 7nd. ed. Moscow: Novatsionnyi tsentr "ENAS", 2011. 552 p.

12. Shishkin S.A. Razriad kondensatornykh batarei ustanovok kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Capacitor banks discharge of reactive power compensation equipment]. Silovaia elektronika, 2006, no. 2, pp. 50-52.

13. Pavliuchenko D.A., Shevtsov D.E. Osobennosti upravliaemoi kommutatsii pri normal'nykh i avariinykh rezhimakh v elektricheskikh setiakh srednego napriazheniia [Features of controlled switching at normal and emergency modes in medium voltage electrical networks]. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaiia promyshlennost'*, 2015, no. 5, pp. 41-44.

14. Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers – benefits and economic aspects. *CIGRE Technical Brochure*, 2004, no. 262. 34 p.

15. Evdokunin G.A., Titenkov S.S. Vnutrennie perenapriazheniia v setiakh 6–35 kV [Internal overvoltages in 6-35 kV networks]. Saint Petersburg: Tertsiaa, 2004. 188 p.

Сведения об авторах

Лиске Елена Генриховна (Новосибирск, Россия) – студентка Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: foniku@gmail.com).

Сельменева Диана Сергеевна (Новосибирск, Россия) – студентка Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: dianaselmeneva@mail.ru).

Шевцов Дмитрий Евгеньевич (Новосибирск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета (630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, e-mail: dmitriy_shevtsov@mail.ru).

About the authors

Liske Elena Genrihovna (Novosibirsk, Russian Federation) is a Student Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, Karla Marksa pr., e-mail: foniku@gmail.com).

Selmeneva Diana Sergeevna (Novosibirsk, Russian Federation) is a Student Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, Karla Marksa pr., e-mail: dianaselmeneva@mail.ru).

Shevtsov Dmitry Evgenevich (Novosibirsk, Russian Federation) is a Senior Lecturer of Department of Power Supply Systems of Enterprises Novosibirsk State Technical University (630073, Novosibirsk, 20, Karla Marksa pr., e-mail: dmitriy_shevtsov@mail.ru).

Получено 09.10.2017