

УДК 621.3.064

DOI 10.46960/2658-6754_2023_3_65

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ ВАКУУМНЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Д.Е. ШевцовORCID: **0000-0003-0792-9624** e-mail: **shevtsov@corp.nstu.ru**Новосибирский государственный технический университет
*Новосибирск, Россия***Д.А. Павлюченко**ORCID: **0000-0003-4522-9557** e-mail: **pavlyuchenko@corp.nstu.ru**Новосибирский государственный технический университет
*Новосибирск, Россия***Л.И. Шевцова**ORCID: **0000-0003-2550-1576** e-mail: **shevczova@corp.nstu.ru**Новосибирский государственный технический университет
*Новосибирск, Россия***Н.В. Александров**ORCID: **0009-0004-8208-4056** e-mail: **alexandrov@mail.ru**Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
*Улан-Удэ, Россия***Э.Г. Ядагаев**ORCID: **0009-0001-6298-5306** e-mail: **yadagaev@mail.ru**АО «Чукотэнерго»
Анадырь, Россия

Представлены результаты исследования переходных процессов, возникающих при управляемой коммутации вакуумными выключателями электродвигателей 6 (10) кВ в режиме пуска. Для управления коммутацией размыкание или замыкание полюсов выключателя происходит в разное время. В *MatLab/Simulink* разработана модель синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ. Произведено моделирование переходных процессов при управляемой коммутации вакуумным выключателем электродвигателей. Рассмотрено влияние моментов коммутации полюсов выключателя на уровень перенапряжений. Проведенные исследования показали, что использование средств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ при включениях и отключениях электродвигателей позволяет проводить коммутацию в оптимальных для оборудования условиях с минимальными переходными напряжениями.

Ключевые слова: вакуумный выключатель, высокочастотные перенапряжения, переходные процессы, синхронный выключатель, управляемая коммутация, электродвигатель.

Для цитирования: Шевцов Д.Е., Павлюченко Д.А., Шевцова Л.И., Александров Н.В., Ядагаев Э.Г. Исследование переходных процессов при управляемой коммутации вакуумным выключателем электродвигателей // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 65-83. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_65

THE STUDY OF TRANSIENTS UNDER CONTROLLED SWITCHING OF ELECTRIC MOTORS BY VACUUM CIRCUIT BREAKER

D.E. Shevtsov

ORCID: **0000-0003-0792-9624** e-mail: **shevtsov@corp.nstu.ru**
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

D.A. Pavlyuchenko

ORCID: **0000-0003-4522-9557** e-mail: **pavlyuchenko@corp.nstu.ru**
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

L.I. Shevtsova

ORCID: **0000-0003-2550-1576** e-mail: **shevczova@corp.nstu.ru**
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

N.V. Alexandrov

ORCID: **0009-0004-8208-4056** e-mail: **alexandrov@mail.ru**
East Siberian State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

E.G. Yadagaev

ORCID: **0009-0001-6298-5306** e-mail: **yadagaev@mail.ru**
JSC “Chukotenergo”
Anadyr, Russia

Abstract. The paper presents the results of a study of transients during controlled switching of 6 (10) kV electric motors by vacuum circuit breakers in the start-up mode. The opening or closing of the circuit breaker poles occurs at different times to control the switching. A MatLab/Simulink model of a 6 (10) kV synchronous vacuum circuit breaker was developed. Simulation of transients during controlled switching of electric motors by

a vacuum circuit breaker was carried out. The influence of switching moments of switch poles on the overvoltage level is considered. The conducted studies have shown that the use of controlled switches in 6 (10) kV electrical networks during electric motors switching on and off makes it possible to carry out switching in conditions that are optimal for equipment with minimal transient voltages.

Keywords: controlled switching, current surges, electric motor, high-frequency overvoltages, synchronous circuit breaker, transients, vacuum circuit breaker.

For citation: D.E. Shevtsov, D.A. Pavlyuchenko, L.I. Shevtsova, N.V. Alexandrov and E.G. Yadagaev, "The study of transients under controlled switching of electric motors by vacuum circuit breaker", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 65-83, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_65

I. Введение

В электрических сетях 6 (10) кВ преимущественно используются вакуумные выключатели, имеющие ряд эксплуатационных преимуществ [1, 2]. Однако, наряду с этим у вакуумных аппаратов имеется существенный недостаток, связанный с коммутациями индуктивных нагрузок. Коммутации такими аппаратами могут инициировать многократные повторные зажиганиями (ПЗ) дуги и, соответственно, высокочастотные перенапряжения, что представляет опасность для изоляции электрооборудования, особенно электродвигателей и кабелей из сшитого полиэтилена, имеющих наименьший запас электрической прочности [3-7].

При отключении электродвигателей основное влияние на уровень перенапряжений оказывают: мощность и режим работы двигателя, длина линии электропередачи и момент коммутации аппарата. Отключение нагруженного и ненагруженного электродвигателя дает обычно перенапряжения не более $2,7 \cdot U_{\phi m}$ при возникновении ПЗ дуги [4, 8]. Отключение электродвигателя в режиме пуска приводит к более опасным значениям, при возникновении виртуальных срезов тока до $5 \cdot U_{\phi m}$ и более [6, 7, 9]. При включении двигательной нагрузки большое влияние на переходной процесс оказывают характеристики выключателя [8, 10]: неодновременность в работе полюсов аппарата и скорость снижения электрической прочности при сближении контактов. По теоретическим сведениям, наибольшая величина перенапряжений достигает $3 \cdot U_{\phi m}$ [7]. По экспериментальным данным [7, 8, 10], уровень перенапряжений доходит до $2,7 \cdot U_{\phi m}$.

В настоящее время отсутствуют эффективные способы ограничения высокочастотных перенапряжений. Разрядники, ограничители перенапряжения, искровые промежутки не влияют на частоту воздействующего напряжения. RC-цепи требуют точного моделирования для правильного выбора параметров в каждом отдельном случае [5, 6, 8, 9, 11]. Кроме того, имеющиеся средства снижения воздействий переходного процесса не решают

первопричину образования перенапряжений, так как коммутация электрической сети проводится в произвольный момент времени, а значит, может произойти в наихудшей фазе напряжения.

Управление моментом включения или отключения сети позволит исключить неблагоприятные условия коммутации и с этой точки зрения является принципиально новым подходом в снижении уровней перенапряжения и бросков тока, увеличении коммутационного ресурса выключателей. Управляемая (или синхронная) коммутация представляет собой одновременное переключение полюсов выключателя в строго определенный момент времени в наиболее подходящих для оборудования условиях [12-14]. Таким образом, целью работы является исследование переходных процессов в электрической сети 6 (10) кВ при одновременном включении и отключении фаз электродвигателя вакуумным выключателем и определение наилучших для оборудования условий управляемой коммутации.

II. Материалы и методы

Модель электрической сети 6 (10) кВ, представленная на рис. 1, позволяет проводить исследования процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки. В модели реализовано независимое управление моментов включения и отключения полюсов вакуумного выключателя. Модель разработана с использованием стандартных блоков *MatLab/Simulink* [15].

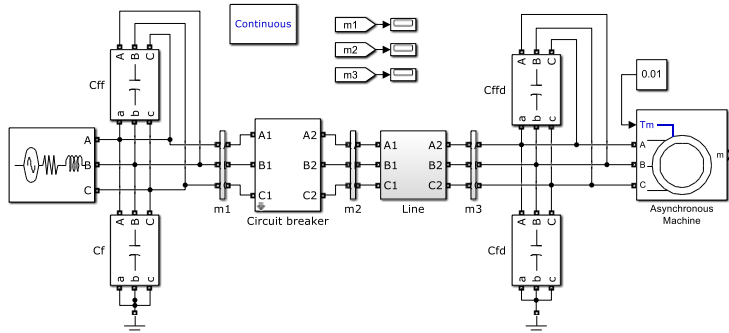


Рис. 1. Модель электрической сети

Fig. 1. Electric network model

Моделирование источника питания выполнено блоком *Three-Phase Source*. Источник питания имитирует точку подключения к энергосистеме с заданными параметрами в виде внутреннего сопротивления и имеет изолированную нейтраль.

В основе исследования коммутационных процессов лежит разработанная авторами модель синхронного вакуумного выключателя (рис. 2-4),

реализующая уникальную функцию управляемого включения и отключения [16]. Момент времени коммутации полюсов синхронного выключателя задается при помощи блоков *Start1-Start3* (рис. 3 и 4). Силовые контакты и электрическая дуга в межконтактном промежутке моделируются блоками *Contact1-Contact3* и *Arc1-Arc3* (рис. 2). Сопротивление электрической дуги в модели выключателя учитывается активным сопротивлением, пропорциональным величине отключаемого тока.

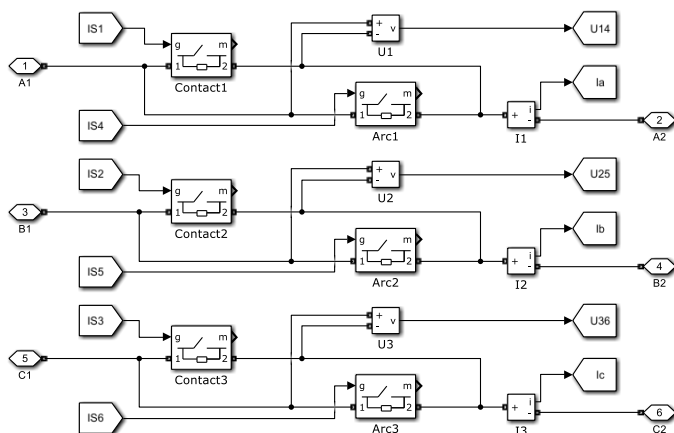


Рис. 2. Внешний вид модели синхронного вакуумного аппарата

Fig. 2. Appearance of the synchronous vacuum circuit breaker model

Управление включением и отключением синхронного выключателя реализовано специально разработанными блоками *ControlledOpening* и *ControlledClosing*, представленных на рис. 3 и 4.

При подаче команды на отключение (рис. 3) происходит возрастание электрической прочности межконтактного промежутка, что реализовано для каждого полюса выключателя блоками *DielectricStrength1-DielectricStrength3*. Для измерения токов в фазах применяются амперметры *I1-I3*, и в случае достижения током в одной из фаз значения тока среза выключателя подается команда на гашение электрической дуги в этой фазе при помощи блоков *ArcExtinction1-ArcExtinction3*.

Между контактами выключателя измеряется напряжение восстановления вольтметрами *U1-U3*, и в случае недостаточной электрической прочности межконтактного промежутка блоками *ArcReignition1-ArcReignition3* направляется управляющий сигнал на зажигание дуги. Далее гашение дуги возможно только при прохождении тока через нулевое значение со скоростью не более заданной или виртуальных срезах тока. Блоки *ArcExtinction4-ArcExtinction6* формируют управляющий сигнал на погасание дуги.

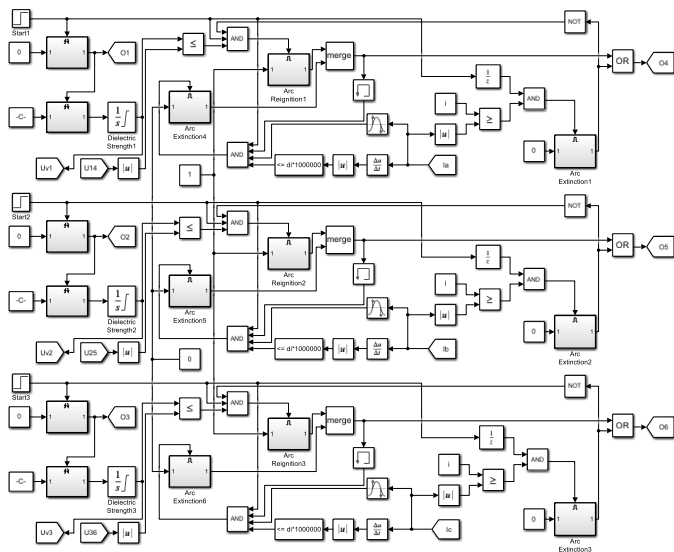


Рис. 3. Блок ControlledOpening

Fig. 3. Block ControlledOpening

После подачи команды на включение (рис. 4) контакты выключателя начинают сближаться, что инициирует процесс снижения электрической прочности межконтактного промежутка (блоки *DielectricStrength1 – DielectricStrength3*). Управляющий сигнал на ПЗ электрической дуги определяется блоками *ArcIgnition1-ArcIgnition3*. Команда на погасание электрической дуги формируется блоками *ArcExtinction1-ArcExtinction3*.

Модель кабельной линии реализована линией с распределенными параметрами при помощи блока *DistributedParametersLine*. В блоке имеется возможность задавать активные, индуктивные и емкостные параметры по прямой и нулевой последовательностям. Стандартный блок не учитывает скин-эффекта, т.е. увеличения активного сопротивления при возрастании частоты входного тока, поэтому в модели вводится дополнительное активное сопротивление при частоте переходного процесса.

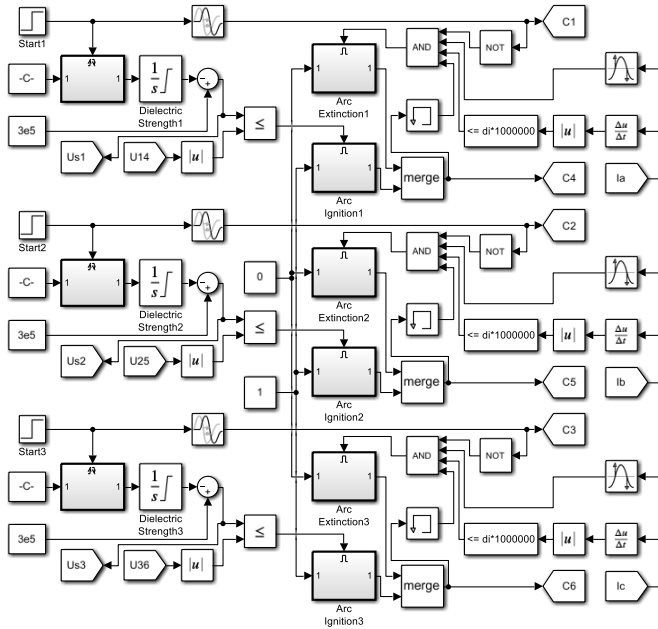


Рис. 4. Блок ControlledClosing

Fig. 4. Block ControlledClosing

Моделирование электродвигателя выполнено блоком *Asynchronous Machine*. Блок асинхронного двигателя состоит из моделей электрической части и механической части [5]. Параметры блока определяются по методике из [15] и подходят для моделирования нормального режима работы электродвигателя, однако в пусковом режиме токи завышены. Поэтому для режима пуска сопротивления двигателя определяются по выражениям, представленным в [17].

Исследование коммутационных перенапряжений требует учета емкостных связей в элементах сети, что реализовано стандартными блоками *RLC Branch*. Проверка работоспособности и адекватности разработанной имитационной модели электрической сети 6 (10) кВ при коммутации реактивных нагрузок выполнено на основе сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, представленными в [10, 18].

На рис. 5, а [18] приведены экспериментальные осциллограммы напряжений при отключении пускового тока заторможенного электродвигателя напряжением 6 кВ мощностью 200 кВт вакуумным выключателем. Длина кабельной линии между двигателем и выключателем составляет

100 м. Для сравнения на рис. 5, б показаны осциллограммы напряжений, выполненные с помощью модели для условий этого эксперимента.

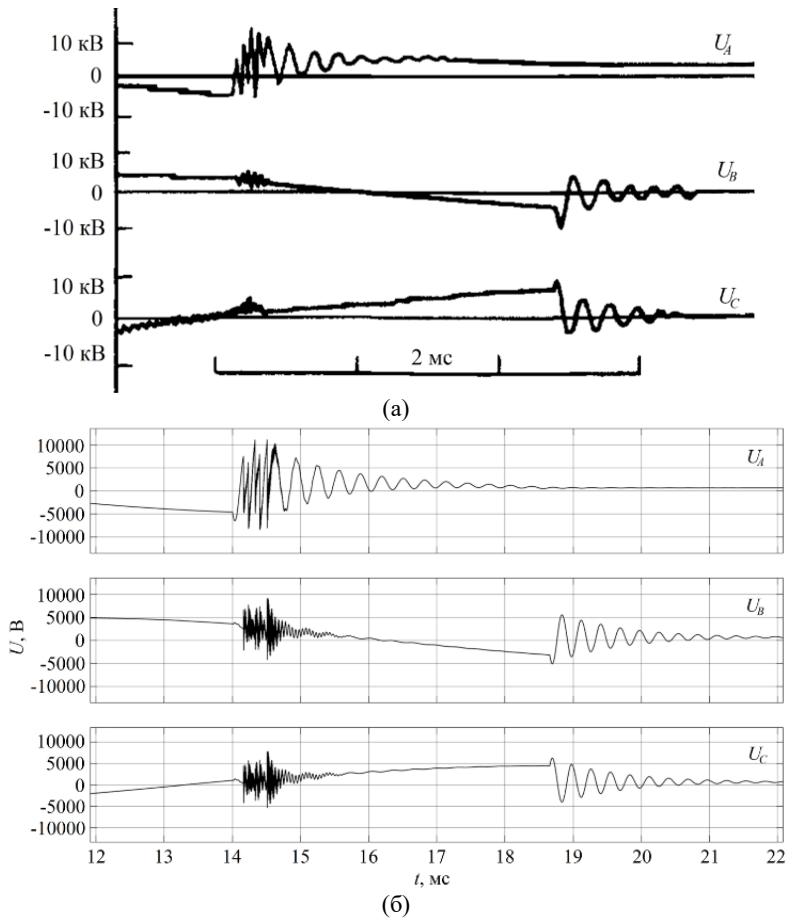


Рис. 5. Напряжения при отключении пускового тока электродвигателя: экспериментальные данные (а); моделирование (б)

Fig. 5. Voltage when the starting current of the electric motor is switched off: experimental data (a); simulation (b)

Экспериментальные осциллограммы процесса включения электродвигателя (напряжение 10 кВ, мощность 2000 кВт, длина кабеля 290 м) вакуумным выключателем представлены на рис. 6, а [10]. Соответствующие

кривые, полученные при помощи имитационного моделирования, приведены на рис. 6, б.

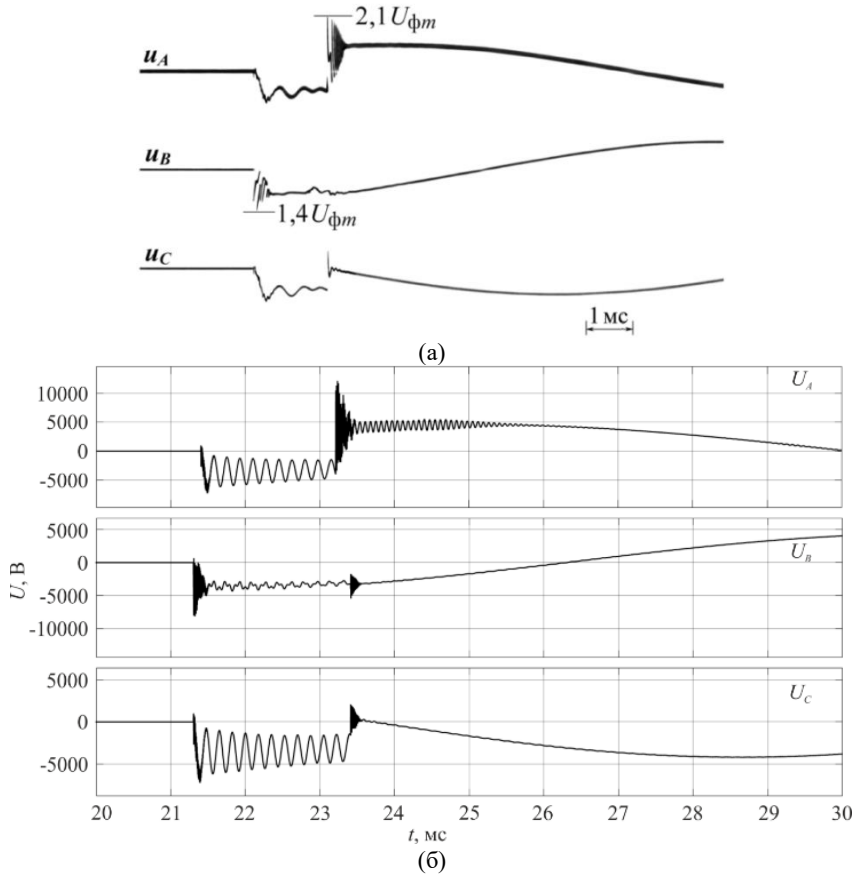


Рис. 6. Напряжения при включении электродвигателя: экспериментальные данные (а); моделирование (б)

Fig. 6. Voltage when the electric motor is switched on: experimental data (a); simulation (b)

Результаты, полученные по предложенной модели электрической сети 6 (10) кВ, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными.

III. Результаты и обсуждение

Основными критериями управляемого отключения электродвигателя являются минимизация уровня перенапряжений и исключение ПЗ дуги.

Наилучшее решение управляемого отключения электродвигателя может быть найдено варьированием момента времени размыкания полюсов выключателя. Дальнейшие исследования проведены для электродвигателей небольшой мощностью (200-500 кВт), работающих в режиме пуска и подключенных короткими кабельными линиями (до 25 м).

На рис. 7 представлены результаты исследования одновременного отключения трех фаз выключателя в разные моменты времени. В этом случае высокие уровни перенапряжений и ПЗ дуги возникают в течение малого промежутка времени, которое соответствует наименьшим значениям тока в одной из трех фаз. Причиной появления высоких уровней перенапряжений являются ПЗ дуги в первом отключаемом полюсе выключателя, вызывающие значительные колебания токов во всех фазах и, как следствие, виртуальные срезы тока. Для исключения причин образования виртуальных токов среза требуется производить коммутацию фаз выключателя разновременно.

На рис. 8 представлены результаты исследования разновременного отключения полюсов вакуумного выключателя. Коммутация первой фазы (рис. 8, а, в) в большинстве случаев не сопровождается высокочастотными перенапряжениями, однако в моменты времени, соответствующие значениям тока не более тока среза выключателя, наблюдаются ПЗ дуги и, соответственно, перенапряжения. Поэтому для исключения ПЗ дуги отключение первой фазы выключателя целесообразно проводить заранее до пересечения током нулевого значения.

При этом следует учитывать, что увеличение времени горения дуги в межконтактном промежутке негативно отражается на ресурсе выключателя. Таким образом, для обеспечения надежного отключения электродвигателя, момент размыкания первого полюса выключателя следует задавать с опережением пересечения током нулевого значения на 1,25 мс.

При известном моменте коммутации первой фазы производится размыкание второго полюса выключателя (рис. 8, б, г). В этом случае ПЗ дуги возникают при коммутации в течение малого промежутка времени, что также соответствует низким значениям тока.

На рис. 9 представлены осциллограммы напряжений и токов при реализации управляемого отключения двигательной нагрузки. Размыкание полюсов аппарата необходимо производить разновременно с опережением достижения токами значений токов среза выключателя для исключения ПЗ дуги, виртуальных срезов тока и сохранения ресурса выключателя. Управляемое отключение двигательной нагрузки позволяет снизить перенапряжения до значений не более $2,3 \cdot U_{ном}$.

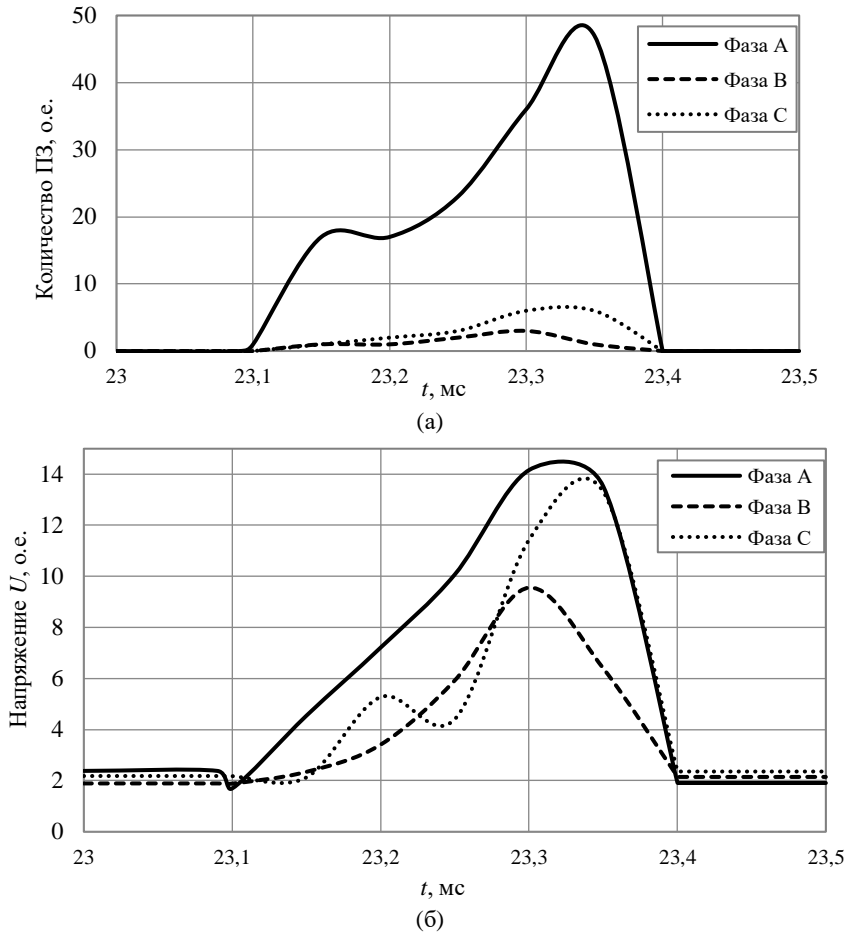


Рис. 7. Одновременное отключение фаз электродвигателя: зависимость количества повторных зажиганий (а); напряжения от момента коммутации (б)

Fig. 7. Simultaneous shutdown of electric motor phases: dependence of the number of re-ignitions (a); voltage from the moment of switching (b)

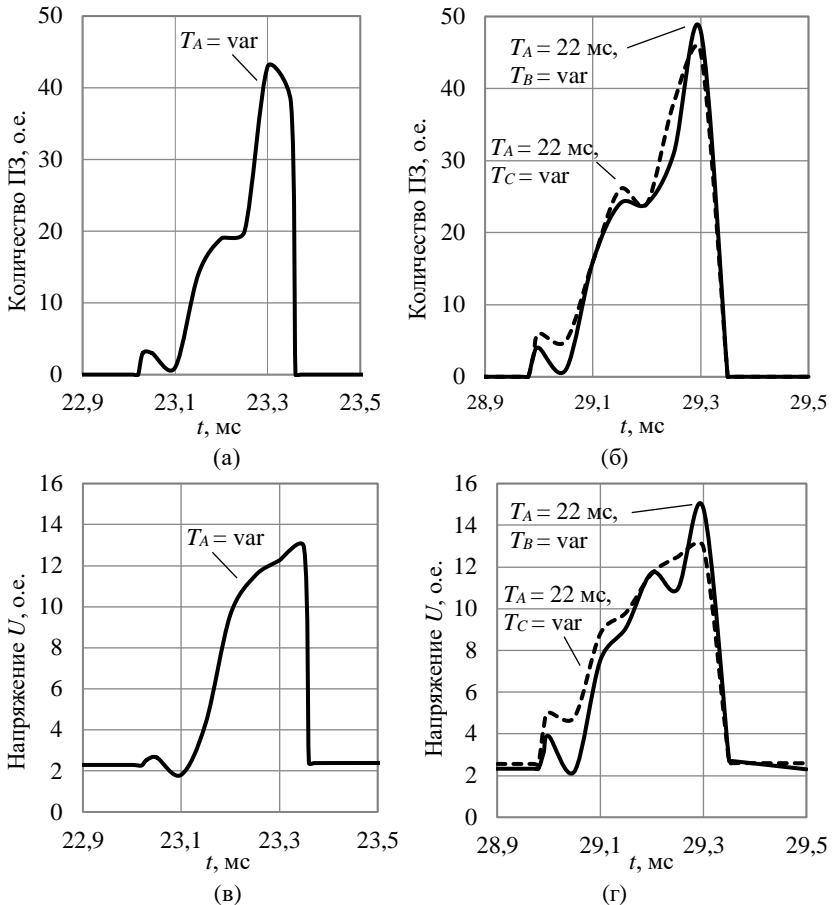


Рис. 8. Разновременное отключение фаз электродвигателя: зависимость количества повторных зажиганий дуги (а, б); напряжения от момента коммутации (в, г)

Fig. 8. Shutdown of electric motor phases at different times: dependence of the number of re-ignitions (a, b); voltage from the moment of switching (в, г)

В качестве критериев управляемого включения двигательной нагрузки целесообразно принять отсутствие предпробоев и минимизацию перенапряжений. При одновременном включении фаз электродвигателя предпробой возникают в любой момент коммутации.

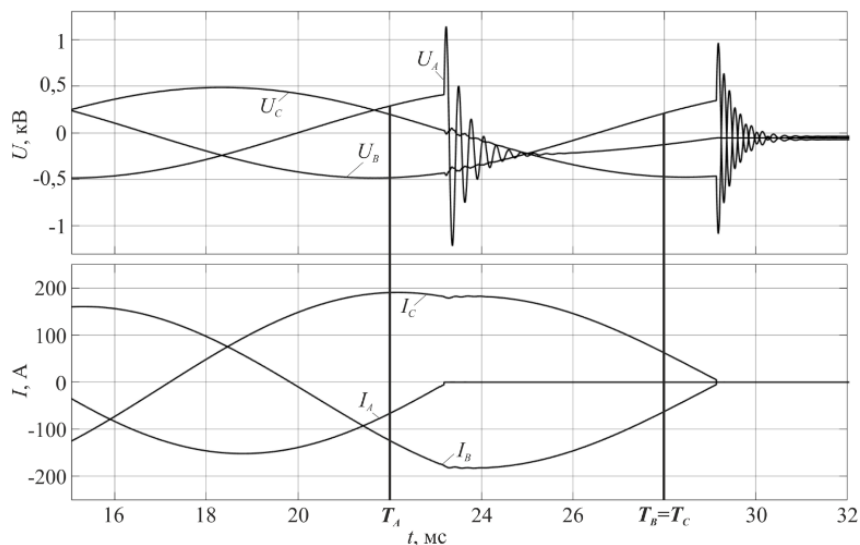


Рис. 9. Управляемое отключение двигательной нагрузки

Fig. 9. Controlled shutdown of electric motor

На рис. 10 представлены результаты исследования одновременного включения фаз выключателя. Замыкание первого полюса вакуумного выключателя около нулевого значения фазного напряжения не вызывает предпробоев и высокочастотных перенапряжений. Замыкание второго полюса выключателя в большинстве случаев сопровождается предпробоями и высокочастотными перенапряжениями, однако в моменты времени около нулевого значения линейного напряжения между первыми включаемыми фазами не вызывает предпробоев и перенапряжений. Замыкание оставшегося в работе полюса выключателя без предпробоев возможно вблизи нулевого значения фазного напряжения на этом полюсе.

Исходя из вышесказанного, управляемое включение двигательной нагрузки без предпробоев и перенапряжений возможно по следующему алгоритму: коммутация первого и последнего полюсов выключателя осуществляется при переходе их фазных напряжений через нулевое значение, второго полюса – при переходе линейного напряжения между первой и второй фазами через нулевое значение. Напряжения и токи при управляемом включении электродвигателя представлены на рис. 11.

Управляемое включение электродвигателей предъявляет к выключателю высокие требования по стабильности времени срабатывания полюсов аппарата. Разброс замыкания полюсов синхронного выключателя должен составлять не более 0,05 мс.

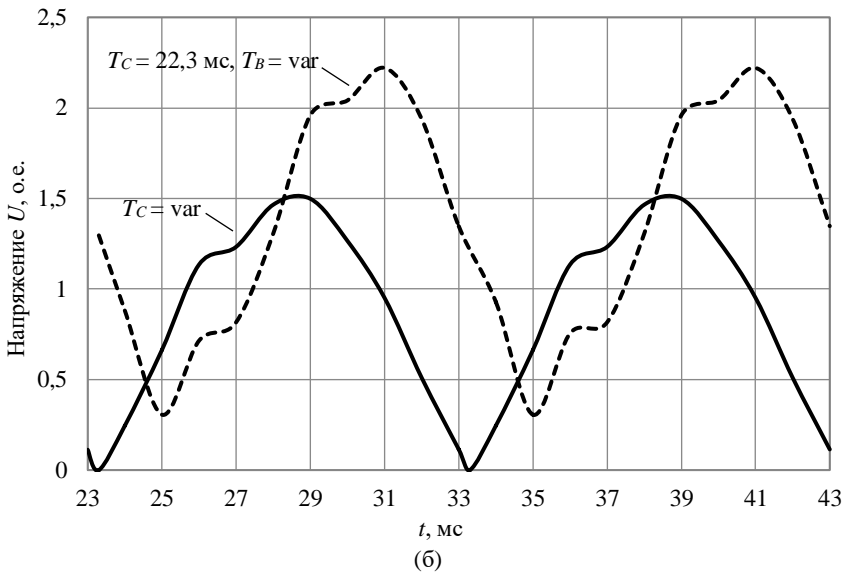
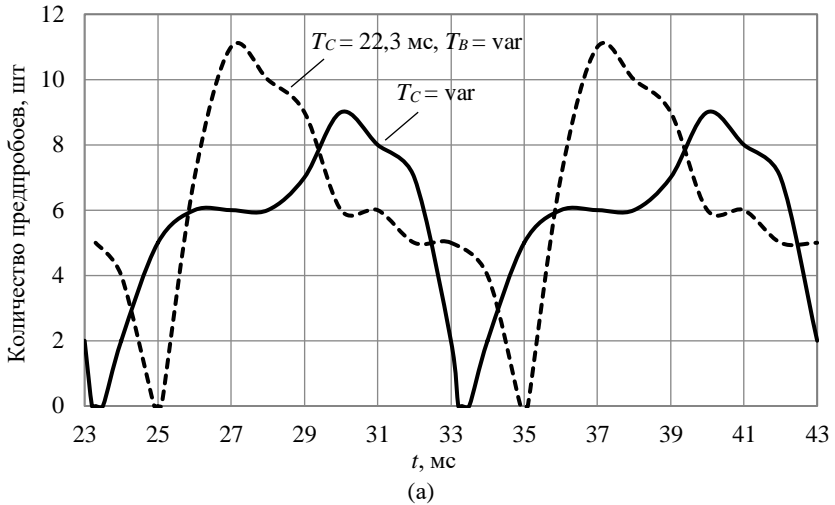


Рис. 10. Разновременное включение фаз электродвигателя: зависимость количества предпробоев (а); напряжения от момента коммутации (б)

Fig. 10. Switching-on of electric motor phases at different times: dependence of the number of pre-breakdowns (a); voltage from the moment of switching (b)

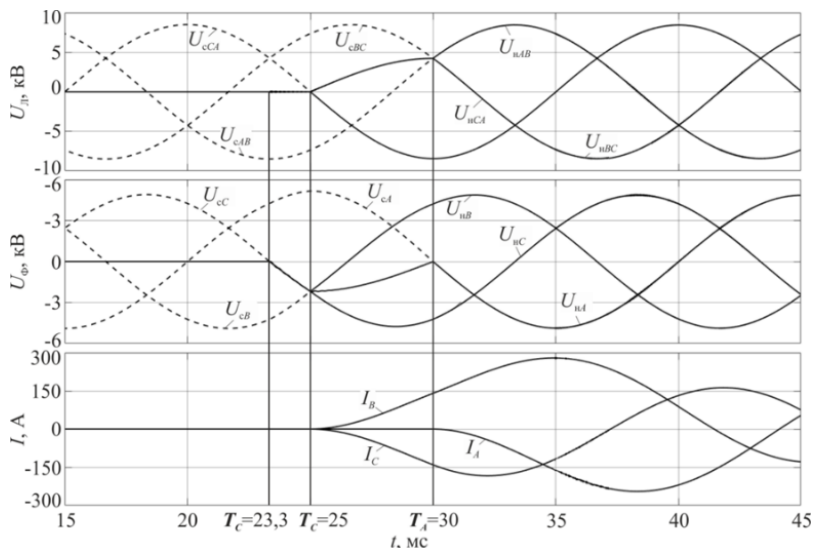


Рис. 11. Управляемое включение двигательной нагрузки

Fig. 11. Controlled electric motor start

В [16] представлены результаты экспериментального исследования точности работы вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* производства ООО «КЭПС» с функцией одновременной коммутации полюсов. Максимальные разбросы времени срабатывания полюсов выключателя не превышают 0,5 мс при отключении и включении.

Из результатов исследования следует, что управляемое включение электродвигателей без предпробов современными вакуумными выключателями не осуществимо. Реализация управляемого отключения электродвигателей без возникновения ПЗ дуги и высокочастотных перенапряжений в настоящее время возможна.

IV. Заключение

В статье рассмотрено влияние моментов коммутации полюсов выключателя на уровень перенапряжений. Выявлено, что при отключении электродвигателя в моменты опережающие переход фазных токов через нулевые значения ПЗ дуги и высокочастотные перенапряжения не возникают. Включение электродвигателя без предварительных пробоев и высокочастотных перенапряжений возможно в случае замыкания первого по последовательности коммутации и последнего полюсов выключателя при переходе фазных напряжений через нулевое значение, второго полюса – при переходе линейного напряжения между первой и второй фазами через нулевое значение.

Проведенные исследования показывают, что внедрение методов управляемой коммутации в вакуумных выключателях 6 (10) кВ позволит проводить коммутации электродвигателей в оптимальных условиях без ПЗ дуги и высокочастотных перенапряжений. Однако управляемое включение электродвигателей предъявляет к выключателю высокие требования по стабильности времени срабатывания полюсов аппарата, разброс замыкания полюсов должен составлять не более 0,05 мс.

© Шевцов Д.Е., 2023

© Павлюченко Д.А., 2023

© Шевцова Л.И., 2023

© Александров Н.В., 2023

© Ядагаев Э.Г., 2023

Поступила в редакцию 07.03.2023

Принята к публикации 25.05.2023

Received 07.03.2023

Accepted 25.05.2023

Библиографический список

- [1] Кравченко А., Метельский В. Вакуумные выключатели нагрузки зарубежных производителей // *Электрик*. 2013. № 3. С. 14-17.
- [2] Назарычев А.Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей // *Энергоэксперт*. 2007. № 4-5. С. 58-63.
- [3] Nicolae P.M., Nicolae M.S., Nicolae I.D., Netoiu A. Overvoltages induced in the supplying line by an electric railway vehicle // *proc. 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Jul. 26-Aug. 13, Raleigh, NC, USA: IEEE, 2021. P. 653-658. DOI: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559345
- [4] Куликовский В.С., Ковалева О.А. Моделирование коммутационных перенапряжений при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями // *Вестник КРАСГАУ*. 2012. № 5 (68). С. 337-343.
- [5] Шпиганович А.Н., Пушница К.А. Имитационная модель системы электроснабжения кислородноконвертерного производства для анализа коммутационных перенапряжений // *Электротехника*. 2016. № 6. С. 21а-25.
- [6] Воркунов О.В., Афанасьева Т.И. Физические процессы в вакуумных выключателях при возникновении коммутационных перенапряжений // *Международный технико-экономический журнал*. 2021. № 5. С. 7-17.
DOI: 10.34286/1995-4646-2021-80-5-7-17
- [7] Vojtovich R.A., Lavro Y.A., Petrova N.F., Tolstobrova L.I. Electromagnetic compatibility of vacuum circuit breakers with electrical equipment of medium voltage // *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) - Proceedings APEIE-2018*, Oct. 02-06, 2018, Novosibirsk, Russia: NSTU, 2018. P. 483-487. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546295
- [8] Коновалов Е.Ф., Дроздов Н.В., Зубрилин А.В. О защите действующих электрических сетей от перенапряжений // *Энергетик*. 1998. № 4. С. 12-14.

- [9] Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С., Подпоркин Г.В., Таджибаев А.И. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 270 с.
- [10] Иванов А.В., Дегтярев И.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических процессов и характеристик вакуумной дугогасительной камеры при коммутации электродвигателей // Нефтегазовое дело. 2007. № 1. С. 1-10.
- [11] Кадомская К.П. Системный подход к обеспечению надежной эксплуатации изоляции электрооборудования в электрических сетях среднего и высокого напряжения // Главный энергетик. 2006. № 1. С. 54-60.
- [12] Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (first part) // Electra. 1999. No. 183. P. 43-73.
- [13] Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (2nd part) // Electra. 1999. No. 185. P. 37-57.
- [14] 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.
- [15] Герман-Галкин С.Г. MatLab and Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Принт, 2014. – 368 с.
- [16] Шевцов Д.Е., Павлюченко Д.А., Лавринович В.А., Шальнев В.Г. Разработка имитационной модели синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ с учетом реальных характеристик аппарата // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 1. С. 38-44.
- [17] Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38-42.
- [18] Евдокунин Г.А., Корепанов А.А. Перенапряжения при коммутации цепей вакуумными выключателями и их ограничение // Электричество. 1998. № 4. С. 2-14.

References

- [1] A. Kravchenko and V. Metel'skii, "Vakuumnye vykliuchateli nagruzki zarubezhnykh proizvoditelei [Vacuum load switches of foreign manufacturers]", *Elektrik [Electrician]*, no. 3, pp. 14-17, 2013 (in Russian).
- [2] A.N. Nazarychev, "Analiz osnovnykh preimushchestv primeneniia vakuumnykh vykliuchatelei [Analysis of the main advantages of using vacuum circuit breakers]", *Energoekspert [Energy Expert]*, no. 4-5, pp. 58-63, 2007 (in Russian).
- [3] P.M. Nicolae, M.S. Nicolae, I.D. Nicolae and A. Netoiu, "Overvoltages induced in the supplying line by an electric railway vehicle", in proc. *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Jul. 26-Aug. 13, 2021, Raleigh, NC, USA, pp. 653-658. DOI: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559345
- [4] V.S. Kulikovskiy and O.A. Kovaleva, "Switching overvoltage modeling in the process of switching the high-voltage electric motors by the vacuum switches", *Bulletin of KSAU*, vol. 5, no. 68, pp. 337-343, 2012.

- [5] A.N. Shpiganovich and K.A. Pushnitsa, "An imitation model of a power-supply system of oxygen-converter manufacturing to analyze switching overvoltage", *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 6, pp. 316-319, 2016. DOI: 10.3103/S1068371216060092
- [6] O.V. Vorkunov and T.I. Afanasyeva, "Physical processes in vacuum circuit breakers under switching overvoltages", *International Technical and Economic Journal*, no. 5, pp. 7-17, 2021. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-80-5-7-17
- [7] R.A. Vojtovich, Y.A. Lavro, N.F. Petrova and L.I. Tolstobrova, "Electromagnetic compatibility of vacuum circuit breakers with electrical equipment of medium voltage", in proc. *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) - Proceedings APEIE-2018*, Oct. 02-06, 2018, Novosibirsk, Russia, pp. 483-487. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546295
- [8] E.F. Kononov, N.V. Drozdov and A.V. Zubrilin, "O zashchite deistvuiushchikh elektricheskikh setei ot perenapriazhenii [On the protection of existing electrical networks from overvoltage]", *Energetik*, no. 4, pp. 12-14, 1998 (in Russian).
- [9] F.Kh. Khalilov, G.A. Evdokunin, V.S. Polyakov, G.V. Podporkin and A.I. Tazhibayev, *Zashchita setei 6-35 kV ot perenapriazhenii [Protection of 6-35 kV networks from overvoltage]*. St. Petersburg: Energoatomizdat, 2002 (in Russian).
- [10] A.V. Ivanov and I.L. Degtiarev, "Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie elektrofizicheskikh protsessov i kharakteristik vakuunnoi dugogasitel'noi kamery pri kommutatsii elektrodvigateli [Theoretical and experimental study of electrophysical processes and characteristics of a vacuum arc-extinguishing chamber when switching electric motors]", *Oil and Gas Business*, no. 1, pp. 1-10, 2007 (in Russian).
- [11] K.P. Kadomskaia, "Sistemnyi podkhod k obespecheniiu nadezhnoi ekspluatatsii izoliatsii elektrooborudovaniia v elektricheskikh setiakh srednego i vysokogo napriazheniia [A systematic approach to ensuring reliable operation of electrical equipment insulation in medium and high voltage electrical networks]", *Glavnyj Energetik [Chief Power Engineer]*, no. 1, pp. 54-60, 2006 (in Russian).
- [12] Working group 13.07, "Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (1st part)", *Electra*, no. 183, pp. 43-73, 1999.
- [13] Working group 13.07, "Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (2nd part)", *Electra*, no. 185, pp. 37-57, 1999.
- [14] D.A. Pavlyuchenko and D.E. Shevtsov, "Osobennosti upravliaemoi kommutatsii pri normal'nykh i avariinykh rezhimakh v elektricheskikh setiakh srednego napriazheniia [Features of controlled switching under normal and emergency operating conditions in medium voltage networks]", *Elektro. Elektrotehnika, Elektroenergetika, Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost' [Electro. Electrical Engineering, Power Industry, Electrical Industry]*, no. 5, pp. 41-44, 2015 (in Russian).
- [15] S.G. German-Galkin, *MatLab and Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [MatLab and Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]*. St. Petersburg: Korona-Print, 2014 (in Russian).
- [16] D.E. Shevtsov, D.A. Pavlyuchenko, V.A. Lavrinovich and V.G. Shalnev, "Razrabotka imitatsionnoi modeli sinkhronnogo vakuumnogo vykliuchatelia 6 (10) kV s uchetom real'nykh kharakteristik apparata [Development of the controlled vacuum 6

- (10) kV circuit Breaker model with real parameters”], *Elektro. Elektrotehnika, Elektroenergetika, Elektrotehnicheskaya Promyshlennost' [Electro. Electrical Engineering, Power Industry, Electrical Industry]*, no. 1, pp. 38-44, 2017 (in Russian).
- [17] Iu.A. Moshchinskii, V.Ia. Bepalov and A.A. Kiriakin, “Opreделение parametrov skhemy zameshcheniia asinkhronnoi mashiny po kataloghnym dannym [Determination of parameters of the asynchronous machine substitution scheme based on catalog data]”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 38-42, 1998 (in Russian).
- [18] G.A. Evdokunin and A.A. Korepanov, “Perenapriazheniia pri kommutatsii tsepei vakuumnymi vykliuchateliami i ikh ogranichenie [Overvoltage during circuit switching by vacuum circuit breakers and their limitation]”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 2-14, 1998 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шевцов Дмитрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Dmitry E. Shevtsov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Павлюченко Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Dmitry A. Pavlyuchenko, Cand. Sci. (Eng.), head of the department of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Шевцова Лилия Ивановна, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Lilia I. Shevtsova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Александров Николай Васильевич, кандидат технических наук, доцент Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ, Российская Федерация

Nikolay V. Alexandrov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation

Ядагаев Эркемен Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник отдела ремонтов АО «Чукотэнерго», г. Анадырь, Российская Федерация

Erkemen G. Yadagaev, Cand. Sci. (Eng.), head of the repair department of Chukotenergo JSC, Anadyr, Russian Federation