

## Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.3.05

DOI 10.30987/2658-6436-2023-2-89-96

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ОДНОСТОРОННЕГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВА СИНХРОНИЗАЦИИ МОМЕНТОВ ВКЛЮЧЕНИЯ КОНТАКТОВ ФАЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Сергей Владимирович Морозов<sup>1✉</sup>, Алексей Иванович Андриянов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> morser777@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2621-8783>

<sup>2</sup> ahaos@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4083-040X>

**Аннотация.** Выполнено моделирование включения воздушной линии электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения в тупиковом режиме, содержащей значительную апериодическую составляющую тока, как от ключа управления выключателем, так и в цикле трехфазного автоматического повторного включения (ТАПВ), с использованием программного комплекса MATLAB. Целью моделирования является поиск и нахождение оптимальных режимов работы электрической передачи с точки зрения допустимости величин апериодической составляющей тока и оценки возможных значений перенапряжений в фазах ЛЭП. Осуществлена проверка возможности применения пофазного управления высоковольтным выключателем, при котором обеспечивается замыкание силовых контактов фазы выключателя в момент максимального значения мгновенного напряжения на этих контактах, как меры способной значительно уменьшить влияние апериодической составляющей тока на возможность повреждения коммутационного оборудования и развитие аварийной ситуации в энергетической системе. Полученные результаты могут быть применены для практического исключения влияния апериодической составляющей тока во всех возможных режимах (тупиковый режим воздушной линии (ВЛ), в цикле неуспешного автоматического повторного включения (АПВ) при всех видах коротких замыканий на высоковольтной линии электропередачи) с введенными в работу шунтирующими реакторами и без них.

**Ключевые слова:** апериодическая составляющая тока, высоковольтная линия, холостой ход, выключатель, шунтирующий реактор

**Для цитирования:** Морозов С.В., Андриянов А.И. Моделирование режима одностороннего включения линии электропередачи сверхвысокого напряжения с применением устройства синхронизации моментов включения контактов фаз выключателя // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №2 (20). С. 89-96. doi: 10.30987/2658-6436-2023-2-89-96.

Original article

Open Access Article

### SIMULATING THE MODE OF ONE-SIDED SWITCHING-ON OF AN ULTRA-HIGH VOLTAGE POWER LINE USING A DEVICE FOR SYNCHRONIZING THE MOMENTS OF SWITCHING-ON THE CONTACTS OF THE CIRCUIT BREAKER PHASES

Sergey V. Morozov<sup>1✉</sup>, Alexey I. Andriyanov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> morser777@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2621-8783>

<sup>2</sup> ahaos@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4083-040X>

**Abstract.** Simulating the switching on of an overhead power transmission line (PTL) of ultra-high voltage in a dead-end mode, containing a significant aperiodic current component, both from the switch control key and in the three-phase automatic reclosing (TARC) cycle, is performed using the MATLAB software package. The aim of model-

ling is to search and find the optimal modes of electrical transmission operation in terms of admitting the values of the aperiodic current component and assessing possible values of overvoltages in the phases of power transmission lines. The possibility of using phase-by-phase control of a high-voltage circuit breaker, which ensures closing the power contacts of the circuit breaker phase at the moment of the maximum value of the instantaneous voltage on these contacts, is checked as a measure that can significantly reduce the influence of the aperiodic current component on the possibility of damaging switching equipment and developing an emergency situation in the power system. The results obtained can be used to practically eliminate the influence of the aperiodic current component in all possible modes (dead-end mode of an overhead line (OL), in an unsuccessful automatic reclosing cycle (ARC) for all types of short circuits on a high-voltage power line) with shunt reactors put into operation and without putting them into operation.

**Keywords:** aperiodic current component, high-voltage line, no-load, switch, shunt reactor

**For citation:** Morozov S.V., Andriyanov A.I. Simulating the mode of one-sided switching-on of an ultra-high voltage power line using a device for synchronizing the moments of switching-on the contacts of the circuit breaker phases. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 2 (20). pp. 89-96. doi: 10.30987/2658-6436-2023-2-89-96.

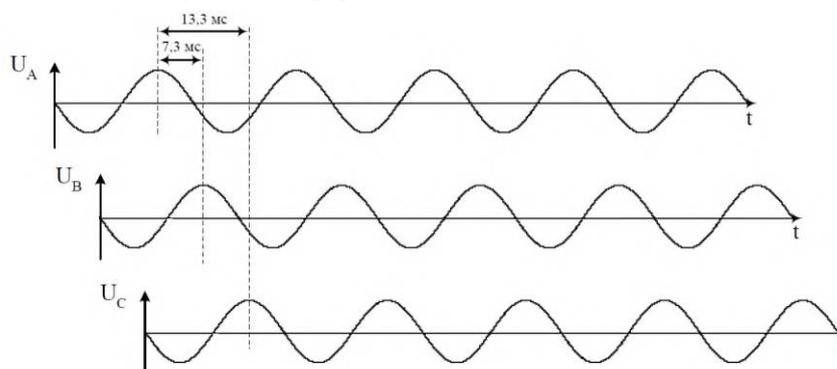
## Введение

Практически все современные высоковольтные выключатели, изготовленные ведущими мировыми производителями высоковольтных коммутационных аппаратов (фирмы SIEMENS, AREVA, Уралэлектротяжмаш и т.п.), которые предназначены для коммутации токов в схемах электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, могут снабжаться устройствами пофазного синхронизированного включения (например, устройство RPH2) [1, 2]. С помощью пофазного управления моментом включения коммутационного аппарата устраняется длительная аperiodическая составляющая в токе «здоровых», т.е. неповрежденных фаз.

### Особенности работы устройства синхронизации моментов пофазного включения контактов коммутационного аппарата

При пофазном управлении выключателем и замыкании контактов фазы выключателя в максимальном значении мгновенного напряжения на этих контактах аperiodическая составляющая в токе выключателя практически не появляется. Но в этом случае наблюдается явление возрастания уровня коммутационных перенапряжений на контактах коммутационного аппарата. При постоянной работе выключателя в таком режиме резко возрастает возможность повреждения коммутационного оборудования и развитие аварийной ситуации в энергетической системе.

Аperiodическая составляющая тока будет оказывать минимальное влияние на контактную группу коммутационного аппарата воздушной линии высокого и сверхвысокого напряжения при работе устройства в оптимальной последовательности [3] (рис. 1), так замыкание фазы «А» коммутационного аппарата должно происходить в момент соответствия максимальному значению амплитуды фазного напряжения  $U_A$ . Через 7,3 мс после замыкания контактов фазы «А» коммутационного аппарата, следует произвести замыкание группы контактов фазы «В» выключателя. Коммутация группы контактов фазы «С» должна быть произведена через 6 мс относительно фазы «В» выключателя или 13,3 мс относительно момента коммутации группы контактов фазы «А» [4].



**Рис. 1. Оптимальная последовательность и величина уставок промежутков времени между замыканием контактов фаз коммутационного устройства**

**Fig. 1. The optimal sequence and value of the setpoints of the time intervals between the closure of the phase contacts of the switching device**

Доказано, что при такой последовательности работы привода коммутационного аппарата значение мгновенного напряжения на контактах выключателя имеет максимальное значение [1].

Особенности работы устройства синхронизации моментов включения контактов коммутационного аппарата для одной фазы выключателя показаны на рис. 2. Приведённые временные диаграммы объясняют принцип действия этого устройства.

Получив управляющее воздействие от ключа оперативного персонала или устройства релейной защиты в момент времени  $t_1$ , логическая часть устройства начинает отслеживать величину напряжения на контактах коммутационного устройства. В момент прохождения синусоиды напряжения через нулевое значение (момент времени  $t_2$ ), устройство синхронизации формирует сигнал на замыкание контактов выключателя (момент времени  $t_3$ ) с задержкой времени  $t_{\text{зад}}$ . Величина временной задержки зависит от уставки времени замыкания контактов соответствующей фазы («А», «В», «С») выключателя и времени работы привода выключателя  $t_{\text{вкл.выкл.собств}}$  и величиной продолжительности горения дуги  $t_{\text{дуг}}$  на силовых контактах выключателя до их полного замыкания. Уставка по времени  $t_{\text{дуг}}$  задается в устройстве синхронизации для каждой фазы отдельно.

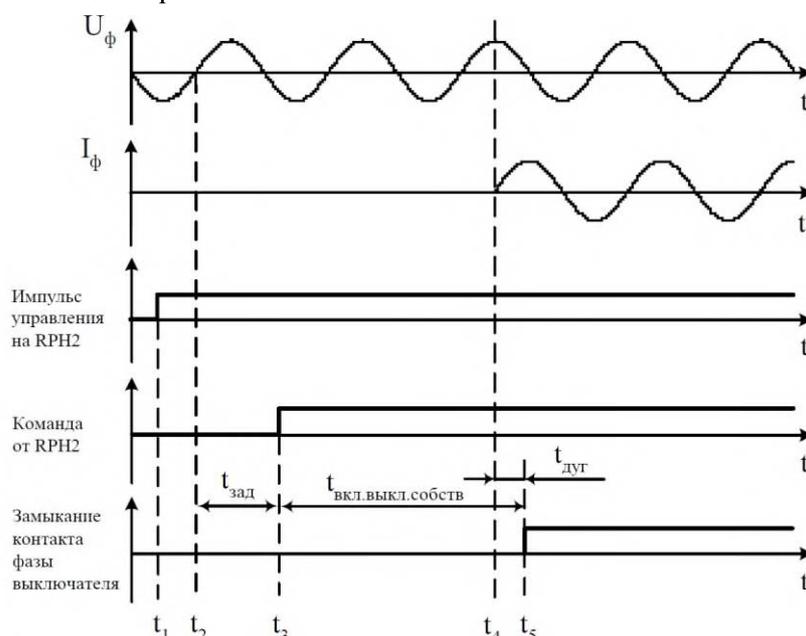


Рис. 2. Принцип работы устройства синхронизации моментов включения силовых контактов коммутационного устройства на примере одной фазы выключателя

Fig. 2. The principle of operation of the timing device for switching on the power contacts of the switching device on the example of one phase of the switch

### Моделирование тупикового режима включения линии электропередачи от ключа управления выключателем

Математическое представление модели ЛЭП как линии с распределенными параметрами определяемыми конструкцией фазы подробно описаны в работах [5, 6].

Расчетная упрощенная схема электропередачи сверхвысокого напряжения показана на рис. 3.

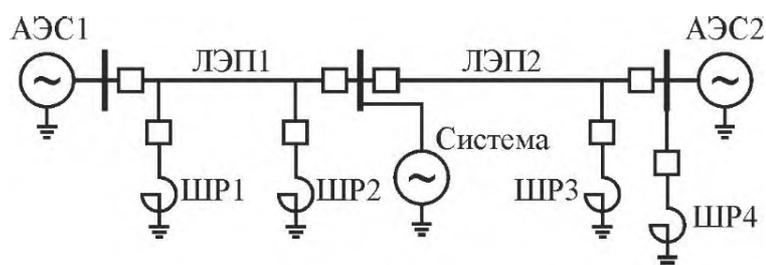
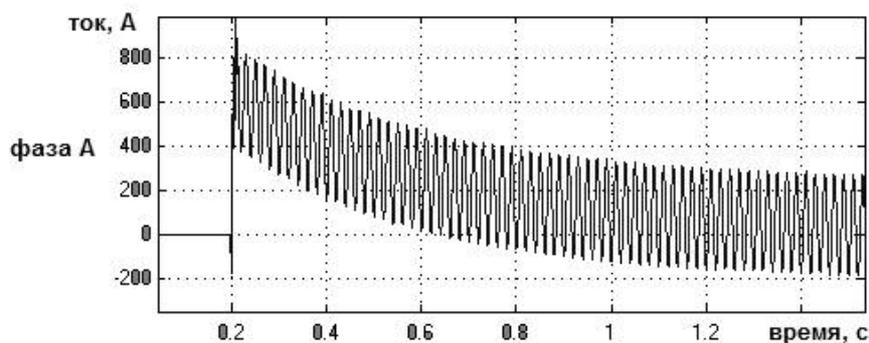


Рис. 3. Расчетная упрощенная схема электропередачи сверхвысокого напряжения  
 Fig. 3. The calculated simplified scheme of ultrahigh voltage power transmission

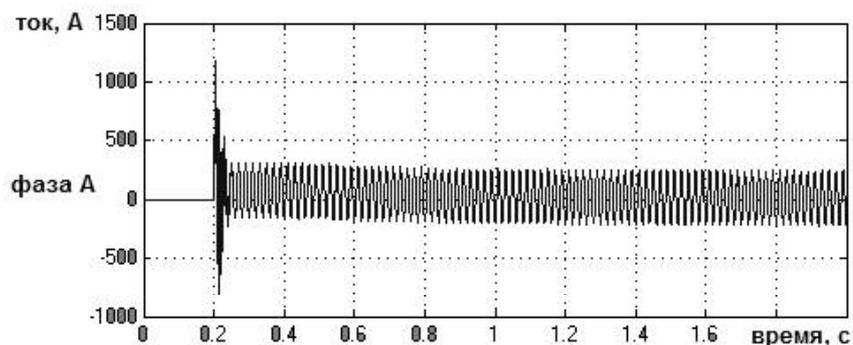
График тока, проходящего через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны подстанции (ПС) при введенных в работу шунтирующих реакторах (ШР) по обоим концам ЛЭП1 без установки устройства синхронизации моментами включения фаз выключателя, приведен на рис. 4.



**Рис. 4.** Ток, проходящий через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1

*Fig. 4. The current passing through the power contacts of the switch in phase «А» when the ultra-high voltage overhead line is turned on at idle from the side of the PS when the shunt reactors are put into operation at both ends of the power line1*

График тока, проходящего через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя, приведен на рис. 5. При сравнении графиков (см. рис. 4, 5) для режима одностороннего включения ЛЭП1 видно, что при наличии устройства пофазного управления включением выключателя, величина апериодической составляющей в токе, проходящем через коммутационное устройство и трансформаторы [7] тока, практически полностью отсутствует.



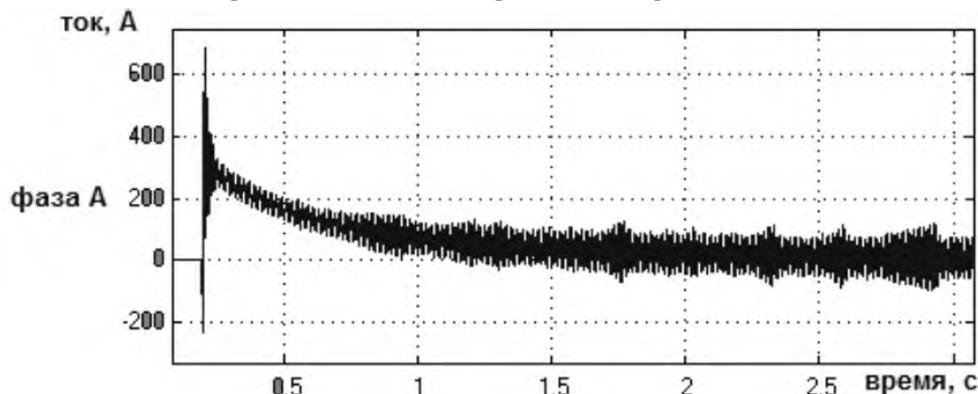
**Рис. 5.** Ток, проходящий через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя

*Fig. 5. The current passing through the power contacts of the switch in phase «А» when the ultra-high voltage overhead line is turned on at idle from the side of the PS when the shunt reactors are put into operation at both ends of the power line 1 and the synchronization device is installed and put into operation by the moments of switching on the phases of the switch*

Проведённое моделирование показало, что на разомкнутом конце включаемой линии величина кратковременного перенапряжения в фазах не превысит номинальное значение на 9 % и возрастет до 480 кВ.

График тока, проходящего через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в рабо-

ту шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1 без установки устройства синхронизации моментами включения фаз выключателя, приведен на рис. 6.

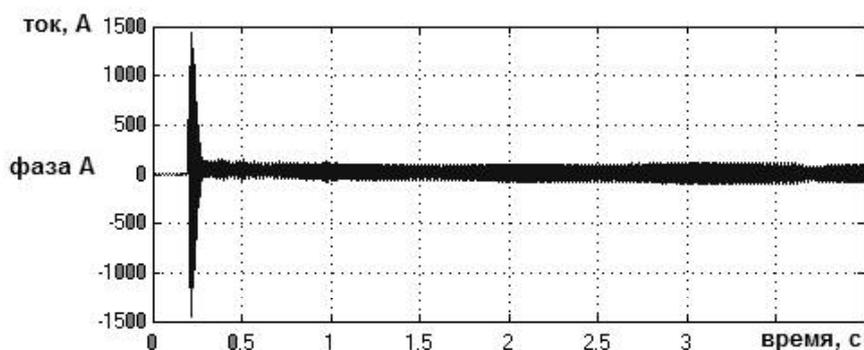


**Рис. 6. Ток, проходящий через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП2**

*Fig. 6. The current passing through the power contacts of the switch in phase «A» when the ultra-high voltage overhead line is turned on at idle from the side of the PS when the shunt reactors are put into operation at both ends of the power line2*

График тока, проходящего через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП2 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя, приведен на рис. 7. При сравнении графиков (см. рис. 6, 7) для режима одностороннего включения ЛЭП2 видно, что при наличии устройства пофазного управления включением выключателя, величина аперiodической составляющей в токе, проходящем через коммутационное устройство, практически полностью отсутствует.

Проведенное моделирование показывает, что на разомкнутом конце включаемой линии величина кратковременного перенапряжения в фазах не превысит номинальное значение на 9,5 % и возрастет до 483 кВ.



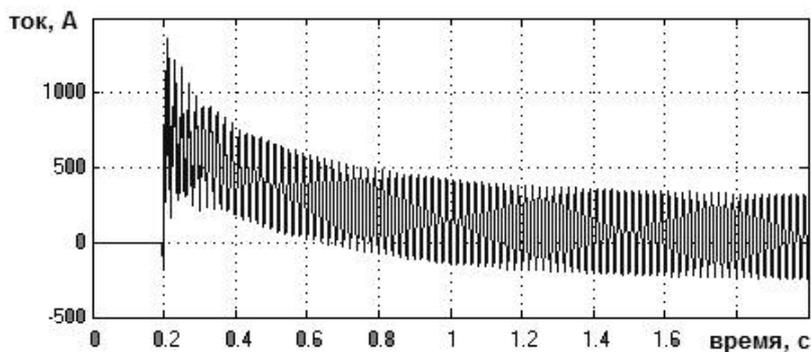
**Рис. 7. Ток, проходящий через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения со стороны ПС при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП2 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя**

*Fig. 7. The current passing through the power contacts of the switch in phase «A» when the ultra-high voltage overhead line is turned on at idle from the side of the PS when the shunt reactors are put into operation at both ends of the power line 2 and the synchronization device is installed and put into operation by the moments of switching on the phases of the switch*

### **Моделирование тупикового режима включения линии электропередачи в цикле ТАПВ**

График тока, проходящего через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения в цикле ТАПВ со стороны ПС в слу-

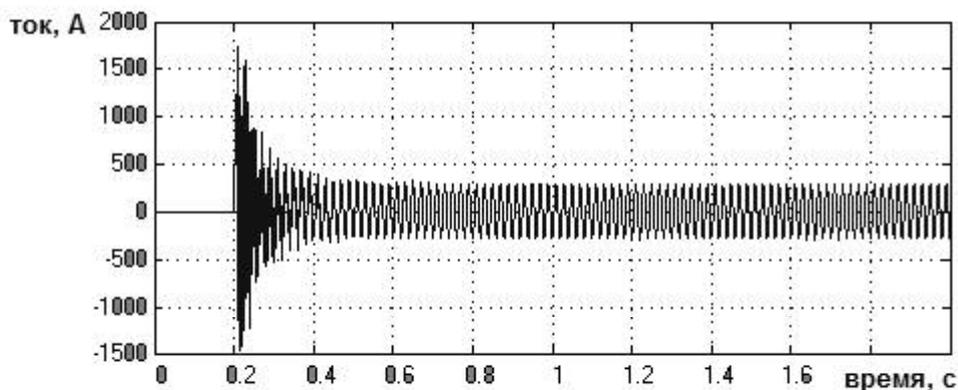
чае двухфазного короткого замыкания (КЗ) у шин атомной электростанции (АЭС) 1 при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1, приведен на рис. 8.



**Рис. 8.** Ток, проходящий через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения в цикле ТАПВ со стороны ПС в случае двухфазного КЗ на землю у шин АЭС1 при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1

*Fig. 8. The current passing through the power contacts of the switch in phase «A» when the ultra-high voltage overhead line is turned on at idle in the TARC cycle from the PS side in the case of a two-phase short circuit to the ground at the AES1 buses with shunt reactors at both ends of the power line*

График тока, проходящего через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения в цикле ТАПВ со стороны ПС в случае двухфазного КЗ у шин АЭС1 при введенных в работу шунтирующих реакторах по обоим концам ЛЭП1 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя, приведен на рис. 9. При сравнении графиков (см. рис. 8, 9) для режима одностороннего включения ЛЭП2 видно, что при наличии устройства пофазного управления включением выключателя, величина аperiodической составляющей в токе, проходящем через коммутационное устройство, практически полностью отсутствует.

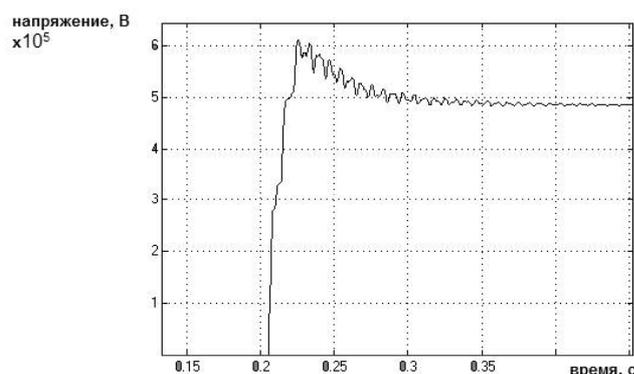


**Рис. 9.** Ток, проходящий через силовые контакты выключателя в фазе «А» при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения в цикле ТАПВ со стороны ПС в случае двухфазного КЗ на землю у шин АЭС1 с введенными в работу шунтирующими реакторами по обоим концам ЛЭП1 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя

*Fig. 9. The current passing through the power contacts of the switch in phase «A» when the ultrahigh voltage overhead line is turned on at idle in the TARC cycle from the PS side in the case of a two-phase short circuit to the ground at the AES1 buses with shunt reactors put into operation at both ends of the power line 1 and the synchronization device installed and put into operation by the switching on of the switch phases*

Проведенный расчёт показывает, что на разомкнутом конце включаемой линии величина кратковременного перенапряжения в фазах может превысить номинальное значение напряжения на 45 %.

Оценка перенапряжений в рассматриваемом случае показывает, что в конце включаемой ВЛ значения фазных напряжений кратковременно превышают номинальное на 42 % (рис. 10).



**Рис. 10. График изменения действующего фазного напряжения (фаза «А») в конце ЛЭП при включении на холостой ход ВЛ сверхвысокого напряжения в цикле ТАПВ со стороны ПС в случае двухфазного КЗ на землю у шин АЭС1 с введенными в работу шунтирующими реакторами по обоим концам ЛЭП1 и установленном и введенном в работу устройстве синхронизации моментами включения фаз выключателя**

*Fig. 10. Graph of the change in the current phase voltage (phase «A») at the end of the transmission line 1 when the ultra-high voltage overhead line is turned on at idle in the TARC cycle from the PS side in the case of a two-phase short circuit to the ground at the AES1 buses with shunt reactors put into operation at both ends of the transmission line 1 and the synchronization device installed and put into operation by the switching on of the switch phases*

### Заключение

Созданная цифровая модель одностороннего включения воздушной ЛЭП сверхвысокого напряжения, содержащей значительную апериодическую составляющую тока с использованием программного комплекса MATLAB, является имитационной математической моделью реального включения электропередачи и реализует все базовые функции, связанные с расчётом переходных процессов в ЛЭП, что позволяет выполнять исследования её работы с достаточной точностью в лабораторных условиях.

Показана возможность применения пофазного управления выключателями на ПС с замыканием силовых контактов фазы коммутационного аппарата при максимальном значении амплитуды мгновенного напряжения на этих контактах для практического исключения влияния апериодической составляющей тока во всех возможных режимах (тупиковый режим ВЛ, в цикле неуспешного АПВ при всех видах коротких замыканий на высоковольтной линии электропередачи) с введенными в работу шунтирующими реакторами и без них. При этом необходимо отметить, что возможны значительные превышения фазных напряжений на ВЛ, хотя и весьма кратковременные.

### Список источников:

1. Паспорт выключателя GL318.
2. Рабочая инструкция. Элегазовый автоматический выключатель с SF6+CF4 GL318.
3. Руководство по эксплуатации RPH2 (58.020.034 RU 2004-02-12), AREVA.
4. Исследование и анализ переходных режимов в целях повышения надежности работы элегазовых выключателей линий электропередачи сверхвысокого напряжения / А.Ю. Мурзин и др. // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2013. – С. 195-203.
5. Марикин А.Н., Агунов А.В., Морозов С.В., Пугачев А.А. Моделирование режима одностороннего включения линии электропередач 750 кВ на холостой ход // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. – № 2. – С. 12-15.

### References:

1. Passport of the GL318 Switch.
2. Working Instruction. SF6+CF4 GL318 SF6 Gas-Insulated Circuit Breaker.
3. Operation Manual RPH2 (58.020.034 RU 2004-02-12). AREVA.
4. Mursin AYu, et al. Research and Analysis of Transient Modes to Improve the Reliability of Ultra-High Voltage SF6 Circuit Breakers of Transmission Lines. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of the 17th Benardos readings: State and Prospects for Developing Electrical Technology; Ivanovo: 2013. p. 195-203.
5. Marikin A.N., Agunov A.V., Morozov S.V., Pugachev A.A. Simulation of No-Load Switch-on Mode of 750 Kv Power Line. Electronics and Electrical Equipment of Transport. 2021;2:12-15.

6. Морозов С.В. Моделирование режима включения линии сверхвысокого напряжения на холостой ход // Совершенствование энергетических машин: сборник научных трудов под ред. А.А. Обозова. – Брянск: БГТУ, 2022. – С. 208-213.

7. Морозов С.В., Морозов А.С. Влияние остаточной намагниченности сердечников трансформаторов тока на соответствие их технических характеристик требованиям микропроцессорных устройств релейной защиты // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 3-4 (13-14). – С. 77-84.

#### **Информация об авторах:**

**Морозов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент каф. ПЭиЭ Брянского государственного технического университета, ORCID: 0000-0002-2621-8783

**Андриянов Алексей Иванович** – доктор технических наук, доцент каф. ЭРЭиЭС Брянского государственного технического университета, ORCID: 0000-0002-4083-040X

6. Morozov S.V. Simulation of No-Load Switch-on Mode on the Ultra-High Voltage Line. In: Obozova A.A., editor. Proceedings: Improvement of Power Machines; Bryansk: BSTU: 2022. p. 208-213.

7. Morozov S.V., Morozov A.S. Influence of the Remnant Magnetization of the Current Transformer Cores Upon the Compliance of Their Technical Characteristics With the Requirements for Microprocessor Type Protective Relays. Automation and Modelling in Design and Management. 2021;3-4(13-14):77-84.

#### **Information about authors:**

**Morozov Sergey Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Industrial Electronics and Electrical Engineering» of Bryansk State Technical University, ORCID: 0000-0002-2621-8783

**Andriyanov Aleksey Ivanovich** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Electronics, Radioelectronic and Electrotechnical Systems Department» of Bryansk State Technical University, ORCID: 0000-0002-4083-040X

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 18.05.2022; одобрена после рецензирования 05.06.2023; принята к публикации 09.06.2023.**

**The article was submitted 18.05.2022; approved after reviewing 05.06.2023; accepted for publication 09.06.2023.**

**Рецензент – Михальченко С.Г., доктор технических наук, профессор, Томский университет систем управления и радиоэлектроники.**

**Reviewer – Mihal'chenko S.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.**

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

*Вёрстка С.В. Морозов. Редактор Д.А. Петраченко.*

Сдано в набор 15.06.2023. Выход в свет 30.06.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,63.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

---

12+