

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение
УДК 004.92 + 621.3
DOI: 10.14529/ctcr220413

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРОСОВОЙ ГРОЗОЗАЩИТЫ ДВУХЦЕПНОЙ ЛЭП КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ 110 кВ В SIMULINK

П.В. Плехов, onim@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5025-9342>
А.В. Затонский, z xenon2000@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>
И.С. Долгополов, demarsel@mail.ru

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, Березники, Россия*

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения качества грозозащиты за счет более точного расчета её параметров. В качестве средства защиты выбран защитный трос. Актуальность задачи обусловлена необходимостью повышения качества и бесперебойности энергоснабжения в современных условиях. В качестве объекта исследования выбран участок реальной сети электрических соединений напряжением 110 кВ в виде воздушных линий на опорах ПБ-100-8, к которым подключены разнородные потребители. Экспериментально установлено, что потребители оказывают друг на друга взаимное влияние. В этих условиях затруднительно применить традиционные методы расчета грозозащиты. **Цель исследования** – анализ влияния проводника грозотроса на переходные процессы реальной двухцепной воздушной линии электроснабжения. **Материалы и методы.** В пакете Simulink разработана имитационная модель взаимодействия элементов системы электроснабжения, выключателей и потребителей, воспроизводящая различные режимы работы сети: холостой ход, работу под нагрузкой, короткое замыкание. Ограничение перенапряжений в модели не учитывается в целях исследования. Недостающие данные получены из сторонних источников и с помощью программы Google Earth. Адекватность модели доказана путем сравнения результатов с экспериментальными данными, в том числе расчетами взаимного влияния потребителей. **Результаты.** Разработан сценарий моделирования, предусматривающий несколько переключений и коротких замыканий в сети. Проанализировано влияние грозозащитного троса в различных режимах работы. Путем анализа осциллограмм сети изучено взаимное влияние проводников разных цепей высоковольтной линии. Показано, что это влияние существенное, и его необходимо учитывать при расчете параметров средств грозозащиты. Оценено обратное влияние грозозащиты на электрическую сеть. **Заключение.** Разработанная модель может использоваться для широкого круга сетей 100 кВ, оснащенных средствами грозозащиты. В данном случае подтверждена эффективность выбранного защитного троса. Важным частным выводом из результатов моделирования является заключение о незначительной (менее 1 %) потере мощности в сети из-за организации тросовой грозозащиты.

Ключевые слова: электроснабжение, моделирование, грозозащита, Simulink

Для цитирования: Плехов П.В., Затонский А.В., Долгополов И.С. Компьютерное моделирование тросовой грозозащиты двухцепной ЛЭП класса напряжения 110 кВ в Simulink // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 4. С. 131–140. DOI: 10.14529/ctcr220413

COMPUTER SIMULATION OF CABLE LIGHTNING PROTECTION OF 110-kV VOLTAGE DOUBLE-CIRCUIT PTL BY SIMULINK

P.V. Plekhov, onim@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5025-9342>

A.V. Zatonskiy, z xenon2000@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

I.S. Dolgoplov, demarsel@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

Abstract. The article deals with the problem of improving the quality of lightning protection due to a more accurate calculation of its parameters. A protective cable was chosen as a means of protection. The urgency of the task is due to the need to improve the quality and uninterrupted power supply in modern conditions. As an object of study, a section of a real network of electrical connections with a voltage of 110 kV in the form of overhead lines on PB-100-8 supports, to which heterogeneous consumers are connected, was chosen. It has been experimentally established that consumers have mutual influence on each other. Under these conditions, it is difficult to apply traditional methods for calculating lightning protection. **The aim** of the study is to analyze the effect of the ground wire conductor on the transient processes of a real double-circuit overhead power supply line. **Materials and methods.** In the Simulink package, a simulation model of the interaction of the elements of the power supply system, switches and consumers has been developed, reproducing various network operation modes: idle, load, short circuit. The overvoltage limitation in the model is not taken into account for research purposes. The missing data was obtained from third-party sources and using the Google Earth program. The adequacy of the model was proved by comparing the results with experimental data, including calculations of the mutual influence of consumers. **Results.** A simulation scenario has been developed that provides for several switching and short circuits in the network. The influence of a lightning protection cable in various operating modes is analyzed. By analyzing the oscillograms of the network, the mutual influence of conductors of different circuits of a high-voltage line was studied. It is shown that this influence is significant, and it must be taken into account when calculating the parameters of lightning protection. The reverse effect of lightning protection on the electrical network is estimated. **Conclusion.** The developed model can be used for a wide range of 100 kV networks equipped with lightning protection devices. In this case, the effectiveness of the selected security cable has been confirmed. An important private conclusion from the simulation results is the conclusion about an insignificant (less than 1 %) power loss in the network due to the organization of a cable lightning protection.

Keywords: power supply, modeling, lightning protection, Simulink

For citation: Plekhov P.V., Zatonskiy A.V., Dolgoplov I.S. Computer simulation of cable lightning protection of 110-kV voltage double-circuit PTL by Simulink. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(4):131–140. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220413

Введение

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) требуют защиты от грозовых перенапряжений [1, 2]. Одним из средств защиты от таких перенапряжений является грозозащитный трос. Несмотря на широко известные недостатки такого метода [3], он широко применяется на практике. Принятие решения об использовании именно грозотроса с учетом характеристик конкретной ВЛ кроме опыта использования может основываться на результатах моделирования линии [4]. В качестве инструмента для построения подобных моделей хорошо зарекомендовали себя разные модули (тулбоксы) среды MATLAB [5, 6], в частности Simulink [7].

Целью данной работы является анализ влияния проводника грозотроса на переходные процессы реальной двухцепной ВЛ. Для этого создадим в Simulink модель и проведем имитационный эксперимент из двух этапов:

1-й этап – моделирование двухцепной ВЛ 110 кВ без грозозащиты;

2-й этап – моделирование двухцепной ВЛ 110 кВ с грозозащитой по всей длине ВЛ.

Проанализируем влияние наличия грозотроса на переходные процессы ВЛ в разных режимах работы, также обратим внимание на взаимное влияние проводников разных цепей ВЛ. В процессе работы оценим эффективности выбранной конструкции опор и грозозащиты, чтобы исследовать возможность её применения.

Рассматриваемый участок сети электрических соединений 35–110 кВ (с объектами электроэнергетики) ПО БЭС филиала ОАО «МРСК Урала» – «Пермэнерго» расположен в Пермском крае и включает в себя:

- 1) источник напряжения 110 кВ;
- 2) выключатель 110 кВ;
- 3) линию электропередачи (ЛЭП) 110 кВ;
- 4) устройство искусственного создания короткого замыкания;
- 5) выключатель 110 кВ;
- 6) трансформаторную подстанцию ПС 110/35/6 кВ.

Анализ зарубежных [8, 9] и отечественных [10, 11, 12] источников показывает, что каждый элемент схемы в энергосистеме оказывает влияние на смежные элементы энергосистемы, поэтому важно исследовать эти явления. Это поможет откорректировать работу энергосистемы, найти слабые места или даже отказаться от применения выбранного способа грозозащиты [13].

Протяженность линии ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск составляет 96 км от г. Соликамска до г. Красновишерска Пермского края. На своем протяжении ВЛ имеет 3 отпайки: ПС Губдор, ПС Озерная, ПС Гежская. Линия электропередачи является двухцепной. Это означает что на одной опоре подвешиваются сразу две цепи ВЛ 110 кВ:

- ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск I цепь;
- ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск II цепь.

Материалы и методы

На всем протяжении линии преобладают опоры типа ПБ110-8. Именно их габаритные размеры будем использовать для расчета. Двухцепная промежуточная железобетонная опора ПБ110-8 предназначена для организации ВЛ по прямому участку. Внешний вид и габаритные размеры показаны на рис. 1.

Основные технические данные провода и грозотроса приведены в табл. 1.

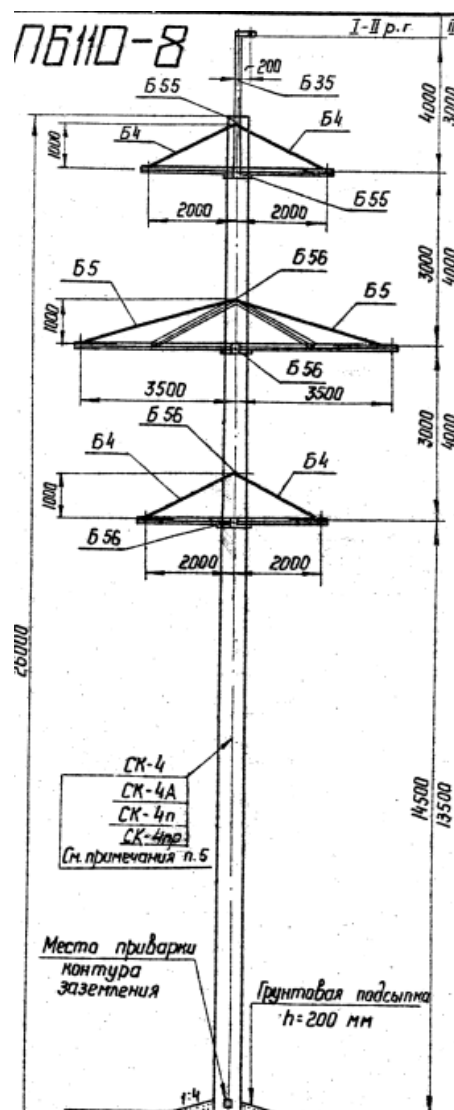


Рис. 1. ПБ110-8
Fig. 1. PБ110-8

Основные технические данные провода и грозотроса

Таблица 1

Basic technical data of the wire and lightning protection cable

Table 1

Наименование	Провод АС 150/19	Грозотрос ГТК 20- 0/90-12,1/104
Диаметр, мм	16,8	12,1
Площадь сечения алюминиевой части, мм ²	147,78	0
Площадь сечения стальной части, мм ²	18,81	86,34
Допустимый ток, А	450	–
Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току, Ом	0,2046	0,999

Из [10] следует, что T/D 0,5 задает сплошную жилу. Тогда подставим данные из табл. 1 в формулу:

$$\frac{T}{D} = \frac{147,78 \cdot 0,5}{147,78 + 18,81} = 0,44. \quad (1)$$

Согласно [14], возьмем среднее значение сопротивления заземляющего устройства порядка 15 Ом. Недостающие данные по расстояниям до мест подключения отпаек получены с помощью Google Earth (рис. 2).

При моделировании ВЛ 110 кВ учтем наличие горозотроса. Согласно схеме фазировки по опорам ВЛ 110 кВ, получим следующее расположение фаз на опоре в направлении от ПС Бумажная к ПС Красновишерск (рис. 3).

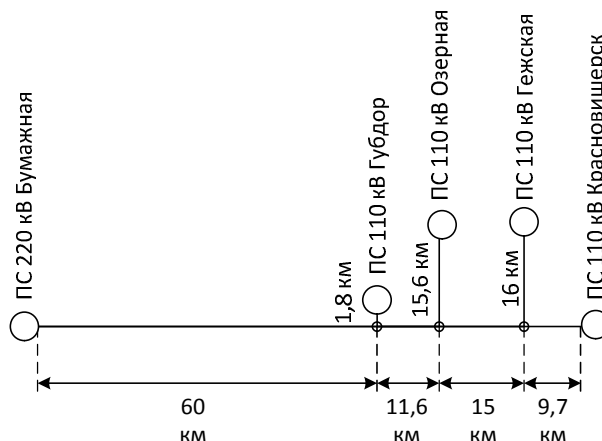


Рис. 2. Недостающие данные по расстояниям до мест подключения отпаек
Fig. 2. Missing data on the distances to the connection points

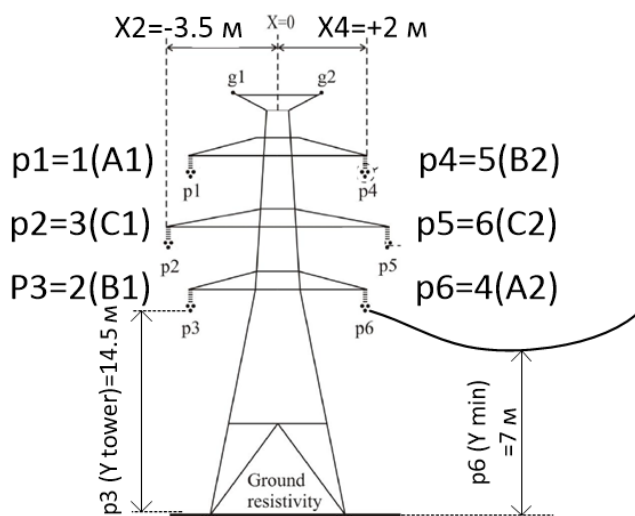


Рис. 3. Расположение фаз двух цепной ВЛ 110 кВ на опоре
Fig. 3. The arrangement of phases of a double-chain 110 kV high-voltage line on the transmission tower

Тогда вставим все полученные данные в PowerGui вкладка Compute RLC Line Parameters [15], как показано это на рис. 4.

Модель участка сети 110 кВ, показанная на рис. 5, предназначена для проведения эксперимента по сценарию моделирования, указанному в табл. 2. Модель сложная, реализует работу трансформаторов и двух цепной ВЛ с нелинейными характеристиками, при различных режимах сети: холостой ход Т1(2), работа под нагрузкой, короткое замыкание. Правая часть модели реализует работу понижающей станции 110 кВ Красновишерск, далее ПС, согласно выданной фазировке на ПС выполнен «крест» (смещение фаз), это связано с конструктивными особенностями ПС. Данная модель в исследовательских целях выполнена без ограничителей перенапряжений, далее ОПН.

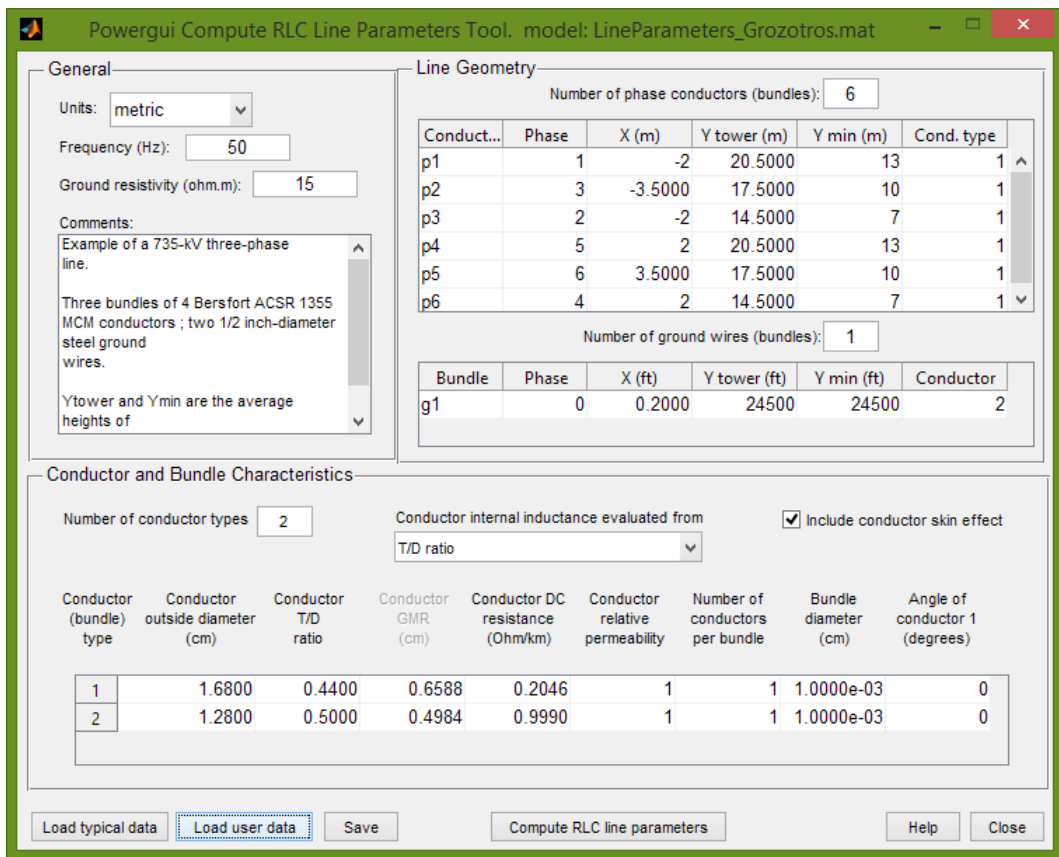


Рис. 4. Настройка виртуальной модели ВЛ 110 кВ вкладка Compute RLC Line Parameters
Fig. 4. Setting up a virtual model of a 110 kV high-voltage line tab “Computer RLC Line Parameters”

Сценарий моделирования

Таблица 2

Simulation scenario

Table 2

Время, с	Обозначение	Наименование
0,05	QW1	Включается выключатель 110 кВ. Подается напряжение на ВЛ 110 кВ Бумажная–Красновишерск 1-я цепь. Линия устанавливается под напряжение
0,3	QW2	Включается выключатель 110 кВ. Подается напряжение на ВЛ 110 кВ Бумажная–Красновишерск 2-я цепь. Линия устанавливается под напряжение
0,5	QW3	Включается выключатель 110 кВ. Включается трансформатор Т1 на холостой ход
2,2	QW4	Включается выключатель 35 кВ. Включается нагрузка № 1 по стороне среднего напряжения, трансформатор Т1 выходит на максимальный рабочий режим
2,5	QW5	Включается выключатель 110 кВ. Включается трансформатор Т2 на холостой ход
4,2	QW6	Включается выключатель 35 кВ. Включается нагрузка № 2 по стороне среднего напряжения, трансформатор Т2 выходит на максимальный рабочий режим
4,5–4,6	КЗ1	Создается однофазное короткое замыкание на землю на 86 км на фазе А ВЛ 110 кВ цепь 1
4,8–5,0	КЗ2	Создается двухфазное короткое замыкание на землю на 60 км ВЛ 110 кВ цепь 1 на фазах А и В
5,1–5,25	КЗ3	Создается двухфазное короткое замыкание на землю на 60 км ВЛ 110 кВ цепь 2 на фазах В и С

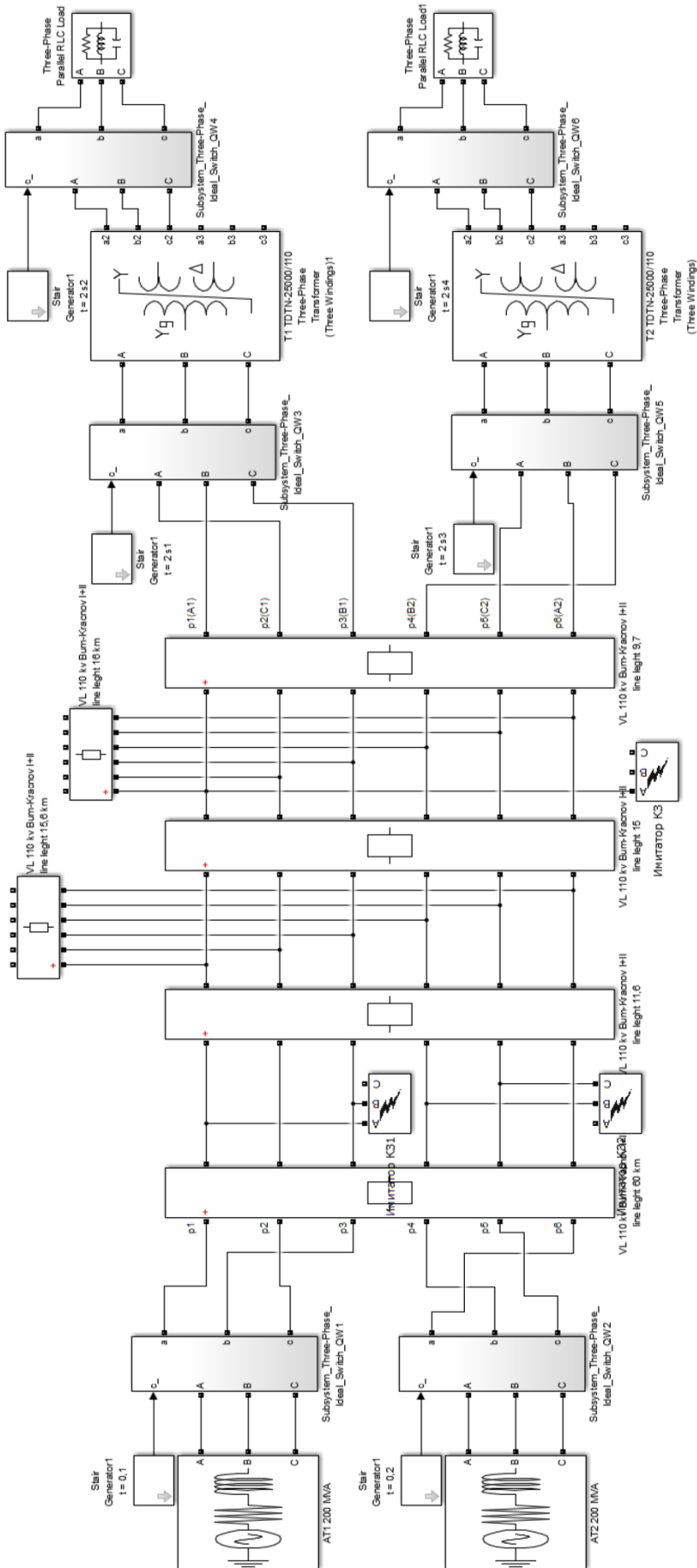


Рис. 5. Модель участка сети 110 кВ от ПС 220 кВ Бумажная до ПС 110 кВ Красновишерск
Fig. 5. 110 kV Network section model from 220 kV Bumazhnaya Substation to 110 kV Krasnovishersk Substation

Обсуждение

Сценарий моделирования приведен в табл. 2. Сценарий одинаков как для ВЛ без грозотроса, так и для ВЛ с грозотросом.

Осциллограммы токов и напряжений ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск цепь 1 и 2 показаны на рис. 6. Из осциллограмм следует, что практически любые изменения тока на ВЛ 110 кВ цепь 1 приводят к небольшому изменению напряжений и токов на ВЛ 110 кВ цепь 2.

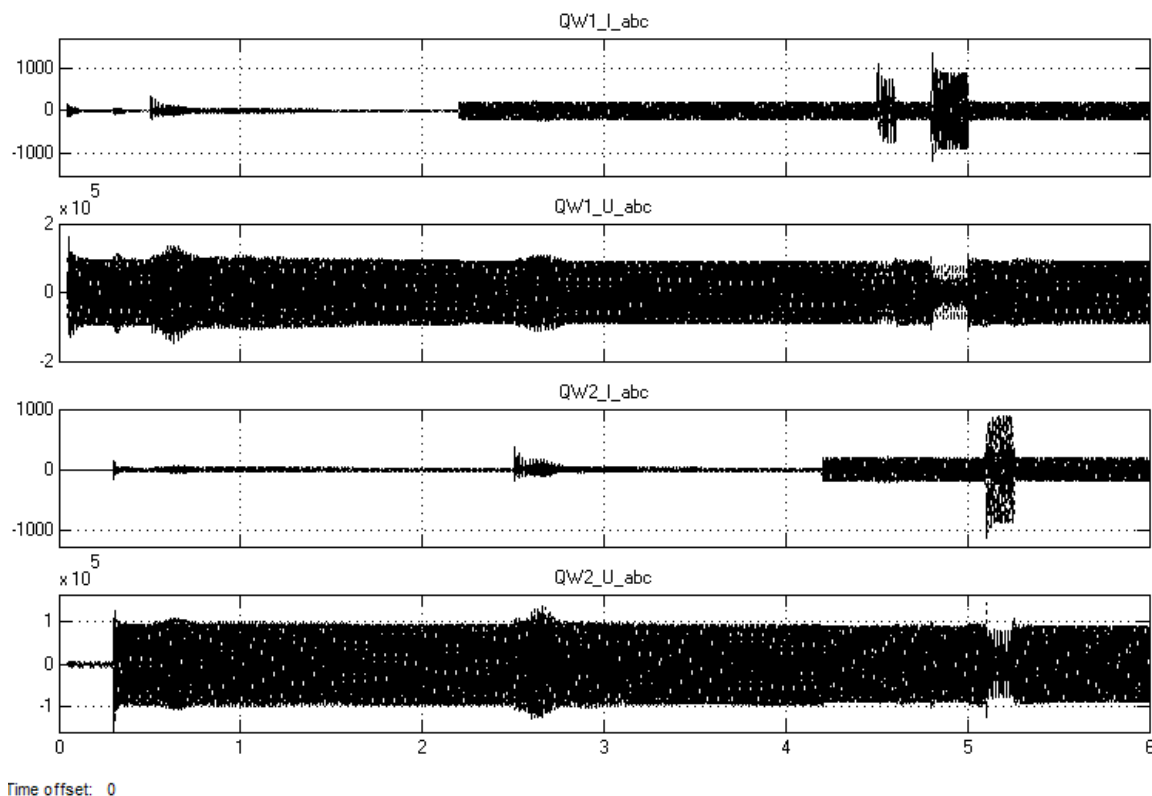


Рис. 6. Осциллограммы токов и напряжений ВЛ 110 кВ Бумажная – Красновишерск цепь 1 и 2
Fig. 6. Oscillograms of currents and voltages of the 110 kV high-voltage line
Bumazhnaya – Krasnovishersk circuit 1 and 2

Результаты

Во втором этапе эксперимента изменим настройки блока ВЛ, добавим в настройки грозотрос, как это показано на рис. 4. Сведем полученные данные в табл. 3.

Данные двух этапов эксперимента

Таблица 3

Data from two stages of the experiment

Table 3

Наименование	Ток, А		Отклонение, %
	Модель без грозотроса	Модель с грозотросом на 100 % длины	
ВЛ цепь 1 без нагрузки	35,9	36,1	0,557
Бросок тока намагничивания T1	390	393	0,769
ВЛ цепь 1 с нагрузкой	195,6	196,5	0,460
ВЛ цепь 1 при КЗ	1353	1353,5	0,037
ВЛ цепь 2 без нагрузки	36,2	36,4	0,552
Бросок тока намагничивания T2	393,8	394,2	0,102
ВЛ цепь 2 с нагрузкой	191,8	192,4	0,313
ВЛ цепь 2 при КЗ	1200,4	1201,4	0,083

Заключение

Анализ изменения токов и напряжений осциллограммы на рис. 6, полученных в процессе моделирования (см. табл. 2), доказал, что любые изменения на одной цепи ВЛ влияют на характеристики второй цепи двухцепной ВЛ.

Результаты проведения двухэтапного эксперимента по конструкции ВЛ с грозотросом и без него, как показано в табл. 3, доказывают то, что наличие грозотроса оказывает минимальное влияние на параметры ВЛ, например, по току в разных режимах работы влияние менее 1 %. Следовательно, потери мощности, возникающие в процессе наведения ЭДС в грозотросе, невелики.

Полученные данные доказывают эффективность выбранной конструкции опор ПБ110-8 и применение на ней грозозащиты в данной конкретной конфигурации ВЛ.

Список литературы

1. Килин С.В., Яковлев А.О. Способы защиты оборудования от грозовых перенапряжений // Материалы XXIII Международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее». 2019. С. 110–111.
2. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4 (33). С. 35–40. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
3. Гиясова С.А. Исследование факторов, влияющих на решение об отказе от тросовой защиты на ВЛ 110–500 кВ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл., Москва, 15–16 марта 2018 года. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2018. С. 1111.
4. Çakıl T., Carlak H.F., Özen Ş. Modeling of power network system of the high voltage substation: a simulation study // International Journal of Engineering & Applied Sciences. 2015. Vol. 7, iss. 3. P. 39–57. DOI: 10.24107/IJEAS.251253
5. Затонский А.В. Моделирование технологического участка обогащательной фабрики в пакете MATLAB // Обогащение руд. 2014. № 4 (352). С. 49–54.
6. Zatonkiy A., Bazhenov R., Beknazarova S. Advantages of freeware-based simulation tools for technical and technological modeling // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. P. 786–790. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446186
7. Бильфельд Н.В., Володина Ю.И. Моделирование электрических систем и систем управления в современных пакетах MATLAB // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 1. С. 27–38. DOI: 10.14529/ctcr200103
8. Tarko R., Gajdzica J., Nowak W., Szyra W. Comparative Analysis of High-Voltage Power Line Models for Determining Short-Circuit Currents in Towers Earthing Systems // Energies. 2021, Vol. 14. P. 4729. DOI: 10.3390/en14164729
9. Fahmani L., Garfaf J., Boukhdar K., Benhadou S., Medromi H. Modelling of very high voltage transmission lines inspection's quadrotor // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. P. 1425. DOI: 10.1007/s42452-020-03222-y
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2012. 215 с.
12. Анохин Б.А. Анализ расположения фаз двухцепной линии на основе уравнений в фазных координатах // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Новосибирск, 2020. С.11–12.
13. Затонский А.В., Уфимцева В.Н. Разработка объектных средств имитационного и много-агентного моделирования производственных процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 4. С. 56–62. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62
14. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ // Правила устройства электроустановок. Новосибирск: Нормативка, 2020. 462 с.
15. A Modelling of High Voltage Transmission Line by Using MATLAB Simulation / A. Ansari, S. Mishra, H.H. Ansari, P.A. Kulkarni // International Journal of Engineering Research & Technology. 2018. Vol. 7, iss. 02. P. 129–133. DOI: 10.17577/ijertv7is020046

References

1. Kilin S.V., Yakovlev A.O. [Ways to protect equipment from lightning overvoltages]. *Materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-proizvodstvennoy konferentsii "Innovatsionnyye resheniya v agrarnoy nauke – vzglyad v budushcheye"*; 2019. P. 110–111. (In Russ.)
2. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. [Specified Per-unit Parameters of Double-circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* 2016;4(33):35–40. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
3. Giyasova S.A. [Study of factors influencing the decision to abandon cable protection on 110–500 kV overhead lines]. In: *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika*. Moscow: RADUGA Publ.; 2018. P. 1111. (In Russ.)
4. Çakil T., Carlak H.F., Özen Ş. Modeling of power network system of the high voltage substation: a simulation study. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*. 2015;7(3):39–57. DOI: 10.24107/IJEAS.251253
5. Zatonskiy A.V. Concentrating plant processing section modeling in MATLAB package. *Obogashcheniye rud*. 2014;4(352):49–54. (In Russ.)
6. Zatonskiy A., Bazhenov R., Beknazarova S. Advantages of freeware-based simulation tools for technical and technological modeling. In: *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*; 2021. P. 786–790. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446186
7. Bilfeld N.V., Volodina Yu.I. Modeling of Electrical Systems and Control Systems by Modern MATLAB Packages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(1):27–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200103
8. Tarko R., Gajdzica J., Nowak W., Szpyra W. Comparative Analysis of High-Voltage Power Line Models for Determining Short-Circuit Currents in Towers Earthing Systems. *Energies*. 2021;14:4729. DOI: 10.3390/en14164729
9. Fahmani L., Garfaf J., Boukhdar K., Benhadou S., Medromi H. Modelling of very high voltage transmission lines inspection's quadrotor. *SN Applied Sciences*. 2020;2:1425. DOI: 10.1007/s42452-020-03222-y
10. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; St. Petersburg: Piter; 2008. 288 p. (In Russ.)
11. Kostyuchenko L.P. *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem elektrosnabzheniya v programme MATLAB* [Simulation modeling of power supply systems in the MATLAB program]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2012. 215 p. (In Russ.)
12. Anokhin B.A. [Analysis of the Location of the Phase Double Circuit Lines Based on Equations in Phase Coordinates]. In: *XVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Sovremennyye tekhnika i tekhnologii"*. Novosibirsk; 2020. P. 11–12. (In Russ.)
13. Zatonskiy A.V., Ufimtceva V.N. Design of object oriented software to multi-agent modeling of enterprise processes. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2018;4:56–62. (In Russ.)
14. *Glava 2.5. Vozdushnyye linii elektroperedachi napryazheniyem vyshe 1 kV* [Chapter 2.5. Overhead power lines with voltage above 1 kV]. In: *Pravila ustroystva elektroustanovok* [Rules for the installation of electrical installations]. Novosibirsk: Normativka; 2020. 462 p. (In Russ.)
15. Ansari A., Mishra S., Ansari H.H., Kulkarni P.A. A Modelling of High Voltage Transmission Line by Using MATLAB Simulation. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2018;7(02):129–133. DOI: 10.17577/ijertv7is020046

Информация об авторах

Плехов Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; onim@gambler.ru.

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; zhenon@narod.ru.

Долгополов Игорь Сергеевич, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; demarsel@mail.ru.

Information about the authors

Pavel V. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; onim@rambler.ru.

Andrey V. Zatonkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; zxenon@narod.ru.

Igor S. Dolgopolov, Master's Student of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; demarsel@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

The article was submitted 20.06.2022