

Моделирование нормальных и аварийных режимов высоковольтных ЛЭП с установками продольной компенсации

© А.В. Крюков^{1,2}, М.А. Садохина¹

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения,

г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты исследований, направленных на создание мультифазных моделей электроэнергетических систем, имеющих в своем составе дальние электропередачи, оснащенные установками продольной компенсации. В основу этих моделей положены методы моделирования электрических сетей, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения и базирующиеся на использовании фазных координат, а также на формировании решетчатых схем замещения, имеющих полностью связную структуру. Расчеты выполнялись на основе программного комплекса Fazonord применительно к схеме дальней линии электропередачи 500 кВ протяженностью 900 км, выполненной проводами АС-300. Предполагалось, что линия оснащена следующими устройствами управления: установкой продольной компенсации, шунтирующими реакторами и управляемым источником реактивной мощности, размещенным на приемном конце ЛЭП. При моделировании учитывалась распределенность параметров дальней электропередачи. Наряду с нормальными режимами рассматривались режимы несимметричного короткого замыкания. Результаты моделирования проиллюстрированы графиками зависимостей токов и напряжений от расстояния до отправного конца ЛЭП. Также представлены диаграммы, показывающие распределение токов по проводам расщепленных фаз ЛЭП. Полученные результаты позволили сформулировать следующее заключение: разработанные модели могут применяться при проектировании и эксплуатации высоковольтных электрических сетей, имеющих в своем составе установки продольной компенсации, шунтирующие реакторы и управляемые источники реактивной мощности, обеспечивающие стабилизацию уровней напряжения в точках их подключения.

Ключевые слова: установки продольной компенсации, дальние линии электропередачи, несимметричные короткие замыкания, фазные координаты, моделирование

Modelling of Normal and Emergency Modes of High-Voltage Transmission Lines with Longitudinal Compensation Installations

© Andrey V. Kryukov^{1,2}, Maria A. Sadokhina¹

¹ Irkutsk National Research Technical University,

Irkutsk, Russian Federation

² Irkutsk State Transport University,

Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of research aimed at creating multiphase models of electric power systems that include long-distance power transmissions equipped with longitudinal compensation installations. These models are based on the methods of modelling electrical networks, developed at Irkutsk State Transport University and based on the use of phase coordinates, as well as on the formation of lattice equivalent circuits with a fully-connected structure. The calculations were carried out on the basis of the Fazonord software package for the scheme of a 500 kV long-distance power transmission line with a length of 900 km, made with AS-300 wires. The line was supposed to be equipped with the following control devices: a longitudinal compensation unit, shunt reactors, and a controlled reactive power source located at the receiving end of the transmission line. The simulation took into account the distribution of long-distance power transmission parameters. In addition to normal modes, asymmetrical short circuit modes were considered. The simulation results are illustrated by the graphs of the dependences of currents and voltages on the distance to the starting end of the transmission line. The article also presents diagrams showing the distribution of currents along the wires of the split phases of power lines. The results provide the following conclusion: the developed models can be used in the design and operation of high-voltage electrical networks, which include longitudinal compensation installations, shunt reactors and controlled reactive power sources that stabilize voltage levels at their point of contact.

Keywords: longitudinal compensation installations, long-distance transmission lines, asymmetrical short circuits, phase coordinates, simulation

Введение. Для улучшения режимов дальних электропередач (ДЛЭП) высокого и сверхвысокого напряжения применяются установки продольной компенсации (УПК) [1–9], которые позволяют управлять режимными параметрами путем компенсации индуктивного сопротивления линии. Для эффективного использования таких установок в условиях перехода электроэнергетики к интеллектуальным сетям smart grid [10] требуются цифровые модели, обеспечивающие комплексное моделирование нормальных и аварийных режимов, а также корректный учет регулирующих устройств.

Такие модели могут быть реализованы на основе методов и средств определения режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), разработанных в ИрГУПСе [11, 12]. В основу этих методов положены полносвязные решетчатые схемы замещения, обеспечивающие моделирование режимов в фазных координатах. Для учета распределенности параметров ДЛЭП используются цепочечные схемы.

Ниже представлены результаты моделирования нормальных и аварийных режимов ДЛЭП 500 кВ протяженностью 900 км.

Методика моделирования. Расчеты режимов ДЛЭП с УПК осуществлялись на основе методов моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах, разработанных в ИрГУПСе [11, 12]. На основе этих методов реализованы компьютерные технологии, отличительные особенности которых состоят в следующем:

1) мультифазность, то есть возможность моделирования однофазных, трехфазных, четырехфазных, шестифазных и т. д. систем;

2) мультирежимность, заключающаяся в моделировании широкого спектра режимов

ЭЭС: нормальных, аварийных, несимметричных, несинусоидальных, предельных по статической апериодической устойчивости;

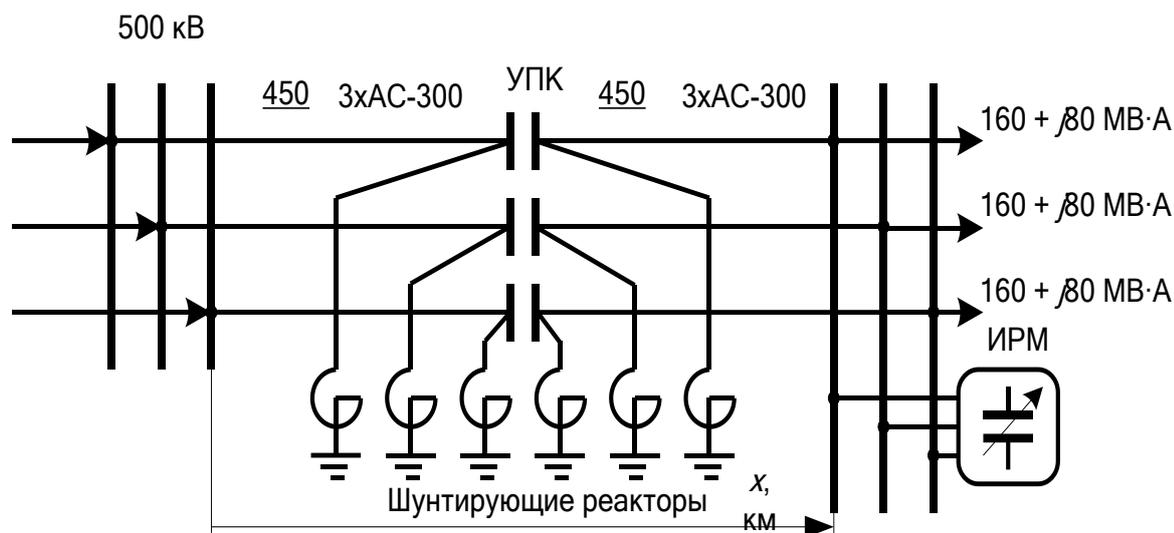
3) мультизадачность, состоящая в возможности решения целого ряда дополнительных задач, таких как определение наведенных напряжений на смежных линии электропередачи и связи, а также протяженных металлических конструкциях; расчет напряженностей электромагнитного поля, создаваемого ЛЭП [12]; параметрическая идентификация ЛЭП и трансформаторов; учет активных элементов smart grid при моделировании ЭЭС; корректное моделирование токопроводов с массивными шинами.

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось на основе программного комплекса Fazonord применительно к схеме дальней электропередачи 500 кВ протяженностью 900 км, выполненной проводами АС-300. На рис. 1 приведены координаты проводов и грозозащитных тросов в поперечном сечении ЛЭП. Схема моделируемой сети и фрагмент ее расчетной модели показаны на рис. 2. Предполагалось, что линия оснащена следующими устройствами управления: установкой продольной компенсации, шунтирующими реакторами (ШР) и управляемым источником реактивной мощности (ИРМ), размещенным на приемном конце ЛЭП. Этот источник обеспечивал стабилизацию фазных напряжений ЛЭП на уровне 290 кВ.

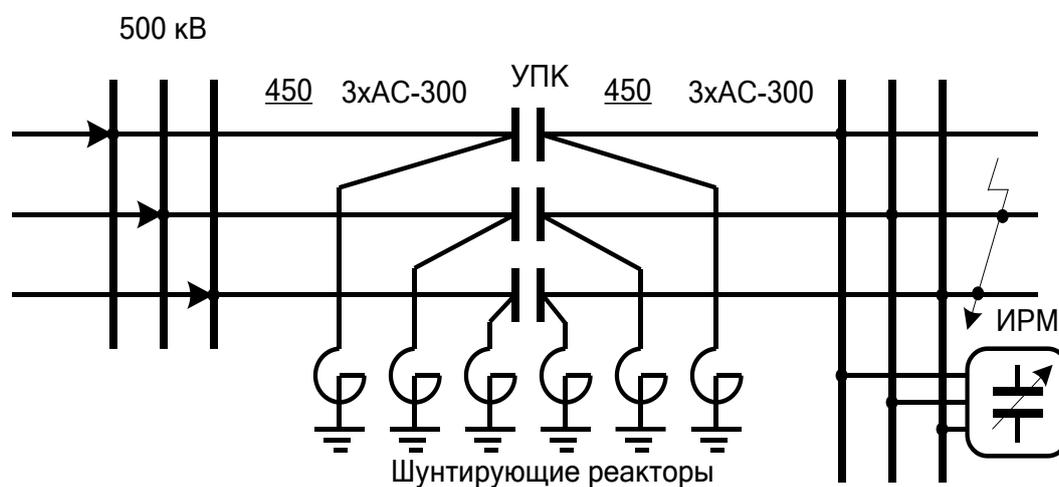
УПК характеризовалось емкостным сопротивлением 150 Ом, а ШР – индуктивной проводимостью 0,0012 См. При моделировании линия электропередачи была разбита на шесть участков протяженностью 150 км. Рассматривались различные ситуации, отличающиеся составом включенных устройств управления.



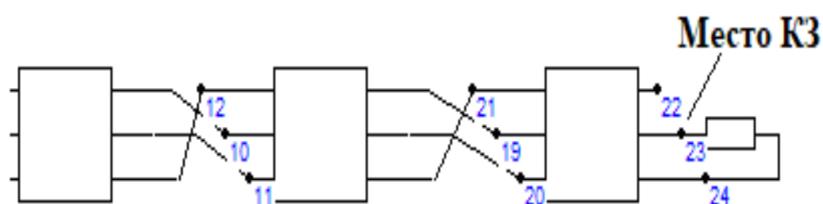
Рис. 1. Координаты проводов и грозозащитных тросов



а)



б)



в)

Рис. 2. Схема сети и ее расчетная модель:

а, б – исходные схемы; а – нормальный режим; б – двухфазное короткое замыкание (КЗ);
в – фрагмент схемы расчетной модели для двухфазного КЗ

Анализировались следующие режимные ситуации:

- 1) УПК включена, ШР и ИРМ отключены;
- 2) ИРМ включен, УПК и ШР отключены;
- 3) УПК включена, ИРМ и ШР отключены;
- 4) УПК, ИРМ и ШР включены.

Результаты моделирования нормальных и аварийных режимов сети представлены в табл. 1, 2 и на рис. 3–7.

В табл. 1 приведены результаты расчета фазных напряжений для условий нормального режима при нагрузках на приемном конце $160 + j80$ МВ·А на фазу. В табл. 2 све-

дены токи для режима двухфазного КЗ на шинах 500 кВ приемной подстанции (ПС). Для иллюстрации полученных результатов были построены зависимости напряжений и

токов нормального режима от пространственной координаты x (рис. 2а), отвечающей расстоянию точки наблюдения от питающей ПС (рис. 3).

Таблица 1. Фазные напряжения в узловых точках сети. Нормальный режим

| Режимная ситуация | Фаза | X, км | | | | | | | |
|----------------------------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 | 150 | 300 | 450 | 450 | 600 | 750 | 900 |
| УПК, ШР и ИРМ отключены | A | 290 | 321,92 | 347,64 | 370,56 | 370,55 | 385,01 | 386,43 | 380,49 |
| | B | 290 | 312,87 | 334,88 | 345,51 | 345,51 | 348,75 | 345,52 | 336,25 |
| | C | 290 | 320,05 | 339,16 | 351,94 | 351,94 | 357,67 | 358,31 | 347,26 |
| ИРМ включен, УПК и ШР отключены | A | 290 | 302,50 | 310,70 | 316,27 | 316,27 | 315,66 | 304,43 | 290,00 |
| | B | 290 | 303,84 | 316,12 | 317,58 | 317,57 | 312,62 | 303,74 | 290,00 |
| | C | 290 | 308,50 | 316,47 | 319,55 | 319,54 | 316,29 | 308,32 | 290,00 |
| УПК включена, ИРМ и ШР отключены | A | 290 | 314,69 | 333,60 | 349,87 | 316,54 | 320,55 | 313,73 | 302,81 |
| | B | 290 | 311,34 | 332,02 | 341,46 | 314,08 | 311,02 | 303,92 | 292,40 |
| | C | 290 | 320,89 | 340,74 | 354,07 | 320,11 | 321,75 | 319,05 | 305,51 |
| УПК, ИРМ и ШР включены | A | 290 | 293,68 | 294,08 | 291,78 | 265,94 | 281,39 | 287,41 | 290,00 |
| | B | 290 | 295,16 | 298,19 | 291,18 | 267,18 | 277,23 | 284,38 | 290,00 |
| | C | 290 | 298,75 | 297,30 | 292,53 | 269,11 | 279,85 | 289,89 | 290,00 |

Таблица 2. Токи двухфазного КЗ

| Режимная ситуация | Фаза | X, км | | | | | | | |
|----------------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0 | 150 | 300 | 450 | 450 | 600 | 750 | 900 |
| УПК, ШР и ИРМ отключены | A | 1068 | 1098 | 1111 | 1105 | 1105 | 1092 | 1088 | 1065 |
| | B | 840 | 879 | 931 | 963 | 963 | 997 | 1037 | 1065 |
| | C | 1479 | 1299 | 1088 | 830 | 830 | 551 | 279 | 0 |
| ИРМ включен, УПК и ШР отключены | A | 1425 | 1541 | 1619 | 1637 | 1637 | 1612 | 1553 | 1452 |
| | B | 218 | 137 | 204 | 354 | 354 | 508 | 654 | 777 |
| | C | 347 | 215 | 191 | 297 | 297 | 456 | 614 | 764 |
| УПК включена, ИРМ и ШР отключены | A | 1973 | 2035 | 2045 | 2005 | 2005 | 2082 | 2130 | 2123 |
| | B | 1582 | 1706 | 1788 | 1826 | 1826 | 1966 | 2072 | 2123 |
| | C | 1223 | 1047 | 844 | 603 | 603 | 401 | 202 | 0 |
| УПК, ИРМ и ШР включены | A | 2985 | 3071 | 3073 | 2985 | 3039 | 3117 | 3121 | 3040 |
| | B | 1172 | 1332 | 1452 | 1552 | 911 | 1096 | 1266 | 1403 |
| | C | 578 | 680 | 798 | 912 | 336 | 484 | 631 | 776 |

На рис. 4 приведены аналогичные зависимости для токов двухфазного КЗ. На рис. 5а показаны сводные зависимости $U = U(x)$ для нормального режима работы ДЛЭП, а на рис. 5б – кривые $I = I(x)$ для режима двухфазного КЗ на приемном конце ДЛЭП. На рис. 6 приведены графики, характеризующие распределение токов по фазам

в режиме КЗ на участках ЛЭП, примыкающих к УПК. Эти графики построены для ситуации, отвечающей включенным УПК, реакторам и ИРМ. На рис. 7 представлены лепестковые диаграммы распределения токов по проводам расщепленных фаз в режиме КЗ.

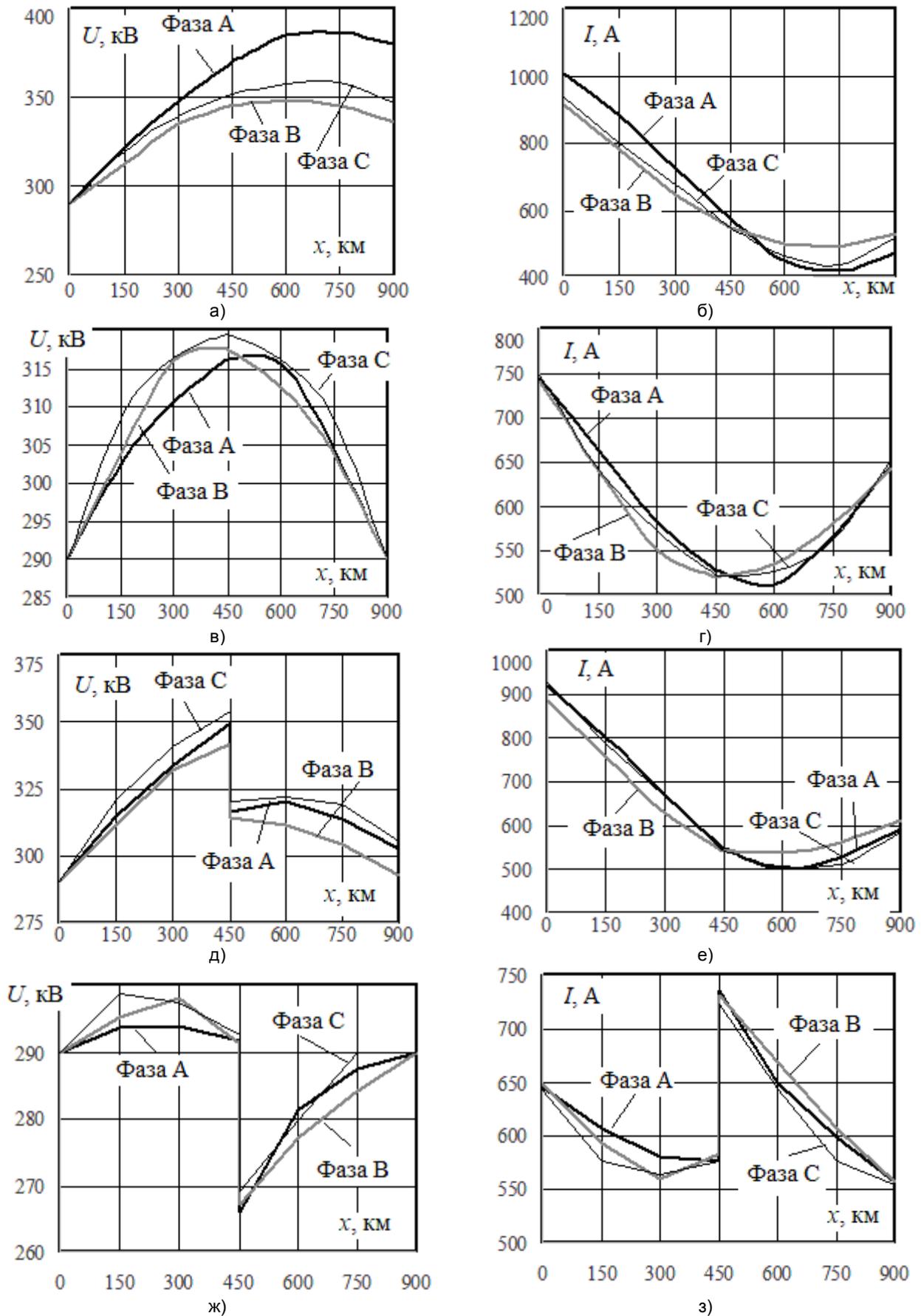
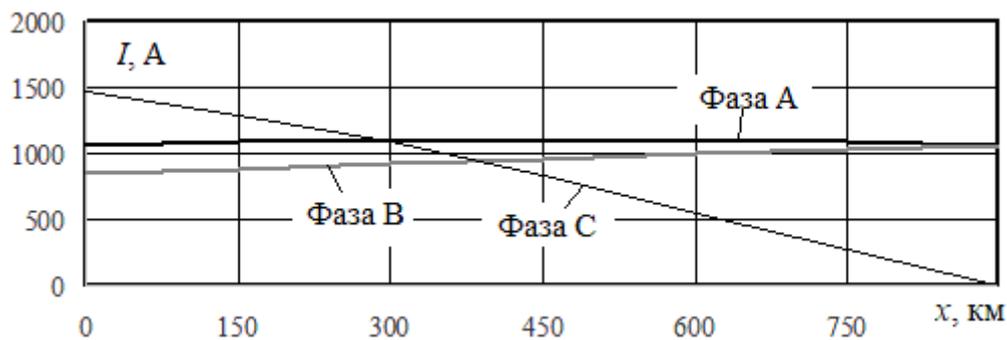
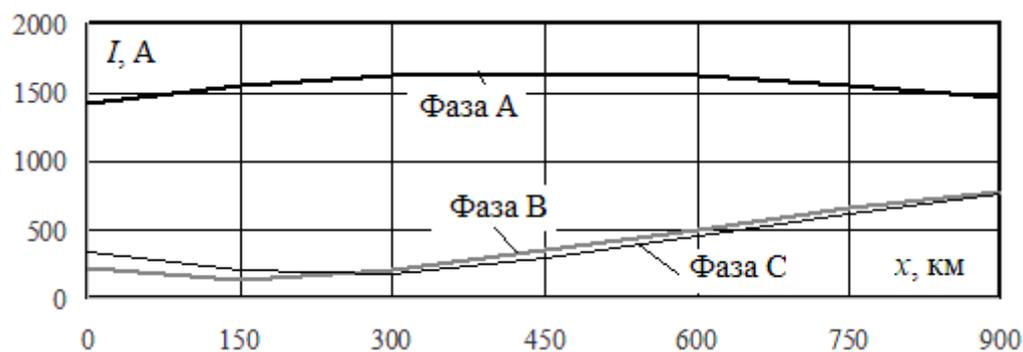


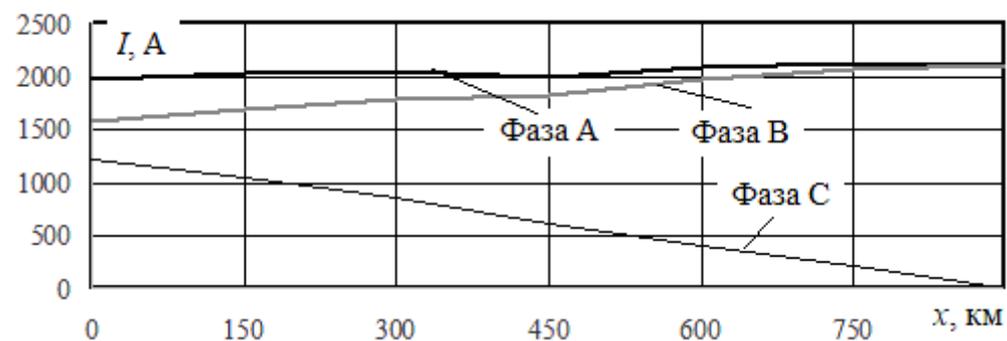
Рис. 3. Зависимости напряжений (а, в, д, ж) и токов (б, г, е, з) в нормальном режиме от координаты x :
 а, б – УПК, ШР и ИРМ отключены; в, г – ИРМ включен, УПК и ШР отключены;
 д, е – УПК включена, ИРМ и ШР отключены; ж, з – УПК, ИРМ и ШР включены



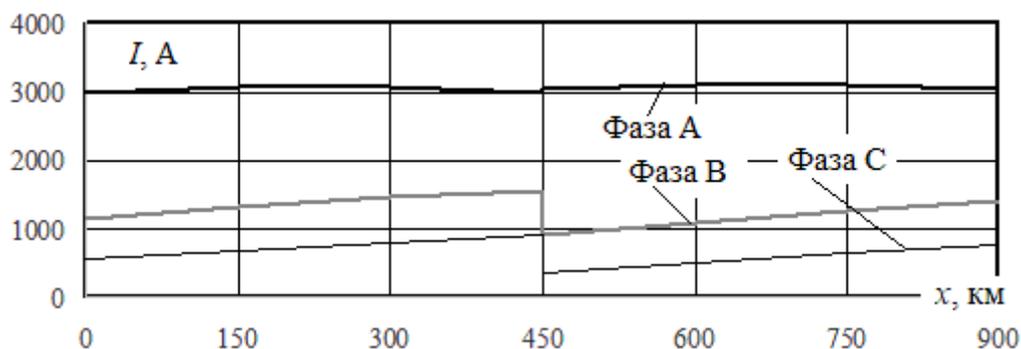
а)



б)

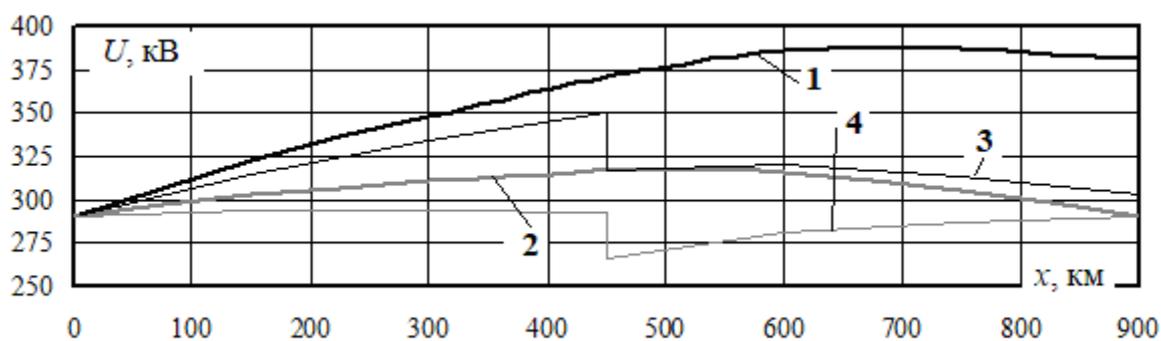


в)

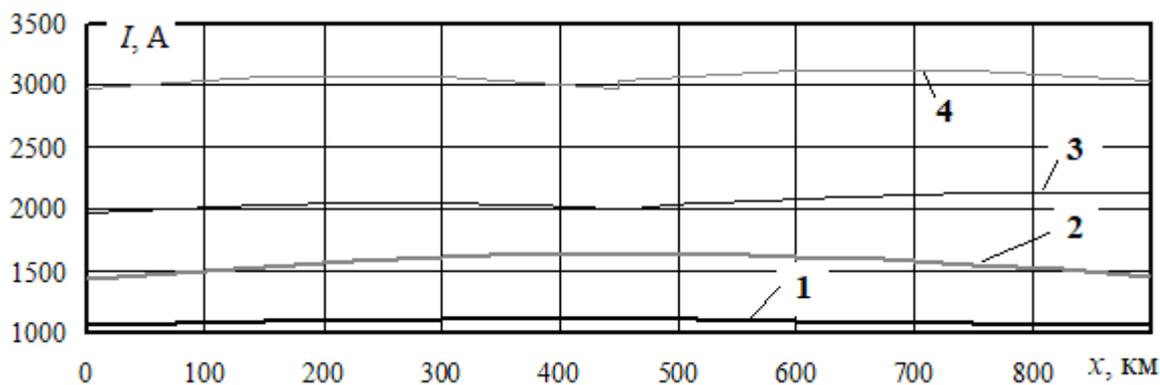


г)

Рис. 4. Зависимости токов в режиме КЗ от координаты x :
 а – УПК, ШР и ИРМ отключены; б – ИРМ включен, УПК и ШР отключены;
 в – УПК включена, ИРМ и ШР отключены; г – УПК, ИРМ и ШР включены

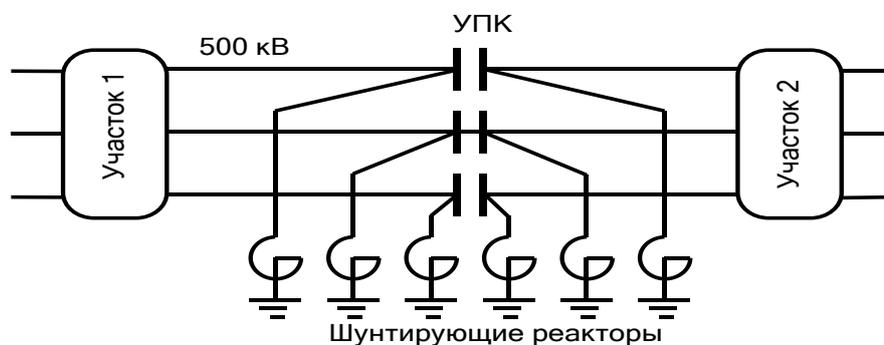


а)

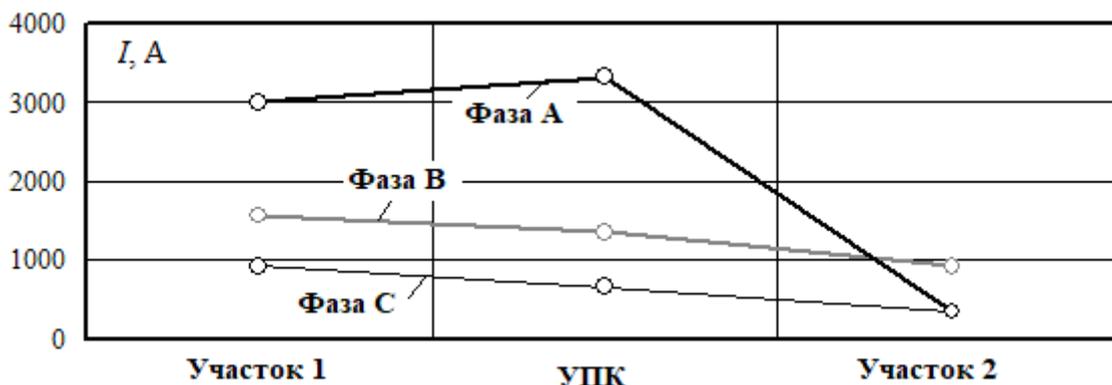


б)

Рис. 5. Зависимости напряжений (а) и токов (б) от координаты x :
 а) – нормальный режим; б) – режим двухфазного КЗ; 1 – УПК, ШР и ИРМ отключены;
 2 – ИРМ включен, УПК и ШР отключены; 3 – УПК включена, ИРМ и ШР отключены;
 4 – УПК, ИРМ и ШР включены



а)



б)

Рис. 6. Распределение токов по фазам в режиме КЗ на участках ЛЭП, примыкающих к УПК, при включенных УПК, реакторах и ИРМ: а – поясняющая схема; б – график распределения токов

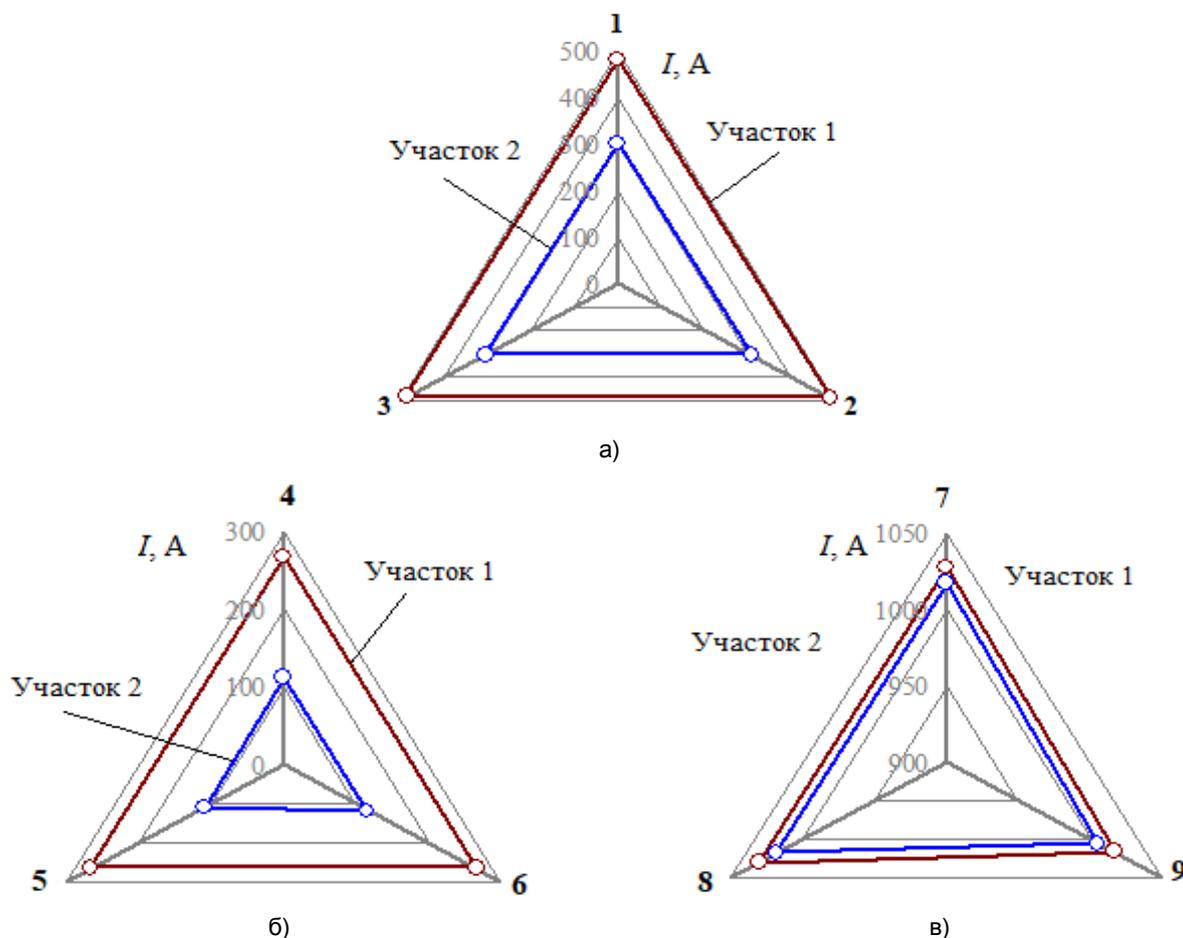


Рис. 7. Распределение токов по проводам расщепленных фаз в режиме КЗ на участках ЛЭП, примыкающих к УПК, при включенных УПК, реакторах и ИРМ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. при отсутствии УПК, ИРМ и ШР наблюдается значительное повышение напряжений на участках ЛЭП за счет емкостных мощностей, генерируемых линией. На приемном конце напряжение относительно земли для фазы С увеличивается на 57 кВ и достигает 347 кВ (табл. 1, рис. 3а, 5а). Включение ИРМ обеспечивает стабилизацию фазных напряжений на приемном конце на уровне 290 кВ, что соответствует линейному напряжению 502 кВ (табл. 1, рис. 3в, 3ж, 5а);

2. при второй ситуации (ИРМ включен, УПК и ШР отключены) для условий нормального режима наблюдается повышение фазных напряжений в середине ЛЭП до 320 кВ, что отвечает линейному напряжению 554 кВ (табл. 1, рис. 3в);

3. зависимость $U = U(x)$ для третьей режимной ситуации, когда УПК включена, ИРМ и ШР отключены (рис. 3д, 5а, табл. 1), имеет разрыв первого рода в точке с координатой

$x = 450$ км, отвечающей месту установки УПК;

4. при наличии всего комплекса устройств управления уровни напряжений в узловых точках сети находятся в допустимых пределах (табл. 1, рис. 3ж, 5а);

5. за счет включения УПК результирующее индуктивное сопротивление передачи резко снижается, что приводит к увеличению токов двухфазного КЗ. Различия токов в ситуациях 1 и 3 достигают почти двукратного значения, а для ситуаций 1 и 4 – трехкратного (табл. 2, рис. 4 и 5б);

6. распределение токов по фазам при несимметричном КЗ отличается заметной неравномерностью (рис. 6);

7. ввиду большого расстояния между осями фаз ЛЭП взаимные электромагнитные влияния проводов отдельных фаз проявляются незначительно (рис. 7).

Таким образом, предлагаемые цифровые модели ЭЭС с дальними ЛЭП, оснащенными УПК, ШР и ИРМ, могут дать проектировщикам и эксплуатационникам полную картину про-

цессов при различных режимах и составах включенных устройств управления.

Заключение. Предложена методика моделирования нормальных и аварийных режимов ЭЭС, имеющих в своем составе дальние электропередачи высокого и сверхвысокого напряжений, оснащенные установками продольной компенсации. Методика позволяет корректно учитывать распреде-

ленность параметров, а также наличие других устройств управления, таких как шунтирующие реакторы и регулируемые источники реактивной мощности. Разработанные цифровые модели могут применяться для решения практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией дальних электропередач переменного тока.

Библиографический список

1. Анисимова Н.Д., Веников В.А., Ежов В.В. Примеры анализа и расчетов режимов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление. М.: Высшая школа, 1967. 297 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.studmed.ru/anisimova-nd-venikov-va-ezhkov-vv-zhukov-la-i-dr-primery-analiza-i-raschetov-rezhimov-elektroperedach-imeyuschih-avtomaticheskoe-regulirovanie-i-upravlenie_f909b661188.html (16.10.2020).

2. Кормилицын Д.Н., Москвин И.А. Управляемые электропередачи с регулируемой продольной компенсацией в электроэнергетической системе // Энергоэлектрика глазами молодежи: труды VI Междунар. науч.-тех. конф. (г. Иваново, 9–13 ноября 2015 г.). Иваново, 2015. С. 558–561.

3. Мартиросян А.А., Зотова М.В., Кормилицын Д.Н. Выбор места установки и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации для повышения устойчивости электроэнергетической системы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 30–36.

4. Очкасов А.В. Управляемые устройства продольной компенсации // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов (г. Омск, 12 мая 2016 г.). Омск, 2016. С. 141–146.

5. Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В. О применении устройств продольной емкостной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. 2016. № 6 (29). С. 26–43.

6. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Использование

управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей // Электротехника. 2017. № 2. С. 60–66.

7. Фокин В.К. Выбор типа, систем управления и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации // Энергия единой сети. 2017. № 4 (33). С. 28–39.

8. Смирнова А.Г. Исследование апериодической статической устойчивости электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Междунар. науч.-тех. конф. (г. Самара, 2–6 октября 2017 г.). Самара, 2017. С. 231–232.

9. Люлина М.А., Першиков Г.А., Смирнов А.А., Беляев А.Н., Смоловик С.В. Аналитическое исследование режимов работы протяженных линий электропередачи с устройствами продольной емкостной компенсации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 60–74.

10. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Berlin: Springer Vieweg, 2014. 396 p.

11. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложносимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИРГУПС, 2005. 273 с.

12. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: АНГТУ, 2018. 382 с.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Крюков Андрей Васильевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры электроснабжения и электротехники,
Институт энергетики,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет пу-

Andrey V. Kryukov,
Dr. Sci. (Technics),
Professor of Power Supply and Electrical Engineering Department,
Institute of Energy,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation;
Professor of Electric Power Engineering of Transport Department,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky Str., Irkutsk, 664074, Russian

тей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15,
Российская Федерация,
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Садохина Мария Алексеевна,
аспирант группы аЭСК-20-1,
Институт энергетики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Рос-
сийская Федерация,
e-mail: mariasadokhina@gmail.ru

Federation,
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Maria A. Sadokhina,
Postgraduate Student,
Institute of Energy,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: mariasadokhina@gmail.ru