

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ

В.П. ЗАКАРЮКИН, А.В. КРЮКОВ

Иркутский государственный университет путей сообщения

В современных электроэнергетических системах применяются экранированные и литые токопроводы напряжением до 6-20 кВ. Конструктивно эти устройства представляют собой три токоведущие шины, каждая из которой имеет металлический экран. По такому же принципу выполняются газоизолированные линии электропередачи.

Для проектирования и эксплуатации систем, оснащенных экранированными токопроводами, необходима разработка компьютерных моделей этих устройств, позволяющих корректно учитывать поверхностный эффект и эффект близости. Такие модели могут быть построены с использованием методов моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения.

Предложенная методика комплексного моделирования экранированных линий электропередачи, выполненная на основе массивных проводников, основана на применении фазных координат и замене массивных шин набором элементарных проводников. На основе методики можно проводить моделирование экранированных и литых токопроводов, а также газоизолированных линий электропередачи. Кроме расчета режима, описанная технология моделирования позволяет осуществлять определение электромагнитных полей, создаваемых токопроводами.

Ключевые слова: экранированные токопроводы, моделирование, поверхностный эффект и эффект близости.

Введение

В современных электроэнергетических системах (ЭЭС) и системах электроснабжения (СЭС) применяются пофазно-экранированные и литые токопроводы напряжением до 20 кВ. Конструктивно эти устройства представляют собой три токоведущие шины, каждая из которой имеет металлический экран [1]. По такому же принципу могут выполняться газоизолированные линии электропередачи [2].

Для проектирования и эксплуатации СЭС, оснащенных экранированными токопроводами, необходима разработка компьютерных моделей этих устройств. Такие модели могут быть построены с использованием методов моделирования ЭЭС в фазных координатах, разработанных в ИрГУПСе [3]. Основная трудность создания моделей состоит в необходимости учета поверхностного эффекта и эффекта близости, которые интенсивно проявляются в линиях электропередачи подобного конструктивного исполнения.

Учет этих эффектов традиционными методами [4] связан с весьма сложными расчетами, мало приемлемыми в практике проектирования и эксплуатации СЭС. Кроме того, методы, изложенные в [4], основываются на рассмотрении токопровода как локального объекта вне его связей с питающей ЭЭС и СЭС. На базе технологии моделирования массивных токоведущих частей, предложенной в работах [5...9], может быть реализован системный подход к моделированию экранированных токопроводов,

отличающийся тем, что предлагаемые модели непосредственно используются в задачах расчета установившихся режимов сложной СЭС.

Результаты моделирования

Для моделирования выбрана система трехфазных экранированных токопроводов 10 кВ, поперечное сечение одной фазы которой показано на рис. 1. Номинальный ток токопровода при прокладке в воздухе равен 2500 А, индуктивность прямой последовательности 0,187 мГн/км, емкость 59,5 пФ/м, активное сопротивление на частоте 50 Гц 18,8 мОм/км. Сечение шины составляет 3524 мм², омическое сопротивление 1 км равно 0,0082 Ом/км; омическое сопротивление 1 км экрана площадью 5663 мм² составляет 0,005 Ом/км.

Моделирование осуществлялось на основе комплекса программ «Fazonord», разработанного в ИрГУПСе [4], для четырех вариантов, три из которых показаны на рис. 2–4. В первой схеме экраны токопровода заземлены на отправном конце, во второй дополнительно применяется замыкание экранов на приемном конце через дроссели с сопротивлением $0,5 + j 6,5$ Ом, в третьей схеме используется металлическое замыкание экранов. Четвертая схема отличается незаземленными и не соединенными друг с другом экранами. Длина токопровода для всех схем принята равной одному километру.

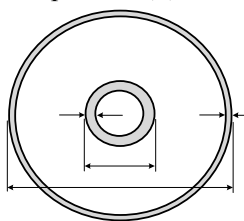


Рис. 1. Поперечное сечение токопровода

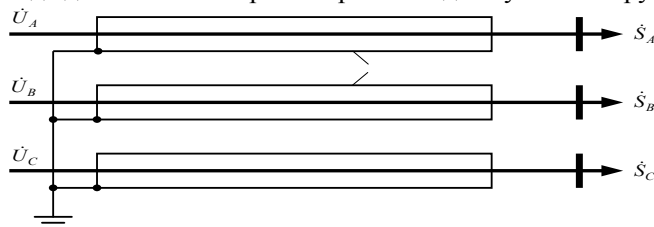


Рис. 2. Схема токопровода с экранами, заземленными на отправном конце

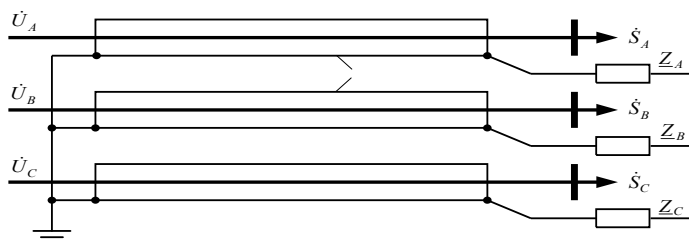


Рис. 3. Схема токопровода с экранами, соединенными на отправном конце через дроссели сопротивлением $Z = 0,5 + j 6,5$ Ом

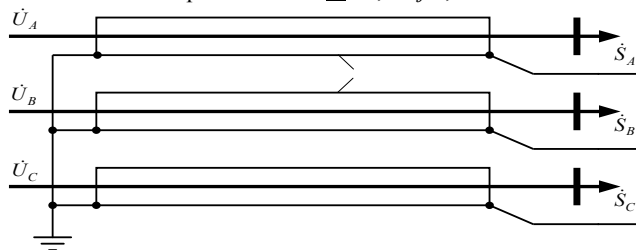


Рис. 4. Схема токопровода с экранами, закороченными на приемном конце

Схема многопроводной модели токопровода, составленной из элементарных проводников (ЭП) и позволяющей корректно учитывать поверхностный эффект и эффект близости, приведена на рис. 5. Каждый элементарный проводник шины эквивалентен участку шины площадью 235 мм², а элементарный проводник экрана отвечает участку площадью 75,5 мм².

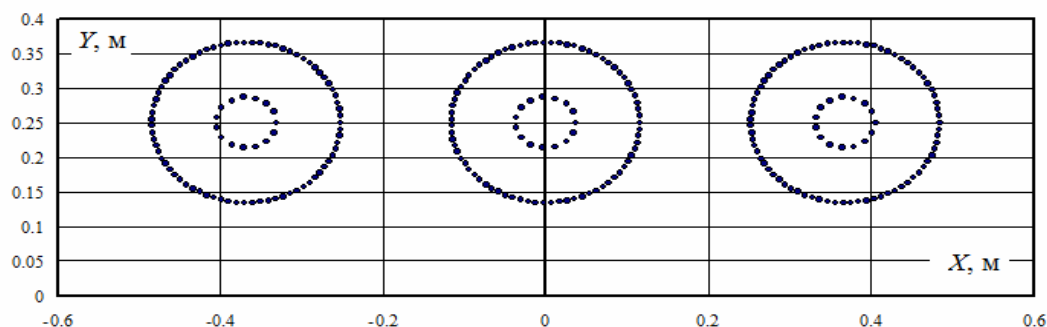


Рис. 5. Многопроводная модель; отсчет номеров элементарных проводников идет от верхнего проводника в направлении часовой стрелки

Результаты моделирования представлены в табл. 1–4 и на рис. 6–11. На рис. 6 и 10 показаны графики токораспределения в фазных проводниках, а на рис. 7 и 11 – в экранах для схем, приведенных на рис. 2 и 4. Рис. 6 и 10 отвечают плотности тока $4,26 \text{ А/мм}^2$ на единицу диаграммы, а рис. 7 и 10 соответствуют плотности тока $13,2 \text{ мА/мм}^2$ на единицу диаграммы. На рис. 8 и 9 показаны векторные диаграммы токов фаз и экранов.

Таблица 1

Результаты расчета режима на приемном конце линии по варианту рис. 2

Фаза	U_F , кВ	U_E , В	I_F , А	I_E , А	P , МВт	Q , Мвар	ΔP , кВт	ΔQ , квар
A	5,83	114	1210	0	15,04	15,61	43,2 0,3%	615 3,9%
B	5,89	71	1201	0				
C	5,88	103	1201	0				

Примечание: U_F – фазное напряжение шины на приемном конце; U_E – напряжение экрана на приемном конце; I_F – ток, протекающий по шине; I_E – ток, протекающий по экрану; P , Q – активная и реактивная мощности, передаваемые по токопроводу; ΔP , ΔQ – потери активной и реактивной мощности.

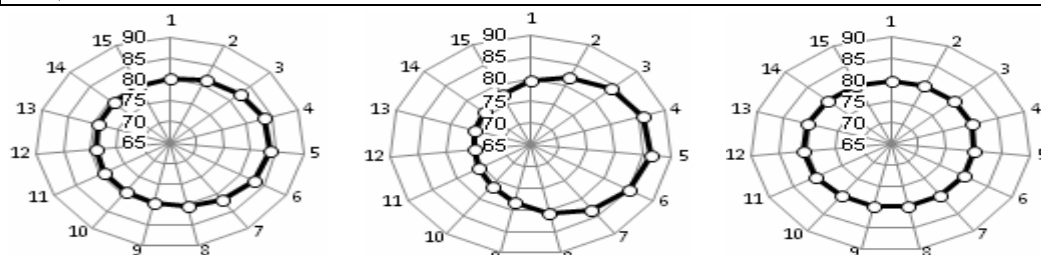


Рис. 6. Распределение токов в начале фазных шин для схемы рис. 2

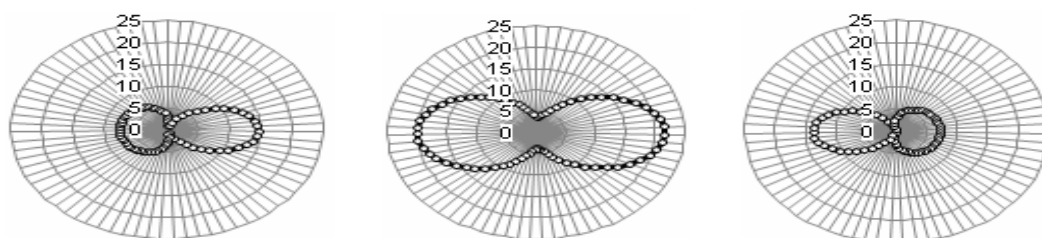


Рис. 7. Распределение токов в начале экранов фаз для схемы рис. 2

Распределения токов по шинам и по экранам мало отличаются для схем по рис. 2 и 3, а потери мощности практически одинаковы. Связано это с вихревыми токами, © Проблемы энергетики, 2015, № 5-6

наведенными в экранах кабелей с достаточно большими плотностями токов. Плотности тока экрана средней фазы превышают аналогичный показатель для экранов крайних фаз. В конце экранов токопровода наводятся напряжения до 114 В. Относительные потери активной мощности составляют 0,3 %, а реактивной – 3,9 %.

Таблица 2

Результаты расчета режима на приемном конце линии по варианту рис. 3

Фаза	U_{F3} , кВ	U_{E3} , В	I_{F3} , А	I_{E3} , А	P , МВт	Q , Мвар	ΔP , кВт	ΔQ , квар
А	5,84	113	1210	16,6	15,0	15,6	$\frac{43,0}{0,3\%}$	$\frac{606}{3,9\%}$
В	5,89	70	1201	9,8				
С	5,88	102	1201	16,7				

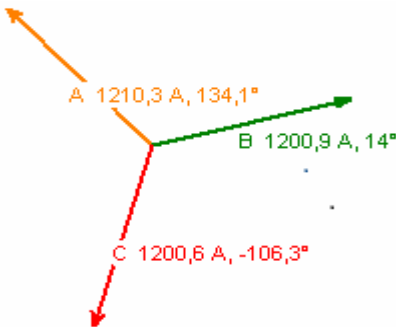


Рис. 8. Векторная диаграмма токов фаз на приемном конце для схемы рис. 3

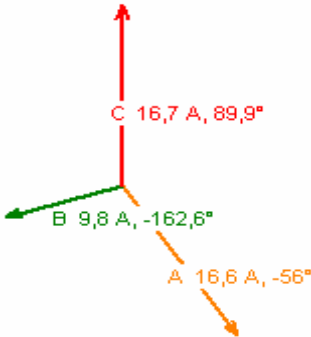


Рис. 9. Векторная диаграмма токов экранов на приемном конце для схемы рис. 3

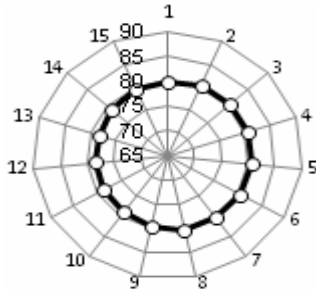
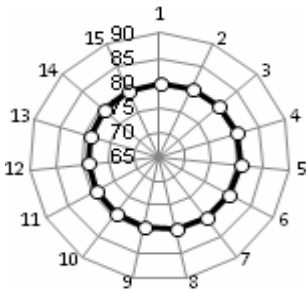
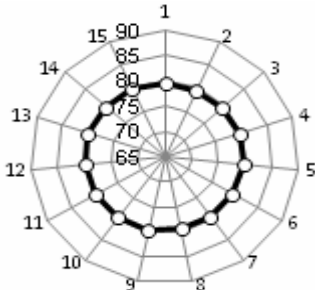


Рис. 10. Распределение токов в начале фазных шин для схемы рис. 4

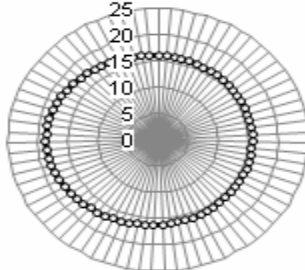
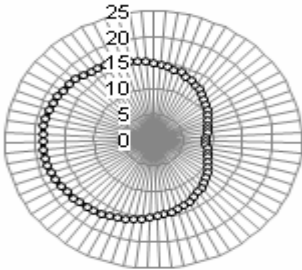
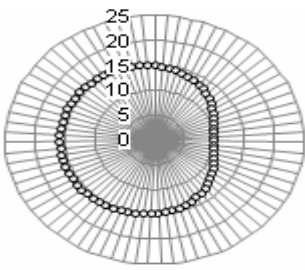


Рис. 11. Распределение токов в начале экранов фаз для схемы рис. 4

Таблица 3

Результаты расчета режима на приемном конце линии по варианту рис. 4

Фаза	U_F , кВ	U_E , В	I_F , А	I_E , А	P , МВт	Q , Мвар	ΔP , кВт	ΔQ , квар
А	5,92	9,5	1195	1043	15,1	15,3	<u>54,1</u> 0,4%	<u>306</u> 2,0%
В	5,91	16,8	1196	1085				
С	5,91	10,7	1196	1231				

Таблица 4

Результаты расчета режима на приемном конце линии при незаземленных экранах

Фаза	U_F , кВ	U_E , кВ	I_F , А	I_E , А	P , МВт	Q , Мвар	ΔP , кВт	ΔQ , квар
А	5,83	2,85	1211	0	15,0	15,6	<u>43,5</u> 0,3%	<u>629</u> 4,0%
В	5,89	2,54	1201	0				
С	5,88	2,87	1201	0				

При металлическом соединении экранов наведенные в конце их напряжения снижаются примерно на порядок, однако по экранам протекают токи, сопоставимые с токами шин. Связано это с возникновением замкнутых контуров шин при больших магнитных потоках в этих контурах (магнитное влияние фазных шин). Этот эффект, однако, не приводит к заметному росту активных потерь ввиду небольшого роста плотности тока в экранах (рис. 11).

При незаземленных экранах, как видно из табл. 4, наведенные напряжения на них достигают недопустимых величин в несколько киловольт.

В табл. 5 и на рис. 12 и 13 представлены результаты определения напряженностей электромагнитного поля (ЭМП), создаваемого токопроводом. Расчеты выполнены по методике, предложенной в работах [10, 11] и позволяющей проводить моделирование ЭМП, создаваемого многопроводными линиями электропередачи, одновременно с расчетом режима в фазных координатах.

Таблица 5

Максимумы значений напряженности электрического и магнитного полей

X , м	$H_{\max}$, А/м			$E_{\max}$, кВ/м		
	1	2	3	1	2	3
-5	6,3	6,2	1,3	0,09	0,00	0,00
-3	16,7	16,5	3,7	0,25	0,01	0,01
-2	36,6	36,0	8,2	0,52	0,01	0,01
-1	132	130	30,0	1,71	0,04	0,03
0	415	408	102	4,84	0,10	0,08
1	127	125	32,6	1,71	0,04	0,03
2	33,9	33,4	8,6	0,52	0,01	0,01
3	15,0	14,8	3,8	0,25	0,01	0,01
5	5,2	5,2	1,4	0,09	0,00	0,00

Примечание. 1 – экраны не заземлены и не замкнуты; 2 – экраны заземлены на отправном конце и замкнуты через дроссели на приемном; 3 – экраны заземлены на отправном конце и короткозамкнуты на приемном.

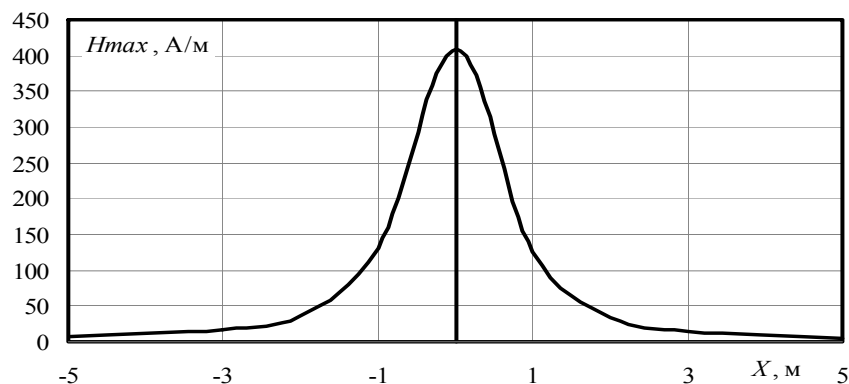


Рис. 12. Поперечный профиль напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м при подвеске токопровода на высоте 2,25 метра для схемы по рис. 3

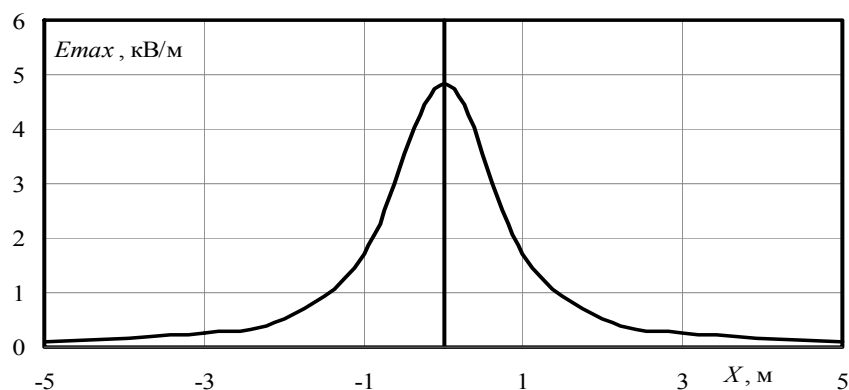


Рис. 13. Поперечный профиль напряженности электрического поля на высоте 1,8 м при подвеске токопровода на высоте 2,25 метра для изолированных экранов

Полученные результаты свидетельствуют о том, что уровень напряженности магнитного поля для схем с незамкнутыми экранами примерно одинаков и превышает допустимый уровень в 80 А/м на расстоянии около 1 м от токопровода. При незаземленных экранах токопровод создает также и электрическое поле с напряженностью немного менее 5 кВ/м.

Заключение

Предложенная методика комплексного моделирования пофазно-экранированных линий электропередачи, выполненных на основе массивных проводников, позволяет определять токораспределение в фазных шинах и экранах с одновременным расчетом электрических и магнитных полей, создаваемых линией. Методика основана на применении фазных координат и замене массивных шин набором элементарных проводников.

Summary

In modern electrical power systems screened and cast current distributors up to 6-20 kV are used. Structurally this equipment represents three current carrying buses each of which has the metal screen. By the same principle the gas-isolated power lines can be carried out.

Development of computer models allowing considering correctly skin effect and effect of proximity is necessary for design and operation of the systems equipped with screened current distributors. Such models can be constructed with use of electrical power systems modeling methods in the phase coordinates developed in Irkutsk state transport university.

Complex modeling technique of the screened power lines executed on the basis of massive conductors is offered. The technique is based on use of phase coordinates and replacement of massive buses with set of elementary conductors. On the basis of the offered technique it is possible to carry out modeling of screened and cast current distributors, and also the gas-isolated power lines. Except calculation of the mode, the described modeling technology allows to carry out definition of the electromagnetic fields created by current distributors.

Keywords: *screened current distributors, modeling, skin effect and proximity effect.*

Литература

1. Долин А.П. Современные токопроводы. М.: Высшая школа, 1988. 80 с.
2. Бударгин О.М., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Перспективы применения газоизолированных линий в современных электропередачах высокого и сверхвысокого напряжения // Электро. № 1. 2011. С. 2-9.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
4. Чальян К.М. Методы расчета электромагнитных параметров токопроводов. М.: Энергоатомиздат. 1990. 280 с.
5. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами. Иркутск: ИрГУПС. 2010. 80 с.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Методология расчета токораспределения в многопроводных системах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3 (15). 2007. С. 36-40.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Системный подход к моделированию многоамперных шинопроводов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 4 (20). 2008. С. 68 - 73.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Моделирование многоамперных шинопроводов в фазных координатах // Вести высших учебных заведений Черноземья. №1(15). 2009. С. 41-43.
9. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю. Моделирование магистральных шинопроводов в фазных координатах // Электротехнические комплексы и системы управления. № 4. 2008. С. 49-54.
10. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 130 с.
11. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железных дорог. Ангарск: АГТА, 2014. 158 с.

Поступила в редакцию

23 апреля 2015 г.

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Тел: 8(395)2638345. E-mail: zakar49@mail.ru.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), академик Российской академии транспорта, член-корр. Российской инженерной академии, член-корр. академии наук высшей школы РФ. Тел: 8(395)2638345. E-mail: and_kryukov@mail.ru.