

Панова Е.А., Новиков И.В., Сабирова Р.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП 110-220 кВ БЕЗ ГРОЗОТРОСА И С ОДНИМ ГРОЗОТРОСОМ

Поскольку промышленные системы электроснабжения характеризуются сравнительно короткими линиями 110-220 кВ, высокой плотностью нагрузки и преобладанием разомкнутых участков сети над замкнутыми, а существующие модели ЛЭП и алгоритмы ОМП ориентированы на моделирование сетей энергосистем, в связи с чем не позволяют достаточно точно установить место возникновения КЗ в условиях системы промышленного электроснабжения, поэтому актуальным является совершенствование методов дистанционного ОМП. Существующие методы моделирования не дают достаточной точности результатов в сетях промышленного электроснабжения 110-220 кВ. Поэтому актуальным является сравнение способов моделирования воздушных линий электропередач без грозотроса и с одним грозотросом. В работе были рассмотрены три метода моделирования: метод симметричных составляющих, метод расчета по справочным данным и метод расчета с помощью комбинированной схемы замещения. Каждый из рассмотренных методов обладает своими недостатками и преимуществами. Представленная комбинированная схема замещения сочетает в себе достоинства методов фазных координат и симметричных составляющих. Это позволяет учесть несимметрию расположения проводов, а также с помощью этого метода возможен расчет опоры ЛЭП любой конфигурации и любыми проводами. В ходе расчета был проведен анализ на примере двух опор П110-3В+4 без троса и АМ110-3Ф4 с 1 тросом с различным сечением проводов. Результаты расчета с помощью комбинированной схемы замещения дали величины по прямой последовательности, идентичные с полученными другими методами. Наибольшее отличие параметров одноцепной ЛЭП получилось при использовании проводов сечением 240 мм². Рассчитанная с помощью комбинированной схемы замещения емкость нулевой последовательности отличается от вычисленной другими методами примерно в 2 раза.

Ключевые слова: линия электропередачи, однофазное короткое замыкание, система электроснабжения, симметричные составляющие, фазные координаты, схема замещения, удельное сопротивление, емкость, определение места повреждения, грозозащитный трос

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее частых видов повреждения в сети с эффективно заземленной нейтралью являются однофазные короткие замыкания. Успешное и быстрое устранение такого повреждения и восстановление нормальной схемы системы электроснабжения возможно только при точном определении места повреждения. Исключение составляют случаи, когда однофазное короткое замыкание было ликвидировано действием режимной автоматики. Фактическое определение места повреждения затрудняется в связи с переходом со стеклянных изоляторов ЛЭП на полимерные. Повреждение на полимерном изоляторе можно обнаружить только при подъеме на опору линии электропередачи. Это существенно увеличивает сроки обнаружения места повреждения. Все это в целом сказывается на надежности системы электроснабжения и питания потребителей. Даже в системах промышленного электроснабжения при сравнительно небольшой длине линии электропередачи напряжением 110 кВ обнаружение и ликвидация повреждения может занимать до 8-10 часов. При этом следует отметить, что существующие методики дистанционного определения места повреждения ориентированы в основном на сети энергосистем. Такие сети характеризуются протяженными линиями электропередачи напряжением 110 кВ и выше и сложнзамкнутым характером сети. Системы же промышленного электро-

снабжения характеризуются высокой концентрацией нагрузки, сравнительно короткими линиями электропередачи напряжением 110 кВ и преобладанием разомкнутых участков сети над замкнутыми.

Для дистанционного определения места повреждения на линиях электропередачи применяются различные подходы. Так, авторами [1] предложена алгоритмическая модель линии электропередачи, которая позволяет оценить некоторые параметры, моделируемые ЛЭП по известным наблюдаемым параметрам режима на участке сети с двусторонним питанием. Похожий подход использован авторами в работе [2] для определения места повреждения в сети с многосторонним питанием. Авторы предлагают использовать для дистанционного места повреждения терминалы локации Бреслер. В работе [3] авторы предлагают специальное реле сопротивления, работа которого основана на принципе нейронных сетей, для обнаружения места повреждения. Следует отметить, что предложенные в данных работах подходы для дистанционного места определения места повреждения требуют установки дополнительного аппаратного обеспечения на линиях электропередачи. Все это связано с дополнительными затратами, что особенно актуально при большом количестве линий электропередачи 110 кВ на распределительном устройстве подстанции.

Намного с меньшими затратами связаны расчётные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима. Однако точность таких методов будет зависеть от способа задания линии электропере-

дачи и точности задания параметров этой линии [4]. Так, авторы [5] предлагают использовать сочетание волнового метода и нейросетевых алгоритмов. В работе [6] авторами предложена модель ЛЭП в пространстве состояний, разработанная в MATLAB/Simulink, которая позволяет анализировать до аварийные и аварийные режимы ее работы и на основе анализа матрицы эквивалентных параметров сети судить о виде и месте возникновения повреждения.

В данной работе представлена комбинированная схема замещения линий электропередачи, ориентированная в первую очередь на сети систем промышленного электроснабжения.

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Комбинированная схема замещения объединяет в себе два метода моделирования ЛЭП, что упрощает задачи получения исходных данных для заданного участка линии. Комбинированная схема позволяет моделировать ЛЭП с помощью метода фазных координат, а оставшуюся сеть в симметричных составляющих.

С помощью метода симметричных составляющих достаточно просто выполнить расчеты несимметричных аварийных режимов. Однако он основывается на модели расчетов, которые усредняют расстояния между проводами и тросами, что не позволяет учесть такие факторы, как несимметричное расположение проводников ЛЭП относительно друг друга и грозозащитного провода. Для этого целесообразно использовать метод фазных координат, который предполагает представление эквивалентной схемы любого элемента в виде матрицы 3×3 , то есть составление трехфазной схемы замещения.

Для определения места повреждения особое внимание требуется уделять определению отдельных электрических параметров, таких как индуктивность, в том числе взаимная индуктивность, и емкость проводников. В [7] авторы показывают вывод формул для нахождения полного сопротивления для ЛЭП с различным расположением проводящих элементов, с учетом и без учета грозозащитного троса. В работе [8] дано определение емкостной проводимости с помощью комбинированной схемы замещения и показан подробный вывод формул.

Сопротивления ЛЭП по прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \\ = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} - (\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA})); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_0 = \\ = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} + 2(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA})), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{ij} = r_{ii} + r_3 + j0,1451g \frac{D_3}{\rho_{п.э}}, \quad (i = j); \\ \dot{Z}_{ij} = r_3 + j0,1451g \frac{D_3}{D_{ij}}, \quad (i \neq j), \end{aligned} \quad (3)$$

где \dot{Z}_{ii} – полное сопротивление фазного провода; \dot{Z}_{ij} – полное сопротивление взаимной индукции между проводами фаз i и j ;

r_{ii} – удельное активное сопротивление провода, Ом/км; r_3 – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока (принимается равным 0,05 Ом/км);

D_3 – глубина расположения обратного провода (принимается равной 935 м), м; $\rho_{п.э}$ – эквивалентный радиус провода (0,95 от действительного радиуса), м;

D_{ij} – расстояние между проводящими элементами, м.

Выполнив расчеты по выражениям, представленным в [8], получим матрицу, диагональные элементы которой представляют собой полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности одноцепной линии электропередачи с одним грозозащитным тросом. Эти полные сопротивления будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{1(T)} = \dot{Z}_{2(T)} = \\ = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} - (\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA})); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{0(T)} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} + 2(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}) - \\ - \frac{(\dot{Z}_{AT} + \dot{Z}_{BT} + \dot{Z}_{CT})^2}{\dot{Z}_{TT}}); \end{aligned} \quad (5)$$

где \dot{Z}_{TT} – сопротивление проводника молниезащиты; \dot{Z}_{iT} и \dot{Z}_{Tj} – полное сопротивление взаимной индукции между проводами фазы i и грозотросом.

Потенциальные коэффициенты в симметричных составляющих [1]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_2 = \\ = \frac{1}{3}(\alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC} - (\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA})); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{3}(\alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC} + 2(\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA})), \quad (7)$$

где α_{ii} – собственный потенциальный коэффициент; α_{ij} – взаимный потенциальный коэффициент.

Зная потенциальные коэффициенты, можно определить поперечную емкость ЛЭП:

$$C = \frac{1}{\alpha}. \quad (8)$$

Грозозащитный трос оказывает влияние только на емкость нулевой последовательности и подтверждает правильность полученных уравнений. Емкость прямой и обратной последовательности одноцепной ЛЭП без грозозащитного троса равна емкости ЛЭП с грозозащитным тросом и определяется по (6) и (8).

Потенциальный коэффициент нулевой последовательности для одноцепной ЛЭП с грозозащитным тросом:

$$\begin{aligned} \alpha_{0(T)} = \frac{1}{3}(\alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC} + \\ + 2(\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA}) - \frac{(\alpha_{AT} + \alpha_{BT} + \alpha_{CT})^2}{\alpha_{TT}}), \end{aligned} \quad (10)$$

где α_{TT} – собственный потенциальный коэффициент проводника молниезащиты;

α_{Tj} и α_{Tj} – потенциальный коэффициент взаимной индукции между проводами фазы i и молниеотводом.

ОЦЕНКА УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП

Для оценки полученных математических моделей был выполнен расчет удельных электрических параметров одноцепной линии электропередачи 110 кВ без грозотроса и с одним грозозащитным тросом. Для определения полных сопротивлений и потенциальных коэффициентов линии электропередачи были рассчитаны расстояния между проводящими элементами, а также между ними и их зеркальными изображениями.

Для оценки полученных результатов и выведенных выражений выполнена серия расчетов удельных электрических параметров ЛЭП для опор П110-3В+4 и АМ110-3Ф4 при различных марках провода.

Расчеты выполнены тремя способами: на основе справочных данных (СД), по руководящим указаниям (РУ11) [9], с помощью разработанной комбинированной схемы замещения по фазным координатам (ФК).

В табл. 1-8 представлены расчеты сопротивления, емкости и емкостной проводимости для опор П110-3В+4 без троса и АМ110-3Ф4 с одним грозотросом.

По полученным данным построены сравнительные гистограммы наиболее отличающихся электрических параметров провода, представленные на рис. 1 и 2.

Расчёты были выполнены в программном продукте «PTC MathCad».

Таблица 1
Данные расчетов для опоры П110-3В+4

Опоры		П110-3В+4 без троса			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,436i	0,306+ +0,425i	0,249+ +0,418i	0,198+ +0,41i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,578+ +1,407i	0,456+ +1,396i	0,399+ +1,389i	0,348+ +1,381i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,046	8,248	8,395	8,547
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	4,127	4,179	4,217	4,225
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,444i	0,306+ +0,421j	0,249+ +0,427i	0,198+ +0,42i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,498+ +1,554i	0,071+ +1,448i	0,872+ +1,462i	0,693+ +1,436i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,121	8,321	8,471	8,599
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,320	2,377	2,420	2,457
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,436i	0,306+ +0,425i	0,249+ +0,418i	0,198+ +0,41i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,578+ +2,278i	0,456+ +2,246i	0,399+ +2,224i	0,348+ +2,202i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,02	8,221	8,368	8,519
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	5,785	5,889	5,964	6,041

Таблица 2
Данные расчетов для опоры П110-3В+4

Опоры		П110-3В+4 без троса		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,404i	0,12+ +0,395i	0,098+ +0,389i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,312+ +1,375i	0,27+ +1,366i	0,248+ +1,36i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,673	8,865	9,017
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	4,286	4,332	4,368
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,413i	0,12+ +0,405i	0,098+ +0,429i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,567+ +1,415i	0,42+ +1,384i	0,343+ +1,361i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,758	8,949	8,408
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,502	2,557	2,402
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,404i	0,12+ +0,395i	0,098+ +0,389i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,312+ +2,184i	0,27+ +2,157i	0,248+ +2,138i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,645	8,836	8,987
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	6,104	6,199	6,272

Таблица 3
Данные расчетов емкостной проводимости для опоры 1У110-1+5

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	1У110-1+5 без троса			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,45	2,51	2,55	2,60
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,50	1,52	1,54	1,55
Справочные данные	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,55	2,61	2,66	2,70
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,73	0,75	0,76	0,77
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,43	2,49	2,53	2,58
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,13	2,17	2,20	2,24

Таблица 4
Данные расчетов емкостной проводимости для опоры 1У110-1+5

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	1У110-1+5 без троса		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,63	2,69	2,73
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,57	1,59	1,60
Справочные данные	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,75	2,81	2,64
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,79	0,80	0,75
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,62	2,67	2,72
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,26	2,30	2,34

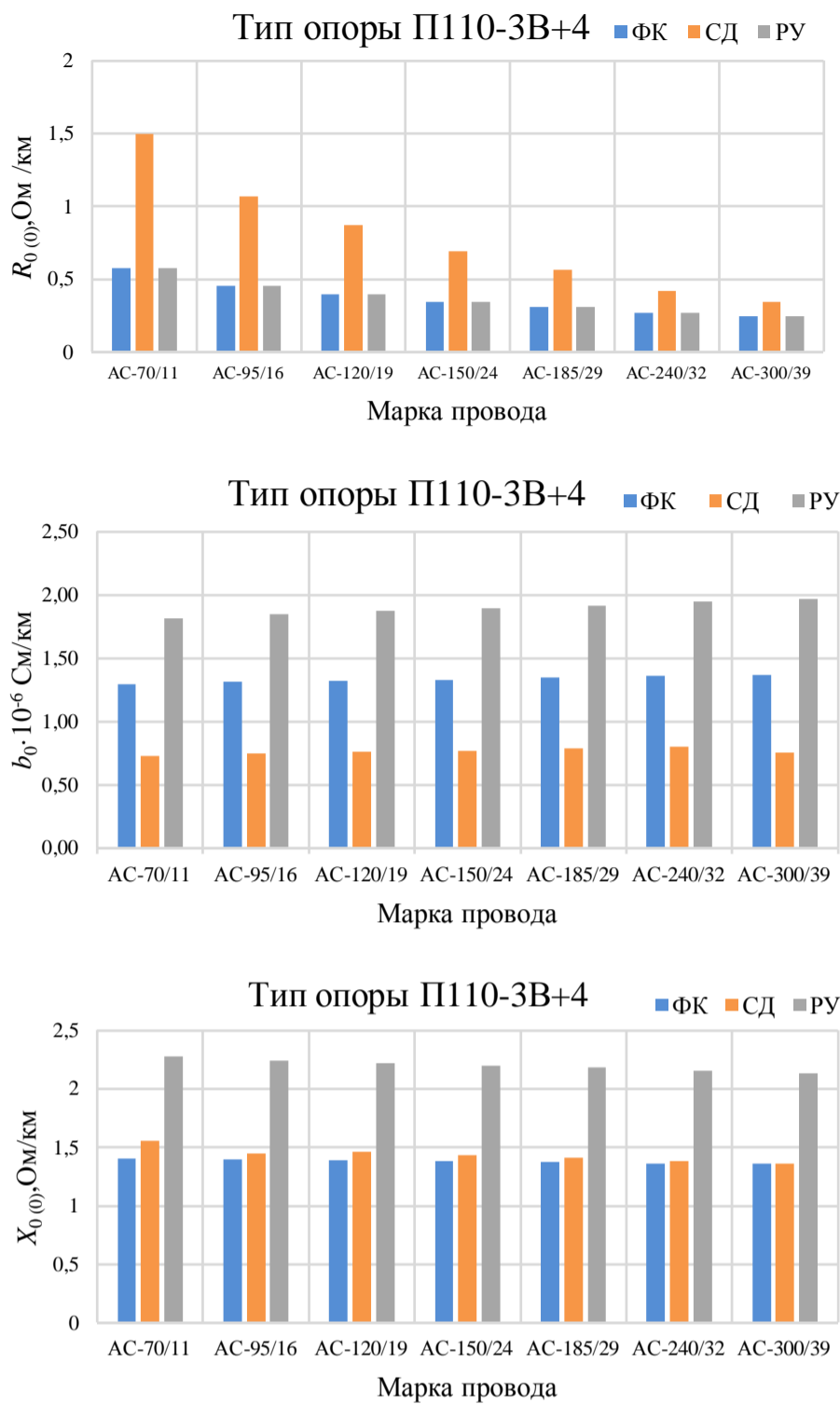


Рис. 1. Сравнительные гистограммы емкостной проводимости и сопротивлений для опоры марки П110-3В+4

Таблица 5

Данные расчетов для опоры АМ110-3Ф4

Опоры		АМ110-3Ф4 с 1 тросом			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,446i	0,306+ +0,436i	0,249+ +0,428i	0,198+ +0,421i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,643+ +1,343i	0,521+ +1,332i	0,464+ +1,352i	0,413+ +1,318i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	7,912	8,107	8,25	8,396
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	5,282	5,368	5,43	5,494
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,444i	0,306+ +0,434i	0,249+ +0,427i	0,198+ +0,42i
	$Z_0, \text{ Ом}$	1,498+ +1,554i	1,071+ +1,448i	0,872+ +1,462i	0,693+ +1,436i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,121	8,321	8,471	8,599
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,320	2,377	2,420	2,457
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,446i	0,306+ +0,436i	0,249+ +0,428i	0,198+ +0,421i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,643+ +2,235i	0,521+ +2,204i	0,464+ +2,181i	0,413+ +2,159i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	7,832	8,023	8,163	8,307
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	7,563	7,742	7,872	8,006

Таблица 6

Данные расчетов для опоры АМ110-3Ф4

Опоры		АМ110-3Ф4 с 1 тросом		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,415i	0,12+ +0,406i	0,098+ +0,399i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,377+ +1,312i	0,335+ +1,303i	0,313+ +1,296i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,518	8,703	8,849
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	5,545	5,623	5,684
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,413i	0,12+ +0,405i	0,098+ +0,429i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,567+ +1,415i	0,42+ +1,384i	0,343+ +1,361i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,758	8,949	8,408
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,502	2,557	2,402
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,415i	0,12+ +0,406i	0,098+ +0,399i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,377+ +2,141i	0,335+ +2,115i	0,313+ +2,095i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,427	8,608	8,751
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,117	8,285	8,418

Таблица 7

Данные расчетов емкостной проводимости для опоры АМ110-3Ф4

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	АМ110-3Ф4 с 1 тросом			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,48	2,55	2,59	2,64
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,66	1,69	1,71	1,73
Справочные данные	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,55	2,61	2,66	2,70
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,73	0,75	0,76	0,77
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,46	2,52	2,56	2,61
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,37	2,43	2,47	2,51

Таблица 8

Данные расчетов емкостной проводимости для опоры 1У110-1+5

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	АМ110-3Ф4 с 1 тросом		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,67	2,73	2,78
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,74	1,77	1,78
Справочные данные	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,75	2,81	2,64
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,79	0,80	0,75
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,65	2,70	2,75
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,55	2,60	2,64

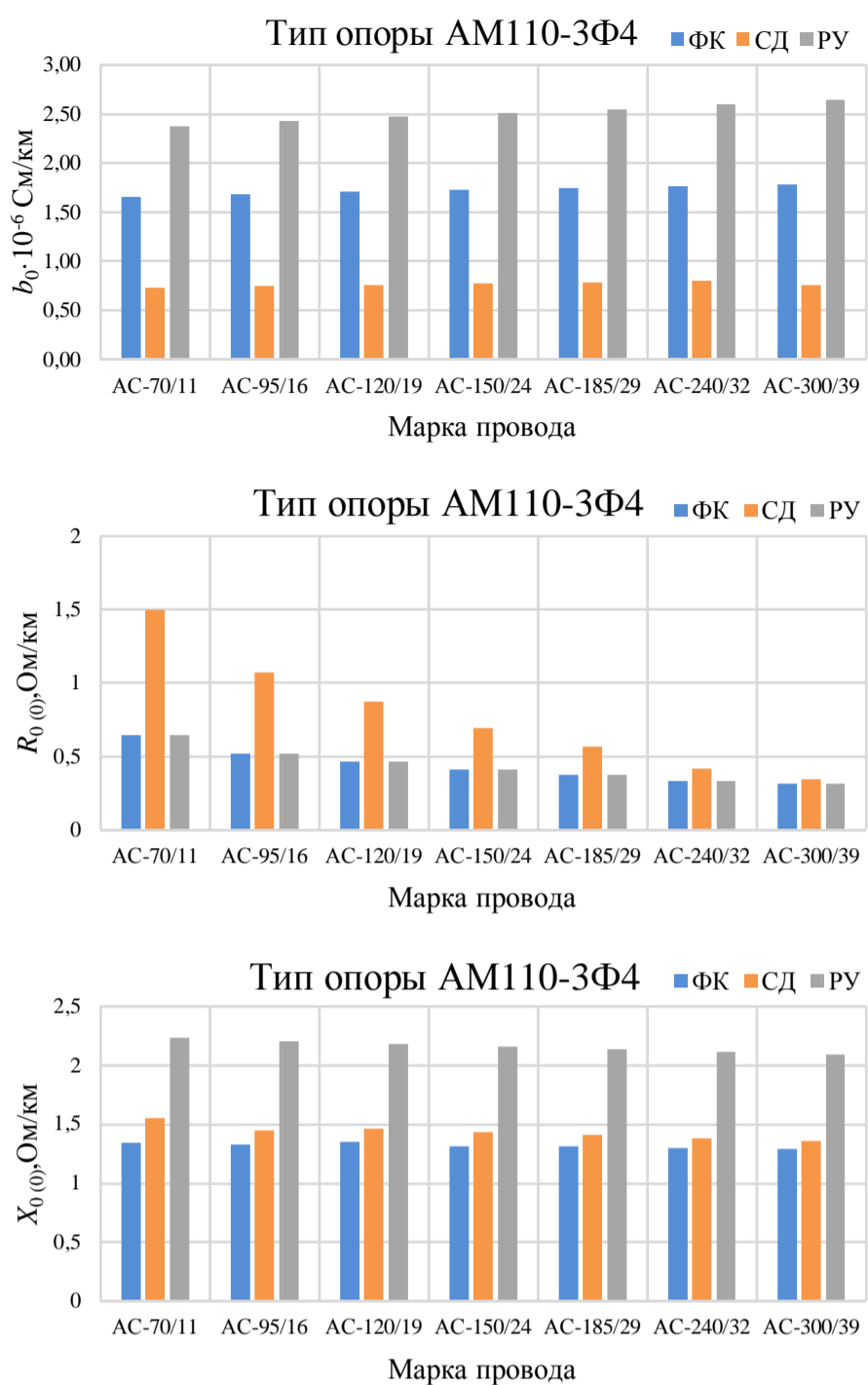


Рис. 2. Сравнительные гистограммы емкостной проводимости и сопротивлений для опоры марки АМ110-3Ф4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена схема замещения одноцепной ЛЭП без и с одним грозозащитным тросом, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих. За счет использования метода фазных координат и задания потенциальных коэффициентов проводов и грозозащитного троса ЛЭП в виде матрицы размерностью 3×3 . В нее включены собственные и взаимные потенциальные коэффициенты фазных проводов и грозозащитного троса.

В статье описаны основные выражения для нахождения сопротивления по прямой, обратной и нулевой последовательности, а также поперечную емкость ЛЭП без и с одним грозотросом. Получены результаты, рассчитанные различными способами по комбинированной схеме замещения, по справочным данным и с помощью руководящих указаний (РУ 11). Полученные данные позволяют оценить точность полученных расчетных данных различными способами, а также оценить влияние грозозащитного троса.

Как показали результаты моделирования одноцепной ЛЭП без и с одним грозотросом, наибольшее отличие в величинах активного и индуктивного сопро-

Поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

тивлений, а также поперечной емкости наблюдаются по нулевой последовательности. Ввиду отсутствия учета грозозащитного троса в расчетах по справочным данным емкостная проводимость получается заниженной на 30%.

Удельное сопротивление прямой последовательности, определенное с использованием комбинированной схемы замещения, отличается менее 5% от аналогичного сопротивления, определенного по руководящим указаниям [9] с использованием метода симметричных составляющих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ермаков К. И. Моделирование в задачах определения места повреждения на линиях электропередач // Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 67-70.
2. Бычков Ю.В., Павлов А.О. Определение места повреждения в схемах с многосторонним питанием // Энергетика Татарстана. 2011. № 2(22). С. 33-38.
3. Kazzaz S.A.S. Al, Ismael I., Mohammed K.K. Fault detection and location of power transmission lines using intelligent distance relay // Int. J. Power Electron. Drive Syst. 2020. Vol. 11. № 2. Pp. 726-734. doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp726-734
4. Куликов Ф.А., Кормилицына А.М., Иванов И.Е. Анализ влияния вариаций параметров воздушных линий электропередачи на точность двустороннего определения места повреждения // Электроэнергетика : Пятнадцатая всероссийская (седьмая междунар.) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: матер. конф. В 6-ти т., Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. С. 13.
5. Кощев М.И., Славутский А.Л., Славутский Л.А. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 110-118.
6. Fault analysis of power transmission line in a generalized state-space model perspective / G. Niu, T. Xiao, W. Pei, M. Zhu, Z. Yan, L. Zhou, Z. Qi, L. Kong // Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Pp. 239-243. doi: 10.1109/IECON.2017.8216044. 2017.
7. Продольное сопротивление одноцепной ЛЭП в фазных координатах для определения места повреждения при однофазных коротких замыканиях в сети 110 кВ / Р.Р. Сабирова, И.В. Лукьянова, О.И. Петухова, Е.А. Панова // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: сборник материалов 22-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов 25-26 мая 2021. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. С. 36-38.
8. Панова Е.А. Комбинированная схема замещения одноцепной ЛЭП // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 17–18 марта 2021 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2021. С. 48-52.
9. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.

Принята к печати 2 ноября 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS FOR CALCULATING ELECTRICAL PARAMETERS OF 110-220 kV TRANSMISSION LINES WITHOUT A LIGHTNING ROD AND WITH ONE LIGHTNING ROD

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Ivan V. Novikov

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1327-2526> Regina R. Sabirova

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-2675-6231>

Since industrial power supply systems are characterized by: relatively short 110-220 kV lines, high load density and the predominance of open network sections over closed ones. And the existing models of power transmission lines and algorithms of faulty faults are focused on modeling networks of power systems and therefore do not allow to accurately determine the location of the occurrence of a short circuit in the conditions of an industrial power supply system. Therefore, it is important to improve the methods of remote WMD. Existing modeling methods do not provide sufficient accuracy of results in 110-220 kV industrial power supply networks. Therefore, it is relevant to compare the methods for modeling overhead power lines without a ground wire and with one ground wire. Three modeling methods were considered in the work: the method of symmetrical components, the method of calculation using reference data and the method of calculation using the combined equivalent circuit. Each of the considered methods has its own advantages and disadvantages. The presented combined equivalent circuit combines the advantages of the methods of phase coordinates and symmetrical components. This allows you to take into account the asymmetry of the location of the wires, as well as using this method, it is possible to calculate the support of a power transmission line of any configuration and any wires. During the calculation, an analysis was carried out on the example of two supports P110-3V + 4 without a cable and AM110-3F4 with 1 cable with different wire cross-sections. The analysis showed that the combined equivalent circuit is accurate, since when calculating the electrical parameters of power lines of a direct sequence of active and inductive resistances, I coincide with the results obtained with other methods of modeling power transmission lines. The greatest difference in the parameters of a single-circuit transmission line was obtained when using wires with a cross section of 240 mm², the zero-sequence capacitance calculated using the combined equivalent circuit differs from that calculated by other methods by about 2 times.

Keywords: power transmission line, single-phase short circuit, power supply system, symmetrical components, phase coordinates, replacement circuit, resistivity, capacitance, damage location determination, lightning protection cable

REFERENCES

1. Ermakov K.I Modeling in problem of the determination of damaged place on the power transmission lineю *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Vestnik Chuvashskogo universiteta], 2011, no. 3, pp. 67-70.
2. Bychkov Yu.V., Pavlov A.O. Definition of a place of damage to schemes with a multilateral food. *Energetika Tatarstana* [Power industry of Tatarstan], 2011, no. 2(22), pp. 33-38.
3. Kazzaz S.A.S. Al, Ismael I., Mohammed K.K. Fault detection and location of power transmission lines using intelligent distance relay. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2020, vol. 11, no. 2, pp. 726-734. doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp726-734
4. Kulikov F.A., Kormilitsyna A.M., Ivanov I.E. Analysis of the influence of variations in the parameters of overhead power lines on the accuracy of two-way determination of the fault location. *Elektroenergetika* [Power industry. Fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical. conference of students, graduate students and young scientists]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University, 2020, p. 13.
5. Koshcheev M.I., Slavutskiy A.L., Slavutskiy L.A. Simple neural network algorithms for wave method of fault location in power networks. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Vestnik Chuvashskogo universiteta], 2019, no. 3, pp. 110-118.
6. Niu G., Xiao T., Pei W., Zhu M., Yan Z., Zhou L., Qi Z., Kong L. Fault analysis of power transmission line in a generalized state-space model perspective. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE.* Pp. 239-243. doi: 10.1109/IECON.2017.8216044. 2017.
7. Sabirova R.R., Luk'yanova I.V., Petukhova O.I., Panova E.A. Longitudinal impedance of a single-circuit power transmission line in phase coordinates to determine the location of damage during single-phase short circuits in a 110 kV network. *Energetiki i metallurgii nastoyashchee i buduyushchie Rossii* [Energy and metallurgy for the present and future of Russia]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021, pp. 36-38.
8. Panova E.A. Combined equivalent circuit of a single-circuit power line. *Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotehniki: Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and prospects for the development of electric power industry and electrical engineering. Proceedings of the OR All-Russian Scientific and Practical Conference], Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2021, pp. 48-52.
9. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vyp. 11. Raschet tokov korotkogo замыкания для releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110-750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculation of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks], Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p.

Панова Е.А., Новиков И.В., Сабирова Р.Р. Сравнительный анализ методов расчета электрических параметров ЛЭП 110-220 кВ без грозотроса и с одним грозотросом // *Электротехнические системы и комплексы.* 2022. № 4(57). С. 36-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-36-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-36-41)

Panova E.A., Novikov I.V., Sabirova R.R. Comparative Analysis of Models for Calculating Electrical Parameters of 110-220 kV Transmission Lines without a Lightning Rod and with One Lightning Rod. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 36-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-36-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-36-41)