

## ПРОДОЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОДНОЦЕПНОЙ ЛЭП С ДВУМЯ ГРОЗОЗАЩИТНЫМИ ТРОСАМИ В ЗАДАЧЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОМП

**Е.А. Панова**

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия*

Одной из наиболее важных задач при дистанционном определении места повреждения в сети 110 кВ и выше является моделирование линий электропередачи с учетом электромагнитного и электростатического взаимодействия их проводящих элементов. Распространенным подходом является использование математических моделей, рекомендованных руководящими указаниями по расчету токов короткого замыкания для релейной защиты. Однако данные модели ЛЭП учитывают среднегеометрическое расстояние между проводами и грозозащитными тросами, а значит, они усредняют величины сопротивлений взаимной индукции. В случаях, когда провода и тросы расположены несимметрично друг относительно друга, это приводит к завышению сопротивления нулевой последовательности ЛЭП и, как следствие, к занижению величины тока однофазного короткого замыкания. Такая ситуация может сказаться на результатах дистанционного ОМП. Для устранения данного недостатка в статье предложена комбинированная схема замещения одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих. Приведенная схема замещения ЛЭП позволяет выполнять расчет параметров режима с использованием метода симметричных составляющих и при этом моделировать интересующие для расчета ЛЭП с использованием фазных координат.

*Ключевые слова:* линия электропередачи, моделирование, однофазное короткое замыкание, несимметричный режим, фазные координаты, грозозащитный трос.

### Введение

Решение таких задач, как дистанционное определение места повреждения при однофазных коротких замыканиях в сети с эффективно заземленной нейтралью, требует высокой точности результатов расчета параметров аварийного режима. Во многом она будет зависеть от используемой в расчете схемы замещения линий электропередачи, которая должна учитывать не только сопротивления проводящих элементов, но также их электромагнитное и электростатическое взаимодействие.

Одним из наиболее простых способов представления в расчете ЛЭП является использование справочных данных об их удельных сопротивлениях и емкостной проводимости. Однако такой способ не позволяет учесть действительные расстояния между проводящими элементами и не учитывает возможность использования проводов сечением более 300 мм<sup>2</sup> в сети напряжением 110 кВ. Такая ситуация характерна, например, для систем электроснабжения крупных промышленных предприятий, характеризующихся высокой плотностью нагрузки. Более точные результаты дает использование схемы замещения ЛЭП, приведенной в руководящих указаниях по расчету токов КЗ для релейной защиты [1]. Приведенные в руководящих указаниях схемы замещения подразумевают использование для расчета параметров режима мето-

да симметричных составляющих, а значит, не могут учесть несимметрию линии, вызванную, например, несимметричным расположением фазных проводов друг относительно друга и относительно грозозащитного троса.

Широко применяется моделирование электроустановок в среде MATLAB Simulink. Так, данный инструмент может быть использован для описания процессов, протекающих при однофазных замыканиях на землю в сети 6–35 кВ [2], а также для моделирования режимов работы длинных ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения [3–6]. Однако в MATLAB Simulink затруднительно смоделировать режимы работы системы промышленного электроснабжения с несколькими источниками электрической энергии (внешняя энергосистема и собственные электростанции), уровнями напряжения от 0,4 до 500 кВ и числом элементов более 10 000. Связано это в первую очередь с большим временем счета и высокими требованиями производительности компьютера.

Одним из наиболее удобных методов расчета параметров режима однофазного короткого замыкания является метод симметричных составляющих [7]. Применение данного метода к моделированию режимов аварийной несимметрии в условиях систем промышленного электроснабжения с собственными электростанциями рассмотрено в [8].

Однако данный метод не позволяет учесть возможную несимметрию элементов схемы. Такая ситуация может возникнуть, например, при работе двухцепной ЛЭП с одной отключенной цепью. При наличии у такой ЛЭП грозозащитных тросов возникает несимметрия сопротивлений линии, обусловленная электромагнитным взаимодействием ее проводящих элементов. Такую несимметрию необходимо учитывать при выполнении расчетов с целью дистанционного определения места повреждения (ОМП).

Для учета несимметрии линии электропередачи по фазам, обусловленной расположением проводов на опоре, а также для учета электромагнитного и электростатического взаимодействия ее проводящих элементов целесообразно использовать метод фазных координат [9, 10]. Данный метод широко применяется для решения задач расчета режимов электрических сетей, содержащих несимметричные элементы. Например таких, как системы электроснабжения тяговых сетей. В работах [11, 12] авторы привели описание математической модели энергосистемы, в том числе модели многофазной ЛЭП, предназначенной для расчета и анализа параметров симметричных и несимметричных режимов. Однако такая модель электрической сети подразумевает, что все ее элементы представлены трехфазной схемой замещения. Такой подход может быть неудобен в схемах с большим числом элементов ввиду сложности подготовки исходных данных. Авторы [13] использовали данный метод для исследования влияния наличия грозозащитного троса, изменения частоты в сети и поверхностного эффекта на сопротивление ЛЭП. Также метод фазных координат используется для определения индуктивности и емкости многоцепных ЛЭП [14], линий с изолированными проводниками [15] и ЛЭП разных уровней напряжения на одной опоре [16].

Несимметричное распределение тока также может быть обусловлено взаимоиндуктивным влиянием близко расположенных ЛЭП [17]. Авторы [18] предложили метод «виртуальной» линии, который позволяет скорректировать ток нулевой последовательности с учетом взаимоиндуктивного влияния соседних ЛЭП. Для расчета сопротивления ЛЭП в работе [19] использован метод конечных элементов. Разработанная модель позволяет оценить индуктивность и емкость ЛЭП с учетом конфигурации опоры, а также наличия расщепления фазного провода.

Из-за особенностей систем промышленного электроснабжения актуальной является задача учета несимметрии ЛЭП без усложнения схемы замещения в целом.

### Продольное сопротивление одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами

Для моделирования одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами в работе использован метод фазных координат. В соответствии с ним сопротивление проводящих элементов и их взаимоиндукции может быть представлено в виде матрицы  $5 \times 5$ :

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AA} & \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{AT_1} & \dot{Z}_{AT_2} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{BB} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{BT_1} & \dot{Z}_{BT_2} \\ \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{CC} & \dot{Z}_{CT_1} & \dot{Z}_{CT_2} \\ \dot{Z}_{AT_1} & \dot{Z}_{BT_1} & \dot{Z}_{CT_1} & \dot{Z}_{T_1T_1} & \dot{Z}_{T_1T_2} \\ \dot{Z}_{AT_2} & \dot{Z}_{BT_2} & \dot{Z}_{CT_2} & \dot{Z}_{T_1T_2} & \dot{Z}_{T_2T_2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

где  $\dot{Z}_{AA}$ ,  $\dot{Z}_{BB}$ ,  $\dot{Z}_{CC}$  – собственные сопротивления фаз ЛЭП;  $\dot{Z}_{T_1T_1}$ ,  $\dot{Z}_{T_2T_2}$  – собственные сопротивления грозозащитных тросов; остальные элементы – сопротивления взаимоиндукции между фазами, фазой и тросом, а также грозозащитными тросами.

Собственные сопротивления фаз либо тросов  $\dot{Z}_L$ , а также сопротивления взаимоиндукции  $\dot{Z}_M$  определяются по известным выражениям из [1]:

$$\dot{Z}_L = r_0 + r_3 + j0,145 \lg \left( \frac{D_3}{0,95\rho_n} \right); \quad \dot{Z}_M = r_3 + j0,145 \lg \left( \frac{D_3}{D_n} \right), \quad (2)$$

где  $r_0$  – удельное активное сопротивление провода либо троса, Ом/км;  $r_3$  – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле при протекании в ней тока (принимается равным 0,05 Ом/км);  $D_3$  – глубина залегания обратного провода (935 м);  $\rho_n$  – радиус провода, м;  $D_n$  – расстояние между проводниками фаз либо тросами, м.

Для того чтобы использовать математическую модель ЛЭП в фазных координатах совместно со схемой замещения электрической сети в симметричных составляющих, матрицу  $\dot{\mathbf{Z}}$  необходимо разделить на четыре части:

$$\dot{\mathbf{Z}}_{\Pi} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AA} & \dot{Z}_{BA} & \dot{Z}_{CA} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{BB} & \dot{Z}_{CB} \\ \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{CC} \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{Z}}_{\Pi T} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AT_1} & \dot{Z}_{AT_2} \\ \dot{Z}_{BT_1} & \dot{Z}_{BT_2} \\ \dot{Z}_{CT_1} & \dot{Z}_{CT_2} \end{pmatrix};$$

$$\dot{\mathbf{Z}}_{T\Pi} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AT_1} & \dot{Z}_{BT_1} & \dot{Z}_{CT_1} \\ \dot{Z}_{AT_2} & \dot{Z}_{BT_2} & \dot{Z}_{CT_2} \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{Z}}_T = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{T_1T_1} & \dot{Z}_{T_1T_2} \\ \dot{Z}_{T_1T_2} & \dot{Z}_{T_2T_2} \end{pmatrix}.$$

Это позволяет преобразовать матрицу сопротивлений одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами (1) к матрице размерностью  $3 \times 3$ :

$$\dot{Z}_{n(t)} = \dot{Z}_n - \dot{Z}_{nn} \dot{Z}_t^{-1} \dot{Z}_{nt} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AA(t)} & \dot{Z}_{AB(t)} & \dot{Z}_{AC(t)} \\ \dot{Z}_{AB(t)} & \dot{Z}_{BB(t)} & \dot{Z}_{BC(t)} \\ \dot{Z}_{AC(t)} & \dot{Z}_{BC(t)} & \dot{Z}_{CC(t)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В полученной матрице (3) диагональные элементы (на примере  $\dot{Z}_{AA(t)}$ ):

$$\dot{Z}_{AA(t)} = \dot{Z}_{AA} + \frac{\dot{Z}_{T2T2} \dot{Z}_{AT1}^2 + \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{AT1}^2 - 2 \dot{Z}_{T1T2} \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{AT2}}{\dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2}}.$$

Недиагональные элементы матрицы (3) на примере  $\dot{Z}_{AB(t)}$ :

$$\dot{Z}_{AB(t)} = \dot{Z}_{AB} + \frac{\dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T1} - \dot{Z}_{T1T2} (\dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{BT2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{BT1})}{\dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2}}.$$

Для преобразования  $\dot{Z}_{n(t)}$  в симметричные составляющие используется следующее выражение:

$$\dot{Z}_{S(t)} = \frac{1}{3} \mathbf{s}^{-1} \dot{Z}_{n(t)} \mathbf{s} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \dot{Z}_1 & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{10} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_2 & \dot{Z}_{20} \\ \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02} & \dot{Z}_0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{s}$  – матрица фазового поворота, содержащая оператор  $a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$ :

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Преобразование в соответствии с (4) позволяет вычислить сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами. Данные величины будут диагональными элементами полученной матрицы. Получим:

– сопротивление прямой (обратной) последовательности:

$$\dot{Z}_{1(2)} = \frac{A}{\dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A = & \dot{Z}_{AA} \dot{Z}_{T1T2}^2 + \dot{Z}_{BB} \dot{Z}_{T1T2}^2 + \dot{Z}_{CC} \dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{AA} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{BB} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{CC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \\ & + \dot{Z}_{AT1}^2 \dot{Z}_{T2T2} - 2 \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T2} - \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2T2} + \\ & + \dot{Z}_{AT2}^2 \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T1T2} - \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T1} - \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T1} + \\ & + \dot{Z}_{BT1}^2 \dot{Z}_{T2T2} - 2 \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T2} - \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{CT1}^2 \dot{Z}_{T2T2} - 2 \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T2} + \\ & + \dot{Z}_{CT2}^2 \dot{Z}_{T1T1} + \dot{Z}_{AB} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{BC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{AB} \dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{AC} \dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{BC} \dot{Z}_{T1T2}^2; \end{aligned}$$

– сопротивление нулевой последовательности

$$\dot{Z}_0 = \frac{B}{\dot{Z}_{T1T2}^2 - \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2}}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B = & \dot{Z}_{AA} \dot{Z}_{T1T2}^2 + \dot{Z}_{BB} \dot{Z}_{T1T2}^2 + \dot{Z}_{CC} \dot{Z}_{T1T2}^2 + 2 (\dot{Z}_{AB} \dot{Z}_{T1T2}^2 + \dot{Z}_{AC} \dot{Z}_{T1T2}^2 + \dot{Z}_{BC} \dot{Z}_{T1T2}^2) + \dot{Z}_{AT1}^2 \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT2}^2 \dot{Z}_{T1T1} + \\ & + \dot{Z}_{BT1}^2 \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{BT2}^2 \dot{Z}_{T1T1} + \dot{Z}_{CT1}^2 \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{CT2}^2 \dot{Z}_{T1T1} - \dot{Z}_{AA} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{BB} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} - \dot{Z}_{CC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \\ & + 2 (\dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T1} + \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T1}) - \\ & - 2 (\dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AB} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{AC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{AT1} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T2} + \\ & + \dot{Z}_{AT2} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{BC} \dot{Z}_{T1T1} \dot{Z}_{T2T2} + \dot{Z}_{BT1} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{BT2} \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{T1T2} + \dot{Z}_{CT1} \dot{Z}_{CT2} \dot{Z}_{T1T2}). \end{aligned}$$

Полученные в данной работе математические модели ЛЭП позволяют составить комбинированную схему замещения, в которой ЛЭП высокого напряжения представлены в фазных координатах, а остальные элементы сети – в симметричных составляющих. Это значительно упрощает расчет параметров несимметричного режима и подготовку данных при составлении расчетной схемы. При этом обеспечивается возможность учета несимметрии линий электропередачи по фазам.

## Расчет продольного сопротивления с использованием полученной схемы замещения

Для оценки полученных результатов в работе представлен расчет удельного продольного сопротивления одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами. Для расчета принята опора типа ПП220-2/40 с проводами АС-300 и тросами ТК-9,1. Одна из цепей ЛЭП отключена, поэтому в расчете рассматриваем данную линию как одноцепную с двумя грозозащитными тросами.

В паспорте опоры указаны расстояния от стойки опоры до каждой фазы и троса (на рисунке обозначены буквой  $L$ ). На основе этих данных были рассчитаны расстояния между проводящими элементами. На рисунке показаны условные обозначения данных расстояний на примере фазы  $A$ . Результаты данного расчета приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены параметры провода и троса.

Таблица 1

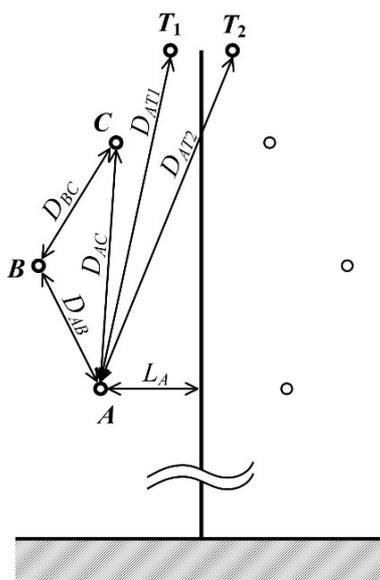
Параметры опоры

Фаза	Расстояние, м					Расстояние от стойки опоры, м
	$A$	$B$	$C$	$T_1$	$T_2$	
$A$	–	9,341	18	25,298	24,187	5,5
$B$	9,341	–	9,487	18,31	15,977	8
$C$	18,007	9,487	–	9,605	6,5	5
$T_1$	25,298	18,31	9,605	–	5	2,5
$T_2$	24,187	15,977	6,5	5	–	2,5

Таблица 2

Параметры провода и троса

Марка	Активное сопротивление, Ом/км	$\rho_{пв}$ , см
АС-300	0,098	12
ТК-9,1	3,25	4,55



Расстояния между фазными проводами и тросами на опоре

Используя формулы (2) и данные табл. 1 и 2, составили матрицу сопротивлений рассматриваемой одноцепной ЛЭП с двумя тросами по (1), Ом/км:

$$\dot{Z} = \begin{pmatrix} 0,148 + j0,568 & 0,05 + j0,29 & 0,05 + j0,249 & 0,05 + j0,227 & 0,05 + j0,23 \\ 0,05 + j0,29 & 0,148 + j0,568 & 0,05 + j0,289 & 0,05 + j0,248 & 0,05 + j0,256 \\ 0,05 + j0,249 & 0,05 + j0,289 & 0,148 + j0,568 & 0,05 + j0,288 & 0,05 + j0,313 \\ 0,05 + j0,227 & 0,05 + j0,248 & 0,05 + j0,288 & 3,3 + j0,629 & 0,05 + j0,329 \\ 0,05 + j0,23 & 0,05 + j0,256 & 0,05 + j0,313 & 0,05 + j0,329 & 3,3 + j0,629 \end{pmatrix}$$

Из полученной матрицы видно, что удельные сопротивления взаимной индукции отличаются друг от друга ввиду несимметричного расположения проводящих элементов на опоре. Так, разность между удельными сопротивлениями взаимной индукции фазных проводов достигает 14,1 %, фазных проводов и первого троса – 21,2 %, фазных проводов и второго троса – 26,5 %.

Пользуясь формулами (5) и (6), выполнили преобразование  $\dot{Z}$  в симметричные составляющие:

$$\dot{Z}_{1(2)} = 0,099 + j0,291 \text{ Ом/км};$$

$$\dot{Z}_0 = 0,344 + j1,045 \text{ Ом/км}.$$

Для оценки полученных результатов и сравнения их с сопротивлениями, полученными с учетом среднегеометрических расстояний, был выполнен расчет  $\dot{Z}_{1(2),PV}$  и  $\dot{Z}_{0,PV}$  по [1]. Для рассматриваемой ЛЭП среднегеометрическое расстояние между фазными проводниками составляет  $D_{cp} = 11,684$  м, а между проводами и тросами  $D_{пт.э} = 14,952$  м.

При таких параметрах ЛЭП, а также характеристиках провода и троса, приведенных в табл. 2, получим

$$\dot{Z}_{1(2),PV} = 0,098 + j0,292 \text{ Ом/км};$$

$$\dot{Z}_{0,PV} = 0,344 + j1,106 \text{ Ом/км}.$$

Видно, что сопротивление нулевой последовательности, определенное на основе среднегеометрических параметров ЛЭП, имеет индуктивную составляющую на 5 % больше, чем сопротивление, определенное на основе метода фазных координат.

### Заключение

В работе представлена комбинированная схема замещения одноцепной линии электропередачи с двумя грозозащитными тросами, предназначенная для совместного использования методов фазных координат и симметричных составляющих для выполнения расчетов параметров несимметричных аварийных режимов. Данную модель предлагается использовать для расчета и анализа несимметричных режимов в условиях систем про-

мышленного электроснабжения, которые характеризуются преобладанием разомкнутых участков сети над замкнутыми, наличием нескольких ступеней напряжения, собственной генерации, высокой плотностью нагрузки и сравнительно короткими ЛЭП напряжением 110 и 220 кВ [20]. Все эти особенности затрудняют использование методов расчета режима, предназначенных для сетей энергосистемы. Представленная модель ЛЭП может быть использована для расчета параметров режима с использованием сочетания методов последовательного эквивалентирования, симметричных составляющих и фазных координат. При этом метод последовательного эквивалентирования используется для определения параметров предшествующего установившегося режима, метод симметричных составляющих – для расчета параметров несимметричного режима и оставления схемы замещения, а метод фазных координат – для моделирования ЛЭП. Такой подход позволяет одновременно упростить расчет режима и учесть возможную несимметрию линий электропередачи. Как показали результаты моделирования одноцепной ЛЭП с двумя грозотросами, удельное сопротивление нулевой последовательности, определенное с использованием комбинированной схемы замещения, оказалось на 5 % меньше аналогичного сопротивления, определенного по руководящим указаниям [1] с использованием метода симметричных составляющих.

### Литература

1. *Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчет токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ.* – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
2. Дихно, А.О. Моделирование электромагнитных процессов параллельных линий электропередачи при замыканиях в одной из них / А.О. Дихно, С.И. Макашова // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке.* – 2019. – Т. 2. – С. 227–231.
3. Кабанов, В.О. Моделирование высоковольтной линии электропередачи для определения предела передаваемой мощности / В.О. Кабанов // *Энергия-2021: Тезисы докладов Шестнадцатой всероссийской (восьмой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 6–8 апреля 2021 года: в 7 т.* – Иваново, 2021. – Т. 3. – С. 17.
4. Рубанов, Н.В. Моделирование линии электропередач сверхвысокого класса напряжения в программном комплексе MATLAB / Н.В. Рубанов, М.С. Матвеева // *Colloquium-journal.* – 2019. – № 24-2 (48). – С. 109–111.
5. Быковская, Л.В. Математическое моделирование режимов работы воздушной линии с распределенными параметрами / Л.В. Быковская, В.В. Быковский // *Горное оборудование и электромеханика.* – 2018. – № 5 (139). – С. 11–16. – DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-11-15
6. Belhocine, M. On the connections between used models of power transmission lines / M. Belhocine, B. Marinescu // *IEEE Power and Energy Society General Meeting.* – 2013. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6673023
7. *Symmetrical Components of Transmission Line Parameters Based on the Installed Tower Ground Resistivity* / L.M. Adesina, G.A. Ajenikoko, O. Ogunbiyi, S.T. Oluwafemi // *Int. J. Recent Technol. Eng.* – 2020. – Vol. 8, no. 6. – P. 1987–1993.
8. Панова, Е.А. Повышение режимной надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в условиях аварийной несимметрии: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Панова. – Магнитогорск, 2012. – 205 с.
9. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – 273 с.
10. Berman, A. Analysis of faulted power systems by phase coordinates / A. Berman, W. Xu // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – 1998. – Vol. 13, no. 2. – P. 587–595. DOI: 10.1109/61.660932

11. Mo, M. *Fault Analysis and Application Based on Improved Phase-Coordinates Fixed-Point Iterative Method in Three-Phase Power Systems* / M. Mo, N. Hang // *J. Electr. Eng. Technol.* – 2019. – Vol. 14. – P. 1429–1440. DOI: 10.1007/s42835-019-00156-3

12. Vepryk, Y.M. *Unified models of elements of power supply systems based on equations in phase coordinates* / Y.M. Vepryk, O.A. Nebera // *Electr. Eng. Electromechanics.* – 2015. – No. 6. DOI: 10.20998/2074-272X.2015.6.10

13. Ebrahimi, R. *Evaluation and calculation of overhead line impedance in distribution networks* / R. Ebrahimi, A. Babaei, M. Hoseynpoor // *Aust. J. Basic Appl. Sci.* – 2011. – Vol. 5, no. 8. – P. 1278–1284.

14. *The electric energy loss in overhead ground wires of 110kV six-circuit transmission line on the same tower* / H. Wang, L. Wang, Y. Wang et al. // *Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE.* – 2012. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303319

15. *Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages* / G. Qi, Y. Zheng, K. Xia et al. // *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).* – 2018, P. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8642003

16. *Analysis of zero sequence power directional unit for multi-circuit transmission lines with different voltage levels* / B. Zhang, C. Wu, X. Wang et al. // *2017 Chinese Automation Congress (CAC).* – 2017. – P. 5242–5246. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243711

17. Holbeck, J.I. *The Effects of Mutual Induction Between Parallel Transmission Lines on Current Flow to Ground Faults* / J.I. Holbeck, M.J. Lantz // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers.* – 1943. – Vol. 62, no. 11. – P. 712–715. DOI: 10.1109/T-AIEE.1943.5058634

18. *Ukrainsev, A.V. “Virtual” power line method to correct the calculation of current ground faults in the parallel overhead transmission lines 110–220 kV* / A.V. Ukrainsev, I.V. Nagay // *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* – 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911473

19. *Evaluation of the high voltage transmission line inductance and capacitance using the finite element approach* / J.A. Dias Pinto, A. Paulo Coimbra, P.G. Pereirinha, C.F. Lemos Antunes // *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering.* – 1998. – Vol. 17, no. 3. – P. 313–317. DOI: 10.1108/03321649810203224

20. Панова, Е.А. *Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения* / Е.А. Панова, А.Я. Альбрехт // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2016. – № 4 (33). – С. 35–40. – DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

**Панова Евгения Александровна**, канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; ea.panova@magtu.ru.

Поступила в редакцию 27 августа 2021 г.

DOI: 10.14529/power210405

## LONGITUDINAL IMPEDANCE OF A SINGLE-CIRCUIT POWER TRANSMISSION LINE WITH TWO LIGHTNING PROTECTION CABLES IN THE PROBLEM OF REMOTE FAULT LOCATION

**E.A. Panova**, ea.panova@magtu.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

One of the most important tasks in remote fault location in a 110 kV+ network is modeling the power lines taking into account the electromagnetic and electrostatic interaction of their conductive elements. A common approach is to use the mathematical models recommended by the guidelines for calculating short-circuit currents for relay protection. However, these models of power transmission lines take into account the geometric mean distance between the wires and the lightning protection cables, which means they average the values of the mutual induction impedances. In cases where wires and cables are located asymmetrically relative to each other, this leads to an overestimation of the zero-sequence impedance of power lines and, as a consequence, to an underestimation of the single-phase short-circuit current. This situation can affect the results of remote fault

location. To eliminate this drawback, the article proposes a combined equivalent circuit for a single-circuit power transmission line with two lightning protection cables, based on a combination of methods of phase coordinates and symmetric components. The given equivalent circuit of power transmission lines allows calculating the mode parameters using the method of symmetric components and, at the same time, simulating those of interest for calculating power lines using phase coordinates.

*Keywords:* power line, simulation, single-phase short circuit, unbalanced mode, phase coordinates, lightning protection wire.

### References

1. *Rukovodyashchie ukazaniya po releyroy zashchite. Vyp. 11. Raschet tokov korotkogo zamykaniya dlya releyroy 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.
2. Dikhno A.O., Makasheva S.I. [Modeling of Electromagnetic Processes in Parallel Power Transmission Lines]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century], 2019, vol. 2, pp. 227–231. (in Russ.)
3. Kabanov V.O. [Simulation of a High Voltage Power Line to Determine the Limit of the Transmitted Power]. *Energiya-2021: Tezisy dokladov Shestnadtsatoy vsrossiyskoy (vos'moy mezhdunarodnoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: v 7 t.* [Energy-2021: Abstracts of the Sixteenth All-Russian (Eighth International) Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists], 2021, Ivanovo, vol. 3, pp. 17. (in Russ.)
4. Rubanov N.V. [Simulation of Electric Transmission Lines of Extra High Voltage Class in MATLAB Software Complex]. *Colloquium-journal*, 2019, no. 24-2 (48), pp. 109–111. (in Russ.)
5. Bykovskaya L.V., Bykovskiy V.V. [Mathematical Modeling of Air Lines Operation Modes with Distributed Parameters]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2018, no. 5 (139), pp. 11–16. (in Russ.) DOI: 10.26730/1816-4528-2018-5-11-15
6. Belhocine M., Marinescu B. On the connections between used models of power transmission lines. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013. DOI: 10.1109/PESMG.2013.6673023
7. Adesina L.M., Ajenikoko G.A., Ogunbiyi O., Oluwafemi S.T. Symmetrical Components of Transmission Line Parameters based on the Installed Tower Ground Resistivity. *Int. J. Recent Technol. Eng.*, 2020, vol. 8, no. 6, pp. 1987–1993.
8. Panova E.A. *Povyshenie rezhimnoy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy v usloviyakh avariynoy nesimmetrii* [Increasing the operational reliability of power supply systems of industrial enterprises in conditions of emergency asymmetry. Cand. sci. diss.]. Magnitogorsk, 2012. 205 p.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Multi Asymmetrical Modes of Electric Systems]. Irkutsk, Irkutsk State University of Communications Publ., 2005. 273 p.
10. Berman A., Xu W. Analysis of faulted power systems by phase coordinates. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 587–595. DOI: 10.1109/61.660932
11. Mo M., Hang N. Fault Analysis and Application Based on Improved Phase-Coordinates Fixed-Point Iterative Method in Three-Phase Power Systems. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2019, vol. 14, pp. 1429–1440. DOI: 10.1007/s42835-019-00156-3
12. Vepryk Y.M., Nebera O.A. Unified Models of Elements of Power Supply Systems Based on Equations in Phase Coordinates. *Electr. Eng. Electromechanics*, 2015, no. 6. DOI: 10.20998/2074-272X.2015.6.10
13. Ebrahimi R., Babaee A., Hoseynpoor M. Evaluation and calculation of overhead line impedance in distribution networks. *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, 2011, vol. 5, no. 8, pp. 1278–1284.
14. Wang H., Wang L., Wang Y. et al. The electric energy loss in overhead ground wires of 110kV six-circuit transmission line on the same tower. *Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303319
15. Qi G., Zheng Y., Xia K. et al. Equivalent Circuit Parameters of Power Tap-Off from Insulated Shield Wires of High Voltage Transmission Lines at Different Rated Voltages. *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8642003
16. Zhang B., Wu C., Wang X. et al. Analysis of zero sequence power directional unit for multi-circuit transmission lines with different voltage levels. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017, pp. 5242–5246. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243711
17. Holbeck J.I., Lantz M.J. The Effects of Mutual Induction Between Parallel Transmission Lines on Current Flow to Ground Faults. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 1943, vol. 62, no. 11, pp. 712–715. DOI: 10.1109/T-AIEE.1943.5058634
18. Ukraintsev A.V., Nagay I.V. “Virtual” power line method to correct the calculation of current ground faults in the parallel overhead transmission lines 110–220 kV. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911473

19. Dias Pinto J.A., Paulo Coimbra A., Pereirinha P.G., Lemos Antunes C.F. Evaluation of the high voltage transmission line inductance and capacitance using the finite element approach. *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 1998, vol. 17, no. 3, pp. 313–317. DOI: 10.1108/03321649810203224

20. 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* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 35–40. (in Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40

*Received 27 August 2021*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панова, Е.А. Продольное сопротивление одноцепной ЛЭП с двумя грозозащитными тросами в задаче дистанционного ОМП / Е.А. Панова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 40–47. DOI: 10.14529/power210405

#### FOR CITATION

Panova E.A. Longitudinal Impedance of a Single-Circuit Power Transmission Line with Two Lightning Protection Cables in the Problem of Remote Fault Location. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 40–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210405

---