

Панова Е.А.¹, Крюкова А.А.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ОАО «Магнитогорскгражданпроект»

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФАЗНЫХ КООРДИНАТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Расчет режима однофазного короткого замыкания в сети с эффективно заземленной нейтралью связан с рядом трудностей. Одна из них связана с необходимостью учета взаимоиндукции между проводящими элементами линии электропередачи (ЛЭП). Действующие руководящие указания предполагают учет данного явления с помощью метода симметричных составляющих, однако приведенные там выражения для определения сопротивления ЛЭП действительны только для линий с полным циклом транспозиции. В системах электроснабжения промышленных предприятий ЛЭП напряжением 110 кВ имеют сравнительно небольшую протяженность и потому являются нетранспонированными. Авторами предложена комбинированная схема замещения электрической сети, позволяющая моделировать ЛЭП с использованием метода фазных координат, а остальные элементы сети в симметричных составляющих. Такой подход эффективен для учета несимметрии расположения проводов и грозозащитного троса друг относительно друга на опоре. В статье приведена математическая модель ЛЭП, а также выполнено сравнение сопротивлений линий, определенных различными способами. Также выполнен расчет токов однофазного короткого замыкания в условиях реального объекта – системы электроснабжения крупного предприятия черной металлургии. Расчеты выполнены как для случая короткого замыкания на распределительном устройстве подстанции, так и для случая короткого замыкания на ЛЭП. Разработанная математическая модель ЛЭП реализована в программном комплексе КАТРАН.

Ключевые слова: система электроснабжения, линия электропередачи, взаимная индуктивность, короткое замыкание, несимметричный режим, фазные координаты, моделирование, КАТРАН, симметричные составляющие, режим.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование элементов электрической сети с целью выполнения расчетов параметров несимметричного режима (нормального или аварийного) может быть выполнено различными способами. Одним из наиболее простых является метод симметричных составляющих, основы которого подробно изложены в [1]. Данный метод может быть успешно использован для моделирования несимметричных режимов работы, в частности коротких замыканий [2], неполнофазных режимов [3], а также режимов сложной несимметрии [4]. Также данный метод может быть использован для моделирования линий электропередачи с учетом взаимоиндуктивного влияния их проводящих элементов [5–7].

Очевидным недостатком метода симметричных составляющих является отсутствие возможности учета пофазной несимметрии элементов сети. Указанный недостаток можно устранить применением метода фазных координат [8]. Фазные координаты широко используются для моделирования несимметричных режимов электрической сети [9–12], в том числе сложных видов повреждений [13]. Также данный метод удобен для моделирования электрических сетей с симметрирующими устройствами и устройствами FACTS [14, 15], учета электромагнитного влияния смежных линий [16]. Большое количество работ посвящено моделированию отдельных элементов сети в фазных координатах, таких как трансформаторы, синхронные двигатели и генераторы [17–20].

Использование метода фазных координат также связано с некоторыми сложностями. Так, при моделировании электрической сети в фазных координатах для расчета её режима может быть применен метод узловых напряжений или контурных токов. Однако это либо вносит погрешности при наличии ветвей с нулевым сопротивлением, так как их приходится заменять

ветвью с малым сопротивлением, чтобы избежать слабой заполненности матрицы узловых проводимостей, либо приводит к погрешностям при наличии обрыва в сети [21]. Устранить указанный недостаток можно, используя схему замещения, являющуюся комбинацией трехлинейной и однолинейной схем. При этом участки, для которых важен учет пофазной несимметрии, моделируются в фазных координатах, а остальная часть схемы с использованием метода симметричных составляющих. Авторами предлагается использовать такой подход к моделированию линий электропередачи напряжением 110 и 220 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий. Актуальность поставленной задачи обусловлена сравнительно малой протяженностью указанных линий (до 15 км), в силу чего они все являются нетранспонированными, а значит, при несимметричном расположении проводящих элементов на опоре сопротивление ЛЭП по фазам будет отличаться. Этим различием можно пренебречь при расчете установившегося режима, однако, при расчетах режима однофазного короткого замыкания, особенно с целью определения места повреждения, его необходимо учитывать.

КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

На **рис. 1** упрощенно представлена комбинированная схема замещения. На ней в качестве примера приведена трехфазная схема замещения одноцепной ЛЭП с грозозащитным тросом. На **рис. 1** приняты следующие обозначения: Z_A, Z_B, Z_C – собственные сопротивления фаз; Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{AC} – сопротивления взаимоиндукции «фаза-фаза»; Z_T – сопротивление грозозащитного троса; Z_{AT}, Z_{BT}, Z_{CT} – сопротивления взаимоиндукции «фаза-трос»; Z_1, Z_2, Z_0 – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности; E_1 – ЭДС прямой последовательности; s, s^{-1} – промежуточные элементы, осуществляющие перевод фазных координат в симметричные составляющие.

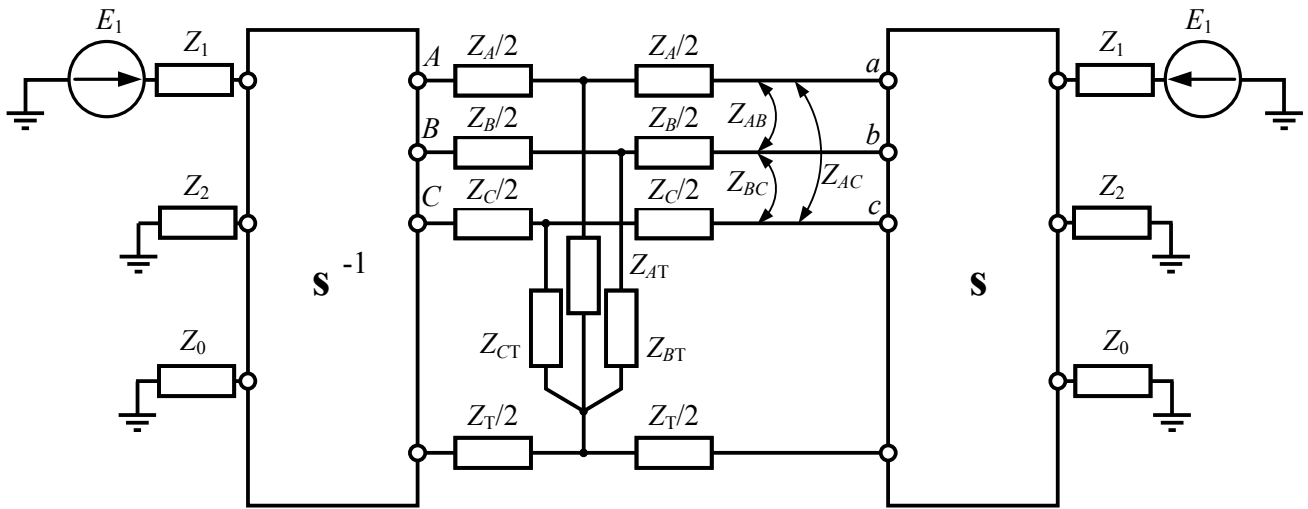


Рис. 1. Комбинированная схема замещения

Элементы матриц s и s^{-1} определяются следующим образом:

$$\dot{s} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\dot{s}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\dot{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор, осуществляющий поворот вектора на 120° .

Фазные и междуфазные сопротивления ЛЭП в фазных координатах представляет собой матрицу размерностью 3×3 .

$$\dot{Z}_{LM} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_A & \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AC} \\ \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_B & \dot{Z}_{BC} \\ \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_C \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а для двухцепной ЛЭП – 9×9

$$\dot{Z}_{LM} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_A & \dot{Z}_{AB} & \dot{Z}_{AC} & \dot{Z}_{Aa} & \dot{Z}_{Ab} & \dot{Z}_{Ac} \\ \dot{Z}_{BA} & \dot{Z}_B & \dot{Z}_{BC} & \dot{Z}_{Ba} & \dot{Z}_{Bb} & \dot{Z}_{Bc} \\ \dot{Z}_{CA} & \dot{Z}_{CB} & \dot{Z}_C & \dot{Z}_{Ca} & \dot{Z}_{Cb} & \dot{Z}_{Cc} \\ \dot{Z}_{aA} & \dot{Z}_{aB} & \dot{Z}_{aC} & \dot{Z}_a & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{bA} & \dot{Z}_{bB} & \dot{Z}_{bC} & \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_b & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{cA} & \dot{Z}_{cB} & \dot{Z}_{cC} & \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_c \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Сопротивления «фаза-трос» также представляют собой матрицу

$$\dot{Z}_{\text{нт}} = \begin{pmatrix} \dot{Z}_{AT} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_{BT} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_{CT} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Преобразование сопротивления в фазных координатах в сопротивления в симметричных составляющих выполняется по следующей формуле:

$$\dot{Z}_S = \dot{s}^{-1} \cdot \dot{Z}_{LM} \cdot \dot{s}. \quad (6)$$

Выполнив преобразование по (6), получим матрицу, диагональные элементы которой являются сопротивлениями ЛЭП по прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= \frac{1}{3} [\dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_C - (\dot{Z}_{AC} + \dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC})], \\ \dot{Z}_2 &= \frac{1}{3} [\dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_C - (\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{AC})], \\ \dot{Z}_0 &= \frac{1}{3} [\dot{Z}_A + \dot{Z}_B + \dot{Z}_C + 2(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{AC})]. \end{aligned} \quad (7)$$

Собственные сопротивления фаз определяются по [5]

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = r_{\text{п}} + r_3 + j0,145 \lg \frac{D_3}{\rho_{\text{эл}}}, \quad (8)$$

где $r_{\text{п}}$ – активное сопротивление провода, Ом/км; $r_3 = 0,15$ Ом/км – сопротивление, учитывающего потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока; $D_3 = 935$ м – эквивалентная глубина расположения обратного провода; $\rho_{\text{эл}}$ – эквивалентный радиус провода, м (для сталеалюминевых проводов $\rho_{\text{эл}} = 0,95 \rho_{\text{п}}$).

Сопротивления взаимной индукции «фаза-фаза»

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{AB} &= r_3 + j0,145 \lg (D_3 / D_{AB}), \\ \dot{Z}_{BC} &= r_3 + j0,145 \lg (D_3 / D_{BC}), \\ \dot{Z}_{AC} &= r_3 + j0,145 \lg (D_3 / D_{AC}), \end{aligned} \quad (9)$$

где D_{AB} , D_{BC} , D_{AC} – расстояния между соответствующими фазами, м.

Для линий электропередачи с грозозащитным тросом необходимо определить сопротивление взаимной индукции «провод-трос». Данное сопротивление также преобразуется из фазных координат в симметричные составляющие подстановкой (5) в (6). Для всех после-

довательностей получим

$$\dot{Z}_{\text{нТ}} = \frac{1}{3}(\dot{Z}_{\text{АТ}} + \dot{Z}_{\text{ВТ}} + \dot{Z}_{\text{СТ}}). \quad (10)$$

Сопротивление взаимной индукции «провод-трос» для каждой фазы

$$\dot{Z}_{\text{фТ}} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{\text{фТ}}}, \quad (11)$$

где $D_{\text{фТ}}$ – расстояние от провода соответствующей фазы до грозозащитного троса.

В соответствии с [5] сопротивление троса для схемы нулевой последовательности:

$$\dot{Z}_{0\text{Т}} = 3r_{\text{Т}} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{\rho_{\text{Э.Т}}}, \quad (12)$$

где $\rho_{\text{Э.Т}}$ – эквивалентный радиус троса, м.

Результирующее сопротивление ЛЭП с тросом

$$\dot{Z}_0^{(\text{Т})} = \dot{Z}_0 - \frac{\dot{Z}_{\text{нТ}}^2}{\dot{Z}_{0\text{Т}}}. \quad (13)$$

Для двухцепных ЛЭП с тросом к $\dot{Z}_0^{(\text{Т})}$ необходимо прибавить сопротивление взаимной индукции между цепями, которое вычисляется аналогично (7) и равно

$$\dot{Z}_0 = \frac{1}{3}[\dot{Z}_{\text{Аа}} + \dot{Z}_{\text{Вв}} + \dot{Z}_{\text{Сс}} + 2(\dot{Z}_{\text{Ав}} + \dot{Z}_{\text{Вс}} + \dot{Z}_{\text{Ас}})]. \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Разработанная модель линии электропередачи реализована в программном комплексе КАТРАН, разработанном на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Для оценки полученной модели в табл. 1 приведены удельные сопротивления двухцепной ЛЭП с одним грозотросом марки ТК-9,1, выполненной проводом АС-300/39 на опоре У-110-2.

Значения сопротивлений по последовательностям, полученных методом фазных координат, оказались меньше, чем тех же сопротивлений, рассчитанных по руководящим указаниям [5]. Это обусловлено тем, что в комбинированной схеме замещения использовались фактические расстояния между проводами, а при расчете по руководящим указаниям – среднегеометрические. Однако сопротивления по справочным данным для нулевой последовательности оказались меньше, чем рассчитанные по руководящим указаниям. Это объясняется тем, что в справочных данных сопротивление линии АС-300/39 не приводится для уровня напряжения 110 кВ, поэтому сопротивление принималось для напряжения 220 кВ, среднегеометрическое расстояние для которого – 8 м, что не соответствует среднегеометрическому расстоянию на опоре У-110-2.

Разработанная математическая модель и программный комплекс были использованы для выполнения расчетов токов однофазного короткого замыкания

в условиях Магнитогорского энергетического узла (МЭУ). Он представляет собой сложную замкнутую сеть напряжением 110 и 220 кВ. Источниками электроснабжения являются собственные электростанции суммарной установленной мощностью более 600 МВт, а также узлы примыкания к энергосистеме. Сеть 110 кВ разделена на два полукольца, имеющих связь через сеть 220 кВ. На рис. 2 приведена упрощенная схема «южного» полукольца МЭУ. Результаты расчета токов однофазного короткого замыкания с использованием разработанной комбинированной схемы замещения и упрощенной схемы представлены в табл. 2.

Таблица 1

Удельные сопротивления, Ом/км

Способ моделирования	\dot{Z}_1, \dot{Z}_2	\dot{Z}_0
Упрощенная схема замещения	0,098+j0,429	0,46+j2,0163
Расчет по [5]	0,097+j0,428	0,498+j2,306
Комбинированная схема замещения	0,097+j0,395	0,397+j2,194

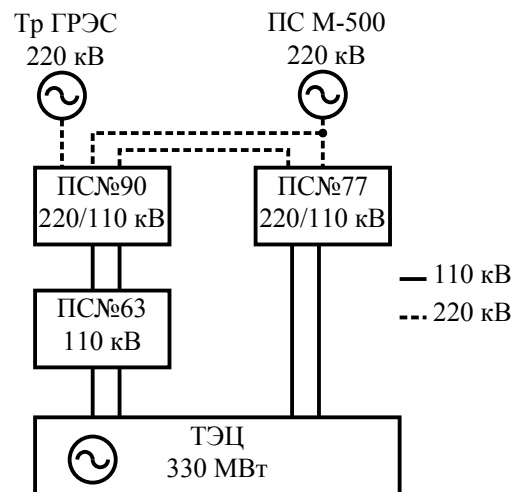


Рис. 2. Упрощенная схема «южного» полукольца МЭУ

Таблица 2

Результаты расчета тока однофазного короткого замыкания на РУ 110–220 кВ «южного» полукольца МЭУ

Ток, кА	Модель ЛЭП	ТЭЦ 110 кВ	ПС №77 220 кВ	ПС №77 110 кВ	ПС №90 220 кВ	ПС №90 110 кВ	ПС №63 110 кВ
$I_{\text{кз}}$	1	24,11	16,8	23,5	17,71	20,43	11,86
	2	25,23	16,94	24,34	17,74	20,77	12,62
ΔI		1,12	0,14	0,84	0,03	0,34	0,76
I_1	1	7,53	4,52	7,34	5,58	6,43	5,22
	2	7,41	5,08	7,22	5,52	6,28	4,99
ΔI		–0,12	0,56	–0,12	–0,06	–0,15	–0,23
I_2	1	6,9	4,96	6,67	5,74	6,15	4,81
	2	6,83	4,95	6,59	5,73	6,06	4,63
ΔI		–0,07	–0,01	–0,08	–0,01	–0,09	–0,18
I_0	1	5,63	3,89	5,53	3,7	4,58	1,08
	2	6,4	4	6,13	3,75	4,91	1,76
ΔI		0,77	0,11	0,6	0,05	0,33	0,68

Примечание. 1 – комбинированная схема замещения; 2 – упрощенная схема замещения.

Из табл. 2 видно, что при расчетах токов короткого замыкания прямой и обратной последовательности использование уточненной схемы замещения дает большие значения токов короткого замыкания, по сравнению с использованием упрощенной схемы замещения ЛЭП. Это обусловлено наличием сопротивления взаимоиндукции, которое уменьшает сопротивление прямой и обратной последовательности линии.

Токи нулевой последовательности, рассчитанные с помощью метода фазных координат, оказываются меньше, так как сопротивление взаимоиндукции проводов увеличивает собственное сопротивление линии по нулевой последовательности.

Фазные токи по уточненной схеме замещения оказались меньше, чем фазные токи по упрощенной, так как являются геометрической суммой токов симметричных составляющих и поэтому их изменение обусловлено изменением токов последовательностей.

Разработанная комбинированная схема замещения ЛЭП может быть эффективна при расчетах тока однофазного короткого замыкания с целью дистанционного определения места повреждения. В качестве примера в статье приведен расчет для линии ТЭЦ-ПС №77. Значения токов фиксировались для начала и конца линии и точки КЗ. Токи короткого замыкания рассчитывались тремя способами: с использованием упрощенной схемы замещения ЛЭП (по удельным справочным сопротивлениям), схемы замещения в соответствии с руководящими указаниями [5] и схемы замещения в фазных координатах. Результаты представлены на рис. 3.

Видно, что использование упрощенной схемы замещения ЛЭП дает завышенные значения токов КЗ. Это объясняется тем, что справочные данные для проводов марки АС-300 определены для среднегеометрических расстояний между фазами, соответствующих уровню напряжения 220 кВ, а в схеме замещения нулевой последовательности наличие троса учтено введением коэффициента. Использование выражений, приведенных в [5], дает меньшие значения токов, однако данные выражения справедливы для линий с полным циклом транспозиции. Так как в промышленных системах электроснабжения ЛЭП имеют сравнительно небольшую протяженность, транспозиция на них не применяется, поэтому при расчете токов КЗ с целью ОМП для повышения точности необходимо учитывать несимметрию расположения проводящих элементов на опоре друг относительно друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами разработана комбинированная схема замещения, в которой ЛЭП моделируется в фазных координатах. Полученная схема замещения позволяет учесть несимметрию расположения проводящих элементов ЛЭП на опоре, что особенно актуально для нетранспонированных ЛЭП в системах электроснабжения промышленных предприятий. При этом остальная часть схемы может быть смоделирована в симметричных составляющих, что упрощает составление схемы замещения и повышает сходимость расчетов.

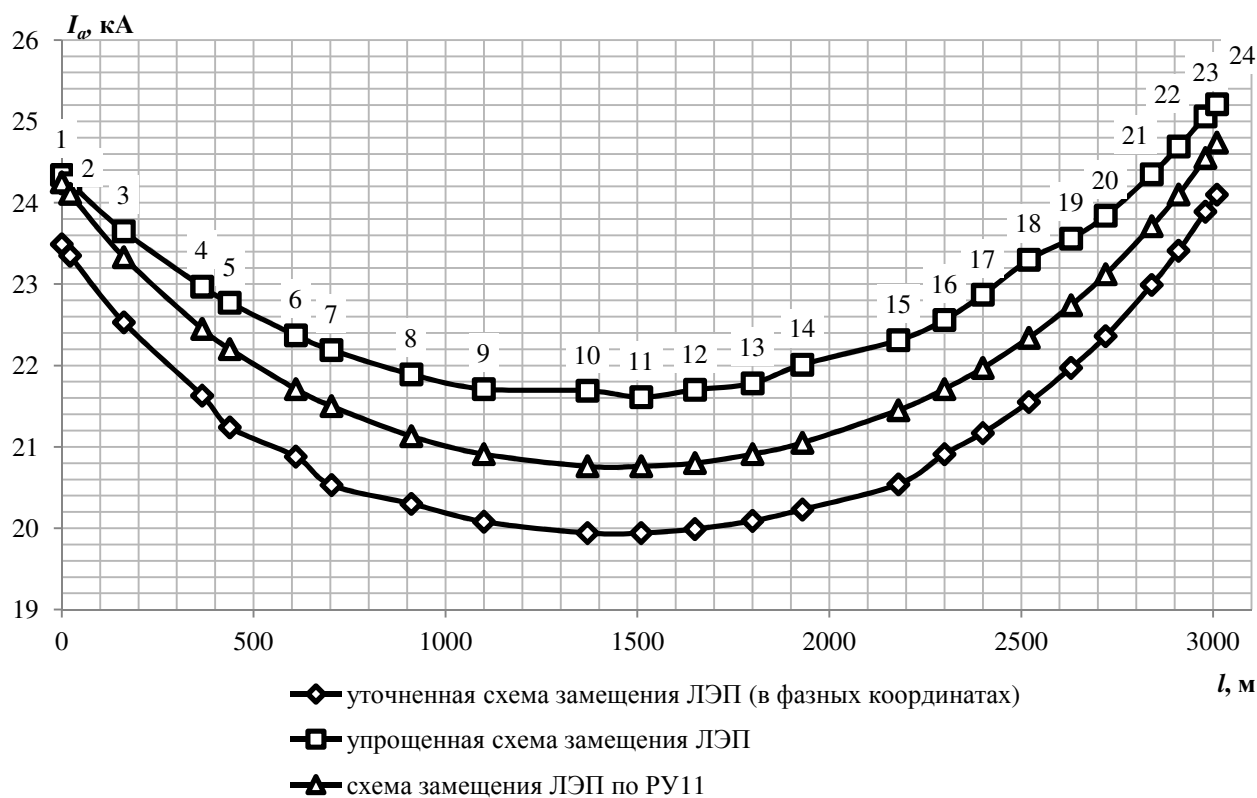


Рис. 3. Ток однофазного короткого замыкания на опорах ЛЭП ПС №77-ТЭЦ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Щедрин Н. Токи короткого замыкания высоковольтных систем: учебное пособие для энергет. вузов. М.; Л.: Объед. науч. техн. изд-во НКТП СССР, гл. ред. энергет. лит., 1935. 457 с.
- Панова Е.А. Повышение режимной надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в условиях аварийной несимметрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 25.05.12: утв. 10.06.13 / Панова Евгения Александровна. Магнитогорск, 2012. 205 с. Библиогр.: с. 137–157.
- Моделирование неполнофазных аварийных режимов в задаче расчёта и анализа работы систем промышленного электроснабжения / А.В. Малафеев, Е.А. Панова, С.В. Беляев, А.А. Емельянов, А.Я. Альбрехт, О.Ю. Биктеева // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С.119–123.
- Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Главный энергетик. 2011. №3. С.35–39.
- 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.
- Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.35–40. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
- Панова Е.А., Савельева К.С. Определение удельных электрических параметров воздушных линий электропередачи // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №10. С.16–22.
- Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1983. 528 с.
- Гусейнов Ак.М., Ибрагимов Ф.Ш. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. 2012. №5. С. 10–17.
- Гусейнов Ак.М., Ибрагимов Ф.Ш. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах // Электричество. 2012. №7. С. 23–34.
- He W.X., Teo C.Y. Unbalanced short-circuit calculation by phase coordinates, Energy Management and Power Delivery, 1995. Proceedings of EMPD '95., 1995 International Conference on, 1995, pp. 744–748, vol. 2. doi: 10.1109/EMPD.1995.500821
- Berman A., Xu Wilsun. Analysis of faulted power systems by phase coordinates, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 587–595, Apr 1998. doi: 10.1109/61.660932
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование сложных повреждений в электрических сетях на основе фазных координат // Системы. Методы. Технологии. 2010. №6. С. 46–52.
- Попов Н.М., Петрищев М.В. Моделирование линии с симметрирующим устройством в фазных координатах // Тр. Международной науч.-техн. конф. энергообеспечение и энергосбережение в сельском хоз-ве. 2012. Т. 1. С. 116–121.
- Ramirez J.M., Davalos R.J.M., Haro P.Z., Perez R.C. FACTS devices embedded into a power system in phase coordinates, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., Denver, CO, 2004, pp. 1527–1534, vol. 2. doi: 10.1109/PES.2004.1373128
- Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах: монография. Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2009. 120 с.
- L. A. F. R., Iov F., Blaabjerg F., Hansen A. D. Advanced Induction Machine model in Phase Coordinates for Wind Turbine Application, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 1189–1194. doi: 10.1109/IEMDC.2007.383599
- Lagace P. J., Vuong M. H., Al-Haddad K. A time domain model for transient simulation of synchronous machines using phase coordinates, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, 6 p. doi: 10.1109/PES.2006.1709083
- Yu Ting-Chung, Marti J. R., A robust phase-coordinates frequency-dependent underground cable model (zCable) for the EMTP, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 189–194, Jan 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2002.807749
- Svenda G. S., Nahman J. M., Transformer phase coordinate models extended for grounding system analysis, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 1023–1029, Oct 2002. doi: 10.1109/TPWRD.2002.803799
- Осак А.Б. Практические методы расчета токов короткого замыкания в ЭЭС при сложных видах замыканий с использованием фазных координат // Технические науки – от теории к практике. 2016. №55. С.181–190.

Поступила в редакцию 31 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF PHASE COORDINATES TO AN INDUSTRIAL POWER SUPPLY SYSTEM OVERHEAD TRANSMISSION LINES SIMULATION

Evgeniya A. Panova

Ph.D (Eng.), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ea.panova@magtu.ru

Anastasiya A. Kryukova

Electrical department engineer, "Magnitogorskgrazhdanproekt" OJSC, Magnitogorsk, Russia.

Computation of a single-phase short circuit mode of an effectively grounded network faces a number of difficulties. One of them is the need of calculation of mutual inductance between conducting elements of an overhead transmission line (OHTL). Current guidelines refer to the symmetrical components method for mutual inductance calculation, but their formulas of OHTL complex impedance are good only for barrel OHTL. In 110 kV industrial electric power supply system OHTL are relatively short and therefore are nontransposed. The authors introduce a com-

bined equivalent scheme, which makes it possible to simulate OHTL with phase coordinates method and the rest network with symmetrical components. Such an approach is preferment for introduction of unsymmetrical position of wires and ropes on the line tower. The paper gives OHTL mathematical model and a comparison of line impedance calculated by different ways. Also the computation of a single-phase short circuit currents is conducted in the context of a real object – iron-and-steel industry enterprise electric power system. The computation is conducted

not only for the short circuit on the bus bars, but also for an OHTL short circuit. Elaborated OHTL mathematical model is applied in KATRAN software.

Keywords: Electric power system, overhead transmission line, mutual inductance, short circuit, unbalanced mode, phase coordinates, simulation, KATRAN, symmetrical components, mode.

REFERENCES

- Shchedrin N. *Toki korotkogo замыкания высоковольтных систем* [Short-circuit current of an electric power system]. Moscow, Leningrad, United scientific technical Publ. of USSR NKTP, general Publ. of power Eng. literature, 1935. 457 p.
- Panova E.A. *Povyshenie rezhimnoy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennyykh predpriyatiy v usloviyakh avariynoy nesimmetrii* [Performance reliability enhancement in industrial electric power systems in terms of out-of-balance emergency operating conditions. Ph.D(Eng.) Diss.]. Magnitogorsk, 2015. 205 p.
- Malafeev A.V., Panova E.A., Belyaev S.V., Emel'yanov A.A., Al'brekht A.Ya., Bikteeva O.Yu. Simulation of openphase mode in the problem of computation and analysis of industrial electric power system operation. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of higher education institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 119–123. (In Russian)
- Malafeev A.V., Panova E.A. The algorithm of complex outof-balance operation mode computation in industrial electric power systems. *Glavnyy energetik* [Chief power engineer], 2010, no. 3, pp. 35–39. (In Russian)
- Guidelines on relay protection. Iss.11. Short-circuit current calculation for relay protection and system automatics in 110–750 kV network. Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p.
- 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 Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
- Panova E.A., Saveleva K.S. Evaluation of specific electric parameters of overhead transmission lines. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: exploitation and maintenance], 2014, no. 10, pp. 16–22. (In Russian)
- Losev S.B., Chernin A.B. *Vychislenie elektricheskikh velichin v nesimmetrichnykh rezhimakh elektricheskikh sistem* [Calculation of electrical parameters in an unbalanced mode of electric power system]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 528 p.
- Guseynov Ak.M., Ibragimov F.Sh. Computation in phase coordinates of an unbalanced steady state and transient modes in complex power grids. *Elektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 5, pp. 10–17. (In Russian)
- Guseynov Ak.M., Ibragimov F.Sh. Computation in phase coordinates of an unbalanced steady state and transient modes in complex power grids. *Elektrichestvo* [Electricity], 2012, no. 7, pp. 23–34. (In Russian)
- He W.X., Teo C.Y. Unbalanced short-circuit calculation by phase coordinates, Energy Management and Power Delivery, 1995. Proceedings of EMPD '95., 1995 International Conference on, 1995, pp. 744–748, vol. 2. doi: 10.1109/EMPD.1995.500821
- Berman A., Xu Wilsun. Analysis of faulted power systems by phase coordinates, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 587–595, Apr 1998. doi: 10.1109/61.660932
- Zakarjukin V.P., Kryukov A.V. Modelling of difficult damages in electric networks on the basis of phase coordinates. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2010, no. 6, pp. 46–52. (In Russian)
- Popov N.M., Petrishchev M.V. Simulation of overhead transmission lines with balancer set using phase coordinates. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaystve* [Papers of the international scientific conference on power supply and power saving in agriculture], 2012, vol. 1, pp. 116–121. (In Russian)
- Ramirez J.M., Davalos R.J.M., Haro P.Z., Perez R.C. FACTS devices embedded into a power system in phase coordinates, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., Denver, CO, 2004, pp. 1527–1534, vol. 2. doi: 10.1109/PES.2004.1373128
- Zakarjukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy na smezhnye LEP na osnove rascheta rezhimov energosistemy v faznykh koordinatakh* [Modeling of electromagnetic influences on adjacent power lines on the basis of mode calculation in phase coordinates]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2009, 120 p.
- L. A. F. R., Iov F., Blaabjerg F., Hansen A. D. Advanced Induction Machine model in Phase Coordinates for Wind Turbine Application, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 1189–1194. doi: 10.1109/IEMDC.2007.383599
- Lagace P. J., Vuong M. H., Al-Haddad K. A time domain model for transient simulation of synchronous machines using phase coordinates, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, 6 p. doi: 10.1109/PES.2006.1709083
- Yu Ting-Chung, Marti J. R., A robust phase-coordinates frequency-dependent underground cable model (zCable) for the EMTP, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 189–194, Jan 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2002.807749
- Svenda G. S., Nahman J. M., Transformer phase coordinate models extended for grounding system analysis, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 1023–1029, Oct 2002. doi: 10.1109/TPWRD.2002.803799
- Osak A.B. Practical methods of complex fault current computation in power grid with phase coordinates. *Tekhnicheskije nauki - ot teorii k praktike* [Technical science – from theory to practice], 2016, no. 55, pp. 181–190. (In Russian)

Панова Е.А., Крюкова А.А. Применение метода фазных координат для моделирования линий электропередачи систем промышленного электроснабжения // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 29–34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-29-34)

Panova E.A., Kryukova A.A. Application Of Phase Coordinates To An Industrial Power Supply System Overhead Transmission Lines Simulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 29–34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-29-34)