

Авторы:

к.т.н. Петров В.С.^{1,2},
Фёдоров А.О.^{1,2},
Разумов Р.В.³,
Петров А.А.³

¹ЧГУ им. И.Н. Ульянова,

²ООО «ЭКРА ИТ»,

³ООО НПП «ЭКРА»,

г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Petrov V.S.^{1,2},

Fedorov A.O.^{1,2},

Razumov R.V.³,

Petrov A.A.³

¹Chuvash State University,

²«ЭКРА ИТ» LTD,

³«ЭКРА» R&P

Enterprise LTD,

Cheboksary, Russia.

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

FEATURES OF TRAVELING WAVE FAULT LOCATION ON CABLE LINE

Аннотация: преобразования Кларк, Карренбауэра и Ведпола в классическом виде не могут быть применены к электрическим величинам кабельной линии электропередачи, поскольку её конструкция отличается от конструкции воздушной линии. Цель настоящей статьи – формирование рекомендаций по применению модального преобразования электрических величин кабельной линии класса напряжения 35–500 кВ при волновом определении места повреждения. Полученные теоретические выводы подтверждаются практическим примером моделирования однофазного короткого замыкания на трехфазной группе одножильных экранированных кабелей.

Ключевые слова: модальное преобразование, кабельная линия электропередачи, волновое определение места повреждения.

Abstract: the classical form of Clark, Karrenbauer and Wedpole transforms cannot be applied to the electrical values of a cable line, since its construction differs from the construction of an overhead line. The purpose of this article is to develop recommendations for the use of modal transformation of a 35 – 500 kV cable line electrical values for traveling wave fault location. The theoretical obtained conclusions are confirmed by a practical example of modeling a phase-to-ground short circuit on a three-phase group of single-core shielded cables.

Keywords: modal transformation, cable line, traveling wave fault location.

Введение

При коротком замыкании (КЗ) на воздушной линии электропередачи (ЛЭП) волны в фазах содержат составляющие двух воздушных и одного земляного волновых каналов [1, 2]. Из-за разной скорости распространения этих составляющих в месте установки устройства волнового определения места повреждения (ОМП) они возникают в разное время [3–5]. Это приводит к тому, что фронты волн в фазах становятся менее выраженными, и, следовательно, снижается точность фиксации моментов их возникновения и точность определения расстояния до места повреждения [6, 7]. Для разделения фазных величин воздушной ЛЭП на независимые составляющие волновых каналов используются инвариантные преобразования Кларк [8–12], Карренбауэра [10, 13] или Ведпола [10, 14]. Однако данные преобразования в классическом виде не могут быть применены к электрическим величинам кабельной линии (КЛ), поскольку её конструкция отличается от конструкции воздушной ЛЭП.

Цель настоящей статьи – формирование рекомендаций по использованию модального преобразования электрических вели-

чин КЛ, состоящей из трех одножильных экранированных кабелей.

Формулировка проблемы

Сегодня в электрических сетях с номинальным напряжением 35–500 кВ среди КЛ наиболее распространены линии, представляющие собой трехфазную группу одножильных экранированных кабелей [15]. Поэтому сначала рассмотрим взаимосвязь электрических величин в одном из них, а затем распространим полученные закономерности на трехфазную группу.

Токи и напряжения в одножильном экранированном кабеле связаны соотношениями (рис. 1) [16]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{U}_1(x, p) \\ \underline{U}_2(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1(p) & -\underline{Z}_{12}(p) \\ -\underline{Z}_{12}(p) & \underline{Z}_2(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1(x, p) \\ \underline{I}_2(x, p) \end{bmatrix}, \\ -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{I}_1(x, p) \\ \underline{I}_2(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1(p) & 0 \\ 0 & \underline{Y}_2(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1(x, p) \\ \underline{U}_2(x, p) \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\underline{I}_1(x, p)$ – ток, протекающий по жиле;
 $\underline{I}_2(x, p)$ – ток, протекающий по наружной поверхности экрана;

$\underline{U}_1(x, p)$ – напряжение между жилой и экраном;

$\underline{U}_2(x, p)$ – напряжение между экраном и землей;

$\underline{Z}_1(p) = \underline{Z}_c^{out}(p) + \underline{Z}_{is}^{in}(p) + \underline{Z}_s^{in}(p)$, $\underline{Z}_c^{out}(p)$ – удельное сопротивление внешней поверхности жилы;

$\underline{Z}_{is}^{in}(p)$ – удельное сопротивление внутренней изоляции;

$\underline{Z}_s^{in}(p)$ – удельное сопротивление внутренней поверхности экрана;

$\underline{Z}_2(p) = \underline{Z}_s^{out}(p) + \underline{Z}_{is}^{out}(p) + \underline{Z}_g(p)$, $\underline{Z}_s^{out}(p)$ – удельное сопротивление внешней поверхности экрана;

$\underline{Z}_{is}^{out}(p)$ – удельное сопротивление внешней изоляции;

$\underline{Z}_g(p)$ – сопротивление поверхности земли;

$\underline{Z}_{12}(p)$ – удельное внутреннее сопротивление экрана;

$\underline{Y}_1(p)$ и $\underline{Y}_2(p)$ – удельные емкостные проводимости внутренней и внешней изоляции.

Из рис. 1 видно, что:

$$\begin{cases} \underline{U}_1(x, p) = \underline{U}_c(x, p) - \underline{U}_2(x, p), \\ \underline{I}_2(x, p) = \underline{I}_s(x, p) + \underline{I}_1(x, p), \end{cases} \quad (2)$$

где $\underline{U}_c(x, p)$ и $\underline{I}_s(x, p)$ – фазное напряжение жилы и ток в экране соответственно.

Для удобства введем обозначения: $\underline{I}_1(x, p) = \underline{I}_c(x, p)$ и $\underline{U}_2(x, p) = \underline{U}_s(x, p)$. Тогда из (1) и (2) получим телеграфные уравнения одножильного экранированного кабеля:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{U}_c(x, p) \\ \underline{U}_s(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{cc}(p) & \underline{Z}_c(p) \\ \underline{Z}_{cs}(p) & \underline{Z}_{ss}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_c(x, p) \\ \underline{I}_s(x, p) \end{bmatrix}, \\ -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{I}_c(x, p) \\ \underline{I}_s(x, p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{cc}(p) & -\underline{Y}_{cs}(p) \\ -\underline{Y}_{cs}(p) & \underline{Y}_{ss}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_c(x, p) \\ \underline{U}_s(x, p) \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ss}(p) &= \underline{Z}_2(p), \\ \underline{Z}_{cc}(p) &= \underline{Z}_1(p) - 2\underline{Z}_{12}(p) + \underline{Z}_2(p), \\ \underline{Z}_{cs}(p) &= -\underline{Z}_{12}(p) + \underline{Z}_2(p), \\ \underline{Y}_{ss}(p) &= \underline{Y}_1(p) + \underline{Y}_2(p), \\ \underline{Y}_{cc}(p) &= \underline{Y}_1(p). \end{aligned}$$

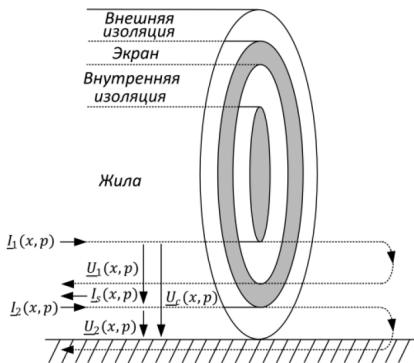


Рис. 1. Одножильный экранированный кабель

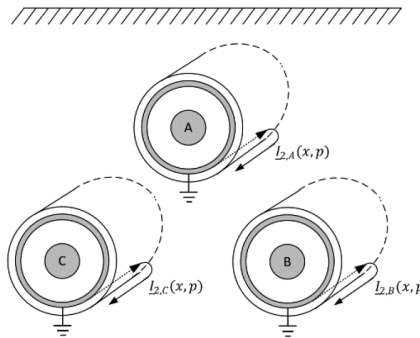


Рис. 2. Трехфазная группа одножильных экранированных кабелей

Теперь распространим рассуждения на симметричную трехфазную группу одножильных экранированных кабелей (рис. 2). При этом учтем, что:

- электромагнитная связь между одножильными кабелями обусловлена лишь токами в их экранах [16];
- ёмкостная проводимость между экранами кабелей может быть принята равной нулю, поскольку они заземлены [16].

С учетом (1) для симметричной трехфазной группы кабелей получим:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & -\underline{Z}_{12} \\ -\underline{Z}_{12} & \underline{Z}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}, \\ -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \underline{Y}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (4)$$

где \underline{U}_1 и \underline{U}_2 , \underline{I}_1 и \underline{I}_2 – векторы-столбцы, состоящие из $\underline{U}_{1,v}(x, p)$ и $\underline{U}_{2,v}(x, p)$, $\underline{I}_{1,v}(x, p)$ и $\underline{I}_{2,v}(x, p)$, соответственно,

$v = A, B, C$, \underline{Z}_1 и \underline{Z}_{12} , \underline{Y}_1 и \underline{Y}_2 – диагональные матрицы, элементы на главной диагонали которых равны $\underline{Z}_1(p)$ и $\underline{Z}_{12}(p)$, $\underline{Y}_1(p)$ и $\underline{Y}_2(p)$, соответственно,

\underline{Z}_2 – матрица, элементы на главной диагонали которой равны $\underline{Z}_2(p)$, а все остальные – удельному междуфазному сопротивлению $\underline{Z}_m(p)$.

Из (4), с учетом (2) и принимая во внимание, что удельное внутреннее сопротивление экрана $\underline{Z}_{12}(p) \approx 0$, получим [17]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{U}_c \\ \underline{U}_s \end{bmatrix} = \underline{Z} \begin{bmatrix} \underline{I}_c \\ \underline{I}_s \end{bmatrix}, \\ -\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \underline{I}_c \\ \underline{I}_s \end{bmatrix} = \underline{Y} \begin{bmatrix} \underline{U}_c \\ \underline{U}_s \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (5)$$



Петров

Владимир Сергеевич

В 2010 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова получил степень магистра по направлению «Электроэнергетика» по профилю «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность».

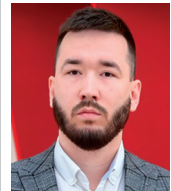
В 2015 г. в ЧГУ

им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ».

Доцент кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Руководитель группы

ООО «ЭКРА ИТ».



Федоров

Алексей Олегович

В 2020 г. в ЧГУ

им. И.Н. Ульянова получил степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность».

Аспирант кафедры

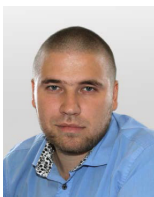
ТОЭ и РЗА

ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

Инженер-исследователь

2 категории

ООО «ЭКРА ИТ».



Разумов Роман Вадимович

В 2008 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности инженер. Директор департамента автоматизации энергосистем (ДАЭС) ООО НПП «ЭКРА».



Петров Алексей Александрович

В 2011 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова получил степень магистра по направлению «Электроэнергетика» по профилю «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность».

Руководитель направления ПА, РАС и ОМП департамента автоматизации энергосистем (ДАЭС) ООО НПП «ЭКРА».

где \underline{U}_c и \underline{U}_s , \underline{I}_c и \underline{I}_s – векторы-столбцы, состоящие из $\underline{U}_{c,y}(x, p)$ и $\underline{U}_{s,y}(x, p)$, $\underline{I}_{c,q}(x, p)$ и $\underline{I}_{s,q}(x, p)$, соответственно,

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{cc} & \underline{Z}_{ss} \\ \underline{Z}_{ss} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix}, \underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{cc} & -\underline{Y}_{cc} \\ -\underline{Y}_{cc} & \underline{Y}_{ss} \end{bmatrix}, \underline{Z}_{cc} \text{ и } \underline{Z}_{ss} -$$

матрицы, элементы на главных диагоналях которых равны $\underline{Z}_{cc}(p)$ и $\underline{Z}_{ss}(p)$ соответственно, а все остальные – $\underline{Z}_M(p)$,

\underline{Y}_{cc} и \underline{Y}_{ss} – диагональные матрицы, элементы на главной диагонали которых равны $\underline{Y}_{cc}(p)$ и $\underline{Y}_{ss}(p)$ соответственно.

Продифференцировав оба выражения системы (5), получим дифференциальные уравнения с одной неизвестной:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \underline{U}_c \\ \underline{U}_s \end{bmatrix} = \underline{ZY} \begin{bmatrix} \underline{U}_c \\ \underline{U}_s \end{bmatrix}, \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \underline{I}_c \\ \underline{I}_s \end{bmatrix} = \underline{YZ} \begin{bmatrix} \underline{I}_c \\ \underline{I}_s \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (6)$$

Система уравнений (6) описывает пространство фазных волн напряжения и тока в трехфазной группе одножильных экранированных кабелей.

Решение дифференциальных уравнений (6) является сложной задачей, поскольку требует учета взаимной связи между электрическими величинами в жилах и экранах фаз. Чтобы преодолеть эту сложность, удобно рассматривать распространение волн в независимых волновых каналах.

Модальное преобразование электрических величин

Напряжения и токи волновых каналов определяются с использованием свойств матричных преобразований подобия из уравнений:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_c \\ \underline{U}_s \end{bmatrix} = \underline{T}_u \begin{bmatrix} \underline{U}_c^m \\ \underline{U}_s^m \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_c \\ \underline{I}_s \end{bmatrix} = \underline{T}_i \begin{bmatrix} \underline{I}_c^m \\ \underline{I}_s^m \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где \underline{T}_u и \underline{T}_i – матрицы связи величин волновых каналов с фазными величинами,

\underline{U}_c^m , \underline{I}_c^m и \underline{U}_s^m , \underline{I}_s^m – векторы-столбцы напряжения, токов волновых каналов, образованных жилами и экранами, соответственно, состоящие из $\underline{U}_{c,q}^m(x, p)$, $\underline{I}_{c,q}^m(x, p)$, $\underline{U}_{s,y}^m(x, p)$, $\underline{I}_{s,y}^m(x, p)$, $q = 1, 2, 3$, $y = 1, 2, 0$.

Подставляя (7) и (8) в (6), получим систему дифференциальных уравнений волновых каналов:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \underline{U}_c^m \\ \underline{U}_s^m \end{bmatrix} = \underline{T}_u^{-1} \underline{ZY} \underline{T}_u \begin{bmatrix} \underline{U}_c^m \\ \underline{U}_s^m \end{bmatrix}, \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \underline{I}_c^m \\ \underline{I}_s^m \end{bmatrix} = \underline{T}_i^{-1} \underline{YZ} \underline{T}_i \begin{bmatrix} \underline{I}_c^m \\ \underline{I}_s^m \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (9)$$

Матрицы преобразований \underline{T}_u и \underline{T}_i должны быть выбраны таким образом, чтобы произведения $\underline{T}_u^{-1} \underline{ZY} \underline{T}_u$ и $\underline{T}_i^{-1} \underline{YZ} \underline{T}_i$ были диагональными матрицами, что будет верно только в том случае, если матрицы \underline{T}_u и \underline{T}_i будут состоять из собственных векторов матриц \underline{ZY} и \underline{YZ} , соответственно. С учетом этого можно получить матрицы модального преобразования для токов

$$\underline{T}_i = \begin{bmatrix} \underline{E} & \underline{0} \\ -\underline{E} & \underline{T}_C^{-1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\underline{T}_i^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{E} & \underline{0} \\ \underline{T}_C & \underline{T}_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

и напряжений

$$\underline{T}_u = [\underline{T}_i^T]^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{E} & \underline{T}_C^T \\ \underline{0} & \underline{T}_C^T \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\underline{T}_u^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{E} & -\underline{E} \\ \underline{0} & [\underline{T}_C^T]^{-1} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где \underline{T}_C – матрица преобразования Кларк.

Транспозиция экранов

На КЛ для снижения потерь в экранах обычно выполняется их транспозиция [15]. Оценим влияние транспозиции экранов на волновые процессы в линии. Для этого рассмотрим падение волны напряжения, распространяющейся в канале между жилой и экраном фазы А, на место транспозиции экранов (рис. 3).

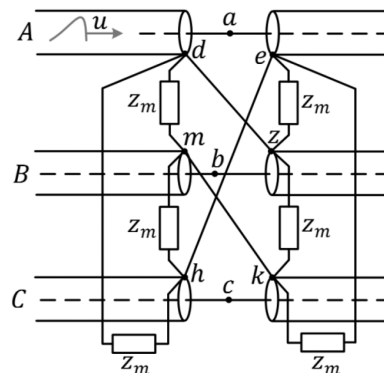


Рис. 3. Транспозиция экранов КЛ: Z_m – взаимное волновое сопротивление между экранами, u – падающая волна напряжения

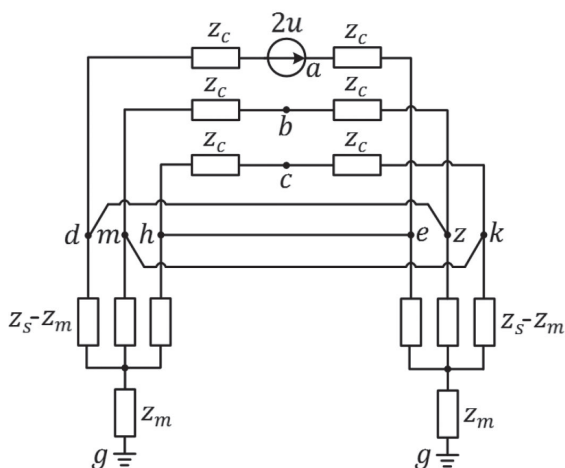


Рис. 4. Расчетная схема замещения

Из схемы замещения на рис. 4 [19] можно определить величину преломленных и отраженных волн напряжения (рис. 3):

$$\begin{cases} u_{ae} = (1 - 2q)u, \\ u_{bz} = qu, \\ u_{ck} = qu, \\ u_{eg} = u_{hg} = 2qu, \\ u_{zg} = u_{dg} = -2qu, \\ u_{kg} = u_{mg} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $q = \frac{z_m - z_s}{4z_c + 3(z_s - z_m)} \approx 0,075 - 0,125$ [19],

z_c – волновое сопротивление между жилой и экраном,

z_m – волновое сопротивление между экраном и землей.

Из (14) следует, что в местах транспозиции экранов происходят множественные отражения волн и их переход из поврежденной фазы в неповрежденную. Это не позволяет выполнить классическое одностороннее волновое ОМП, основанное на оценке времени прихода волны, отраженной от места КЗ [20–22].

Место измерений

Устройство ОМП может измерять волны путем подключения к линейным трансформаторам напряжения (ТН) и трансформаторам тока (ТТ) или к датчикам тока в шкафу заземления экранов (рис. 5).

Для анализа волнового процесса в месте измерений воспользуемся схемой замещения на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что волна напряжения u_2 полностью отражается от места заземления экранов на конце КЛ. Поэтому волны межэкранных и земляного волновых каналов не будут фиксироваться линейным ТН.



Рис. 5. Способы измерения волнового процесса в КЛ устройством ОМП

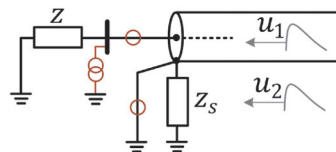


Рис. 6. Расчетная схема замещения при падении на место измерений волны напряжения в канале между жилой и экраном и волны напряжения в экране u_2

Вместе с этим из (11) следует, что волны тока в жилах не оказывают влияния друг на друга при их распространении вдоль КЛ. В результате чего устройство, подключенное к линейному ТН или к линейному ТТ, фиксирует в фазных величинах лишь волны, пришедшие по каналу между жилой и экраном. Следовательно, модальное преобразование при двухстороннем волновом ОМП на основе измерений с линейных ТТ и ТН в таком случае выполнять не требуется. При этом волны напряжения и тока в жилах неповрежденных фаз возникают в месте транспозиции экранов.

Уровень волн тока и напряжения, измеряемых линейными ТТ и ТН, при падении на место установки устройства волны напряжения u_1 зависит от соотношения волнового сопротивления канала между жилой и экраном z_c и волнового сопротивления z примыкающих элементов сети (рис. 6). Если эквивалентное волновое сопротивление z значительно больше волнового сопротивления z_c , то измеренная линейным ТТ волна тока будет близка к нулю, а измеряемая линейным ТН волна напряжения будет максимальной. Несмотря на максимальный уровень волны напряжения, следует помнить, что ТН имеет узкую полосу пропускания и сильно искажает фронты волн [5]. Поэтому для двухстороннего волнового ОМП в таком случае лучше использовать измерения с датчиков тока в ветви заземления экранов. При этом для волн тока в экранах следует использовать классическое преобразование Кларк. Если же полного отражения волн тока в жилах в месте установки устройства ОМП не происходит, то для выделения волн в межэкранных и земляном волновых каналах необходимо выполнить модальное преобразование по (11).

Кроме того, следует отметить, что волны земляного волнового канала, распространяющиеся по экранам, переходят место транспозиции без изменений. При этом место повреждения может быть определено односторонним способом на основе времени Δ , на которое волна в земляном волновом канале отстает от вол-

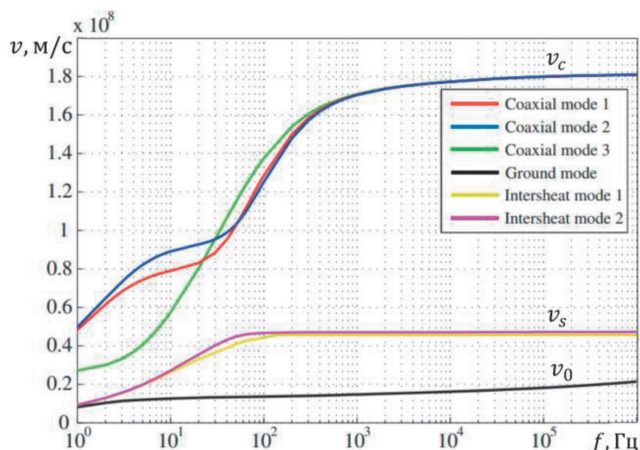


Рис. 7. Скорость распространения волн в волновых каналах трехфазной группы одножильных кабелей: coaxial mode – волновой канал между жилой и экраном, ground mode – земляной волновой канал, intersheats mode – межэкранный волновой канал, v_s – скорость распространения волн в межэкранных каналах

ны в канале между жилой и экраном, подходя к месту установки устройства:

$$x_f = \frac{\Delta}{\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v_c}}, \quad (15)$$

где v_c и v_0 – скорости распространения волн в канале между жилой и экраном и в земляном волновом канале (рис. 7 [17]). Однако при сильном затухании волны в земляном волновом канале взамен такого способа лучше использовать ОМП на основе нейронных сетей [23].

Пример

Рассмотрим распространение волн, возникающих при однофазном КЗ, вдоль КЛ (рис. 8).

Электрическая сеть имеет следующие параметры:

- номинальное напряжение примыкающих систем – 220 кВ; для упрощения анализа их волновые сопротивления приняты равными волновому сопротивлению z_c – это исключает отражения волн в жилах в месте измерений;

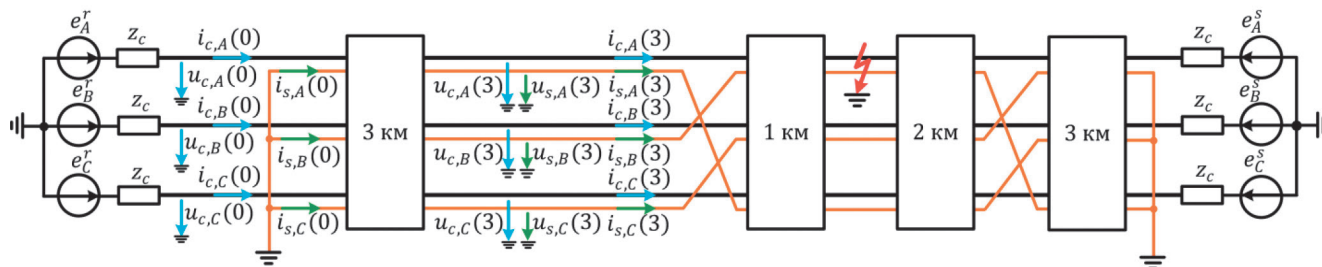


Рис. 8. Схема КЛ с полным циклом транспозиции экранов

Таблица 1. Параметры кабеля 2XS(FL)2Y 127/220 1X1000

Наименование параметра	Значение
Сечение медной жилы, мм ²	1000
Относительная проницаемость жилы, о.е.	1
Удельное активное сопротивление жилы, Ом·мм ² /м	0,018
Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, о.е.	2,4
Относительная магнитная проницаемость изоляции, о.е.	1
Относительная проницаемость экрана, о.е.	1
Удельное активное сопротивление экрана, Ом·мм ² /м	0,028
Относительная диэлектрическая проницаемость оболочки, о.е.	2,4
Относительная магнитная проницаемость оболочки, о.е.	1
Емкость кабеля, мкФ/км	0,19
Расстояние между фазными кабелями, мм	250

• трехфазная группа выполнена из одножильного кабеля марки 2XS(FL)2Y 127/220 1X1000, параметры которого приведены в табл. 1 и на рис. 9.

Результаты моделирования подтверждают вышеизложенные теоретические выводы о характере распространения волн вдоль КЛ.

При однофазном КЗ фазы А на землю на КЛ без транспозиции экранов волны тока в жилах неповрежденных фаз отсутствуют (рис. 10а), (10). При этом лишь фазные ток и напряжение (рис. 10а и 12а) поврежденной жилы содержат волну, распространяющуюся в канале между жилой и экраном (i_w и u_w , соответственно).

По экрану поврежденной фазы быстрее остальных волн (рис. 11а) движется волна тока, величина которой равна волне тока в жиле, а полярность противоположна (10), рис. 1 и 7. Остальные волны в экранах распространяются аналогично волнам при однофазном КЗ фазы А на воздушной ЛЭП (10), (12).

При транспозиции экранов в упомянутых электрических величинах наблюдается множество других волн (рис. 10-12б), возникших в результате преломле-

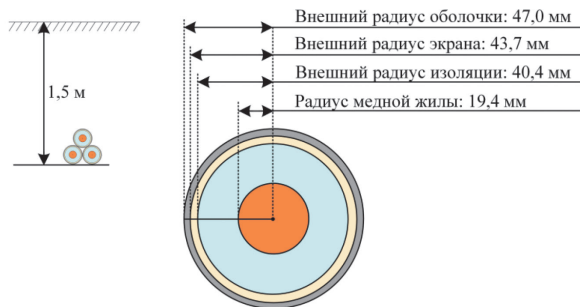


Рис. 9. Глубина прокладки и размеры кабеля 2XS(FL)2Y 127/220 1X1000

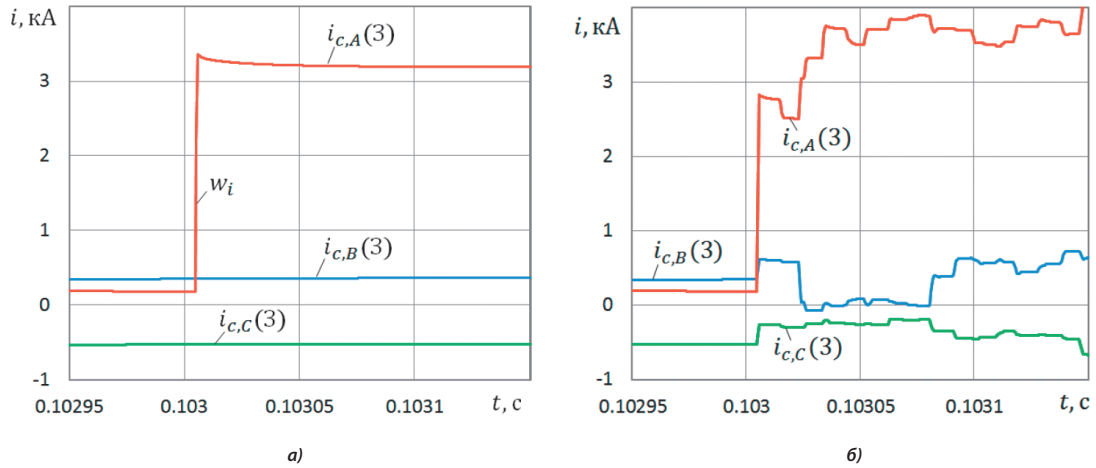


Рис. 10. Фазные токи жил на расстоянии 3 км от места измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

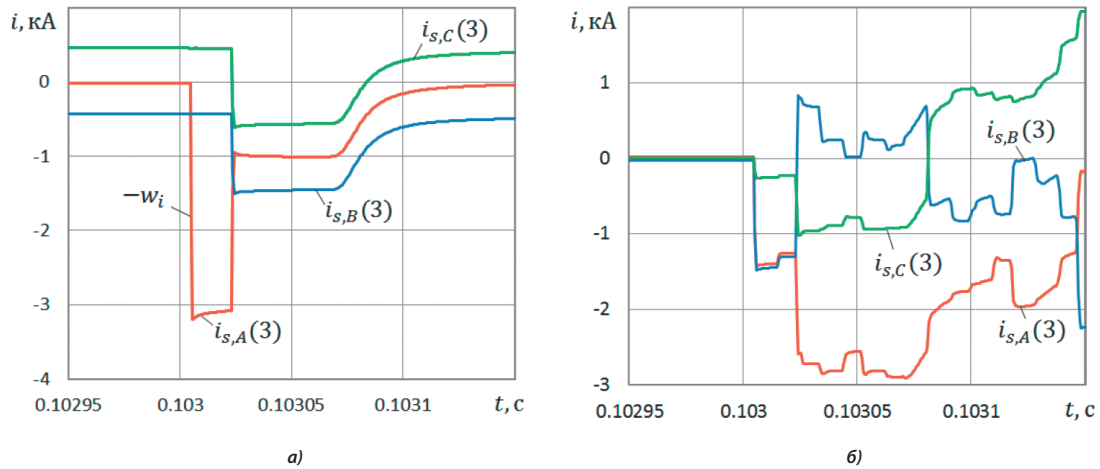


Рис. 11. Фазные токи экранов на расстоянии 3 км от места измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

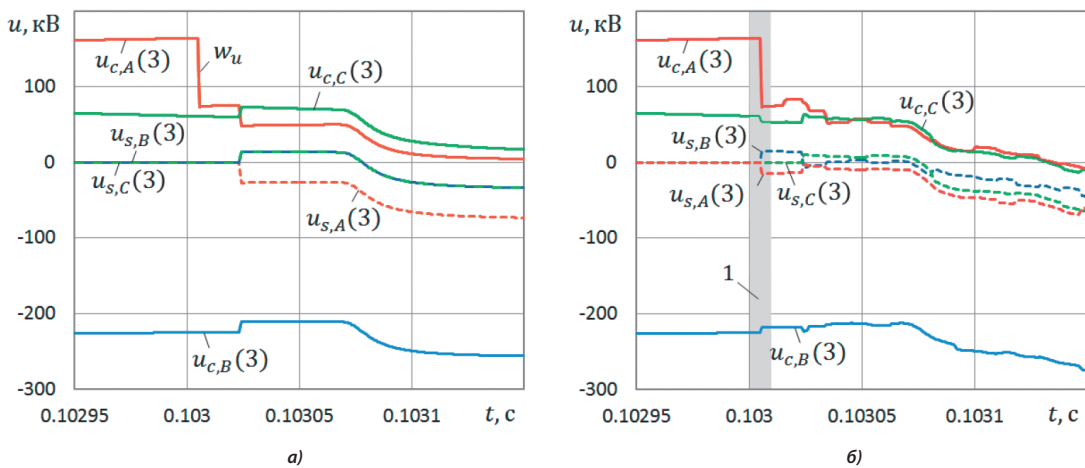


Рис. 12. Фазные напряжения жил и экранов на расстоянии 3 км от места измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

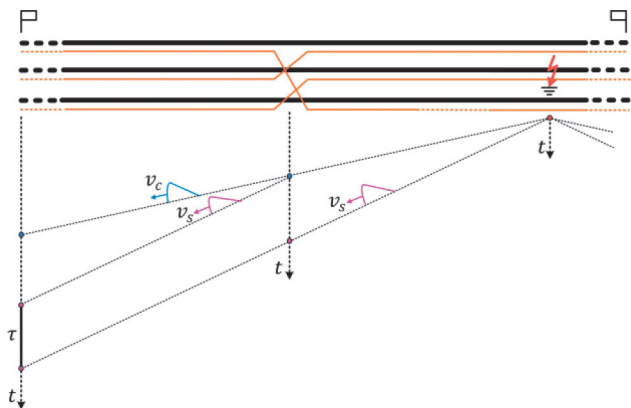


Рис. 13. Иллюстрация, поясняющая влияние транспозиции на время прихода к месту измерений волн в межэкранном волновом канале: τ – время, на которое волна, образованная в месте транспозиции, опережает волну, возникшую в месте КЗ

ний и отражений в месте транспозиции. Вместе с этим рис. 126 [см. область 1] подтверждает корректность оценки по (14) влияния транспозиции на первую волну напряжения, распространяющуюся в канале между жилой и экраном поврежденной фазы. Её преломление в экраны (рис. 13) и дальнейшее распространение со скоростью v_s , значительно отличающейся от скорости v_c (рис. 7), должно учитываться при разработке двухстороннего волнового ОМП КЛ на основе измерений электрических величин в экранах.

Модальное преобразование упомянутых электрических величин по (11) и (13) показывает, что быстрее всех движется волна по волновому каналу между жилой и экраном (см. красную кривую на рис. 14а и рис. 15а), затем – волна по межэкранному волновому каналу (оранжевая кривая). Наименьшую скорость и наибольшее затухание имеет волна, пришедшая к месту измерений по земляному волновому каналу (чер-

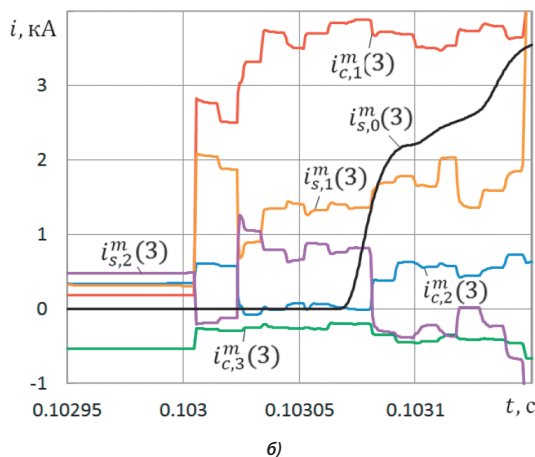
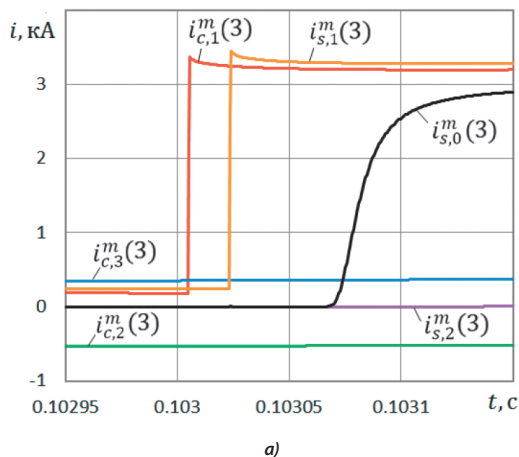


Рис. 14. Токи волновых каналов на расстоянии 3 км от места измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

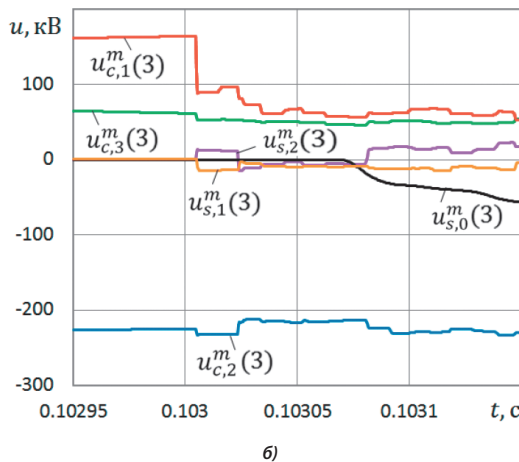
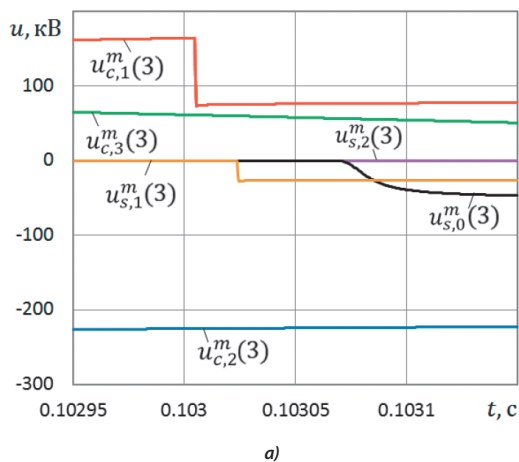


Рис. 15. Напряжения волновых каналов на расстоянии 3 км от места измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

ная кривая). При наличии транспозиции экранов волны наблюдаются и во втором межэкранном волновом канале (фиолетовая кривая, рис. 14б и рис. 15б). Такой характер распространения волн согласуется с графиком скоростей волн в волновых каналах на рис. 7. Кроме того, при наличии транспозиции экранов в токе и напряжениях земляного волнового канала на расстоянии 3 км от места измерений наблюдаются волны, образованные в результате перехода волн межэкранного волнового канала в земляной волновой канал в месте однофазного КЗ [7].

Результаты моделирования также подтверждают выводы об особенностях использования модального преобразования в месте установки устройства ОМП (рис. 5).

Из сравнения рис. 10а с рис. 16а видно, что в месте измерений КЛ без транспозиции экранов волны тока в неповрежденных жилах, как и ранее, отсутствуют. Вол-

ны напряжения (рис. 12а, рис. 17а), распространяющиеся по экранам и наблюдаемые в фазных напряжениях жил на расстоянии 3 км от места измерений, в месте измерений также отсутствуют. Это связано с их полным отражением в месте заземления экранов. Поэтому выполнять модальное преобразование электрических величин, измеряемых линейными ТТ и ТН, не требуется.

Волны тока и напряжения в жилах неповрежденных фаз возникают, как и ранее, только при наличии транспозиции экранов (рис. 16б и рис. 17б).

Из рис. 18а и рис. 19а видно, что в токе экрана наблюдаются волны, распространяющиеся в канале между жилой и экраном поврежденной фазы рис. 2 (2), а также волны тока в межэкранном и земляном волновых каналах. Поэтому для волнового ОМП необходимо использовать модальное преобразование (11), рис. 19.

Из рис. 18б и рис. 19б следует, что выполнить одно-стороннее волновое ОМП, основанное на выявлении

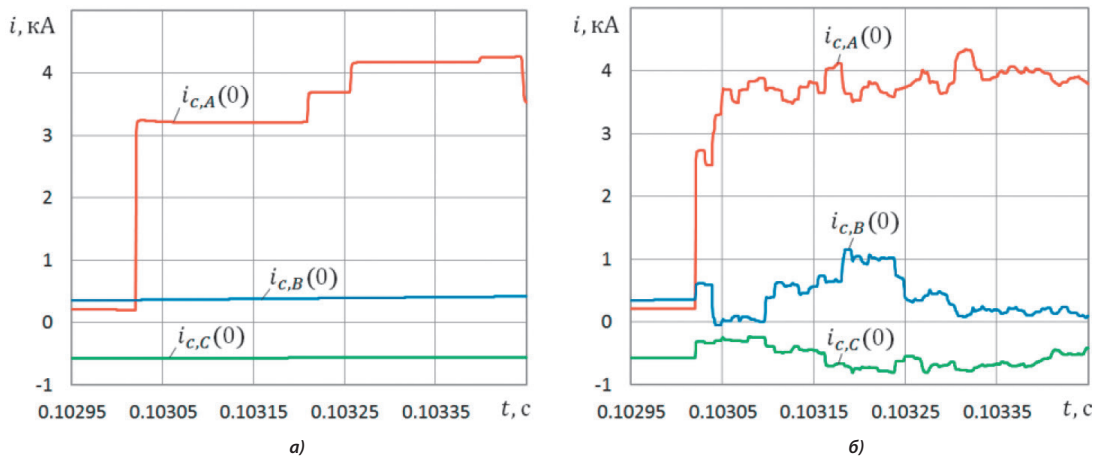


Рис. 16. Фазные токи жил в месте измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

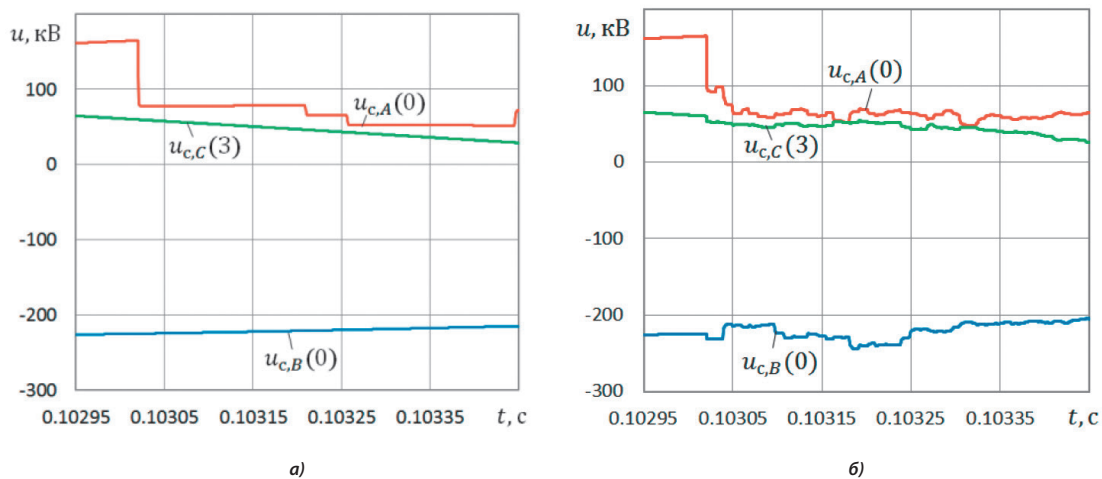


Рис. 17. Фазные напряжения жил в месте измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

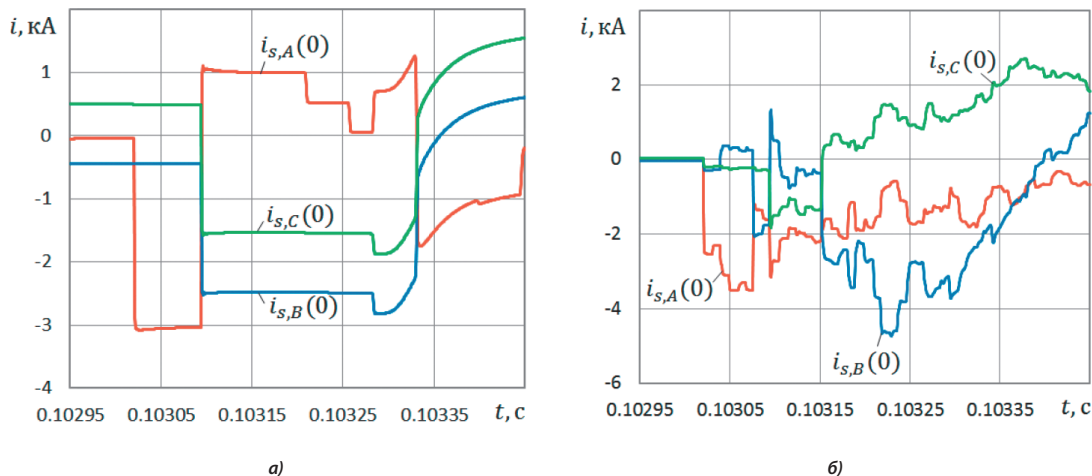


Рис. 18. Фазные токи экранов в месте их заземления: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

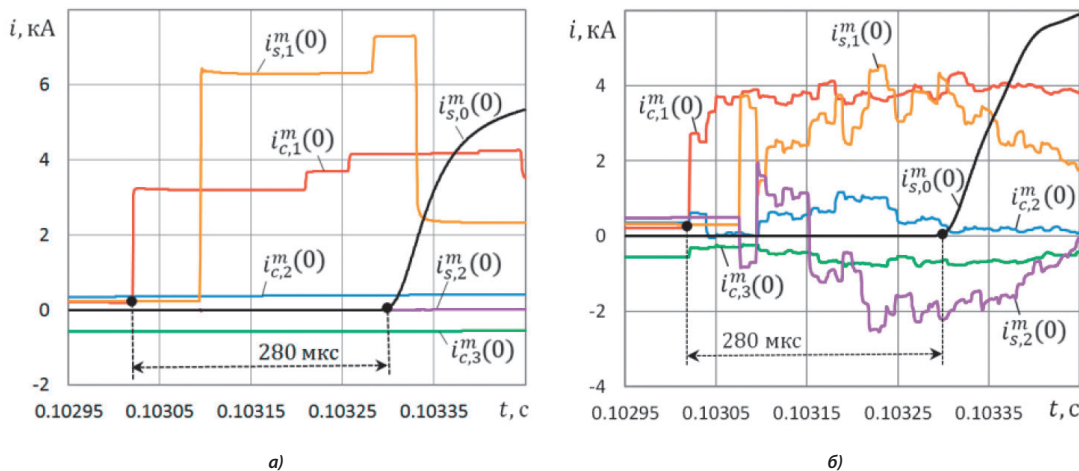


Рис. 19. Токи волновых каналов в месте измерений: а) КЛ без транспозиции экранов; б) КЛ с полным циклом транспозиции экранов

волны, отраженной от места КЗ, сложно из-за множественных отражений в местах транспозиции экранов. Поэтому можно использовать более простой односторонний способ (15):

$$\hat{x}_f = \frac{280 \cdot 10^{-6} c}{\frac{1}{13324 \frac{км}{с}} - \frac{1}{202122 \frac{км}{с}}} = 3,995 км.$$

Погрешность ОМП в 5 м, полученная в модели КЛ, подтверждает пригодность предлагаемого способа. Для достижения аналогичной точности ОМП на практике нужно знать фактические скорости распространения волн в канале между жилой и экраном и в земляном волновом канале. Для этого могут быть использованы опыты включения КЛ на холостой ход.

Выводы

Волны тока в жилах КЛ движутся с одинаковой скоростью и не оказывают влияния друг на друга. При этом в жилах неповрежденных фаз они возникают лишь вследствие транспозиции экранов. Поэтому в устройстве двухстороннего волнового ОМП, измеряющем волны тока в жилах, необходимо использовать непосредственно фазные токи без модального преобразования. Если устройство двухстороннего волнового ОМП измеряет фазные напряжения жил, то модальное преобразование выполнять также не требуется, поскольку в них наблюдаются лишь не зависящие друг от друга волны, пришедшие по каналам между жилой и экраном.

Если к КЛ примыкает оборудование со значительным волновым сопротивлением, то волны тока в жилах будут полностью отражаться от места измерений. В

таким случае двухстороннее волновое ОМП может выполняться путем контроля токов в экранах. При этом в качестве модального преобразования необходимо использовать преобразование Кларк. Если же полного отражения волн тока в жилах не происходит, то для выделения волн в каналах необходимо использовать правила модального преобразования, приведенные в настоящей статье.

Вышеупомянутые рекомендации также следует учитывать и при двухстороннем волновом ОМП на КВЛ.

Устройства одностороннего волнового ОМП, принцип работы которых основан на оценке времени пробега волной расстояния от места измерений до повреждения и обратно, имеют низкую устойчивость функционирования на КЛ из-за множественных отражений волн в местах транспозиции экранов. В этой связи для одностороннего ОМП выигрышными представляются способы, основанные на оценке времени, на которое волна в земляном волновом канале отстает от волны в канале между жилой и экраном, подходя к месту установки устройства.

Литература:

1. X.Z. Dong, Z.Q. Bo, M.A. Redfern, J. Fang, «The Application of the Wavelet Transform of Travelling Wave Phenomena for Transient Based Protection», IPST2003, International Conference on Power System Transients, Hong Kong, 2003, pp. 1-6.
2. F.M.d.M. Júnior and F.V. Lopes, «Mathematical Study on Traveling Waves Phenomena on Three Phase Transmission Lines – Part I: Fault-Launched Waves», in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 1151-1160, April 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3077769.
3. X. Dong, W. Kong and T. Cui, «Fault Classification and Faulted-Phase Selection Based on the Initial Current Traveling Wave», in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 552-559, April 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.921144.
4. A. Ametani, N. Nagaoka, Y. Baba and T. Ohno, «Power System Transients – Theory and Applications», Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013, 600 p.
5. A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina, «Limitations of Traveling Wave Fault Location», 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.
6. F.M. de Magalhaes Júnior and F.V. Lopes, «Mathematical Study on Traveling Waves Phenomena on Three Phase Transmission Lines – Part II: Reflection and Refraction Matrices», in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 1161-1170, April 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3077730.
7. A. Fedorov, V. Petrov, V. Naumov and V. Hristoforov, «Theory of Single-end Traveling Wave Fault Location», 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 68-74, doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.
8. V. Alekseev, V. Petrov and V. Naumov, «Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator», 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.
9. I.E. Clarke. Circuit Analysis of Alternating Current Power Systems, vol. 1. New York: Wiley, 1943, 540 p.
10. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski, Fault Location on Power Networks, Springer, 2010, 432 p.
11. E.O. Schweitzer, A. Guzmán, M.V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny and S. Marx, «Locating faults by the traveling waves they launch», 2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2014, pp. 95-110, doi: 10.1109/CPRE.2014.6798997.
12. K.H. Le and P.H. Vu, «Performance Evaluation of Traveling Wave Fault Locator for a 220kV Hoa Khanh-Thanh My Transmission Line», Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 8, no. 4, pp. 3243-3248, Aug. 2018.
13. Aoyu Lei, X. Dong and S. Shi, «A novel method to identify the travelling wave reflected from the fault point or the remote-end bus», 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7285725.
14. L.M. Wedepohl, «Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems», Proceedings IEE, Vol. 110, pp. 2200-2212, December 1963.
15. М.В. Дмитриев Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2010. – 154 с.
16. H.W. Dommel. Electromagnetic Transients Program: Theory Book, Bonneville Power Administration, 1986, 483 p.
17. A. Ametani, T. Ohno, N. Nagaoka. Cable system transients: theory, modeling and simulation, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2015, 395 p.
18. F. Silva, C. Bak. Electromagnetic Transients in Power Cables, Springer-Verlag London Ltd., 2013, 228 p., doi: 10.1007/978-1-4471-5236-1.
19. Y. Hase. Handbook of power system engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2007, 577 p.
20. C. F. Jensen. Online Location of Faults on AC Cables in Underground Transmission Systems, Springer Theses, 2014, 221 p., doi: 10.1007/978-3-319-05398-1.
21. Козлов, В.Н. Расширение возможностей пассивного волнового определения места повреждения за счет отраженных волн / В.Н. Козлов, К.И. Ермаков, Ю.В. Бычков // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 4 (37). – С. 34-37.
22. Лачугин, В.Ф. Волновые методы определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1 (50). – С. 58-61.
23. Фёдоров, А.О. Одностороннее волновое определение места повреждения на основе сверточной нейронной сети / А.О. Фёдоров, В.С. Петров, А.А. Ильин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 3 (52). – С. 48-53.