

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

ISSN 0201-4564

2022 6

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Анализ причин повреждения экранных труб средней радиационной части и результаты испытаний котла ПК-24

Технология "Торнадо" для энергетических котлов

ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Проектирование системы частотного управления синхронной реактивной машиной для кинетических накопителей энергии

Основные дефекты и определение технического состояния твёрдой изоляции силовых трансформаторов

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

Определение места повреждения электропередачи по мгновенным значениям токов и напряжений на обеих сторонах

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

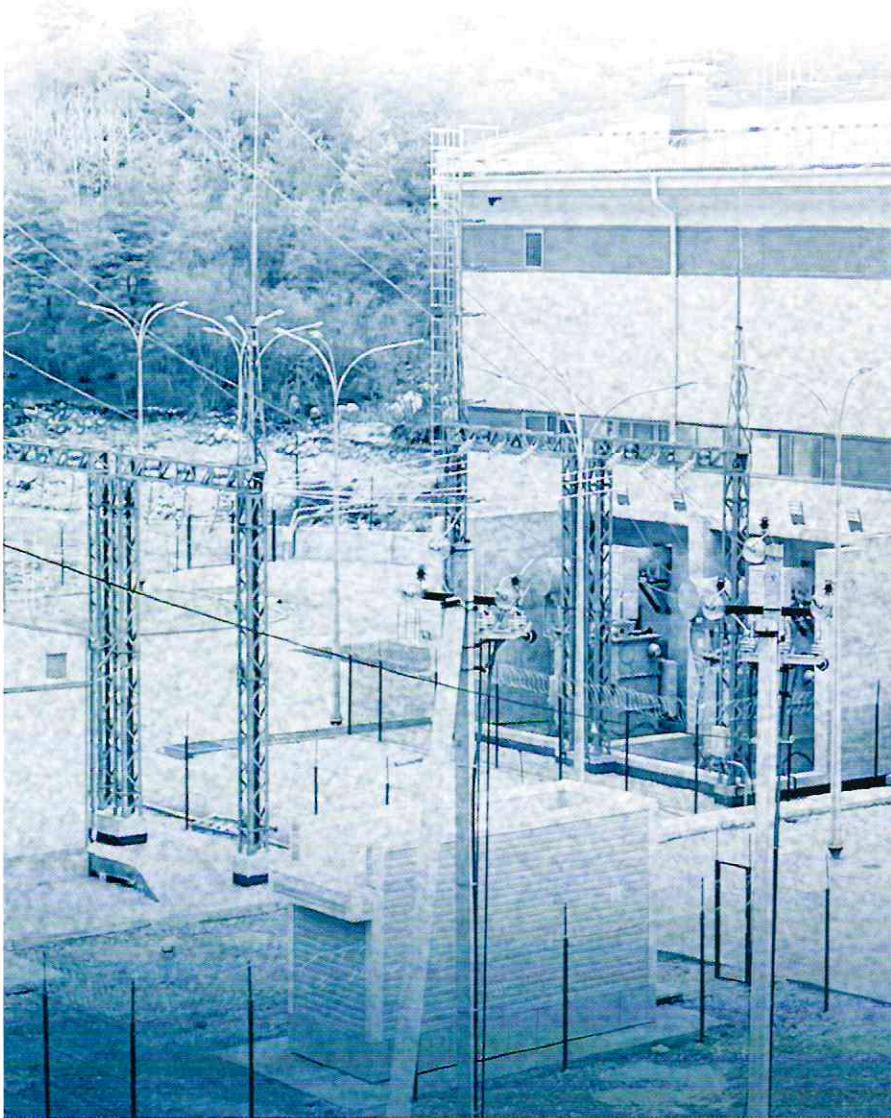
Развитие производства отечественных зарядных станций для электротранспорта

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Альтернативный подход к проектированию информационного обмена систем автоматизации цифровых подстанций

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний



УЧРЕДИТЕЛИ

МИНЭНЕРГО РОССИИ,
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ
КОМПАНИЯ ЕЭС,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
“КОРПОРАЦИЯ ЕЭСК”,
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА
“ЭНЕРГОПРОГРЕСС”,
НП “НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС”

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **Ольховский Г.Г.**,
доктор техн. наук, чл.-кор. РАН
Зам. главного редактора **Сокур П.В.**,
канд. техн. наук
Бондаренко А.Ф., Волков Э.П., академик РАН,
Воротников В.Э., доктор техн. наук,
Денисов В.И., доктор эконом. наук,
Долматов И.А., канд. эконом. наук,
Зорченко Н.В., канд. техн. наук,
Илюшин П.В., доктор техн. наук,
Касьянов Л.Н., Корниенко А.Г.,
Кошевер А.А., доктор техн. наук,
Лачугин В.Ф., доктор техн. наук,
Львов М.Ю., доктор техн. наук,
Любарский Д.Р., доктор техн. наук,
Мирзиханов М.Ш., доктор техн. наук,
Новак В., доктор техн. наук (Польша),
Пикин М.А., канд. техн. наук,
Савицкий Д.С., канд. техн. наук,
Седлов А.С., доктор техн. наук,
Соловьёва Т.И., Тупов В.Б., доктор техн. наук

РЕДАКЦИЯ

Зам. главного редактора
Соловьёва Т.И.

Клюева Н.Н.
Коновалова О.Ф.
Шарпина О.В.

АДРЕС РЕДАКЦИИ

129090, Москва,
ул. Щепкина, 8

ТЕЛЕФОНЫ

Редакция (495) 234-7417, 234-7419
Главный редактор (495) 234-7417
Internet www.elst.energy-journals.ru
E-mail
el.stantsii@gmail.com

Журнал включен в перечень ВАК.
Свидетельство о регистрации СМИ –
№ ФС 77-37404 от 04.09.2009;
регистратор – Роскомнадзор

Редакция не несет ответственности за
достоверность информации, опубликованной
в рекламных объявлениях.
Текущая перепечатка ссылка на журнал
«Электрические станции» обязательна.

Сдано в набор 20.05.2022
Подписано в печать 15.06.2022
Дата выхода в свет 24.06.2022
Формат 60×24 1/8
Бумага Galerie Art Silk. Печать офсетная
Кол. л. л. 9. Тираж 1800. Цена свободная

Дизайн-макет
выполнен в издательстве "Фолиум"
127411, Москва, Дмитровское ш., 157
Телефон: (499) 258-0828
сайт: www.folium.ru
E-mail: prepress@folium.ru

Отпечатано
в типографии издательства "Фолиум"
127411, Москва, Дмитровское ш., 157
Адрес: учредителя и издателя: 129090, Москва,
ул. Щепкина, 8

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2022 6

Издаётся
с января 1930 г.
1091-й выпуск
с начала издания

Содержание

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- Федоров А.И. Анализ причин повреждения экранных труб средней радиационной части и результаты испытаний котла ПК-24 2
- Пузырёв Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. Технология "Торнадо" для энергетических котлов 10

ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

- Глазырин М.В., Юркевич В.Д. Проектирование системы частотного управления синхронной реактивной машиной для кинетических накопителей энергии 17
- Долин А.П., Киприянова М.М. Основные дефекты и определение технического состояния твёрдой изоляции силовых трансформаторов 27

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

- Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я. Определение места повреждения электропередачи по мгновенным значениям токов и напряжений на обеих сторонах 34

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

- Аргасцев А.Ю., Жданеев О.В., Мякочин Ю.О. Развитие производства отечественных зарядных станций для электротранспорта 42

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

- Трофимов А.В., Трофимов В.А., Горбунов Р.А. Альтернативный подход к проектированию информационного обмена систем автоматизации цифровых подстанций 54

ХРОНИКА

- Новости электротехнических и электроэнергетических компаний 61
- Content, abstracts, keywords 70
- Правила оформления рукописи статьи 72

Определение места повреждения электропередачи по мгновенным значениям токов и напряжений на обеих сторонах

- Кочетов И. Д.¹, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары
- Лямец Ю. Я., доктор техн. наук, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары

Рассмотрены вопросы определения места повреждения (ОМП) линии электропередачи в базисе мгновенных значений токов и напряжений, наблюдаемых на двух её сторонах. Универсального критерия ОМП на основе мгновенных значений не существует. Ставится задача поиска общего подхода к построению критериев, отвечающих характеру наблюдаемых процессов. Таким подходом стало разделение наблюдаемых величин на два компонента – локальный и нормальный. Локальный режим создаётся в модели электропередачи неизвестным источником, действующим из места КЗ. Входы модели, что существенно, при этом зашунтированы. Появляется возможность провести обучение индикатора места КЗ в локальном режиме и получить его априорную характеристику, активируя модель в различных местах вероятного повреждения и фиксируя локальные токи в зашунтированных входах. Помимо этапа обучения, которому удалено основное внимание, рассмотрен также основной алгоритм ОМП, включающий в себя определение токов нормального режима как реакции модели неповреждённой линии на наблюдаемые напряжения и определение локальных токов как разности между наблюдаемыми и нормальными токами.

Ключевые слова: определение места повреждения, линия электропередачи, мгновенные значения электрических величин.

По мере развития средств связи становятся всё более востребованными методы определения места повреждения (ОМП) линии электропередачи по токам и напряжениям, наблюдаемым на обеих её сторонах [1, 2]. Методы подразделяются на две группы в зависимости от того, какой из двух возможных базисов используется для представления электрических величин – базис мгновенных значений или же комплексный базис [3 – 5]. Второй безусловно проще, но его применение связано с выделением составляющих основной частоты. Свободная составляющая переходного процесса короткого замыкания при этом подавляется и содержащаяся в ней информация утрачивается. Но и в случае применения базиса мгновенных значений избежать информационных потерь не удается, хотя и по иным причинам.

Из методов такого рода наибольшее распространение получили волновые. В них фиксируются моменты прихода первых после КЗ волн в начало и в конец линии. Информационную ценность представляют фронты волн. В другие моменты времени наблюдаемые величины для целей ОМП не используются. Привлечение к распознаванию места КЗ всей имеющейся информации о мгновен-

ных значениях наблюдаемых токов и напряжений, вообще говоря, возможно, но сталкивается с проблемой подбора критерия места КЗ. Оставаясь в базисе мгновенных значений, такой критерий отыскать удаётся [4], но он оказывается значительно более сложным, чем в базисе комплексных величин. В этой статье преследуется цель совместить базис мгновенных значений с критериями, доставляемыми компонентами токов короткого замыкания, представления о которых сложились за последнее время [5 – 7].

Локальный режим наблюдаемой линии

Пусть t_s – время, в котором ведётся наблюдение линии в месте s , t_r – в месте r ; а $t_s = 0$ и $t_r = 0$ – моменты появления локальных токов $i_{s\text{лк}}(t_s)$ и, соответственно, $i_{r\text{лк}}(t_r)$. Локальный режим создаётся в модели линии, места наблюдения которой s и r зашунтированы источником тока $i_f(t_f)$ или ЭДС $e_f(t_f)$ (рис. 1) [7]. Неизвестны место КЗ f , момент КЗ $t_f = 0$, источники $i_f(t_f)$, $e_f(t_f)$, интервалы времени между моментами $t_f = 0$, $t_s = 0$, $t_r = 0$. Протекающие в шунтах токи локального режима $i_{s\text{лк}}(t_s)$ и $i_{r\text{лк}}(t_r)$ являются составляющими наблюдаемых токов $i_s(t_s)$ и $i_r(t_r)$.

¹ Кочетов Иван Дмитриевич: ivankochetov171298@mail.ru

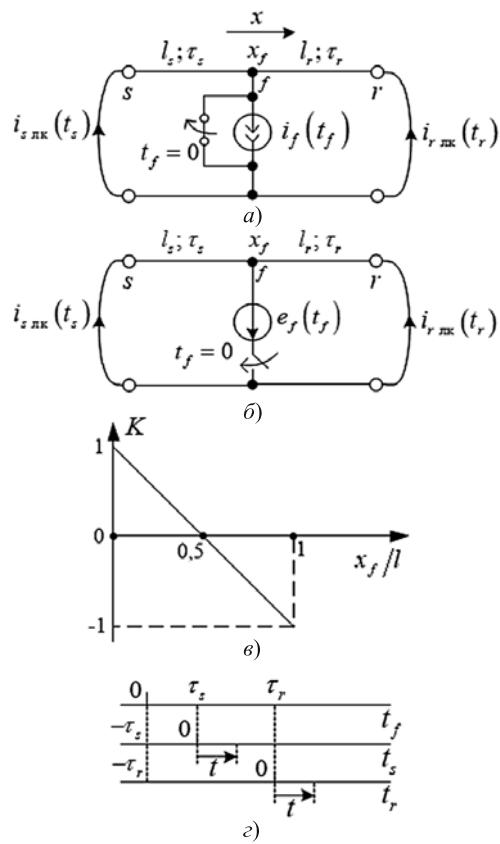


Рис. 1. Локальный режим двухпроводного канала линии электропередачи, активируемого из места КЗ:

а – источником тока; б – ЭДС; в – каноническая функция места КЗ; г – соответствие начал отсчета времени t_f, t_s, t_r и t

Установившийся синхронно наблюдаемый локальный режим, активируемый источником комплексной частоты $\underline{p} = -\delta + j\omega$, например ЭДС

$$e_f(t) = \text{Im } \underline{E}_m e^{\underline{p}t} = E_m e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi),$$

где $\underline{E}_m = E_m \angle \psi$, обнаруживает существенную закономерность: соотношение комплексов локальных токов на любой комплексной частоте \underline{p} инвариантно относительно источника \underline{E}_m или \underline{I}_m и определяется исключительно координатой места КЗ x_f . Так, комплексная функция места КЗ

$$\underline{K}(x_f) = \frac{\underline{I}_{ms_nk}(x_f) - \underline{I}_{mr_nk}(x_f)}{\underline{I}_{ms_nk}(x_f) + \underline{I}_{mr_nk}(x_f)} \quad (1)$$

даёт для однородной линии зависимость

$$\underline{K}(x_f, \underline{p}) = \frac{\text{th} \frac{\gamma(\underline{p})(l-2x_f)}{2}}{\text{th} \frac{\gamma(\underline{p})l}{2}}, \quad (2)$$

где $l = l_s + l_r$; $\gamma(\underline{p})$ – коэффициент распространения, $\gamma(\underline{p}) = \alpha(\underline{p}) + j\beta(\underline{p})$, $\alpha(\underline{p})$ и $\beta(\underline{p})$ – коэффициенты затухания и фазы длиной линии на комплексной частоте \underline{p} .

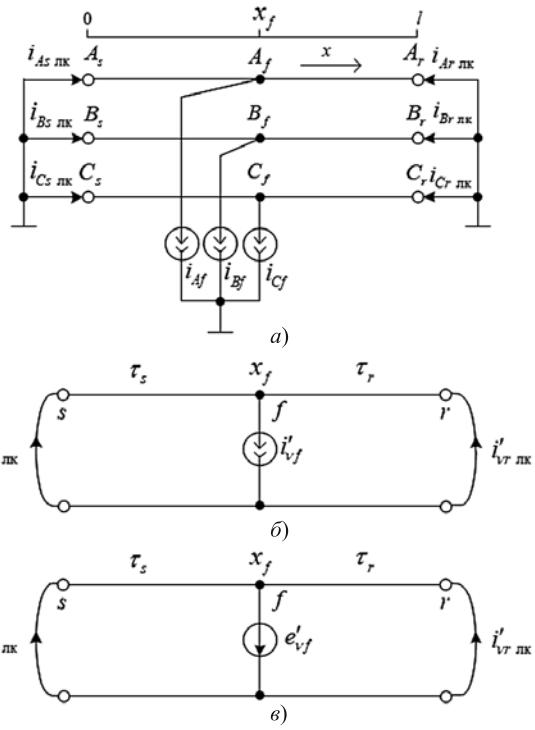


Рис. 2. Локальный режим трёхфазной линии при замыкании на землю:

а – в общей модели; б, в – в двухпроводных каналах безнулевых (центрированных) составляющих

Без учёта потерь на произвольной частоте $\underline{p} = j\omega$, $\alpha(\underline{p}) \equiv 0$, $\beta(\underline{p}) = \beta(\omega) = \omega \sqrt{L^0 C^0}$ (L^0 и C^0 – удельные параметры линии) выражение (2) модифицируется

$$\underline{K}(x_f, \omega) = \frac{\text{tg}(\beta(\omega)(l-2x_f)/2)}{\text{tg}(\beta(\omega)l/2)}. \quad (2a)$$

Наконец на тех частотах, где

$$\text{tg}(\beta(\omega)l/2) \approx \beta(\omega)l/2, \quad (3)$$

выражение (2a) утрачивает зависимость от частоты и сводится к канонической линейной функции (рис. 1, в)

$$\underline{K}(x_f) = K(x_f) = 1 - 2(x_f/l). \quad (2b)$$

Иначе говоря, однозначная связь параметра K с местом КЗ справедлива для тех локальных процессов, частотный спектр которых отвечает условию (3).

В случае междуфазного КЗ двухпроводная модель относится к одной из повреждённых фаз или же к междуфазному каналу повреждения. Замыкание на землю имеет свои особенности (рис. 2). Локальный режим создаётся в общем случае тремя токами i_{vf} ($v = A, B, C$ – обозначение произвольной фазы). Модель справедлива для линии с любым режимом нейтрали. В симметричной линии имеется возможность выделить три двухпроводных

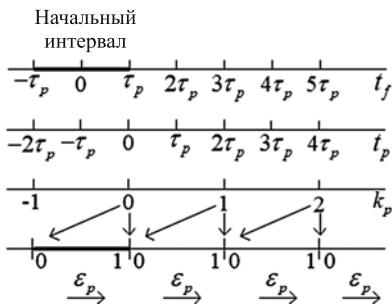


Рис. 3. Взаимосвязь аргументов переходного локального тока

фазных канала безнулевых (центрированных) составляющих (рис. 2, б, в) [3, 4]

$$\begin{aligned} i_v' &= i_v = i_0; \\ i_0 &= \frac{1}{3}(i_v + i_{v-1} + i_{v+1}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $v - 1$ и $v + 1$ – обозначения отстающей и опережающей фазы. Отсюда

$$i_v' = \frac{1}{3}(2i_v - i_{v-1} - i_{v+1}). \quad (5)$$

Локальный режим несимметричной линии может быть рассмотрен в двухпроводных каналах модальных составляющих [7].

С наблюдением переходного процесса и вообще с базисом мгновенных значений связана проблема поиска функции координаты места КЗ. Представляет в этом плане интерес функция двух переменных – координаты x_f и времени t , отсчитываемого как от начала времени t_s , так и в равной мере от начала времени t_r (рис. 1, в)

$$K(x_f, t) = \frac{i_{s\text{лк}}(x_f, t) - i_{r\text{лк}}(x_f, t)}{i_{s\text{лк}}(x_f, t) + i_{r\text{лк}}(x_f, t)}, \quad (6)$$

и далее – функции места КЗ, построенные на базе текущих интегральных токов

$$K(x_f, t) = \frac{I_{s\text{лк}}(x_f, t) - I_{r\text{лк}}(x_f, t)}{I_{s\text{лк}}(x_f, t) + I_{r\text{лк}}(x_f, t)}. \quad (7)$$

Функционал F , преобразующий функцию $i_{\text{лк}}(x_f, t)$ в интегральный ток

$$I_{p\text{лк}}(x_f, t) = F[i_{p\text{лк}}(x_f, t)], p = s, r, \quad (8)$$

составляет предмет поиска. Возможные варианты – интегрирование абсолютных значений локального тока

$$I_{p\text{лк}}(x_f, t) = \int_0^t |i_{p\text{лк}}(x_f, \xi)| d\xi \quad (9)$$

или определение его текущей спектральной плотности

$$I_{p\text{лк}}(x_f, j\omega, t) = \int_0^t i_{p\text{лк}}(x_f, \xi) e^{-j\omega\xi} d\xi. \quad (10)$$

Обратим внимание на следующее обстоятельство: $t = t_f - \tau_p$ – единое время для двух сторон линии; как следствие, одному и тому же значению t отвечают разные значения времени t_f , отсчитываемого от момента КЗ (рис. 1, в).

Аналитическое описание локальных токов

В имитационной модели длинной линии переходные процессы анализируются в едином времени t . Переходный процесс, активируемый постоянной ЭДС $e_f = E$ или синусоидальной ЭДС $e_f(t_f) = E_m \sin(\omega_0 t_f + \psi_f)$, описывается в замкнутой форме функциями разных аргументов [8]. Установившаяся слагающая $i_{p\text{уст}}$ переходного локального тока $i_{p\text{лк}}$ описывается функцией времени t_f , а для описания свободной слагающей $i_{p\text{св}}$ время t_p разделяется на интервалы продолжительностью в $2\tau_p$ каждый

$$t_p = 2\tau_p[(k_p - 1) + \varepsilon_p], \quad (11)$$

где k_p – дискретное время; ε_p – непрерывное, изменяющееся в ограниченных пределах времени:

$$k_p = \text{ent}(t_p^*) = 0, 1, 2, \dots; \quad (12)$$

$$t_p^* = \frac{t_p}{2\tau_p};$$

$$\varepsilon_p = t_p^* - k_p + 1 \in (0, 1). \quad (13)$$

Соответствие значений дискретного времени и интервалов изменения времени ε_p показано на рис. 3. Необходимо пояснить, что, в отличие от предыдущих работ, здесь дискретные моменты времени k_p приходятся не на начала, а на окончания интервалов изменения непрерывного времени ε_p , чем и объясняется смещение k_p на единицу в формуле (11). Так сделано для того, чтобы начальный интервал времени, на котором действует нулевое начальное условие, располагался левее момента $k_p = 0$

$$i_{p\text{лк}}(t_p) \equiv 0, \quad t_p \in (-2\tau_p, 0)$$

или

$$i_{p\text{лк}}(0, \varepsilon) \equiv 0, \quad \varepsilon \in (-1, 0),$$

и тогда

$$i_{p\text{св}}(0, \varepsilon) = -i_{p\text{уст}}[t_f \in (-\tau_p, \tau_p)]. \quad (14)$$

Переходный локальный ток получает в итоге следующее описание

$$i_{p\text{лк}}(t_f; k_p, \varepsilon_p) = i_{p\text{уст}}(t_f) + i_{p\text{св}}(k_p, \varepsilon_p) \quad (15)$$

при начальном условии (14).

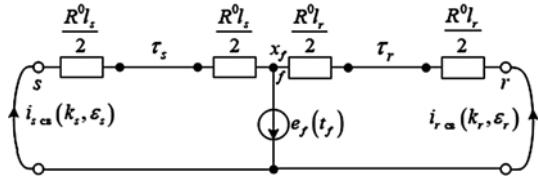


Рис. 4. Имитационная модель свободной составляющей локального процесса, активируемого ЭДС в месте КЗ

Постоянная ЭДС создаёт установившийся ток

$$I_{p_{\text{уст}}} = \frac{E}{R^0 l_p}, \quad (16)$$

соответственно, синусоидальная ЭДС частоты ω_0 создаст ток

$$i_{p_{\text{уст}}}(t_f) = I_{mp} \sin(\omega_0 t_f + \psi_p), \quad (17)$$

комплекс которого

$$I_{mp} \angle \psi_p = \frac{E_m \angle \psi_f}{Z_C \sinh \gamma l_p}, \quad (18)$$

где $Z_C = \sqrt{Z^0 / Y^0}$ и $\gamma = \sqrt{Z^0 Y^0}$ – характеристическое сопротивление и коэффициент распространения линии; $Z^0 = R^0 + j\omega_0 L^0$ и $Y^0 = G^0 + j\omega_0 C^0$ – комплексные первичные параметры линии; R^0, G^0, L^0, C^0 – удельные параметры линии.

Закон изменения свободной составляющей определяет начальное условие (14). При действии постоянной ЭДС

$$i_{p_{\text{св}}}(k_p, \varepsilon_p) = -I_{p_{\text{уст}}} \lambda_p^{k_p} l(\varepsilon_p), \quad (19)$$

а при действии синусоидальной ЭДС

$$i_{p_{\text{св}}}(k_p, \varepsilon_p) = -I_{mp} \lambda_p^{k_p} \sin(2\alpha_p \varepsilon_p + \psi_p - \alpha_p), \quad (20)$$

где $\alpha_p = \omega_0 \tau_p$.

Основание $\lambda_p < 1$ дискретной показательной функции, говорящей об интенсивности затухания свободного процесса, учитывает потери приблизённо, например, путём сосредоточения распределённых активных сопротивлений на границах участков линии (рис. 4). В таком случае

$$\lambda_p = \left(\frac{R^0 l_p - 2R_b}{R^0 l_p + 2R_b} \right)^2, \quad (21)$$

где $R_b = \sqrt{L^0 / C^0}$ – волновое сопротивление линии.

Функция места КЗ при действии постоянного источника $E_f = E$

В линии без потерь $\lambda_p = 1$. В модели по рис. 1, б с постоянной ЭДС установившийся ре-

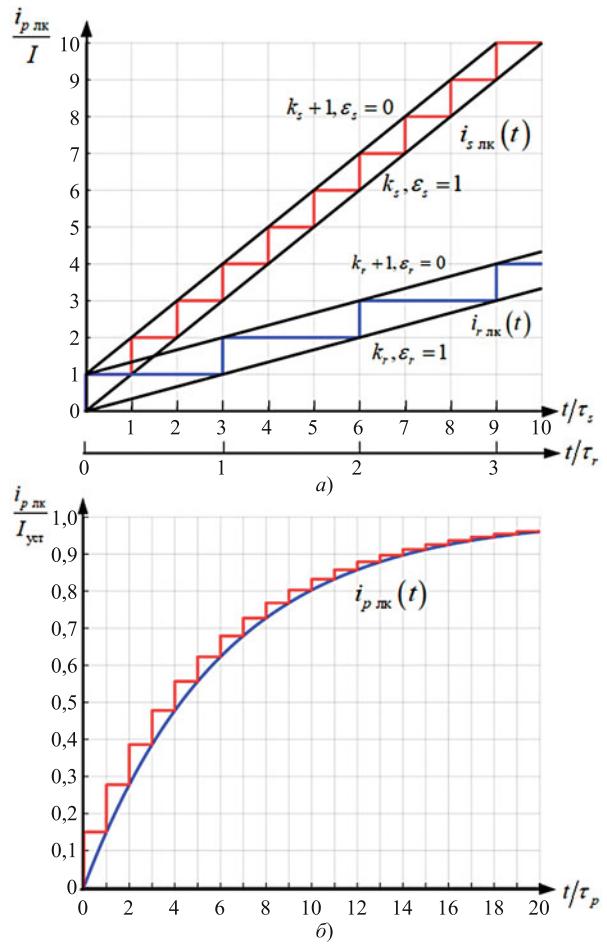


Рис. 5. Локальные токи, активируемые постоянной ЭДС в длинной линии:

a – без учёта потерь ($\tau_s = \tau/4, \tau_r = 3\tau/4$); *б* – с учётом потерь

жим не наступает, и место решения уравнений (16), (19), (21) занимает одно выражение

$$i_{p_{\text{лок}}}(k_p, \varepsilon_p) = I k_p l(\varepsilon_p), \quad k_p \geq 0, \quad (22)$$

где $I = 2E/R_b$. Процесс линейного дискретного нарастания тока (рис. 5, *a*) при всей максимально возможной идеализации модели даёт тем не менее представление о подходящей для данного случая функции координаты места КЗ. Достаточно заметить, что прямая, соединяющая отсчёты $i_{p_{\text{лок}}}(k_p, \varepsilon_p = 1)$, в текущем времени t описывается функцией

$$i_{p_{\text{лок}}}(t)|_{\varepsilon_p=1} = a_p t \quad (23)$$

с угловым коэффициентом

$$a_p = \frac{t}{2\tau_p} I. \quad (24)$$

Параллельно проходит линия, соединяющая отсчёты $i_{p_{\text{лок}}}(k_p + 1, 0)$

$$i_{p_{\text{лок}}}|_{\varepsilon_p=0} = a_p t + 1. \quad (25)$$

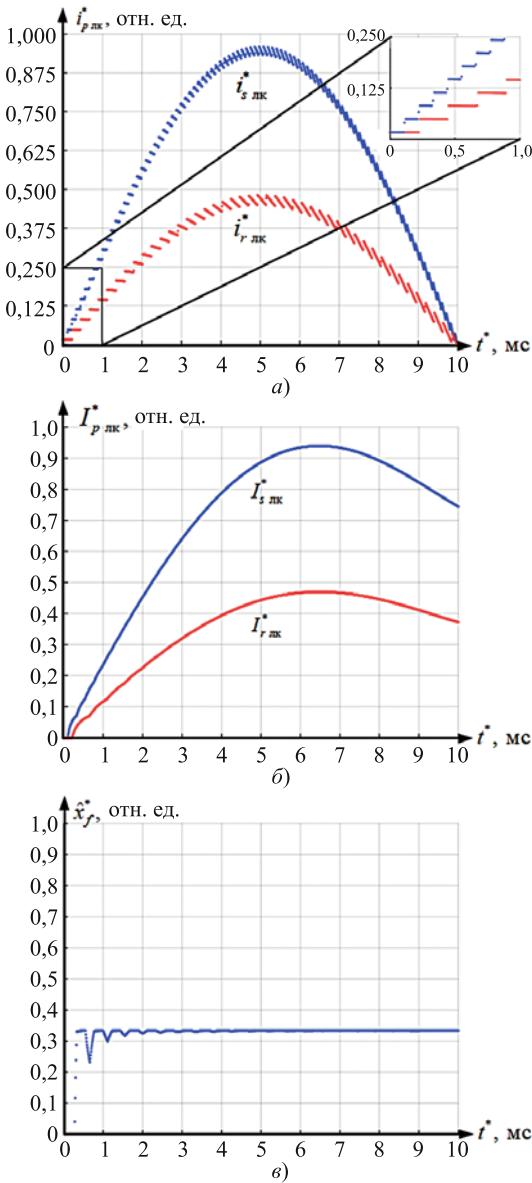


Рис. 6. Модули локальных токов, активируемых косинусоидальной ЭДС в длинной линии:

а – мгновенные локальные токи; б – интегральные локальные токи по функции (34); в – зависимость координаты места КЗ от окна наблюдения

На основе угловых коэффициентов зависимостей (23) или (25), полученных по двум локальным токам $i_{s\text{лк}}(t)$ и $i_{r\text{лк}}(t)$, может быть построена функция места КЗ

$$K(x_f) = \frac{a_s(x_f) - a_r(x_f)}{a_s(x_f) + a_r(x_f)}. \quad (26)$$

Соотношение (24) и взаимосвязи

$$\frac{\tau_s}{\tau_r} = \frac{l_s}{l_r} = \frac{x_f}{l - x_f} \quad (27)$$

приводят выражение (26) к канонической функции (2) (рис. 1, в).

Формулы (17), (20), учитывающие потери, дают следующую аппроксимацию отсчётов $i_{p\text{св}}(k_p, \varepsilon_p = 1)$ во времени t (рис. 5, б):

$$i_{p\text{лк}}(t) = I_{p\text{уст}} \left(1 - \lambda_p^{\frac{2\tau_p}{t}} \right). \quad (28)$$

Для определения установившегося тока из зависимости (28) достаточно трёх её отсчётов $i(t - 2\Delta t), i(t - \Delta t), i(t)$, взятых с интервалом Δt ,

$$I_{p\text{уст}} = \frac{i_{p\text{лк}}(t - \Delta t) + b(t)i_{p\text{лк}}(t - 2\Delta t)}{1 + b(t)}; \quad (29)$$

$$b(t) = \frac{i_{p\text{лк}}(t - \Delta t) - i_{p\text{лк}}(t)}{i_{p\text{лк}}(t - 2\Delta t) - i_{p\text{лк}}(t - \Delta t)}. \quad (30)$$

Функция места КЗ

$$K(x_f) = \frac{I_{s\text{уст}}(x_f) - I_{r\text{уст}}(x_f)}{I_{s\text{уст}}(x_f) + I_{r\text{уст}}(x_f)} \quad (31)$$

после подстановки в неё выражения установившегося тока (17) преобразуется так же, как ранее функция (26) в каноническую зависимость (2).

Функция места КЗ при действии косинусоидального источника e_f

Локальные токи, описываемые выражениями (15), (17) и (20), в данном случае будут представлены следующим образом

$$i_p^*(t_p^*; k_p, \varepsilon_p) = \cos \alpha_p t_p^* - \lambda_p^{k_p} \cos(2\alpha_p \varepsilon_p - \alpha_p), \quad (32)$$

где $i_p^* = i_p / I_{mp}$.

На рис. 6, а приведены функции (32) для линии без потерь ($\lambda_p = 1$) при $x_f = l/3$ ($\tau_s = \tau_r/2 = \tau/3$) и $\alpha = \omega_0 \tau = 6,016^\circ$, на рис. 6, б – результат применения к ним преобразований (9), (10), а на рис. 6, в – изменение во времени значения места КЗ (7), причём интегральное преобразование (10) рассматривалось только на одной из частот ω_* .

$$I_{p\text{лк}}^*(\alpha_p, t^*) = \int_0^{t^*} |i_{p\text{лк}}^*(\alpha_p, \xi)| d\xi; \quad (33)$$

$$I_{p\text{лк}}^*(\alpha_p, j\omega_*, t^*) = \int_0^{t^*} i_{p\text{лк}}^*(\alpha_p, \xi) e^{-j\omega_* \xi} d\xi, \quad (34)$$

где $t^* = t/\tau$, $\omega_* = \omega/\omega_0$.

Графики функций $K(\alpha_p)$ при фиксированных значениях времени t^* приведены на рис. 7.

Обучение индикатора КЗ

Рассмотрим процедуру определения функции $K(x_f)$ на примере однофазного КЗ. Для активирования локальных токов воспользуемся источником

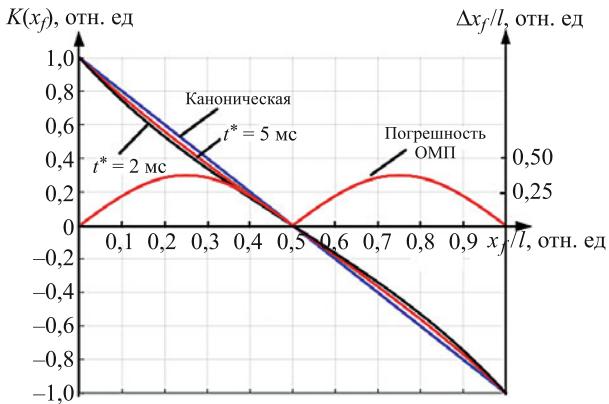


Рис. 7. Влияние окна наблюдения на функцию координаты места КЗ

$e_{Af}(t_f) = \cos \omega t$ (рис. 8), что отвечает случаю металлического КЗ.

Конкретные результаты приведены для линии 110 кВ длиной 100 км с первичными параметрами прямой и нулевой последовательности:

$$R_1^0 = 0,210 \text{ Ом / км},$$

$$X_{L1}^0 = 0,401 \text{ Ом / км},$$

$$B_{C1}^0 = 2,750 \text{ мкСм / км},$$

$$R_0^0 = 0,569 \text{ Ом / км},$$

$$X_{L0}^0 = 1,681 \text{ Ом / км},$$

$$B_{C0}^0 = 1,560 \text{ мкСм / км}.$$

Функция (7) канала безнулевых токов $I'_{s\text{лк}}(x_f, t)$, $I'_{r\text{лк}}(x_f, t)$ во многом повторяет аналогичную функцию при действии косинусоидальной ЭДС, которая была рассмотрена ранее (рис. 7).

Формирование локальных токов из наблюдаемых величин

В реальных условиях наблюдаются токи и напряжения текущего режима КЗ $i_s(t_s)$, $u_s(t_s)$; $i_r(t_r)$, $u_r(t_r)$. Существуют два варианта решения задачи выделения из текущих токов i_s и i_r их локальных компонентов $i_{s\text{лк}}$ и $i_{r\text{лк}}$ в соответствии с двумя возможными моделями локального режима (рис. 1, а, б). В обоих вариантах требуется исключить из токов $i_s(t_s)$ и $i_r(t_r)$ те составляющие, которые обязаны своим происхождением напряжениям $u_s(t_s)$ и $u_r(t_r)$. Ситуацию объясняют два варианта модели текущего режима, в которых напряжения представлены по принципу компенсации зависимыми ЭДС $e_s(t_s) = u_s(t_s)$ и $e_r(t_r) = u_r(t_r)$ (рис. 9, 10).

Модели различаются тем, каким из двух возможных типов источников имитируется повреждение. Поскольку место повреждения и сами источники неизвестны, на рис. 9, а и 10, а они изображены пунктирными линиями. Метод наложения предоставляет возможность разграничить действие известных источников e_s , e_r и неизвестных i_f или e_f . Между вариантами с источником тока i_f и ЭДС e_f имеется принципиальное отличие. В первом

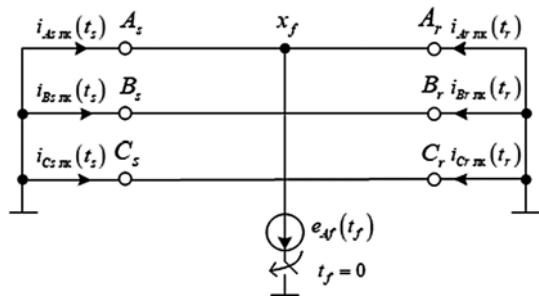


Рис. 8. Модель локального режима при однофазном КЗ

вом случае известные источники e_s , e_r действуют в модели неповреждённой линии (рис. 9, б, в, г), в силу чего создаваемые ими токи названы нормальными [5 – 7]. ЭДС $e_s(t_s)$ создаёт ток $i_{s1\text{HM}}(t_s)$ на своей стороне линии и ток $i_{s2\text{HM}}(t_r)$ на противоположной стороне (рис. 9, б). В свою очередь ЭДС $e_r(t_r)$ создаёт токи $i_{r1\text{HM}}(t_r)$ и $i_{s2\text{HM}}(t_s)$ (рис. 9, в). Наложение частичных нормальных токов образует итоговые нормальные токи

$$i_{p\text{HM}}(t_p) = i_{p1\text{HM}}(t_p) + i_{p2\text{HM}}(t_p), \quad p = s, r. \quad (35)$$

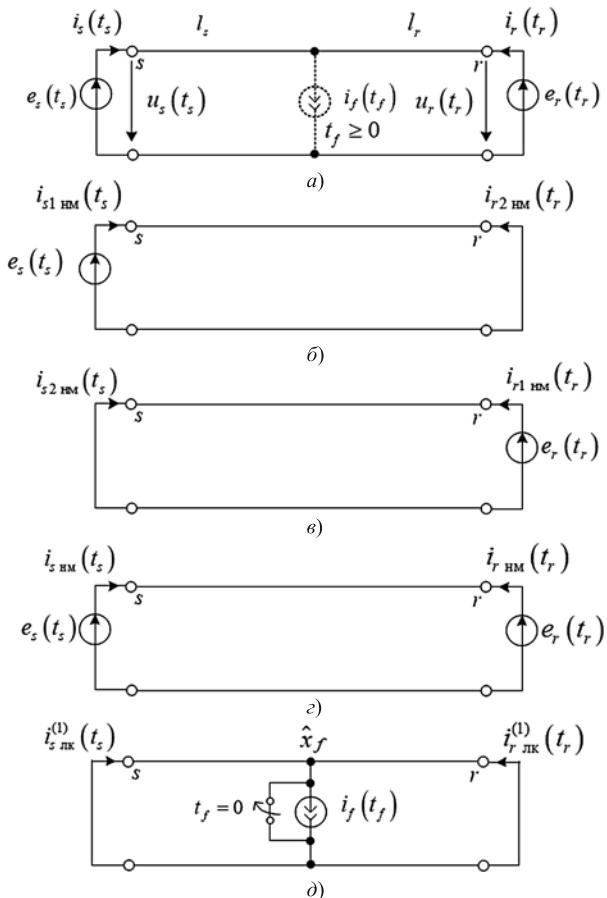


Рис. 9. Модели в первой модификации алгоритма ОМП:
а – текущего режима; б, в, г – составляющих нормального режима и их наложения; д – локального режима первого типа

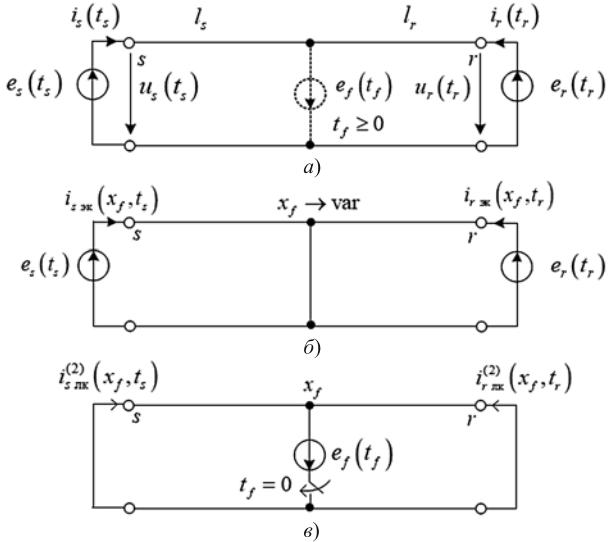


Рис. 10. Модели во второй модификации алгоритма ОМП:

а – текущего режима; б – экстремального режима; в – локального режима второго типа

Необходимо заметить, что в данном варианте нормальный режим линии определяется вне какой-либо связи с предполагаемым местом КЗ. Во втором варианте (рис. 10) ситуация иная. Там известные источники e_s и e_r действуют в модели, где ЭДС e_f оставляет вместо себя закоротку (рис. 10, б). Такой режим может быть охарактеризован как экстремальный [6]. В отличие от нормального режима ему присуща функциональная привязка к предполагаемому месту КЗ x_f , что на рис. 10, б нашло отражение в записи токов как функций двух аргументов – x_f и t . Нормальный и экстремальные режимы правомерно интерпретировать как прямое продолжение предшествующего режима наблюдаемой линии. Иначе говоря, предшествующий режим формирует начальные условия для последующих нормального или экстремальных режимов.

В соответствии с принципом наложения на долю локального тока остаётся разность между

наблюдаемым током и, в первом варианте, его нормальной составляющей

$$i_{p_{\text{лк}}}^{(1)}(t_p) = i_p(t_p) - i_{p_{\text{нм}}}(t_p), \quad (36)$$

а во втором варианте – экстремальным током

$$i_{p_{\text{лк}}}^{(2)}(x_f, t_p) = i_p(t_p) - i_{p_{\text{эк}}}(x_f, t_p). \quad (37)$$

Если оценка координаты места КЗ \hat{x}_f получена по первому варианту определения локальных токов, то желательно воспользоваться вторым вариантом для подтверждения полученного результата.

Иллюстрация процедуры ОМП на примере однофазного КЗ

Модель наблюдаемой линии, приведённая ранее на рис. 8 в априорном локальном режиме с тестирующим источником e_{Af} и начальной фазой 90° , здесь дополняется моделями передающей и приёмной систем (рис. 11). Задаётся координата места КЗ x_f и переходное сопротивление R_f .

Конкретные результаты приведены далее для следующих значений параметров прямой и нулевой последовательности двух сторон: $L_{s1} = 6,27 \text{ мГн}$, $L_{s0} = 12,54 \text{ мГн}$, $R_{s1} = 0,35 \Omega$, $R_{s0} = 0,69 \Omega$, $L_{r1} = 9,40 \text{ мГн}$, $L_{s0} = 18,81 \text{ мГн}$, $R_{s1} = 0,52 \Omega$, $R_{s0} = 1,04 \Omega$. Напряжения источников e_s и e_r приняты равными номинальному напряжению сети. В предшествующем режиме угол передачи линии составлял $\delta = 5^\circ$. Имитировалось КЗ в месте $x_f = 0,2l$ через переходное сопротивление $R_f = 10 \Omega$.

Первая операция индикатора КЗ заключается в преобразовании наблюдаемых напряжений $u_s(t_s)$, $u_r(t_r)$ в частичные нормальные токи $i_{s1_{\text{нм}}}(t_s)$, $i_{r2_{\text{нм}}}(t_r)$, $i_{r1_{\text{нм}}}(t_r)$, $i_{s2_{\text{нм}}}(t_s)$ (рис. 9, б, в). Вторая операция – определение локальных токов как функций времени (36), третья – перевод их в интегральную форму (8) – также функцию времени $I_{\text{лк}}^{(1)}(t)$. Заключительная операция – определение замера (7) как функции $K(t)$ и отображение её на одном графике рис. 7 с семейством априорных функций места КЗ. Результат выполнения всех операций представлен на рис. 12, откуда видно, что в тече-

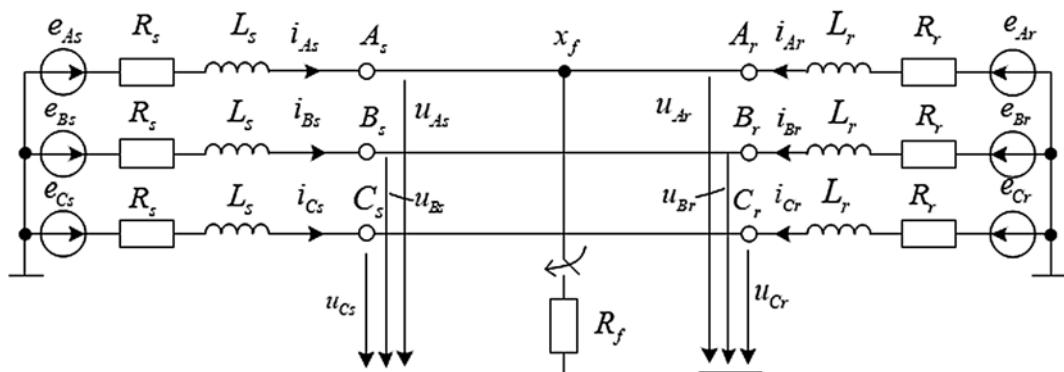


Рис. 11. Имитационная модель наблюдаемой линии

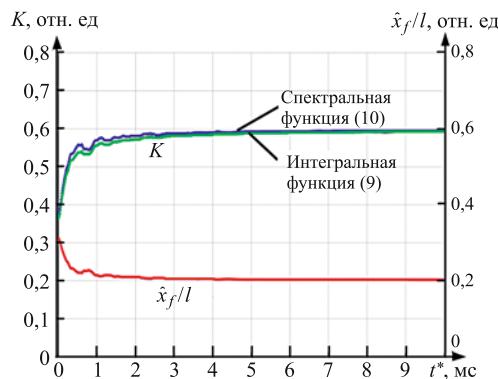


Рис. 12. Изменение функции и оценки координаты места КЗ \hat{x}_f/l во времени после возникновения локального режима

ние пяти миллисекунд после начала КЗ значение функции места КЗ и, как следствие, оценка координаты этого места \hat{x}_f устанавливаются. Погрешность оценки не превышает 1% длины линии.

Выводы

1. Локальные составляющие токов, наблюдавшихся на разных сторонах линии электропередачи, несут информацию о месте КЗ будучи представлены не только в базисе комплексных величин, но и в базисе мгновенных значений. Универсальный характер локальных токов объясняется тем, что они протекают в модели линии с зашунтированными входами и активируются источником, действующим из неизвестного места КЗ. Базис мгновенных значений избавляет от необходимости фильтровать локальные токи с целью выделения компонента основной частоты.

2. Функциональная связь между соотношением локальных токов и координатой места КЗ существует на произвольной комплексной частоте. Локальному режиму с ограниченным спектром частот отвечает линейная каноническая функция места КЗ. Закономерность изменения огибающей мгновенного локального тока, обнаруживаемая в аналитических примерах, также отвечает этой зависимости. Отклонение от неё при однофазном КЗ составляет незначительную величину спустя несколько миллисекунд после его начала.

Список литературы

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита [Текст] / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. Фадке, А. Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах [Текст] / А. Г. Фадке, Д. С. Торп; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. – М.: Техносфера, 2019.
3. Попов, И. Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов [Текст] / И. Н. Попов, В. Ф. Лачугин, Г. В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Белянин, А. А. Локация замыкания в длинной линии по величинам волнового процесса [Текст] / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец, А. Ю. Чернов // Изв. РАН. Энергетика. – 2019. – № 4.
5. Лямец, Ю. Я. Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети [Текст] / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин // Электротехника. – 2016. – № 10.
6. Кочетов, И. Д. Унификация моделей и характеристик повреждённой электропередачи при двухстороннем наблюдении [Текст] / И. Д. Кочетов, Ю. Я. Лямец, Ф. А. Макашкин // Изв. РАН. Энергетика. – 2020. – № 4.
7. Кочетов, И. Д. Информационные свойства и приложения локальной составляющей тока короткого замыкания [Текст] / И. Д. Кочетов, Ю. Я. Лямец, Ф. А. Макашкин // Электротехника. – 2021. – № 2.
8. Лямец, Ю. Я. Анализ переходных процессов в длинной линии в базисе дискретного и непрерывного времени [Текст] / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 5.