

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

СТАЦИИ

ISSN 0201-4564

2021 5

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Развитие угольной паротурбинной энергетики Китая в ближайшей перспективе

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Методология анализа внутренних воздействий на безопасность АЭС

ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Стандартизация предоставления информации субъектами электроэнергетики для целей оперативно-диспетчерского управления в соответствии с серией ГОСТ Р 58651

Быстродействующие полупроводниковые регуляторы напряжения трансформаторов под нагрузкой для распределительных сетей

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Особенности работы ветровых электростанций в составе электроэнергетической системы

ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

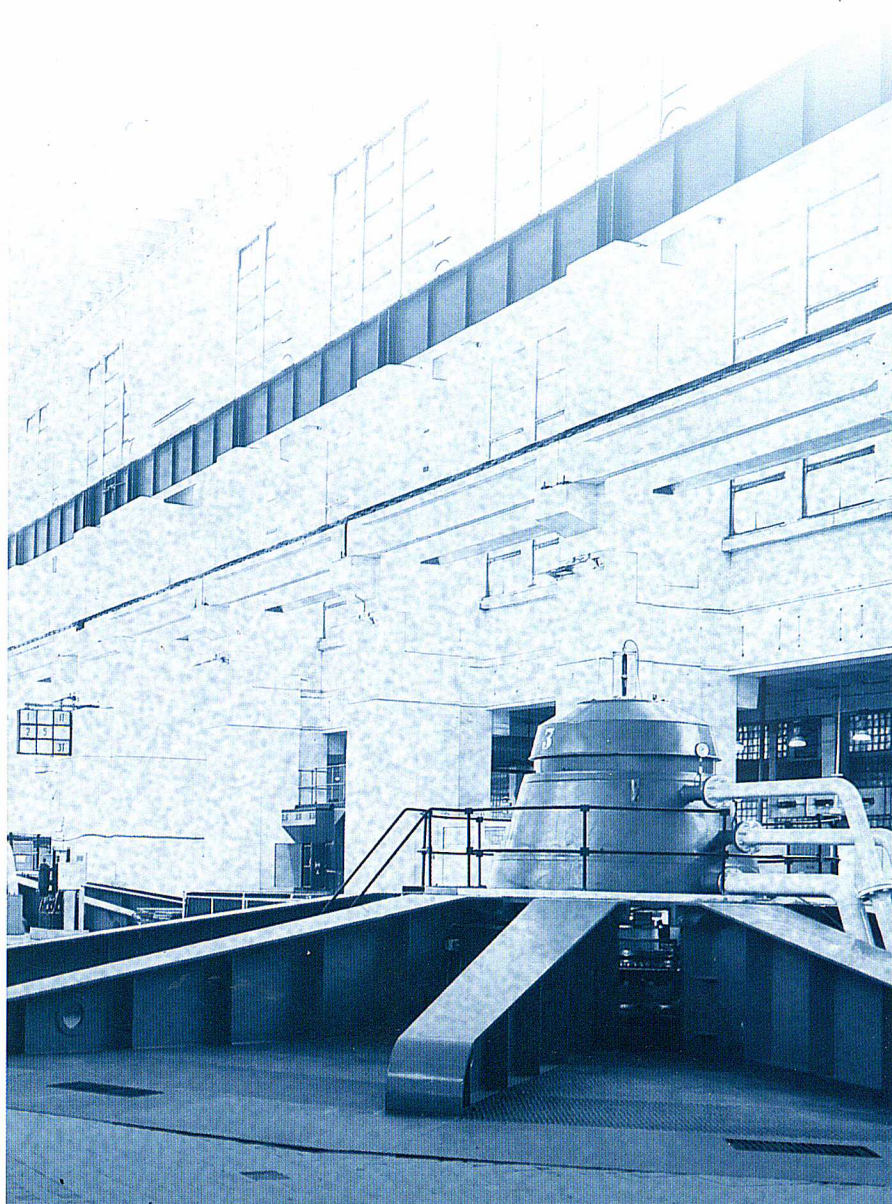
О тепловом состоянии обмотки ротора турбогенератора с самовентиляцией из подпазового канала

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ

Распознавание короткого замыкания при каскадном отключении повреждённой цепи в двухцепной линии электропередачи

ХРОНИКА

Новости электротехнических и электроэнергетических компаний



УЧРЕДИТЕЛИ

МИНЭНЕРГО РОССИИ,
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ
КОМПАНИЯ ЕЭС,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
"КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК",
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

Антипов К.М., канд. техн. наук
Бондаренко А.Ф., Волков Э.П., академик РАН,
Воротницкий В.Э., доктор техн. наук,
Денисов В.И., доктор эконом. наук,
Долматов И.А., канд. эконом. наук,
Зорченко Н.В., канд. техн. наук, Касьянов Л.Н.,
Корниенко А.Г., Кошечев Л.А., доктор техн. наук,
Лачугин В.Ф., доктор техн. наук,
Лейзерович А.Ш., доктор техн. наук (США),
Львов М.Ю., доктор техн. наук,
Любарский Д.Р., доктор техн. наук,
Мисриханов М.Ш., доктор техн. наук,
Нечаев В.В., канд. техн. наук,
Новак В., доктор техн. наук (Польша),
Орфеев В.М., Пикин М.А., канд. техн. наук,
Савваитов Д.С., канд. техн. наук,
Седлов А.С., доктор техн. наук,
Соловьёва Т.И., Тупов В.Б., доктор техн. наук,
Широкова М.И.

РЕДАКЦИЯ

Зам. главного редактора
Соловьёва Т.И.

Ответственный секретарь, научный редактор
Широкова М.И.

Секретарь редакции
Васина С.А.

Компьютерный набор
Коновалова О.Ф.

АДРЕС РЕДАКЦИИ

115280, Москва,
3-й Автозаводский проезд, 4, корп. 1

ТЕЛЕФОНЫ

Редакция (495) 234-7417, 234-7419

Главный редактор (495) 234-7617

Internet www.elst.energy-journals.ru

E-mail

el-stantsii@rambler.ru
el.stantsii@gmail.com

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

Редакция не несёт ответственности за
достоверность информации, опубликованной
в рекламных объявлениях.

При перепечатке ссылка на журнал
«Электрические станции» обязательна.

Сдано в набор 14.04.2020

Подписано в печать 17.05.2021

Дата выхода в свет 27.05.2021

Формат 60×84 1/8

Бумага Galerie Art Silk. Печать офсетная
Усл. п. л. 9. Тираж 1800. Цена свободная

Оригинал-макет

выполнен в издательстве "Фолиум"
127411, Москва, Дмитровское ш., 157
Тел/факс: (499) 258-0828
Internet: 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

© НТФ "Энергопрогресс",
"Электрические станции", 2021



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2021 5

Издаётся
с января 1930 г.
1078-й выпуск
с начала издания

Содержание

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	
Лейзерович А. Ш. Развитие угольной паротурбинной энергетики Китая в ближайшей перспективе . . .	2
АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	
Горюнов О. В., Ермакович Ю. Л., Кузьмина И. Б., Ланин Д. Г. Методология анализа внутренних воз- действий на безопасность АЭС	9
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ	
Богомолов Р. А. Стандартизация предоставления информации субъектами электроэнергетики для целей оперативно-диспетчерского управления в соответствии с серией ГОСТ Р 58651	17
Асташев М. Г., Панфилов Д. И., Рожков А. Н., Петров М. И., Рашитов П. А., Горчаков А. В. Быстро- действующие полупроводниковые регуляторы напряжения трансформаторов под нагрузкой для распределительных сетей	23
ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА	
Сигитов О. Ю., Чемборисова Н. Ш. Особенности работы ветровых электростанций в составе электро- энергетической системы	32
ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ	
Верховцев Д. А., Гуревич Э. И., Коровкин Н. В. О тепловом состоянии обмотки ротора турбогенератора с самовентилирующей из подпазового канала	38
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, СВЯЗЬ	
Лямец Ю. Я., Мартынов М. В., Никонов И. Ю. Распознавание короткого замыкания при каскадном отключении повреждённой цепи в двухцепной линии электропередачи	44
ХРОНИКА	
Новости электротехнических и электроэнергетических компаний	53
В. А. Биленко (к 75-летию со дня рождения)	66
Content, Abstracts, Keywords	69
Правила оформления рукописи статьи	71

Распознавание короткого замыкания при каскадном отключении повреждённой цепи в двухцепной линии электропередачи

- **Лямец Ю. Я.**, доктор техн. наук, ООО “Релематика”; Чувашский госуниверситет, Чебоксары
- **Мартынов М. В.**, канд. техн. наук, ООО “Релематика”, Чебоксары
- **Никонов И. Ю.**¹, ООО “Релематика”, Чувашский госуниверситет, Чебоксары

Статья дополняет опубликованный ранее анализ информационного вклада каскадного отключения линии электропередачи в распознавание произошедшего в ней короткого замыкания (КЗ). Распознаваемость КЗ при одностороннем наблюдении линии благодаря отключению противоположной стороны повышается, но сохраняется необходимость в привлечении полной информации о фазных величинах, включая, что нежелательно, их составляющие нулевой последовательности. Показано, что в случае двухцепной линии электропередачи, притом с обходной связью, каскадное отключение повреждённой цепи открывает принципиально новую возможность оценить напряжение и ток на её ненаблюдаемой стороне. Складывается ситуация, во многом, хотя и не во всём, напоминающая двухстороннее наблюдение повреждённой цепи. Главное, что комбинированное наблюдение, как и обычное двухстороннее, может осуществляться в двухпроводных каналах фазных величин, освобождённых от составляющих нулевой последовательности. Показана эффективность разделения центрированных фазных токов на две составляющие – нормальную, определяемую в модели неповреждённой линии, и локальную, действующую в каналах, зашунтированных с обеих сторон. Замер, на основе которого распознается место КЗ, характеризуется априорной зависимостью от координаты линии. Теоретические положения проиллюстрированы на примерах двухцепных линий, в том числе реальной электропередачи с ответвлениями.

Ключевые слова: двухцепная линия электропередачи, одностороннее наблюдение, определение места повреждения, каскадное отключение.

Двухстороннее наблюдение линии электропередачи по сравнению с односторонним наблюдением обладает бесспорным информационным превосходством. Абсолютная селективность защиты с двухсторонним наблюдением безусловно предпочтительнее относительной селективности защиты с односторонним наблюдением. В частности, абсолютная селективность устраняет необходимость отстройки защиты от коммутаций на противоположной стороне линии. Кроме того, при двухстороннем наблюдении появляется возможность распознавать повреждения, не прибегая к составляющим нулевой последовательности. Они нежелательны в связи с тем влиянием, которое оказывают на них токи в земле и в параллельных проводах [1].

Каскадное отключение линии пополняет информационную базу наблюдения на стороне, отключаемой последней [2]. Представляют интерес те условия, при выполнении которых дополнительная информация создаёт возможность оценивания электрических величин на противоположной стороне линии. Подобное наблюдение линии

занимает промежуточное положение между одно- и двухсторонним. Назовём его комбинированным. Оно повышает распознающую способность одностороннего наблюдения, но не настолько, чтобы обеспечить абсолютную селективность релейной защиты. Эффективность каскадного отключения объясняется тем, что короткое замыкание (КЗ) в линии при наблюдении на приёмной стороне распознаётся проще, чем на передающей, так как защита линии на передающей стороне должна быть отстроена от замыкания выключателя на противоположном конце линии, а защита на приёмной стороне в подобной блокировке не нуждается.

Рассмотрим стоящую задачу на примере двухцепной линии, в общем случае с ответвлениями и с обходной связью. Линия наблюдается на передающей стороне в трёх режимах – предшествующем, режиме КЗ и режиме каскадного отключения (КО) (рис. 1). Показан двухпроводный фазный канал линии без составляющих нулевой последовательности. Применяется следующая система обозначений: I – наблюдаемая величина, \hat{I} – оценка

¹ Никонов Иван Юрьевич: ivan04031997@gmail.com

ненаблюдаемой величины, \hat{I} – неизвестная величина.

На стороне s обеих цепей линии электропередачи наблюдаются токи и напряжения трёх режимов: предшествующего – $\underline{I}_{si\text{ пд}}, \underline{U}_{si\text{ пд}}, i = 1, 2$; режима КЗ – $\underline{I}_{si\text{ кз}}, \underline{U}_{si\text{ кз}}$, режима КО – $\underline{I}_{si\text{ ко}}, \underline{U}_{si\text{ ко}}$ (рис. 1). Ненаблюдаемая сторона r представлена в модели электропередачи эквивалентным генератором – активным двухполюсником A с неизвестными параметрами – внутренним сопротивлением \underline{Z}_r и ЭДС \underline{E}_r . На рис. 1, б, в показаны неизвестные токи: $\hat{I}_{f\text{ кз}}$ и $\hat{I}_{f\text{ ко}}$ – в месте КЗ с неизвестной координатой x_f ; $\hat{I}_{r\text{ кз}}$ – на ненаблюдаемой стороне линии. Между тем, тот же ток в режиме КО обозначен как $\hat{I}_{r\text{ ко}}$, что свидетельствует о сложившихся наконец условиях для его оценивания.

Априорная информация об электропередаче задаётся коэффициентами $\underline{A}_i, \underline{B}_i, \underline{C}_i, \underline{D}_i$ формы А (прямая передача) каждой цепи как четырёхполюсника, а также коэффициентами \underline{Y}_{rr} и \underline{Y}_{rs} формы уравнений Y. Оценки напряжения и тока на выходе второй, неповреждённой цепи во всех трёх режимах определяются стереотипно уравнениями обратной передачи

$$\begin{aligned} \hat{U}_r &= \underline{D}_2 \underline{U}_s - \underline{B}_2 \underline{I}_{s2}; \\ \hat{I}_{r2} &= -\underline{C}_2 \underline{U}_s + \underline{A}_2 \underline{I}_{s2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Также во всех трёх режимах определяется оценка выходного тока обходной связи

$$\hat{I}_{r3} = -(\underline{Y}_{rs3} \underline{U}_s + \underline{Y}_{rr3} \hat{U}_r). \quad (2)$$

Первая цепь не повреждена только в одном из трёх режимов, и только тогда имеется возможность оценить удалённый ток

$$\hat{I}_{r1\text{ пд}} = -\underline{C}_1 \underline{U}_s + \underline{A}_1 \underline{I}_{s1\text{ пд}}. \quad (3)$$

Ток \underline{I}_r двухполюсника A_r получает оценку в предшествующем режиме

$$\hat{I}_{r\text{ пд}} = \hat{I}_{r1\text{ пд}} + \hat{I}_{r2\text{ пд}} + \hat{I}_{r3\text{ пд}} \quad (4)$$

и, что самое существенное, ещё и в режиме КО

$$\hat{I}_{r\text{ ко}} = \hat{I}_{r2\text{ ко}} + \hat{I}_{r3\text{ ко}}. \quad (5)$$

Токов и напряжений двух режимов достаточно для определения параметров эквивалентного генератора

$$\underline{Z}_r = \frac{\hat{U}_{r\text{ пд}} - \hat{U}_{r\text{ ко}}}{\hat{I}_{r\text{ пд}} - \hat{I}_{r\text{ ко}}}; \quad (6)$$

$$\hat{E}_r = \hat{U}_{r\text{ пд}} + \hat{Z}_r \hat{I}_{r\text{ пд}}, \quad (7)$$

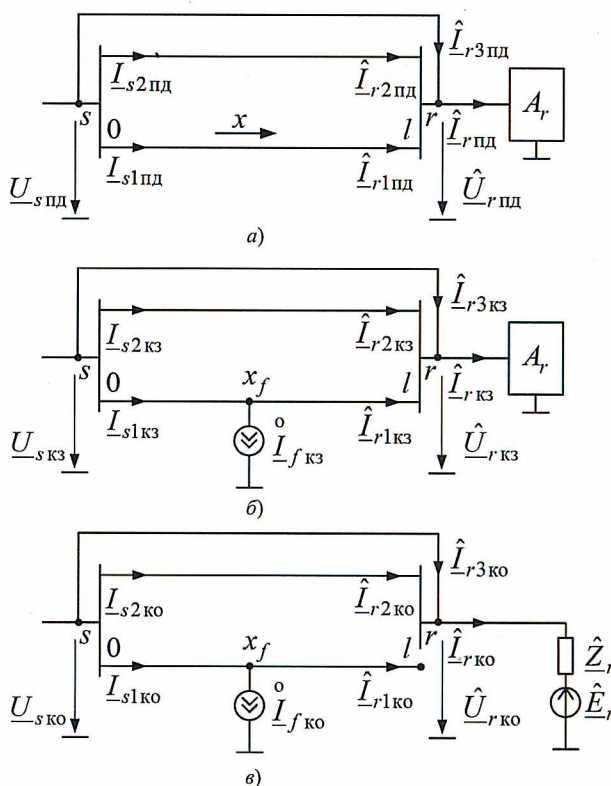


Рис. 1. Модели двухцепной электропередачи в различных режимах:

а – предшествующем; б – в режиме КЗ; в – в режиме КО

что открывает возможность обратиться к режиму КЗ, доопределив его модель (рис. 1, б)

$$\hat{I}_{r\text{ кз}} = \hat{U}_{r\text{ кз}} / \hat{Z}_r; \quad (8)$$

$$\hat{I}_{r1\text{ кз}} = \hat{I}_{r\text{ кз}} - \hat{I}_{r2\text{ кз}} - \hat{I}_{r3\text{ кз}}. \quad (9)$$

В итоге модель повреждённой цепи предстаёт в таком виде, как если бы она наблюдалась с двух сторон (рис. 2, а), и теперь для определения координаты места КЗ можно воспользоваться априорной характеристикой этой цепи $\underline{K}_1(x_f)$, сравнивая с ней замер, определяемый токами локального режима $\underline{I}_{лк}$ [3]

$$\underline{K}_1 = \frac{\underline{I}_{s1\text{ лк}} + \underline{I}_{r1\text{ лк}}}{\underline{I}_{s1\text{ лк}} - \underline{I}_{r1\text{ лк}}}. \quad (10)$$

Локальный и нормальный режимы – составляющие режима КЗ. Токи нормального режима $\underline{I}_{нм}$ представляют собой реакцию модели той же, но неповреждённой цепи на напряжения режима КЗ (рис. 2, б)

$$\begin{aligned} \underline{I}_{s1\text{ нм}} &= \underline{Y}_{ss1} \underline{U}_{s1\text{ кз}} + \underline{Y}_{sr1} \underline{U}_{r1\text{ кз}}; \\ \underline{I}_{r1\text{ нм}} &= -(\underline{Y}_{rs1} \underline{U}_{s1\text{ кз}} + \underline{Y}_{rr1} \underline{U}_{r1\text{ кз}}), \end{aligned} \quad (11)$$

а токи локального режима – это остающаяся часть токов КЗ

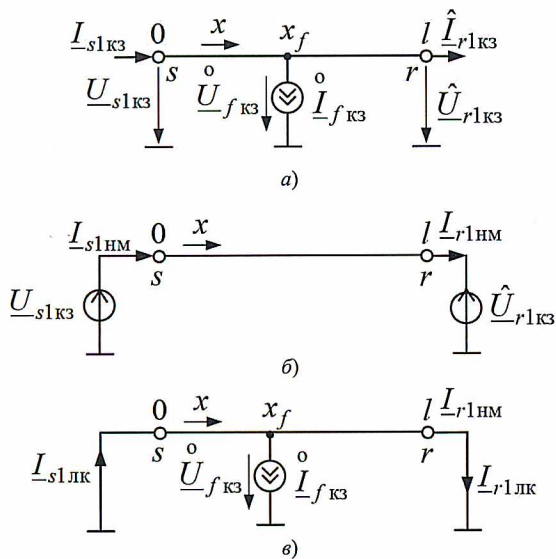


Рис. 2. Модели повреждённой цепи в режимах виртуального двухстороннего наблюдения:

а – чисто аварийном; б – нормальном; в – локальном

$$\begin{aligned} \underline{I}_{s1лк} &= \underline{I}_{s1кз} - \underline{I}_{s1нм}; \\ \hat{\underline{I}}_{r1лк} &= \hat{\underline{I}}_{r1кз} - \hat{\underline{I}}_{r1нм}. \end{aligned} \quad (12)$$

В простейшем случае, когда линия замещается одним сопротивлением \underline{Z}_1

$$\hat{\underline{I}}_{s1нм} = \hat{\underline{I}}_{r1нм} = (1/\underline{Z}_1)(\underline{U}_{s1кз} - \hat{\underline{U}}_{r1кз}). \quad (13)$$

Что же касается природы локального режима, то он как никакой другой обусловлен исключительно повреждением выделенной цепи, так как активизируется током КЗ $\underline{I}_{fкз}$ в цепи, зашунтированной с обеих сторон (рис. 2, в). Локальные токи $\underline{I}_{s1лк}$ и $\underline{I}_{s2лк}$ пропорциональны одной и той же величине – напряжению $\underline{U}_{fкз}$ в месте предполагаемого КЗ. Если $\underline{B}(x_f)$ и $\underline{B}(l-x_f)$ – коэффициенты передачи левого и правого участков линии, то

$$\underline{I}_{s1лк}(x_f) = -\frac{\underline{U}_{fкз}}{\underline{B}(x_f)}; \quad (14)$$

$$\underline{I}_{r1лк}(l-x_f) = \frac{\underline{U}_{fкз}}{\underline{B}(l-x_f)}. \quad (15)$$

Подставляя выражения (14) и (15) в отношение (10), получаем аналитическое выражение априорной характеристики

$$\underline{K}_1(x_f) = \frac{\underline{B}(x_f) - \underline{B}(l-x_f)}{\underline{B}(x_f) + \underline{B}(l-x_f)}. \quad (16)$$

В частности, для однородной линии без поперечных элементов, зависимость (16) является линейной функцией

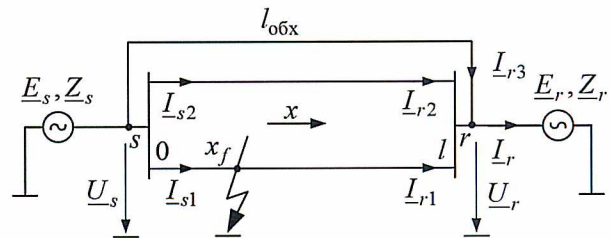


Рис. 3. Имитационная модель сети

$$\underline{K}_1(x_f) = 1 - \frac{2x_f}{l}. \quad (17)$$

В процессе наблюдения линии локальные токи формируются процедурой обработки входных величин, включающей в себя операции, описанные выражениями (2) – (9), (11), (12), а координата места КЗ определяется сравнением замера по формуле (10) с априорной характеристикой $\underline{K}_1(x_f)$ [4].

Проиллюстрируем описанную процедуру распознания КЗ на примере простейшей структуры по рис. 3, где $l = 100$ км, $l = 120$ км, удельное сопротивление линий и обходной связи $\underline{Z}^0 = 0,1 + j0,4$ Ом/км. Каждая цепь как четырёхполюсник характеризуется коэффициентами: $\underline{A} = \underline{D} = 1$, $\underline{B} = 10 + j40$, $\underline{C} = 0$. Зависимость замера \underline{K}_1 от координаты x_f места КЗ в однородной цепи в данном случае имеет вид функции (17).

Рассмотрим имитационную модель сети по рис. 3, предшествующий режим которой задаётся источниками с фазными параметрами $E_s = E_r = E = 110/\sqrt{3}$ кВ, $E_s/E_r = \exp j\delta$, $\delta = 30^\circ$. Сопротивления прямой последовательности систем: $\underline{Z}_{s1} = 10,05 \angle 84,29^\circ$ Ом, $\underline{Z}_{r1} = 85,44 \angle 69,44^\circ$ Ом. В фазе А ЭДС $\underline{E}_{sA} = E \angle 92,75^\circ$ кВ. Величины фазы А, наблюдаемые в этом режиме: $\underline{U}_{sAпд} = 51,81 \angle 90,03^\circ$ кВ, $\underline{I}_{sA1пд} = 86,26 \angle 96,08^\circ$ А, $\underline{I}_{sA2пд} = 86,26 \angle 96,08^\circ$ А, а оценка ненаблюдаемых величин $\underline{U}_{rAпд} = 51,44 \angle 86,11^\circ$ кВ, $\underline{I}_{rA1пд} = 86,26 \angle 96,08^\circ$ А, $\underline{I}_{rA2пд} = 86,26 \angle 96,08^\circ$ А, $\underline{I}_{rA3пд} = 71,88 \angle 96,08^\circ$ А, $\underline{I}_{rAпд} = 244,41 \angle 96,08^\circ$ А.

Предположим, что однофазное КЗ с переходным сопротивлением $R_f = 50$ Ом произошло в фазе А в одном из трёх мест, координаты которых $x_f^* = 0,25; 0,5; 0,75$, где $x_f^* = x_f/l$. Указанным значениям отвечают значения замера (17) – 0,5; 0; (-0,5). Значения величин, наблюдаемых в режимах КЗ и КО не только в повреждённой, но и в одно из неповреждённых фаз, приведены в табл. 1. В этих несимметричных режимах целесообразно перейти к центрированным составляющим фазных величин [5, 6]

$$\underline{U}'_{sv} = \underline{U}_{sv} - \underline{U}_{s0}, \quad \underline{I}'_{sv} = \underline{I}_{sv} - \underline{I}_{s0}, \quad v = A, B, C, \quad (18)$$

где \underline{U}_{s0} и \underline{I}_{s0} – составляющие нулевой последовательности наблюдаемых величин. Заметим, что параметры источников $\underline{E}_s, \underline{Z}_{s1}$ и $\underline{E}_r, \underline{Z}_{r1}$, задаваемые в имитационной модели, в дальнейшем при распознавании места КЗ остаются неизвестными, как и электрические величины ненаблюдаемой стороны электропередачи $\underline{U}_r, \underline{I}_{r1}, \underline{I}_{r2}, \underline{I}_{r3}, \underline{I}_r$. Обработка наблюдаемых величин, точнее их центрированных составляющих, выполнялась в фазных двухпроводных каналах неповрежденной цепи с параметрами прямой (обратной) последовательности. Дело в том, что центрированные составляющие

соединяют в себе именно эти две последовательности. Результаты оценивания ненаблюдаемых величин приведены в табл. 2. Наконец, нормальные и локальные компоненты центрированного тока КЗ поврежденной фазы, а также значение определяемого по локальным компонентам замера (10), приведены в табл. 3.

Значения замера $\hat{\underline{K}}_1$, завершающие процедуру распознавания координаты места КЗ, свидетельствуют об отсутствии методической погрешности локации повреждений. Важно обратить внимание на ещё одно обстоятельство: точный результат по-

Таблица 1
Электрические величины режимов КЗ и КО

Место КЗ	Напряжение, кВ; ток, А					
	Наблюдаемые			Оцениваемые		
	Полные		Полные			
1	$\underline{U}_{As\text{ КЗ}}$	48,83∠81,33°	\underline{U}'_{As1}	49,70∠84,34°	$\hat{\underline{U}}'_{Ar1}$	49,06∠79,1°
2		48,45∠82,32°		49,47∠85,01°		47,91∠77,87°
3		48,40∠82,83°		49,45∠85,34°		46,99∠76,29°
1	$\underline{U}_{Bs\text{ КЗ}}$	51,81∠-29,97°	\underline{U}'_{Bs1}	49,09∠-30,21°	$\hat{\underline{U}}'_{Br1}$	48,16∠-34,26°
2				49,30∠-29,95°		47,46∠-33,86°
3				49,43∠-29,87°		46,69∠-33,62°
1	$\underline{I}_{As1\text{ КЗ}}$	816∠73,61°	\underline{I}'_{As1}	571∠74,71°	$\hat{\underline{I}}'_{Ar1}$	57∠-140,95°
2		627∠70,22°		444∠71,84°		152∠-126,76°
3		468∠69,97°		338∠72,11°		251∠-123,06°
1	$\underline{I}_{Bs1\text{ КЗ}}$	86∠-23,92°	\underline{I}'_{Bs1}	267∠-90,21°	$\hat{\underline{I}}'_{Br1}$	100∠15,05°
2				203∠-88,57°		138∠29,92°
3				155∠-81,69°		182∠38,38°
1	$\underline{I}_{As2\text{ КЗ}}$	124∠84,88°	\underline{I}'_{As2}	111∠87,77°	$\hat{\underline{I}}'_{Ar2}$	111∠87,77°
2		186∠77,62°		152∠81,06°		152∠81,06°
3		250∠73,74°		194∠76,97°		194∠76,97°
1	$\underline{I}_{Bs2\text{ КЗ}}$	86∠-23,92°	\underline{I}'_{Bs2}	86∠-33,32°	$\hat{\underline{I}}'_{Br2}$	86∠-33,32°
2				92∠-47,01°		92∠-47,01°
3				101∠-58,78°		101∠-58,78°
1	$\underline{U}_{As\text{ КО}}$	48,63∠81,33°	\underline{U}'_{As1}	49,55∠84,42°	$\hat{\underline{U}}'_{Ar1}$	49,79∠79,81°
2		47,95∠82,74°		49,13∠85,36°		49,42∠80,53°
3		47,66∠84,02°		48,98∠86,2°		49,26∠81,18°
1	$\underline{U}_{Bs\text{ КО}}$	51,80∠-29,79°	\underline{U}'_{Bs1}	49,01∠-29,98°	$\hat{\underline{U}}'_{Br1}$	49,11∠-35,81°
2				49,29∠-29,56°		49,11∠-35,46°
3				49,58∠-29,3°		49,52∠-35,23°
1	$\underline{I}_{As2\text{ КО}}$	84∠102,31°	\underline{I}'_{As2}	97∠99,53°	$\hat{\underline{I}}'_{Ar2}$	97∠99,53°
2		90∠104,46°		101∠100,91°		101∠100,91°
3		95∠105,2°		105∠101,48°		105∠101,48°
1	$\underline{I}_{Bs2\text{ КО}}$	124∠-24,21°	\underline{I}'_{Bs2}	121∠-17,8°	$\hat{\underline{I}}'_{Br2}$	121∠-17,8°
2				123∠-18,35°		123∠-18,35°
3				124∠-18,95°		124∠-18,95°

лучен как в двухпроводном канале поврежденной фазы *A*, так и в канале неповрежденной фазы *B* (табл. 3), что на первый взгляд может показаться странным. Все объясняют граничные условия в месте КЗ. Между центрированными составляющими токов разных фаз в этом месте *f* при однофазном КЗ действуют соотношения [6]

$$\begin{aligned} \underline{I}'_{Af} &= (2/3)\underline{I}_{Af}; \\ \underline{I}'_{Bf} &= \underline{I}'_{Cf} = -(1/3)\underline{I}_{Af}, \end{aligned} \quad (19)$$

где \underline{I}'_{Af} – ток КЗ. Как следует из данных табл. 3, ток $\underline{I}'_{As\text{ лк}}$ в поврежденной фазе *A* вдвое превышает ток $\underline{I}'_{Bs\text{ лк}}$ и находится с ним в противофазе, как и ток $\underline{I}'_{Ar\text{ лк}}$ по отношению к $\underline{I}'_{Br\text{ лк}}$, что объясняется задаваемой условием (19) пропорцией между

активирующими локальный режим токами \underline{I}'_{Af} и \underline{I}'_{Bf} .

В качестве ещё одной иллюстрации изложенных положений рассмотрим двухцепную воздушно-кабельную линию электропередачи 110 кВ длиной $l = 10,31$ км Новокремлёвская – Западная (Казанских электрических сетей) с четырьмя ответвлениями и обходной связью (рис. 4). Координаты ответвлений x_1, x_2, x_3, x_4 равны 1,27; 2,43; 4,50; 7,72 км соответственно. Трансформатор первого ответвления – 16 МВ·А, 110/6 кВ, остальных ответвлений – 110/35 кВ мощностью 40, 2 × 40, 40 МВ·А; коэффициенты загрузки трансформаторов 0,7. Длины ответвлений $l_{i\text{ от}}$: 121 м, 1,68 км, 0, 25 м. Сопротивления КЗ трансформаторов ответвлений: первого – $4,39 + j86,8$ Ом, второго и четвертого – $1,41 + j36$ Ом, третьего – $2,81 +$

Таблица 2

Оценки центрированных составляющих величин фаз *A* и *B* ненаблюдаемой стороны линии

Место КЗ	Напряжение, кВ; ток А; сопротивление, Ом		
	Величина	Фаза <i>A</i>	Фаза <i>B</i>
1	$\hat{I}'_{r3\text{ пл}}$	$72\angle 96,08^\circ$	$72\angle -23,92^\circ$
2			
3			
1	$\hat{I}'_{r\text{ пл}}$	$244\angle 96,08^\circ$	$244\angle -23,92^\circ$
2			
3			
1	$\hat{I}'_{r3\text{ кз}}$	$92\angle 87,77^\circ$	$72\angle -33,32^\circ$
2		$126\angle 81,06^\circ$	$76\angle -47,01^\circ$
3		$162\angle 76,97^\circ$	$84\angle -58,78^\circ$
1	$\hat{I}'_{r3\text{ ко}}$	$81\angle 99,53^\circ$	$101\angle -17,8^\circ$
2		$84\angle 100,91^\circ$	$102\angle -18,35^\circ$
3		$87\angle 101,48^\circ$	$104\angle -18,95^\circ$
1	$\hat{I}'_{r\text{ ко}}$	$178\angle 99,53^\circ$	$222\angle -17,8^\circ$
2		$185\angle 100,91^\circ$	$225\angle -18,35^\circ$
3		$192\angle 101,48^\circ$	$228\angle -18,95^\circ$
1	\hat{Z}_{r1}	$86\angle 69,46^\circ$	$86\angle 69,43^\circ$
2			
3			
1	\hat{E}'_r	$51,85\angle 62,76^\circ$	$51,84\angle -57,25^\circ$
2			
3			
1	$\hat{I}'_{r\text{ кз}}$	$171\angle 102,36^\circ$	$237\angle -14,93^\circ$
2		$160\angle 107,45^\circ$	$241\angle -12,95^\circ$
3		$147\angle 112,59^\circ$	$243\angle -10,82^\circ$
1	$\hat{I}'_{r1\text{ кз}}$	$57\angle -140,95^\circ$	$100\angle -15,05^\circ$
2		$152\angle -126,76^\circ$	$138^\circ 29,92^\circ$
3		$251\angle -123,06^\circ$	$228^\circ 28,38^\circ$

Таблица 3

Компоненты центрированных токов КЗ фаз *A* и *B* и соответствующие замеры

Место КЗ	Напряжение, кВ; ток А; сопротивление, Ом		
	Величина	Фаза <i>A</i>	Фаза <i>B</i>
1	$\hat{I}'_{r3\text{ пл}}$	$72\angle 96,08^\circ$	$72\angle -23,92^\circ$
2			
3			
1	$\hat{I}'_{r\text{ пл}}$	$244\angle 96,08^\circ$	$244\angle -23,92^\circ$
2			
3			
1	$\hat{I}'_{r3\text{ кз}}$	$92\angle 87,77^\circ$	$72\angle -33,32^\circ$
2		$126\angle 81,06^\circ$	$76\angle -47,01^\circ$
3		$162\angle 76,97^\circ$	$84\angle -58,78^\circ$
1	$\hat{I}'_{r3\text{ ко}}$	$81\angle 99,53^\circ$	$101\angle -17,8^\circ$
2		$84\angle 100,91^\circ$	$102\angle -18,35^\circ$
3		$87\angle 101,48^\circ$	$104\angle -18,95^\circ$
1	$\hat{I}'_{r\text{ ко}}$	$178\angle 99,53^\circ$	$222\angle -17,8^\circ$
2		$185\angle 100,91^\circ$	$225\angle -18,35^\circ$
3		$192\angle 101,48^\circ$	$228\angle -18,95^\circ$
1	\hat{Z}_{r1}	$86\angle 69,46^\circ$	$86\angle 69,43^\circ$
2			
3			
1	\hat{E}'_r	$51,85\angle 62,76^\circ$	$51,84\angle -57,25^\circ$
2			
3			
1	$\hat{I}'_{r\text{ кз}}$	$171\angle 102,36^\circ$	$237\angle -14,93^\circ$
2		$160\angle 107,45^\circ$	$241\angle -12,95^\circ$
3		$147\angle 112,59^\circ$	$243\angle -10,82^\circ$
1	$\hat{I}'_{r1\text{ кз}}$	$57\angle -140,95^\circ$	$100\angle -15,05^\circ$
2		$152\angle -126,76^\circ$	$138^\circ 29,92^\circ$
3		$251\angle -123,06^\circ$	$228^\circ 28,38^\circ$

+j68,6 Ом. Сопротивления нагрузки ответвлений: первого – $1227 + j1636$ Ом, остальных $491 + j654$ Ом. Участки линии между вторым и третьим ответвлениями: ВЛ – 1,12 км, КЛ – 948 м; между третьим и четвертым: КЛ – 322 м, ВЛ – 2,89 км. Сопротивления передающей и приёмной систем: $Z_s = 1 + j10$ Ом, $Z_r = 30 + j80$ Ом. Удельное сопротивление первых трёх участков воздушной линии $Z^0 = 0,162 + j0,395$ Ом/км, у последних двух участков воздушной линии и второго и третьего ответвлений $Z^0 = 0,162 + j0,346$ Ом/км, у первого ответвления $Z^0 = 0,162 + j0,412$ Ом/км, и, наконец, у кабельной линии $Z^0 = 0,037 + j0,161$ Ом/км, $C^0 = 12,2$ мкФ/км.

Предшествующий режим создавался источниками с фазными параметрами $E_s = E_r = E = 110/\sqrt{3}$ кВ, $E_s/E_r = \exp j\delta$, $\delta = 30^\circ$. Сопротивления прямой последовательности систем: $Z_{s1} = 10,05 \angle 84,29^\circ$ Ом, $Z_{r1} = 85,44 \angle 69,44^\circ$ Ом. В фазе А ЭДС $E_{sA} = E \angle 92,75^\circ$ кВ. Величины фазы А, наблюдаемые в этом режиме: $U_{sA \text{ пд}} = 48,75 \angle 87,89^\circ$ кВ, $I_{sA1 \text{ пд}} = 223,36 \angle 58,36^\circ$ А, $I_{sA2 \text{ пд}} = 223,36 \angle 58,36^\circ$ А, а оценка ненаблюдае-

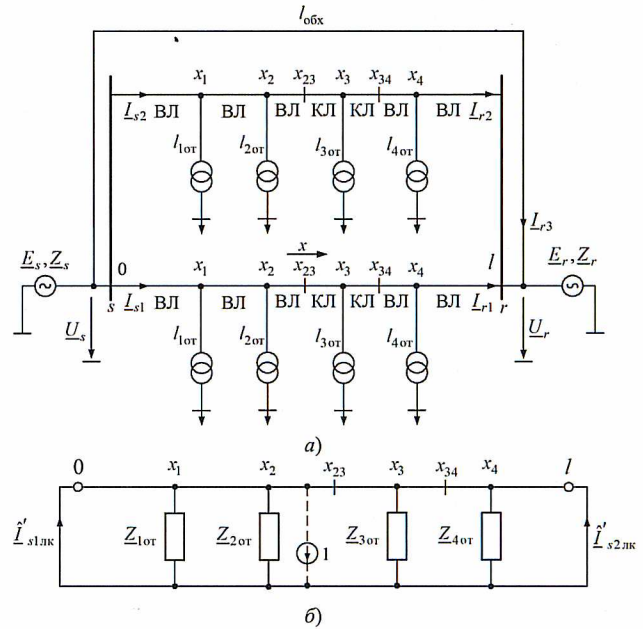


Рис. 4. Модели двухфазной электропередачи с четырьмя ответвлениями:

а – имитационная; б – локального режима повреждённой цепи; ВЛ, КЛ – воздушные и кабельные участки линии

Таблица 4

Электрические величины режимов КЗ в одном из ответвлений и режима КО

Повреждённое ответвление	Напряжение, кВ; ток, А					
	Наблюдаемые				Оцениваемые	
	Полные		Центрированные			
1	$U_{s \text{ КЗ}}$	45,46 \angle 86,33°	U'_{s1}	46,55 \angle 86,87°	U'_{r1}	46,28 \angle 86,34°
2		44,66 \angle 83,44°		45,99 \angle 85,01°		45,65 \angle 84,41°
3		45,16 \angle 85,72°		46,35 \angle 86,48°		45,94 \angle 85,89°
4		44,68 \angle 83,32°		46,01 \angle 84,93°		45,41 \angle 84,12°
1	$I_{s1 \text{ КЗ}}$	555 \angle 38,37°	I'_{s1}	441 \angle 41,68°	I'_{r1}	101 \angle 137,24°
2		715 \angle 48,84°		551 \angle 50,13°		105 \angle 168,39°
3		525 \angle 41,66°		422 \angle 44,57°		129 \angle 165,81°
4		535 \angle 50,59°		430 \angle 51,93°		204 \angle -159,08°
1	$I_{s2 \text{ КЗ}}$	216 \angle 57,07°	I'_{s2}	218 \angle 57,51°	I'_{r2}	95 \angle 114,4°
2		247 \angle 54,64°		239 \angle 55,8°		109 \angle 102,46°
3		266 \angle 52,72°		252 \angle 54,39°		110 \angle 95,21°
4		365 \angle 53,05°		317 \angle 54,29°		170 \angle 80,67°
1	$U_{s \text{ КО}}$	45,44 \angle 86,34°	U'_{s1}	46,54 \angle 86,89°	U'_{r1}	46,39 \angle 86,1°
2		44,65 \angle 83,45°		45,98 \angle 85,03°		45,86 \angle 84,29°
3		45,15 \angle 85,73°		46,34 \angle 86,49°		46,19 \angle 85,71°
4		44,69 \angle 83,39°		46,01 \angle 84,98°		45,89 \angle 84,25°
1	$I_{s2 \text{ КО}}$	223 \angle 74,19°	I'_{s2}	234 \angle 72,77°	I'_{r2}	154 \angle 124,73°
2		200 \angle 71,86°		218 \angle 72,25°		146 \angle 127,17°
3		217 \angle 73,98°		230 \angle 72,61°		152 \angle 125,42°
4		199 \angle 74,66°		218 \angle 71,13°		145 \angle 127,13°

МЫХ величин $\hat{U}_{rA \text{ пд}} = 48,48 \angle 87,37^\circ \text{ кВ}$,
 $\hat{I}_{rA1 \text{ пд}} = 96,63 \angle 117,82^\circ \text{ А}$, $\hat{I}_{rA2 \text{ пд}} =$
 $= 96,63 \angle 117,82^\circ \text{ А}$, $\hat{I}_{rA3 \text{ пд}} = 78,65 \angle 69,71^\circ \text{ А}$,
 $\hat{I}_{rA \text{ пд}} = 252,66 \angle 104,42^\circ \text{ А}$.

Таблица 5

Оценки остальных центрированных составляющих величин фазы А ненаблюдаемой стороны линии

Повреждённое ответвление	Напряжение, кВ; ток, А; сопротивление, Ом	
1	$\hat{I}'_{r3 \text{ пд}}$	$79 \angle 69,71^\circ$
2		
3		
4		
1	$\hat{I}'_{r \text{ пд}}$	$253 \angle 104,42^\circ$
2		
3		
4		
1	$\hat{I}'_{r3 \text{ кз}}$	$78 \angle 68,19^\circ$
2		$90 \angle 63,63^\circ$
3		$95 \angle 59,73^\circ$
4		$133 \angle 55,88^\circ$
1	$\hat{I}'_{r3 \text{ ко}}$	$100 \angle 87,05^\circ$
2		$92 \angle 87,46^\circ$
3		$98 \angle 87,34^\circ$
4		$92 \angle 87,36^\circ$
1	$\hat{I}'_{r \text{ ко}}$	$241 \angle 110,01^\circ$
2		$224 \angle 111,97^\circ$
3		$237 \angle 110,67^\circ$
4		$224 \angle 111,91^\circ$
1	\hat{Z}_{r1}	$86,18 \angle 69,65^\circ$
2		$85,98 \angle 69,51^\circ$
3		$86,12 \angle 69,6^\circ$
4		$85,98 \angle 69,51^\circ$
1	\hat{E}'_{r1}	$51,99 \angle 62,65^\circ$
2		$51,92 \angle 62,68^\circ$
3		$51,97 \angle 62,66^\circ$
4		$51,92 \angle 62,68^\circ$
1	$\hat{I}'_{r \text{ кз}}$	$243 \angle 110,34^\circ$
2		$226 \angle 112,56^\circ$
3		$239 \angle 111,34^\circ$
4		$223 \angle 113,35^\circ$
1	$\hat{I}'_{r1 \text{ кз}}$	$101 \angle 137,24^\circ$
2		$105 \angle 168,39^\circ$
3		$129 \angle 165,81^\circ$
4		$204 \angle -159,08^\circ$

Локальный режим повреждённой первой цепи активировался единичной ЭДС (рис. 4, б), действующей из произвольного места модели, как и источник $\hat{U}_{f \text{ кз}}$ в схеме по рис. 2, в. Априорная характеристика (10) представлена на плоскости зависимостью

$$K_{1 \text{ Ре}}(x_f) = \text{Re} \frac{\hat{I}'_{s1 \text{ лк}}(x_f) + \hat{I}'_{r1 \text{ лк}}(x_f)}{\hat{I}'_{s1 \text{ лк}}(x_f) - \hat{I}'_{r1 \text{ лк}}(x_f)}$$

с двумя перегибами в точках x_{23} и x_{34} – начале и конце кабельной вставки.

Допустим, наблюдается однофазное КЗ в фазе А через переходное сопротивление $R_f = 50 \text{ Ом}$, которое произошло на шинах нагрузки одного из четырёх ответвлений. В табл. 4 приведены величины, наблюдаемые в режиме КЗ и КО в повреждённой фазе, в табл. 5 – результаты оценки ненаблюдаемых величин, в табл. 6 – нормальные и локальные компоненты центрированного тока КЗ в повреждённой фазе, а также значение определяемого по этим компонентам замера.

Полученные значения замера отображены на априорной характеристике (рис. 5).

Как видно из рис. 5, значения определяемого по локальным и нормальным компонентам замера

Таблица 6

Компоненты центрированного тока КЗ фазы А и соответствующие замеры

Повреждённое ответвление	Ток А; замер, отн. ед.	
	1	$\hat{I}'_{s1 \text{ нм}}$
2	$239 \angle 55,8^\circ$	
3	$252 \angle 54,39^\circ$	
4	$317 \angle 54,29^\circ$	
1	$\hat{I}'_{r1 \text{ нм}}$	$95 \angle 114,4^\circ$
2		$109 \angle 102,46^\circ$
3		$110 \angle 95,21^\circ$
4		$170 \angle 80,67^\circ$
1	$\hat{I}'_{s1 \text{ лк}}$	$239^\circ 27,22^\circ$
2		$314 \angle 45,81^\circ$
3		$179^\circ 30,69^\circ$
4		$114 \angle 45,35^\circ$
1	$\hat{I}'_{r1 \text{ лк}}$	$39 \angle -151,77^\circ$
2		$117 \angle -132,83^\circ$
3		$139 \angle -145,97^\circ$
4		$325 \angle -132,24^\circ$
1	$\hat{K}_{1 \text{ Ре}}$	0,72
2		0,46
3		0,13
4		-0,48

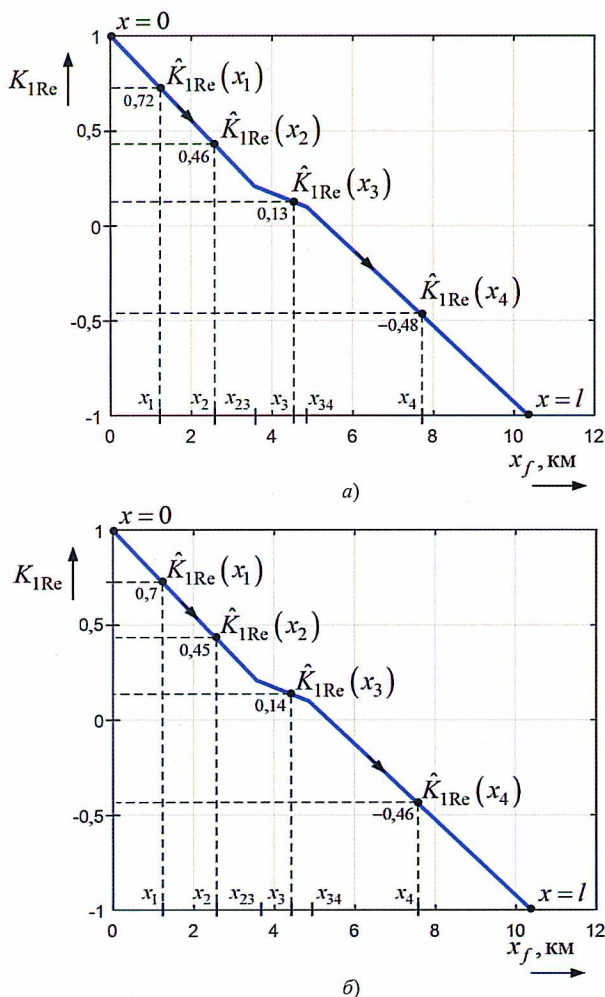


Рис. 5. Априорная характеристика замера для линии с четырьмя ответвлениями и отображения замера при наблюдении режима КЗ в одном из них:

a – при точном задании сопротивлений ответвлений; *b* – без учёта сопротивлений ответвлений

при повреждениях на шинах нагрузки ответвлений лежат на априорной характеристике $\hat{K}_{1Re}(x_f)$.

Остаётся вопрос о задании сопротивлений ответвлений в моделях локального и нормального режимов. В модели локального режима, которая необходима для определения априорной характеристики замера, подлежат заданию сопротивления всех ответвлений, за исключением того, которое полагается повреждённым. В модели нормального режима, с помощью которой определяются замеры при наблюдении линии, подлежат заданию сопротивления всех ответвлений без исключения. Неточное задание сопротивлений приводит к погрешности в локации КЗ. На рис. 5, *b* проиллюстрирован крайний случай – неучёт сопротивлений ответвлений в моделях как локального, так и нормального режимов, при том, что в имитационной модели объекта они, разумеется, подлежат учёту. Как видим, в применении к рассматриваемой электропередаче погрешность от столь резкого упрощения алгоритма распознавания КЗ оказалась ма-

лозаметной. Слабая зависимость алгоритма от сопротивлений ответвлений объясняется в основном тем, что в модели локального режима шунты на входе и выходе ослабляют влияние её поперечных элементов.

Выводы

1. Каскадное отключение повреждённой цепи двухцепной линии электропередачи принципиально видоизменяет информационную базу, предоставляемую односторонним наблюдением. К естественному наблюдению на одной стороне добавляется алгоритмическое наблюдение другой стороны. Такое комплексное наблюдение приобретает черты двухстороннего наблюдения, уступая ему тем, что вместо измеряемых значений напряжений и токов на другой стороне линии используются их оценки, но, с другой стороны, обладая преимуществом, благодаря тому, что не нуждается в канале связи между сторонами.

2. Комплексное наблюдение повреждённой цепи делает возможным распознавание места КЗ по состоянию двухпроводных каналов фазных центрированных величин. Анализ состояния каналов выполняет процедура, основанная на разделении центрированных токов на две составляющие – нормальную и локальную. Замер, указывающий координату места КЗ, представляет собой соотношение локальных токов на разных сторонах повреждённой цепи.

3. Реальный пример свидетельствует о низкой чувствительности результата распознавания места КЗ к сопротивлениям неповреждённых ответвлений, задаваемым в модели локального режима при определении априорной характеристики индикатора повреждения и в модели нормального режима для обработки наблюдаемых величин.

Список литературы

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита [Текст] / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. Лямец, Ю. Я. Распознавание повреждения линии электропередачи в режиме каскадного отключения [Текст] / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, И. Ю. Никонов // Электрические станции. – 2021. – № 3. – С. 30 – 37.
3. Кочетов, И. Д. Распознающая способность локальных токов при двухстороннем наблюдении линии электропередачи [Текст] / И. Д. Кочетов, Ю. Я. Лямец, Ф. А. Макашкин // Электрические станции. – 2020. – № 6. – С. 54 – 58.
4. Кочетов, И. Д. Унификация моделей и характеристик повреждённой электропередачи при двухстороннем наблюдении [Текст] / И. Д. Кочетов, Ю. Я. Лямец, Ф. А. Макашкин // Известия РАН. Энергетика. – 2020. – № 4. – С. 55 – 68.
5. Попов, И. Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов [Текст] / И. Н. Попов, В. Ф. Лачугин, Г. В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Лямец, Ю. Я. К анализу переходных процессов в трёхфазных цепях методом симметричных составляющих [Текст] / Ю. Я. Лямец // Электричество. – 1988. – № 12. – С. 57 – 60.