

УДК 621.311.1.019

**УНИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОВРЕЖДЕННОЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ НАБЛЮДЕНИИ**© 2020 г. И. Д. Кочетов¹, *, Ю. Я. Лямец¹, Ф. А. Макашкин¹¹ООО “Релематика”, Чувашский госуниверситет, Чебоксары, Россия

*e-mail: kochetov_id@relematika.ru

Поступила в редакцию 16.03.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Задача унификации алгоритмов и характеристик релейной защиты, ставшая предметом обсуждения в недавнее время, в приложении к двухстороннему наблюдению линии электропередачи имеет оригинальное развитие. В статье рассматривается унифицированный алгоритм распознавания места короткого замыкания (КЗ). Унификация зависимости замера, формируемого из наблюдаемых величин, от координаты места КЗ имеет следствием унификацию алгоритмов распознавания повреждений. Констатация повреждения линии электропередачи, совершаемая релейной защитой, становится частным случаем определения места КЗ. Унифицированный замер скомпонован из токов локального режима, который представляет собой наиболее ценную в информационном отношении часть чисто аварийного процесса. Остальная часть – нормальный режим, активируемый в модели неповрежденной электропередачи аварийными составляющими наблюдаемых напряжений.

Ключевые слова: линия электропередачи, двухстороннее наблюдение, релейная защита, унификация характеристик

DOI: 10.31857/S0002331020040044

Унифицированный алгоритм распознавания повреждений энергообъектов положил начало идее построения безуставочной (*setting-less*) релейной защиты [1, 2]. Защита такого типа ограничивается минимально возможной информационной базой, куда входит текущая информация – наблюдаемые токи и напряжения – и лишь та часть априорной информации об электрической системе, которая относится к входящему в систему защищаемому объекту, но не касается внешних по отношению к нему подсистем [3, 4]. Статья посвящена распознаванию короткого замыкания (КЗ) в электропередаче, наблюдаемой с обеих сторон [5–7]. Задача унификации заключается в поиске алгоритма определения места КЗ, который в реальном времени выполнял бы функцию защиты абсолютной селективности. Необходимый инструментарий предоставляется своеобразным компонентом процесса КЗ, названным локальным процессом [8].

Режимы и модели линии до и после КЗ. В любом режиме n -проводная электропередача может быть представлена совокупностью n двухпроводных каналов, в общем случае модальных, а в частном случае симметричной трехфазной линии – двухпроводными каналами центрированных (безнулевых) фазных напряжений и токов

$$\underline{U}'_v = \underline{U}_v - \underline{U}_0, \quad \underline{I}'_v = \underline{I}_v - \underline{I}_0, \quad v = A, B, C, \quad (1)$$

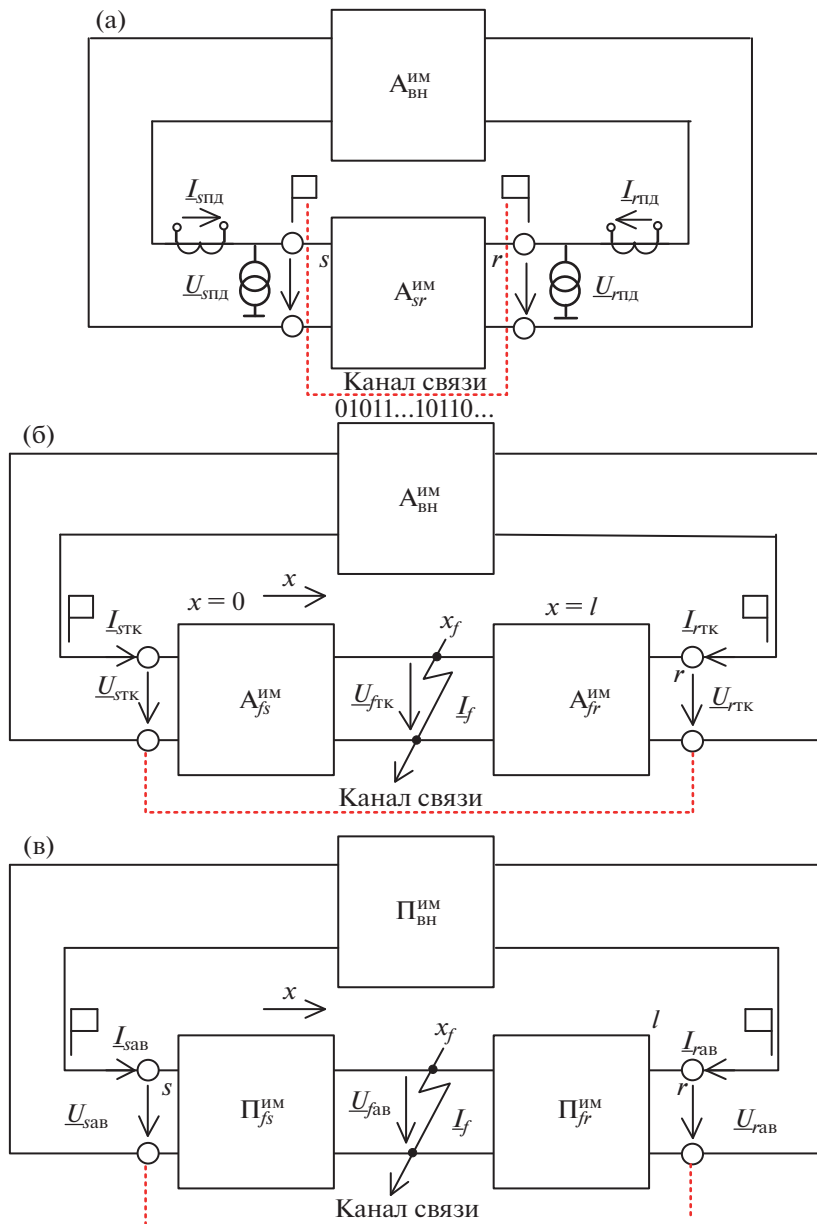


Рис. 1. Имитационная модель двухпроводного канала сети с электропередачей, наблюдаемой в двух местах: (а), (б), (в) – в предшествующем, текущем и чисто аварийном режимах.

объединяющих в себе составляющие прямой и обратной последовательностей, и каналом величин нулевой последовательности $\underline{U}_0, \underline{I}_0$. Модели двухпроводных каналов состоят из четырехполюсников, активных А или пассивных П (рис. 1–3). Стороны линии отмечены символами s и r . Наблюдаемые напряжения и токи произвольного канала – $\underline{U}_s, \underline{I}_s; \underline{U}_r, \underline{I}_r$.

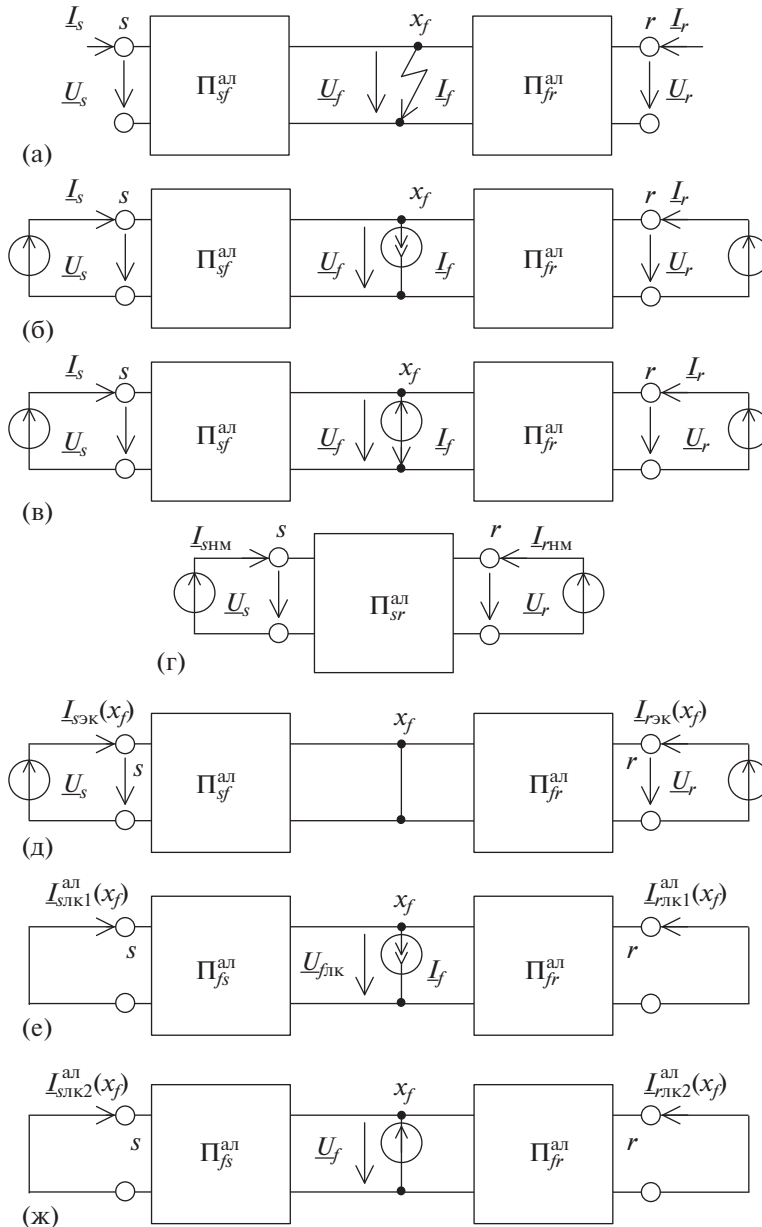


Рис. 2. Алгоритмические модели двухпроводного канала линии электропередачи для различных режимов: (а), (б), (в) – для текущего или чисто аварийного режима; (а) – модель общего вида; (б), (в) – с применением принципа компенсации; (б) – с источником тока в месте КЗ; (в) – с ЭДС; (г) – для экстремального режима; (е), (ж) – для локального режима первого и второго типа.

Модели подразделены на три группы: имитационные (рис. 1), воспроизводящие режимы линии в составе электрической системы, алгоритмические [4], формирующие замеры распознающего органа (рис. 2), и тестирующие, определяющие пределы и погрешности распознавания аварийной ситуации (рис. 3). К числу имитационных отно-

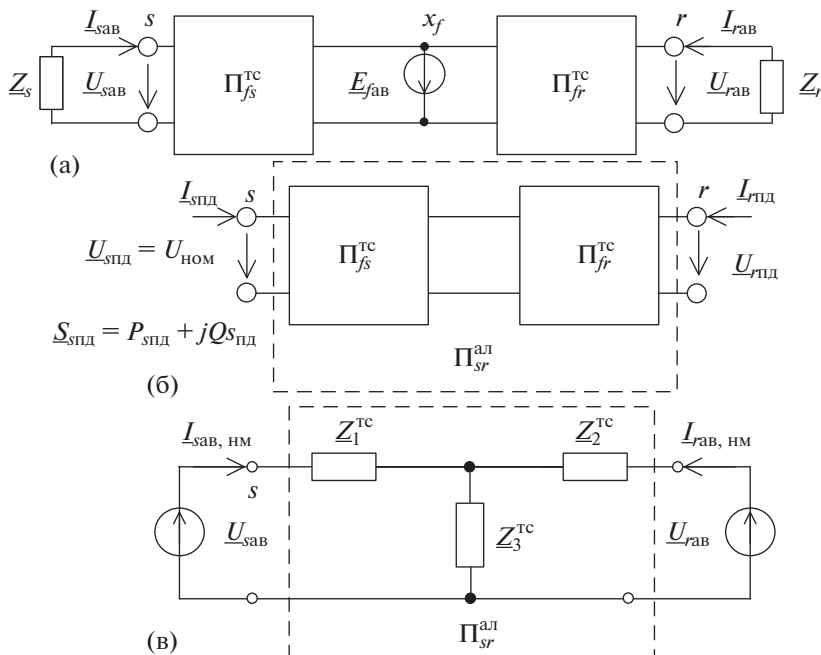


Рис. 3. Операции тестирования: (а) – воспроизведение чисто аварийного режима; (б) – воспроизведение предшествующего режима; (в) – формирование токов нормального режима в синтезированной модели неповрежденного объекта.

сятся три режима, два реальных и один виртуальный. Реальные – предшествующий (рис. 1а) и текущий режим КЗ (рис. 1б). Виртуальный – чисто аварийный режим [9]; виртуально наблюдаются аварийные составляющие напряжений и токов (рис. 1в)

$$\underline{U}_{ав} = \underline{U}_{тк} - \underline{U}_{пд}, \quad \underline{I}_{ав} = \underline{I}_{тк} - \underline{I}_{пд}. \quad (2)$$

Параметры имитационных моделей отмечены верхним индексом “им”. Неповрежденный канал электропередачи представлен четырехполюсником $A_{sr}^{им}$, активным в том общем случае, когда в линии имеются ненаблюдаемые активные ответвления. Внешняя по отношению к линии одноканальная часть системы представлена четырехполюсником обходной связи $A_{вн}^{им}$.

Место КЗ с координатой x_f разделяет двухпроводный канал текущего режима на предположительно активные четырехполюсники $A_{fs}^{им}$ и $A_{fr}^{им}$ (рис. 1а), а канал чисто аварийного режима – на пассивные четырехполюсники $\Pi_{fs}^{им}$ и $\Pi_{fr}^{им}$ (рис. 1б). Повреждение, как элемент канала, представляет собой двухполюсники с током \underline{I}_f , одним и тем же в текущем и чисто аварийном режимах, и напряжением $\underline{U}_{f-тк}$ или $\underline{U}_{f-ав}$, своим в каждом из этих двух режимов.

Текущий режим имитационной модели создается независимыми источниками, теми же, что и предшествующий режим, а еще зависимым источником тока \underline{I}_f или напряжения \underline{U}_f , которым может быть либо $\underline{U}_{f-тк}$ в модели по рис. 1б, либо $\underline{U}_{f-ав}$ в модели по рис. 1в.

Компоненты наблюдаемых токов. Пусть $\underline{U}_s, \underline{I}_s$ и $\underline{U}_r, \underline{I}_r$ – общие обозначения наблюдаемых напряжений и токов в текущем или чисто аварийном режимах, что согласуется с общим обозначением \underline{U}_f неизвестного напряжения в месте x_f . Независимость от режима присуща только току \underline{I}_f . Будем считать, что исходные данные в виде наблюдаемых комплексов токов и напряжений не имеют погрешности, чтобы оценить эффективность метода, описанного ниже. Переход к комплексному базису снимает вопрос о начальных условиях и задержек по времени. Передача комплексов токов и напряжений с удаленного конца, а также синхронизация их с токами и напряжениями наблюдаемого конца осуществляется с использованием спутниковой связи или по каналу связи (рис. 1) на основе предшествующего режима. Таким каналом может быть, например, оптоволоконный канал связи, получивший в последнее время широкое распространение.

Модель двухпроводного канала, используемая в алгоритмических целях, оперирует четырьмя наблюдаемыми величинами $\underline{U}_s, \underline{I}_s, \underline{U}_r, \underline{I}_r$ и двумя неизвестными \underline{I}_f и \underline{U}_f . Они действуют в трех местах модели наблюдаемого канала (рис. 2а), которая в отличие от имитационной названа алгоритмической [3, 4]. По принципу компенсации в трех местах s, r и f можно включить только три источника, по одному представителю из каждой пары, действующих в одном месте напряжения и тока.

Представляют интерес два варианта алгоритмической модели с известными ЭДС \underline{U}_s и \underline{U}_r в местах наблюдения и с разными неизвестными источниками \underline{I}_f и \underline{U}_f в неизвестном месте КЗ (рис. 2б, 2в). Возможные варианты с источниками известных токов \underline{I}_s и \underline{I}_r здесь не рассматриваются.

Метод наложения дает возможность разграничить действие известных источников $\underline{U}_s, \underline{U}_r$ и неизвестного источника, которым может быть как источник тока \underline{I}_f , так и источник напряжения \underline{U}_f , вследствие чего выявляются новые режимы как компоненты текущего или чисто аварийного режима. В моделях по рис. 2б и 2в известные ЭДС \underline{U}_s и \underline{U}_r создают разные режимы. Условие $\underline{I}_f = 0$ в схеме по рис. 2б вне зависимости от значения x_f создает модель канала неповрежденной электропередачи $\Pi_{sr}^{ал}$ (рис. 2г). Режим, создаваемый источниками \underline{U}_s и \underline{U}_r в этой модели, назван нормальным. Токи нормального режима определяются уравнениями четырехполюсника $\Pi_{sr}^{ал}$ формы Y

$$\underline{I}_{sнм} = \underline{Y}_{sr\ cб} \underline{U}_s + \underline{Y}_{вз} \underline{U}_r, \quad \underline{I}_{rнм} = \underline{Y}_{вз} \underline{U}_s + \underline{Y}_{rs\ cб} \underline{U}_r, \quad (3)$$

где $\underline{Y}_{cб}$ – собственные проводимости разных сторон, $\underline{Y}_{вз}$ – взаимная проводимость между входами.

Условие $\underline{U}_f = 0$ приводит к появлению шунта в произвольном месте x_f (рис. 2д). Режим, создаваемый в модели, разделенной шунтом на независимые четырехполюсники $\Pi_{sf}^{ал}$ и $\Pi_{rf}^{ал}$, назван экстремальным. Токи экстремального режима определяются собственными проводимостями зашунтированных на выходах четырехполюсников. В отличие от токов нормального режима в экстремальном режиме имеет место зависимость от места КЗ

$$\underline{I}_{s\ эк} (x_f) = \underline{Y}_{sf} (x_f) \underline{U}_s, \quad \underline{I}_{r\ эк} (x_f) = \underline{Y}_{rf} (x_f) \underline{U}_r. \quad (4)$$

где $\underline{Y}_{sf} (x_f)$ и $\underline{Y}_{rf} (x_f)$ – взаимные проводимости между соответствующим входом модели и ветвью КЗ. На первый взгляд нормальный режим, не связанный с координатой x_f , имеет бесспорное преимущество перед экстремальным режимом. Между тем, и у последнего имеются свои достоинства. Во-первых, для определения модулей $I_{s\ эк} (x_f)$,

$I_{r \text{ эк}}(x_f)$ нет необходимости в синхронизации наблюдений на разных сторонах линии. А во-вторых, в отличие от нормального режима, подверженного влиянию ненаблюдаемых поперечных элементов, в экстремальном режиме их влияние компенсируется шунтом в месте КЗ.

Нормальный режим модели по рис. 2б и экстремальный режим модели по рис. 2в представляют собой первые составные части общего режима КЗ (рис. 2а). Остающиеся части локализуются в алгоритмических моделях с зашунтированными входами s и r (рис. 2е, 2ж), отсюда и название – локальный режим первого и второго типа. Различие между ними в моделях по рис. 1б и 1в опять же на первый взгляд носит формальный характер, коль скоро их источники – ток I_f или напряжение $U_{f \text{ лк}}$ в схеме по рис. 2е, как и ЭДС U_f в схеме рис. 2ж, неизвестны. Но на самом деле между двумя типами локального режима существует физическое различие.

Если наблюдаются токи $I_s^{\text{нб}}$ и $I_r^{\text{нб}}$, то по ним будут определены локальные компоненты $I_{s \text{ лк}}^{\text{нб}}$ и $I_{r \text{ лк}}^{\text{нб}}$, причем разные их типы определяются по-разному. Ток первого типа – вычитанием тока нормального режима $I_{\text{нм}}$, не связанного с местом КЗ, а ток второго типа – вычитанием тока экстремального режима $I_{\text{эк}}(x_f)$, который очевидным образом зависит от координаты места КЗ

$$I_{s \text{ лк1}}^{\text{нб}} = I_s^{\text{нб}} - I_{\text{нм}}, \quad I_{r \text{ лк1}}^{\text{нб}} = I_r^{\text{нб}} - I_{\text{нм}}, \quad (5)$$

$$I_{s \text{ лк2}}^{\text{нб}}(x_f) = I_s^{\text{нб}} - I_{\text{эк}}(x_f), \quad I_{r \text{ лк2}}^{\text{нб}}(x_f) = I_r^{\text{нб}} - I_{\text{эк}}(x_f). \quad (6)$$

Замеры и характеристики. Между замерами, формируемыми из локальных токов первого и второго типа, также существует принципиальное различие. Из токов первого типа может быть сформирован замер в виде фиксированного числа

$$\underline{K}_1 = \frac{I_{s \text{ лк1}}^{\text{нб}} - I_{r \text{ лк1}}^{\text{нб}}}{I_{s \text{ лк1}}^{\text{нб}} + I_{r \text{ лк1}}^{\text{нб}}}. \quad (7)$$

Из токов второго типа замер может быть сформирован только в виде координатного годографа – комплексной функции

$$\underline{K}_2(x_f) = \frac{I_{s \text{ лк2}}^{\text{нб}}(x_f) - I_{r \text{ лк2}}^{\text{нб}}(x_f)}{I_{s \text{ лк2}}^{\text{нб}}(x_f) + I_{r \text{ лк2}}^{\text{нб}}(x_f)}. \quad (8)$$

Характеристики локатора замыкания в линии электропередачи определяются в собственной модели локального режима (рис. 2е, 2ж) в виде функции

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x_f) = \frac{I_{s \text{ лк}}^{\text{ал}}(x_f) - I_{r \text{ лк}}^{\text{ал}}(x_f)}{I_{s \text{ лк}}^{\text{ал}}(x_f) + I_{r \text{ лк}}^{\text{ал}}(x_f)}. \quad (9)$$

Отношение локальных токов в алгоритмических моделях по рис. 2е и 2ж определяется инвариантно, так как источники в этих моделях действуют из одного и того же места x_f , а значения источников могут быть заданы произвольно, например, приняты единичными.

Характеристика (9) выражается через взаимные проводимости

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x_f) = \frac{Y_{sf}(x_f) - Y_{rf}(x_f)}{Y_{sf}(x_f) + Y_{rf}(x_f)}. \quad (10)$$

В однородном канале без распределенной емкости функция (10) не зависит от удельного сопротивления канала и имеет вид

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x_f^*) = 1 - 2x_f^*, \quad x_f^* = 0 \dots 1, \quad (11)$$

где $x_f^* = x_f/l$, l – длина линии. Отсюда следует, что в данном идеальном случае характеристика локатора представляет собой линейную функцию. Для однородной длинной линии зависимость (10) дает результат, зависящий не только от координаты x_f , но и от коэффициента распространения $\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}^0 \underline{Y}^0}$, где \underline{Z}^0 и \underline{Y}^0 – удельные параметры линии, –

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x_f) = \frac{\text{sh} \underline{\gamma} l (1 - x_f^*) - \text{sh} \underline{\gamma} l x_f^*}{\text{sh} \underline{\gamma} l (1 - x_f^*) + \text{sh} \underline{\gamma} l x_f^*}. \quad (12)$$

Для воздушных линий электропередачи всех классов напряжений зависимость (12) показывает отличие от прямой (11) на доли процента.

Оценивание координаты места КЗ. Операция оценивания координаты x_f заключается в сопоставлении фиксированного замера (7) или функционального замера (8) с заранее определенной характеристикой (10). Соответствующие комплексные уравнения содержат одну вещественную неизвестную величину x_f

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x_f) = \underline{K}_1, \quad (13)$$

$$\underline{K}^{\text{ал}}(x_f) = \underline{K}_2(x_f). \quad (14)$$

В качестве общего критерия оценки может быть принято условие близости левой и правой части уравнения (13) или (14)

$$\Delta K(x_f) = \text{mod } \underline{\Delta K}(x_f) \rightarrow \min_{x_f}, \quad (15)$$

где

$$\underline{\Delta K}(x_f) = \underline{K}^{\text{ал}}(x_f) - \underline{K}_1 \quad (16)$$

или

$$\underline{\Delta K}(x_f) = \underline{K}^{\text{ал}}(x_f) - \underline{K}_2(x_f). \quad (17)$$

Если в первом приближении заменить комплексные равенства (13), (14) вещественными уравнениями для модулей, то оценка \hat{x}_f будет определяться пересечением характеристической кривой $\underline{K}^{\text{ал}}(x_f)$ с линией замера \underline{K}_1 или же с кривой замера $\underline{K}_2(x_f)$. Необходимо заметить, что в моделях с интервальными параметрами замеры и характеристика также приобретут интервальный характер, а оценка координаты места КЗ будет определена в виде интервала $\Delta \hat{x}_f$.

Схемная модель нормального режима. Модель неповрежденного канала, например Т-образная (рис. 4), состоит из трех элементов $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$. Если модель не задана или недоопределена, то возникает необходимость ее адаптации к предшествующему режиму. Напряжения и токи, наблюдаемые на зажимах моделей, связывают неизвестные сопротивления двумя уравнениями. Требуется еще одно уравнение. Если принять, что сумма продольных сопротивлений может быть задана величиной \underline{Z}_Σ , то сопротивления модели определяются следующим образом

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_\Sigma - \underline{Z}_3(1 + \underline{\eta}_1), \quad (18)$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_r - \underline{Z}_3(1 + \underline{\eta}_2), \quad (19)$$

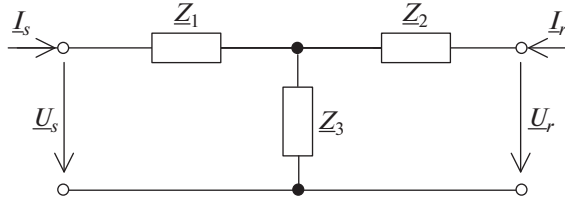


Рис. 4. Эквивалентная схема четырехполюсника Π_{sr}^{al} в модели по рис. 2г.

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_s + \underline{Z}_r - \underline{Z}_\Sigma}{2 + \underline{\eta}_1 + \underline{\eta}_2}, \quad (20)$$

где $\underline{Z}_s = \underline{U}_s / \underline{I}_s$, $\underline{Z}_r = \underline{U}_r / \underline{I}_r$, $\underline{\eta}_1 = \underline{I}_r / \underline{I}_s$, $\underline{\eta}_2 = 1 / \underline{\eta}_1$. Коэффициенты уравнений (3), определяющих нормальные токи, выражаются через проводимости $\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_3$ сопротивлений (18)–(20)

$$\underline{Y}_{sr \text{ сб}} = \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3, \quad \underline{Y}_{rs \text{ сб}} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_3, \quad \underline{Y}_{вз} = -\underline{Y}_3,$$

$$\underline{Y}_i = \underline{\zeta} \underline{Z}_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad \underline{\zeta} = (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1)^{-1}.$$

Влияние поперечных элементов на суммарное продольное сопротивление. Величина $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$ совпадает с продольным сопротивлением линии в отсутствие ответвлений и без учета распределенной емкости. Сопоставим величину \underline{Z}_Σ с продольным сопротивлением однородной линии $\underline{Z}^0 l$.

Влияние распределенной емкости. Однородная линия с распределенными параметрами представляет собой симметричный четырехполюсник. В его модели (рис. 2б) продольные сопротивления совпадают: $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z} = \underline{Z}_\Sigma / 2$. Уравнение длинной линии с характеристическим сопротивлением $\underline{Z}_C = \sqrt{\underline{Z}^0 / \underline{Y}^0}$

$$\underline{I}_s = \frac{1}{\underline{Z}_C} \underline{U}_s \text{sh} \underline{\gamma} l - \underline{I}_r \text{ch} \underline{\gamma} l$$

сопоставим с уравнением модели по рис. 4

$$\underline{I}_s = \frac{1}{\underline{Z}_3} \underline{U}_r - \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right) \underline{I}_r.$$

В результате найдем искомый параметр

$$\underline{Z}_\Sigma = 2 \underline{Z}_C \text{th} \frac{\underline{\gamma} l}{2}. \quad (21)$$

Заметим, что при $\underline{\gamma} l \rightarrow 0$ формула (21) сводится к равенству $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}^0 l$. Разница $\underline{\Delta Z} = \underline{Z}_\Sigma - \underline{Z}^0 l$ и погрешность $\underline{\Delta Z} / \underline{Z}^0 l$ для линии разных классов напряжений с максимальной из встречающихся длин приведена в табл. 1.

Влияние ответвлений. Пара соседних ответвлений образует с заключенным между ними участком линии треугольник сопротивлений. На рисунке 5а приведена модель линии с четырьмя ответвлениями $\underline{Z}_{11}, \dots, \underline{Z}_{44}$ и пятью участками $\underline{Z}_{01}, \dots, \underline{Z}_{45}$. Замена

Таблица 1. Погрешность суммы продольных сопротивлений в Т-образной модели линии электропередачи от неучета распределенной емкости

Параметры линии	Номинальное напряжение, кВ							
	35	110	220	330	500	750	1150	
Длина l , км	30	120	250	300	400	500	500	
Z^0	Z^0 , Ом/км	0.500	0.462	0.440	0.332	0.307	0.290	0.270
	φ , град	60.0	74.0	77.0	82.0	85.0	86.5	87.6
Y^0 , мкСм/км		2.60	2.65	2.70	3.41	3.62	4.13	4.38
Z_C	Z_C , Ом	438	418	404	312	291	265	248
	φ_C , град	-15.0	-8.00	-6.50	-4.00	-2.50	-1.75	-1.20
γ	α , мНп/км	0.295	0.154	0.123	0.074	0.046	0.033	0.023
	β , 10^{-3} рад/км	1.10	1.10	1.08	1.06	1.05	1.09	1.09
Z_Σ	R_Σ , Ом	7.48	15.3	25.0	14.1	11.0	9.31	5.95
	X_Σ , Ом	13.0	53.4	108	99.3	124	148	138
$Z^0 l$	$R^0 l$, Ом	7.48	15.3	24.8	13.8	10.7	8.85	5.66
	$X^0 l$, Ом	13.0	53.3	107	98.5	122	145	135
ΔZ	ΔR , Ом	0.001	0.043	0.302	0.240	0.325	0.462	0.292
	ΔX , Ом	0.001	0.069	0.616	0.818	1.824	3.700	3.420
$\Delta Z / Z^0 l$, %		0.010	0.147	0.623	0.856	1.509	2.572	2.541

треугольников сопротивлений Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} и Z_{33} , Z_{44} , Z_{34} эквивалентными звездами Z_{66} , Z_{16} , Z_{26} и, соответственно, Z_{77} , Z_{37} , Z_{47} приводит к следующим результатам

$$Z_{16} + Z_{26} = \frac{Z_{12}}{1 + \zeta_1} \approx (1 - \zeta_1) Z_{12}, \quad (22)$$

$$Z_{66} \approx (1 - \zeta_1) \frac{Z_{11} Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22}}, \quad (23)$$

$$Z_{37} + Z_{47} = \frac{Z_{34}}{1 + \zeta_2} \approx (1 - \zeta_2) Z_{34}, \quad (24)$$

$$Z_{77} \approx (1 - \zeta_2) \frac{Z_{33} Z_{44}}{Z_{33} + Z_{44}}, \quad (25)$$

$$\zeta_1 = \frac{Z_{12}}{Z_{11} + Z_{22}}, \quad \zeta_2 = \frac{Z_{34}}{Z_{33} + Z_{44}}. \quad (26)$$

А далее переход к эквивалентной схеме с одним ответвлением (рис. 5б), где $Z_{06} = Z_{01} + Z_{16}$, $Z_{67} = Z_{26} + Z_{23} + Z_{37}$, $Z_{57} = Z_{47} + Z_{45}$, и заключительное сведение к Т-образной модели (рис. 5в).

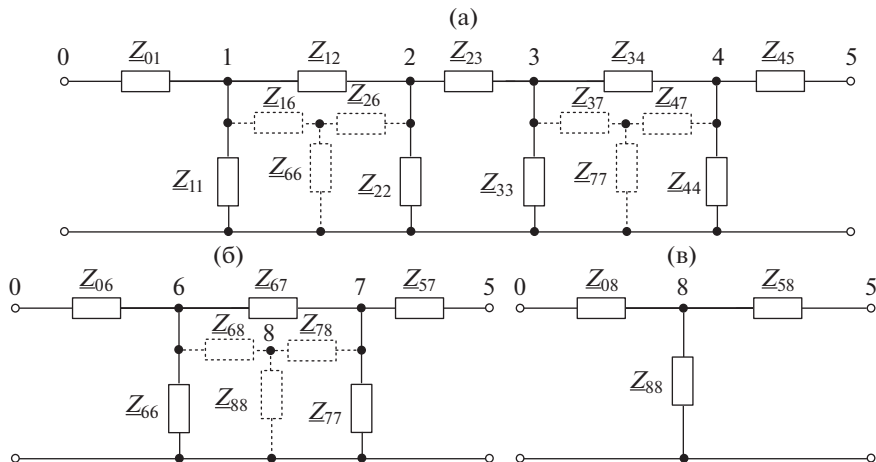


Рис. 5. Изменение эквивалентного продольного сопротивления участка линии под влиянием ответвлений: (а), (б), (в) – переход к эквивалентной Т-образной модели.

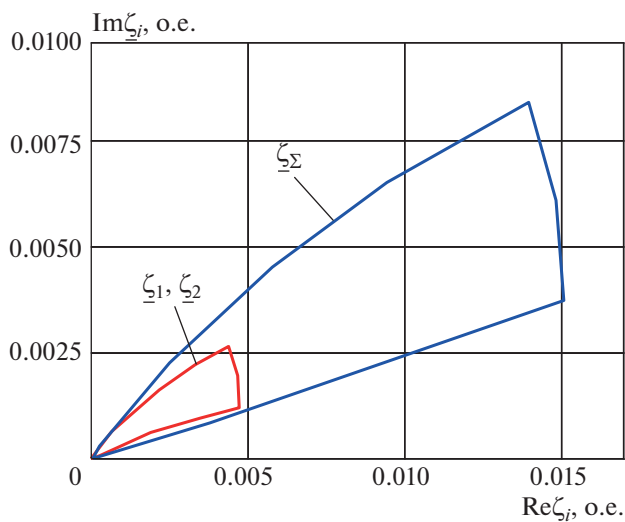


Рис. 6. Пределы изменения коэффициентов ζ_i для линии электропередачи (ζ_Σ – погрешность при переходе от Z_{66}, Z_{77} к Z_{88}).

Для реальных линий электропередачи коэффициенты (26) располагаются в первой четверти комплексной плоскости и характеризуются малым модулем (рис. 6). Выражения (22)–(25) свидетельствуют о том, что ответвления влияют на параметры модели вполне определенным образом: сумма эквивалентных сопротивлений отклоняется в меньшую сторону относительно величины $Z^0 l$, а эквивалентные поперечные сопротивления отклоняются в меньшую сторону относительно параллельного соединения ответвлений.

Унифицированное тестирование распознающего модуля. Процедура определения места КЗ, реализуемая распознающим модулем, в общем случае включает в себя следующую

щие операции: 1) адаптация модели неповрежденного канала к предшествующему режиму; 2) определение нормальных или экстремальных компонентов аварийных составляющих; 3) определение локальных токов и замера (7); 4) определение координаты места КЗ x_f путем сравнения замера с известной зависимостью $\underline{K}^{\text{ал}}(x_f)$, полученной на этапе обучения.

Каждая из операций, а значит и вся процедура в целом, унифицированы, так как обходятся без привлечения параметров внешнего модуля $A_{\text{вн}}^{\text{им}}$ (рис. 1а), в том числе и на этапе обучения. Естественно стремление предельно унифицировать и процедуру проверки распознающего модуля, не исключая ни одной его операции. Сложность поставленной задачи заключается в подготовке исходных сигналов – аварийных составляющих токов и напряжений $\underline{U}_{s \text{ ав}}, \underline{I}_{s \text{ ав}}; \underline{U}_{r \text{ ав}}, \underline{I}_{r \text{ ав}}$. Полностью обойтись без учета внешних связей тестируемого канала здесь невозможно, и они задаются двумя варьируемыми сопротивлениями \underline{Z}_s и \underline{Z}_r (рис. 3а), а единственный источник аварийных составляющих $\underline{E}_{f \text{ ав}}$ может быть задан произвольно, например, принят равным 1. Сопротивления $\underline{Z}_s, \underline{Z}_r$, с которых снимаются исходные сигналы, служат нагрузками пассивных четырехполосников $\Pi_{fs}^{\text{тс}}$ и $\Pi_{fr}^{\text{тс}}$, где верхние индексы указывают на их тестирующую функцию.

Воспользоваться одними и теми же модулями для построения тестирующих моделей поврежденного и неповрежденного объекта можно только при том условии, что именно так был организован тестируемый распознающий модуль. Однако в общем случае он предусматривает адаптацию модели неповрежденного объекта к предшествующему режиму (рис. 2б). Получается, что последний востребован и при тестировании. Каскадное соединение модулей $\Pi_{fs}^{\text{тс}}$ и $\Pi_{fr}^{\text{тс}}$, обозначенное на рис. 3б как четырехполосник $\Pi_{sr}^{\text{ал}}$, воссоздает предшествующий режим передачи мощности $\underline{S}_{\text{пд}}$ при номинальном напряжении на входе s . Элементы синтезируемой модели $\underline{Z}_i^{\text{тс}}, i = 1, 2, 3$, используются далее для выделения нормальных компонентов токов чисто аварийного режима (рис. 3в).

Виртуальное наблюдение ответвлений. Информация, доставляемая наблюдением электропередачи в предшествующем режиме, дает некоторое представление о сопротивлениях ответвлений. Разумеется, ее возможности относительно невелики, но все же достаточны для определения двух комплексных величин. В линии с тремя ответвлениями неизвестны их комплексные сопротивления $\underline{Z}_{x1}, \underline{Z}_{x2}, \underline{Z}_{x3}$ (рис. 7). Два сопротивления, скажем \underline{Z}_{x1} и \underline{Z}_{x2} , можно принять в качестве неизвестных величин. А третью связать с первой задаваемым коэффициентом: $\underline{Z}_{x3} = \lambda \underline{Z}_{x1}$, после чего \underline{Z}_{x1} определится выражением

$$\underline{Z}_{x1} = \frac{(\underline{Z}_{23}/\lambda)\underline{U}_3 - \underline{Z}_{12}\underline{U}_1}{\underline{U}_1 - \underline{U}_3 - \underline{Z}_{12}\underline{I}_s + \underline{Z}_{23}\underline{I}_r},$$

где

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_s - \underline{Z}_{s1}\underline{I}_s; \quad \underline{U}_3 = \underline{U}_r - \underline{Z}_{3r}\underline{I}_r.$$

Далее определяются токи в сопротивлениях $\underline{Z}_{12}, \underline{Z}_{23}$ и остающееся неизвестным сопротивление \underline{Z}_{x2} .

Общий подход к определению сопротивлений произвольного числа ответвлений состоит в распределении между ними поступающей в линию комплексной мощности

$$P_{\text{от}} + jQ_{\text{от}} = \underline{U}_s^* \underline{I}_s + \underline{U}_r^* \underline{I}_r.$$

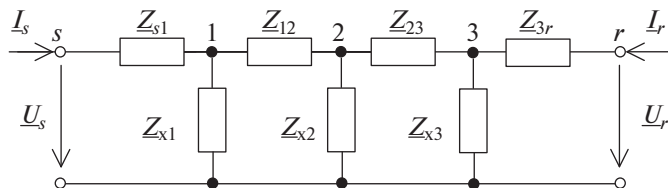


Рис. 7. Определение параметров модели электропередачи с тремя ответвлениями.

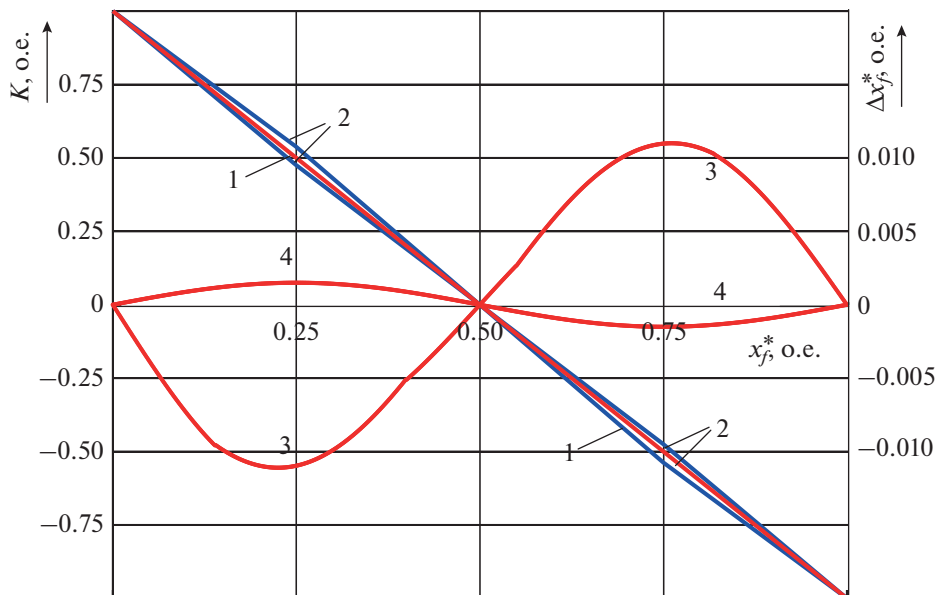


Рис. 8. Зависимость $K^{\text{ал}}(x_f)$ для линии с ответвлениями: 1 – идеальная прямая (11); 2 – реальные кривые (максимальная и минимальная); 3, 4 – отклонение реальных кривых от идеальной.

Пусть σ_{iP} и σ_{iQ} – удельные веса i -го ответвления, указывающие его доли в распределении мощностей P и Q . Тогда сопротивление этого ответвления

$$\underline{Z}_i = \frac{U_i^2}{\sigma_{iP} P_{\text{от}} - j \sigma_{iQ} Q_{\text{от}}},$$

где U_i – модуль напряжения i -го ответвления. Если $i = 1, n$, то напряжения ответвлений определяются начиная от $i = 1$ и $i = n$ во встречных направлениях.

Рассмотрим линию электропередачи 110 кВ с тремя ответвлениями, номинальная мощность каждого из которых равна 25 МВА. Фактическая мощность ответвлений определяется коэффициентом загрузки трансформатора и в общем случае различна для каждого из ответвлений. По величине мощности, поступающей в линию, определяются сопротивления \underline{Z}_{1x} , \underline{Z}_{2x} , \underline{Z}_{3x} , на их основе определяется модель в локальном режиме и формируется замер (7). Отклонение полученной кривой от прямой (11) незначительно (рис. 8), что говорит о правомерности предположений при расчете сопротивлений ответвлений.

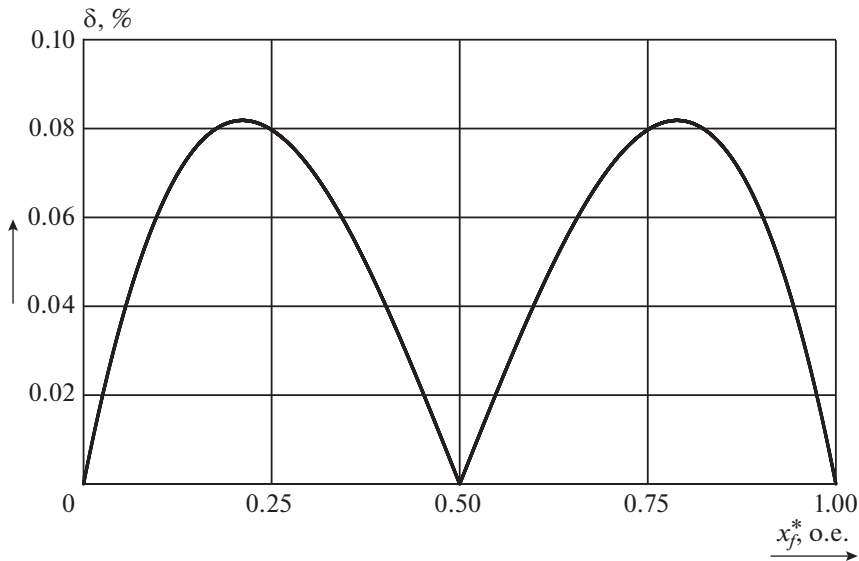


Рис. 9. Погрешность отношения локальных токов вследствие неучета распределенной емкости.

Погрешность применения метода локальных составляющих. Во всех вышеприведенных примерах не учитываются погрешности исходных данных, поскольку целью статьи является оценка точности и эффективности метода локальных составляющих. Этот метод сам по себе не имеет методической погрешности. Появление ее при определении места повреждения на основе локальных компонентов связано в первую очередь с неточностью задания модели нормального режима неповрежденного объекта. Неточность модели может быть обусловлена как неучетом распределенной емкости линии электропередачи (табл. 1), так и неточным определением сопротивлений неопределенных ответвлений (рис. 5, 6). Модель же локального режима менее восприимчива к таким видам неточностей благодаря наличию шунтов в местах наблюдения, которые ослабляют влияние неучтенных поперечных элементов модели.

Шунты на выходах модели линии в локальном режиме ослабляют влияние распределенной емкости. Оценим погрешность, создаваемую неучетом емкости, сравнивая величину модуля \underline{K} формулы (11) и модуль \underline{K} , определяемый по точной формуле (12), на примере произвольного КЗ в линии 220 кВ длиной 150 км с первичными параметрами $R^0 = 0.098$ Ом/км, $X_L^0 = 0.429$ Ом/км, $B_C^0 = 2.64$ мкСм/км; коэффициент распространения $\gamma = (0.121 + j1.071) \times 10^{-3}$ (1/км). Как видно из рис. 9, погрешность не превысила 0.1%, что свидетельствует о незначительном влиянии на модель локального режима неучета распределенной емкости.

ВЫВОДЫ

1. Унификация моделей и характеристик поврежденной электропередачи при двухстороннем наблюдении обеспечивается отношением локальных составляющих токов короткого замыкания, наблюдаемых на двух сторонах линии электропередачи.

2. Между токами КЗ и локальными составляющими стоит режим, активируемый наблюдаемыми напряжениями в типовой модели электропередачи. Если рассматривать электропередачу как эквивалентный генератор относительно места КЗ, а ветвь КЗ как его нагрузку, то типовые модели создаются режимом холостого хода (нормаль-

ный режим) или металлического КЗ (экстремальный режим). Отношение локальных токов инвариантно, но для определения места КЗ первоочередное значение имеет нормальный режим, а роль экстремального режима по меньшей мере заключается в проверке результата локации.

3. Двухпроводный канал электропередачи в нормальном режиме описывается уравнением четырехполюсника. Коэффициенты уравнения линии с ответвлениями могут быть уточнены в предшествующем режиме. Дополнительное условие доставляет суммарное продольное сопротивление электропередачи. Модель нормального режима относится к тому типу алгоритмических моделей, которые входят в структуру индикатора короткого замыкания в качестве преобразователей наблюдаемых величин.

4. Модель локального режима относится к типу обучающих алгоритмических моделей; она отличается зашунтированными входами, отделяющими ее от других частей системы. Целью обучения является определение зависимости замера от координаты места КЗ.

5. Унификация алгоритмов распознавания повреждений распространяется и на методику их тестирования, которая ограничивается вариациями чисто аварийного режима наблюдаемой электропередачи и не предполагает воспроизведения режимов электрической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов В.А., Мартынов М.В., Буров А.В., Гайдаш А.А. Адаптивная дистанционная защита линии электропередачи. Релейная защита и автоматизация, 2015. № 4. С. 26–30.
2. Sungyun C., Meliopoulos A.P. Setting-less transformer protection for ensuring security and dependability. —Elec. Eng. 2016. 98. № 3. P. 283–297.
3. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н., Никонов И.Ю. Унификация характеристик индикатора повреждения на контролируемом участке линии электропередачи. Изв. РАН. Энергетика, 2019. № 1. С. 123–134.
4. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н. Распознавание коротких замыканий в линии электропередачи с разветвлением. Изв. РАН. Энергетика, 2019. № 2. С. 118–126.
5. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. Энергоатомиздат, 2007. Гл. 6. С. 234–284.
6. Патент РФ № 2647485. Способ релейной защиты линии электропередачи при двухстороннем наблюдении. БИ, 2018, № 8 / Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Воронов П.И.
7. Патент РФ № 2542337. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем наблюдении. БИ, 2015, № 5 / Лямец Ю.Я., Воронов П.И.
8. Лямец Ю.Я., Белянин А.А. Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети. Электротехника, 2016. № 10. С. 40–44.
9. Fikri M., El-Sayed M. New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines. IEE Proc., 1988. V. 135. № 5. P. 436–440.

Unification of Models and Characteristics of Damaged Power Transmission during Two-Side Observation

I. D. Kochetov^{a,*}, Yu. Ya. Liamets^a, and F. A. Makashkin^a

^a“Relematika”, LLC, Chuvash State University, Cheboksary, Russia
*e-mail: kochetov_id@relematika.ru

The unification of algorithms and characteristics of relay protection, which has become the subject of discussion in recent times, has an original development in the application to the two-way observation of the transmission line. The article considered a unified fault location recognition algorithm. The unification of the dependence of the measurer on the fault location, formed from the observed values, results in the unification of damage recognition algorithms. The establishment of damage to the transmission line by relay protection becomes a special case of determining the fault location. The unified measurer is formed from currents of the local mode, which are the most valuable part of a purely emergency process in information terms. The rest part is the normal mode, activated in the model of intact power transmission by emergency components of the observed voltages.

Keywords: transmission line, two side observation, relay protection, unification of characteristics