

УДК 621.316.925

**РАСПОЗНАВАНИЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ
В ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С РАЗВЕТВЛЕНИЕМ**© 2019 г. Ю. Я. Лямец¹, *, М. В. Мартынов¹, А. Н. Маслов¹¹Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

*e-mail: yu.ya.liamets@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2018 г.

После доработки 02.04.2019 г.

Принята к публикации 23.04.2019 г.

Ранее были обнаружены теоретические и прикладные предпосылки унификации характеристик, разграничивающих режимы наблюдаемой электропередачи и отделяющих, как следствие, короткие замыкания в защищаемой зоне от альтернативных режимов. В настоящей статье найденный подход распространяется на более сложные структуры, в которых имеются ненаблюдаемые ветви. Они могут образовывать разветвление в конце основной линии или же отдельные промежуточные ответвления от нее. Основная линия наблюдается с одной стороны, а защищаемая зона простирается за ее пределы, заходя в ненаблюдаемые ветви. Показано, каким образом применяются в данных случаях теоретические положения метода информационного анализа и практические приемы метода алгоритмических моделей.

Ключевые слова: линия электропередачи, ненаблюдаемые ветви, короткое замыкание, распознавание, унификация

DOI: 10.1134/S0002331019020109

Как показано в предыдущей статье [1], метод алгоритмических моделей, вобравший в себя теоретические положения метода информационного анализа [2], создает предпосылки, необходимые для унификации характеристик индикатора повреждения на участке наблюдаемой электропередачи. В настоящей статье те же предпосылки используются для решения более сложной задачи построения индикатора повреждения в ненаблюдаемых ветвях, отходящих от электропередачи. Алгоритмическая модель обладает интересным свойством [3]. Она адекватна моделируемой части наблюдаемого объекта при условии, что эта часть не повреждена. Если модель рассчитана на зону защиты, то адекватность нарушается при КЗ в защищаемой зоне (α -режимы). Как следствие, α -режимы преобразуются алгоритмической моделью из начала в конец зоны неадекватно объекту, а режимы, альтернативные КЗ в зоне (β -режимы), — адекватно. Метод алгоритмических моделей располагает инструментом локализации альтернативных режимов [4]. Процедура локализации основывается на адекватности преобразования β -режимов, но предполагает еще и подбор замера, способного отобразить множество режимов в малой части комплексной плоскости. Альтернативные режимы имеют собственную градацию. Так, аварийные режимы β_f — это КЗ вне зоны, а нормальные режимы β_n — изменения в структуре объекта.

Коль скоро унификация характеристик обеспечивается локализацией альтернативных режимов, то итогом становятся унифицированные модули блокировки релейной защиты. Правомерно утверждение, что режим, отвечающий общему критерию повре-

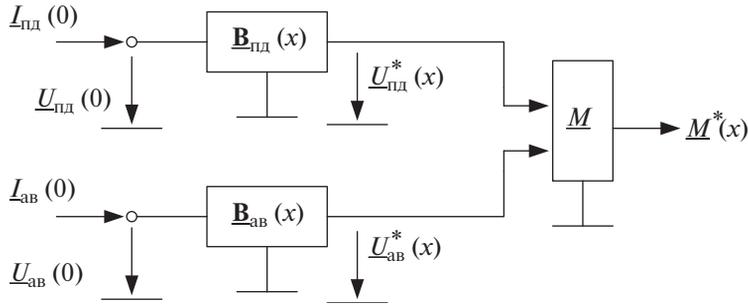


Рис. 1. Структура индикатора повреждения с алгоритмическими моделями для величин двух режимов.

ждения, но не вызвавший срабатывания одного из модулей блокировки, должен быть интерпретирован как КЗ в защищаемой зоне.

Алгоритмическое моделирование разветвленной электропередачи. Алгоритмическая модель выполняет ряд функций: связывает произвольное место электропередачи с местом наблюдения, передает со входа на выход информацию о наблюдаемых режимах — предшествующем, текущем и производным от них чисто аварийном, формирует из выходных величин замеры, каждый из которых отображается на своей плоскости. Напряжение $\underline{U}(x)$ произвольного места электропередачи идентифицируется с напряжением $\underline{U}^*(x)$ алгоритмической модели; верхний символ отличает величины алгоритмической модели от величин реального объекта, воспроизводимых в его имитационной модели. Напряжение $\underline{U}^*(x)$ является результатом преобразования напряжения $\underline{U}(0)$ и тока $\underline{I}(0)$, наблюдаемых на объекте в месте с координатой $x = 0$ (рис. 1). Алгоритмическая модель адекватна той части неповрежденной передачи, которая проходит от места $x = 0$ до произвольного места x . В общем случае величины предшествующего режима $\underline{U}_{нд}(0)$, $\underline{I}_{нд}(0)$ и чисто аварийного режима (аварийные составляющие) $\underline{U}_{ав}(0)$, $\underline{I}_{ав}(0)$ проходят преобразование в отдельных трактах. На рис. 1 преобразователи изображены в виде четырехполюсников, где $\mathbf{B}(x)$ — матрицы-строки обратной передачи. Выходные напряжения алгоритмических моделей, определяемые выражениями

$$\underline{U}_{нд}^*(x) = \mathbf{B}_{нд}(x) [\underline{U}_{нд}(0), \underline{I}_{нд}(0)]^T, \quad (1)$$

$$\underline{U}_{ав}^*(x) = \mathbf{B}_{ав}(x) [\underline{U}_{ав}(0), \underline{I}_{ав}(0)]^T, \quad (2)$$

преобразуются в замер

$$\underline{M}^*(x) = \frac{\underline{U}_{ав}^*(x)}{\underline{U}_{нд}^*(x)}. \quad (3)$$

Ненаблюдаемые ветви разветвленной электропередачи очевидным образом видоизменяют методику алгоритмического моделирования. Примем следующую концепцию построения алгоритмических моделей неопределенных структур. Одна из ненаблюдаемых ветвей выбирается в качестве опорной. Выход алгоритмической модели соответствует определенному месту в опорной ветви, причем модель строится в предположении, что электропередача не повреждена на всем протяжении от места наблюдения до указанного места в опорной ветви. Состояние всех ненаблюдаемых ветвей полагается таким, что в предшествующем режиме оно не создает неопределенности при оценивании тока в опорной ветви.

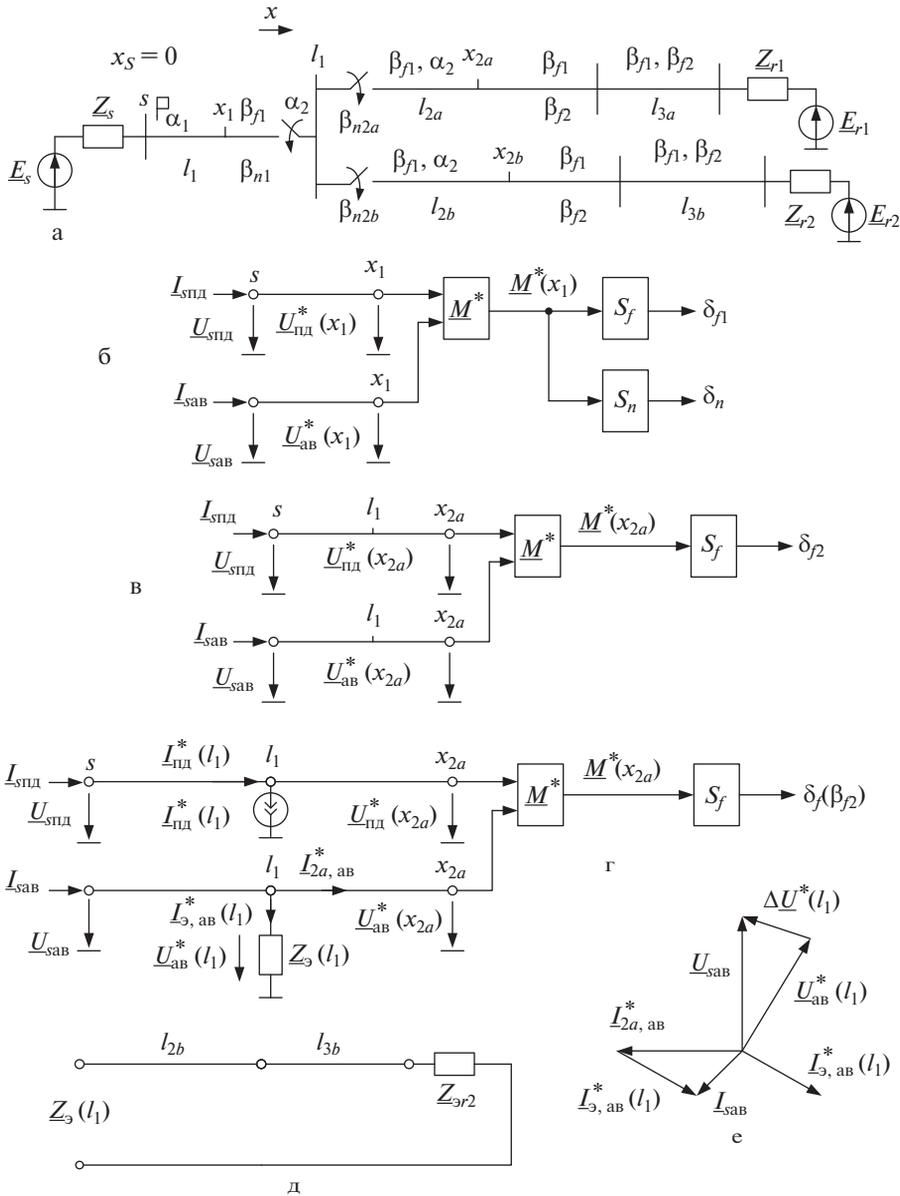


Рис. 2. Электропередача с разветвлением: (а) имитационная модель; (б) алгоритмическая модель первой зоны, (в, г) первая и вторая модификации алгоритмической модели второй зоны, (д) цепь эквивалентного сопротивления, (е) эффект усиления аварийной составляющей тока.

Индикатор повреждения как элемент релейной защиты. Электропередача нуждается в резервной защите от КЗ в ненаблюдаемых ветвях [5]. Защита такого рода сталкивается с проблемой, обусловленной нехваткой информации о состоянии контролируемого объекта. Задача выглядит по-разному для ветвей продольного и поперечного типа – разветвлений (рис. 2а), что рассматривается далее, и ответвлений, чему посвящена

вторая часть статьи. Защиты разветвления резервируются второй и последующими ступенями дистанционной защиты линии, наблюдаемой с одной стороны. Соответственно, КЗ во второй зоне электропередачи по рис. 2а – это α -режимы, а КЗ за пределами второй зоны – β_{f2} -режимы. Что же касается нормальных β_n -режимов, то они не привязаны к защищаемой зоне, и отстройка от них – общая задача защиты всей электропередачи от симметричных (трехфазных) КЗ, а не частные задачи защиты отдельных зон. Отсюда вытекает не вполне очевидный на первый взгляд вывод, что для выполнения отстройки от β_n -режимов достаточно воспользоваться алгоритмической моделью первой зоны, как это описано в [1]. На долю алгоритмической модели второй зоны достается единственная задача – отстройка от β_{f2} -режимов.

Как бы далеко ни отошла алгоритмическая модель от структуры реального объекта, это не приведет к неселективному действию релейной защиты, если ее характеристики определяются с применением процедуры обучения от имитационной модели данного объекта [6]. Иное дело, защита с унифицированными характеристиками, где ответственность за обеспечение селективности ложится на алгоритмические модели, а характеристики берутся с необходимым запасом, но с сохранением простейшей формы.

Алгоритмические модели для второй ступени дистанционной защиты. В качестве примера рассмотрим разветвление наблюдаемой линии l_1 на две ненаблюдаемые ветви (рис. 2а): первая ветвь образована линиями l_{2a} , l_{3a} , вторая – линиями l_{2b} , l_{3b} . Место x_1 – граница первой зоны, защищаемой первой ступенью дистанционной защиты с алгоритмической моделью по рис. 2б. Граничные точки второй зоны x_{2a} и x_{2b} задана на обеих линиях разветвления. Вторая ступень дистанционной защиты контролирует замыкания во второй зоне электропередачи – режимы α_2 . Локализации и блокировке подлежат замыкания вне зоны – режимы β_{f2} .

В качестве опорной ветви выберем более короткую ветвь разветвления ($l_{2a} < l_{2b}$). Выход алгоритмической модели соответствует границе x_{2a} второй зоны дистанционной защиты в опорной ветви. Алгоритмические модели, состояние которых определено в предшествующем режиме, выстраиваются в предположении, что одна из двух линий отключена, и предстают, как следствие, в двух модификациях. В соответствии с принятой концепцией первая модификация, не допускающая удлинения зоны срабатывания дистанционной защиты, строится на основе элементарного предположения, что в разветвлении включена только одна опорная линия l_{2a} , а остальные отключены. В данном случае отключена вторая линия l_{2b} . Предельная простота первой модификации алгоритмической модели (рис. 2в) обусловлена тем, что модель остается неизменной в предшествующем и чисто аварийном режимах. Вторая модификация (рис. 2г, д) основывается на прямо противоположном предположении, что опорная линия находится в режиме холостого хода. Остальные ветви, если их несколько, включены все или только часть из них. В данном случае включена единственная остающаяся линия l_{2b} . Если число ветвей больше двух, то в этой модели $\underline{Z}_3(l_1)$ – эквивалентное сопротивление пассивного разветвления без опорной ветви (рис. 2г). Как можно заметить, структура по рис. 2г видоизменяется при переходе от предшествующего к чисто аварийному режиму. Источник тока $I_{\text{пл}}^*(l_1)$, отводящий ток от опорной ветви в предшествующем режиме, заменяется в чисто аварийном режиме входным сопротивлением $\underline{Z}_3(l_1)$ второй ветви (рис. 2д), которое создает эффект усиления аварийной составляющей тока в опорной ветви. В поясняющей его диаграмме принято во внимание, что наблюдаемая аварийная составляющая тока $I_{s, \text{ав}}$ опережает наблюдаемую аварийную составляющую напряжения на угол, несколько больший 90° (рис. 2е).

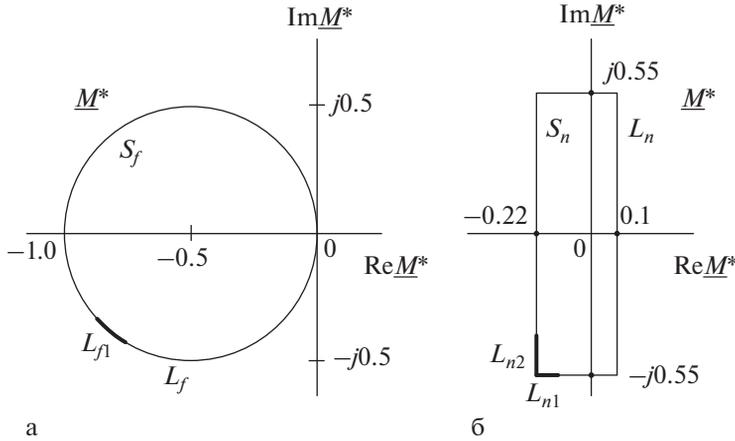


Рис. 3. Унифицированные характеристики отстройки от альтернативных режимов: (а) от КЗ вне зоны защиты, (б) от подключения симметричной активной нагрузки.

Задаваемые на плоскости \underline{M}^* унифицированные характеристики L_f и L_n являются граничными линиями областей блокировки S_f и S_n (рис. 3) [1].

Круговая характеристика L_f выполняет во второй ступени дистанционной защиты функцию блокировки в режимах КЗ вне зоны (β_{f2} -режимы), а прямоугольная характеристика L_n выполняет универсальную функцию блокировки защиты при коммутациях сети (β_n -режимы). Вне зависимости от зоны защиты процедура отстройки от нормальных режимов выражается логической операцией

$$\left(\underline{M}_1^* \in S_n\right) = \delta_n, \quad (4)$$

где $\underline{M}_1^* = \underline{M}^*(x_1)$, а δ_n – логическая переменная: $\delta_n = 1$ в случае отображения замера \underline{M}_1^* в области S_n и $\delta_n = 0$ в случае отображения вне этой области.

Условие блокировки от КЗ вне зоны более специализировано, так как у каждой зоны своя алгоритмическая модель. Блокировка от КЗ за пределами первой зоны выражается операцией

$$\left(\underline{M}_1^* \in S_f\right) = \delta_{f1}, \quad (5)$$

где δ_{f1} играет ту же роль по отношению к области S_f , что и δ_n по отношению к S_n . Блокировка от КЗ вне второй зоны отличается от условия (5) только алгоритмической моделью

$$\left(\underline{M}_{2a}^* \in S_f\right) = \delta_{f2}, \quad (6)$$

где $\underline{M}_{2a}^* = \underline{M}^*(x_{2a})$. На рис. 2б, в, г величины δ_n и δ_f играют роль дискретных выходных сигналов блокирующих органов на основе алгоритмических моделей.

Векторы варьируемых параметров имитационной модели. Пусть \mathbf{x}_n – вектор варьируемых нормальных параметров, а \mathbf{x}_f – вектор параметров в режиме КЗ

$$\mathbf{x}_f^T = \left[x_f, R_f, \mathbf{x}_n^T \right],$$

где x_f – координата места КЗ, R_f – переходное сопротивление. Соответственно, $\mathbf{x}_{f\alpha_2}$ и $\mathbf{x}_{f\beta_2}$ – векторы КЗ внутри и вне второй зоны защиты (режимы α_2 и β_{f_2}). В режимах α_2 координата x_f принимает следующие значения

$$x_{f\alpha_2} = \begin{cases} x_1 \dots l_1, & \text{линия } l_1, \\ l_1 \dots x_{2a}, & \text{линия } l_{2a}, \\ l_1 \dots x_{2b}, & \text{линия } l_{2b}. \end{cases} \quad (7)$$

Соответственно, для КЗ вне второй зона (режимы β_{f_2})

$$x_{f\beta_2} = \begin{cases} x_{2a} \dots l_1 + l_{2a}, & \text{линия } l_{2a}, \\ l_1 + l_{2a} \dots l_1 + l_{2a} + l_{3a}, & \text{линия } l_{3a}, \\ x_{2b} \dots l_1 + l_{2b}, & \text{линия } l_{2b}, \\ l_1 + l_{2b} \dots l_1 + l_{2b} + l_{3b}, & \text{линия } l_{3b}. \end{cases} \quad (8)$$

Алгоритмические модели преобразуют входные величины, поступающие от имитационной модели, в силу чего формируемые замеры \underline{M}_1^* и \underline{M}_{2a}^* являются функциями варьируемых параметров имитационной модели $\underline{M}_1^*(\mathbf{x})$ и $\underline{M}_{2a}^*(\mathbf{x})$; в нормальных режимах – $\underline{M}_1^*(\mathbf{x}_n)$ и $\underline{M}_{2a}^*(\mathbf{x}_n)$, в α_2 -режимах $\underline{M}_1^*(\mathbf{x}_{2a})$ и $\underline{M}_{2a}^*(\mathbf{x}_{2a})$, а в β_{f_2} -режимах – $\underline{M}_1^*(\mathbf{x}_{2\beta})$ и $\underline{M}_2^*(\mathbf{x}_{2\beta})$.

Распознающая способность защиты второй зоны от симметричных КЗ. О распознающей способности индикатора КЗ говорит его объектная характеристика [1, 2]. В данном случае это зависимость $R_{f \max \min}(x_{f\alpha_2})$. Предельное значение переходного сопротивления $R_{f \max}$, при котором удается распознать КЗ, минимизируется по всем варьируемым нормальным параметрам. Пусть G , G_α , G_β и G_n – области определения векторов \mathbf{x} , \mathbf{x}_α , \mathbf{x}_β и \mathbf{x}_n ($\mathbf{x} \in G$, $\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha$, $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta$, $\mathbf{x}_n \in G_n$). Объектную характеристику определит процедура поиска условного экстремума

$$R_{f \max \min}(x_{f\alpha_2}) = \max_{R_f} \min_{\mathbf{x}_n \in G_n} \left(\mathbf{x}_{\alpha_2} = [x_{f\alpha_2}, R_f, \mathbf{x}_n^T]^T \in G_{\alpha_2} \right); \quad (9)$$

Ограничивающие условия – несрабатывание блокировок (4), (6) при КЗ во второй зоне

$$\underline{M}_1^*(\mathbf{x}_{2\alpha} \in G_{\alpha_2}) \notin S_n, \quad (10)$$

$$\underline{M}_{2a}^*(\mathbf{x}_{2\alpha} \in G_{\alpha_2}) \notin S_f, \quad (11)$$

что равносильно нулевым значениям дискретных сигналов δ_n и δ_{f_2} .

Объектные характеристики получены не только для унифицированных характеристик S_n и S_f , но и для вписанных в них областей конкретных отображений множества альтернативных режимов (рис. 4). Процедура построения таких областей интерпретируется как обучение релейной защиты [6], а их совокупность берет на себя роль областей S_f (рис. 4а) и S_n (рис. 4б). Распознающая способность индикатора КЗ в таком случае будет предельно высокой. Сравнивая с пределом распознающую способность унифицированного исполнения, узнаем, во что обходится унификация (рис. 5).

Конкретные результаты применения процедуры (8)–(10) (рис. 5) получены для имитационной модели по рис. 2а с постоянными параметрами $l_1 = l_{2b} = 60$ км, $l_{2a} = l_{3a} = 40$ км, $l_{3b} = 50$ км, $x_1 = 48$ км, $x_{2a} = 32$ км, удельным сопротивлением

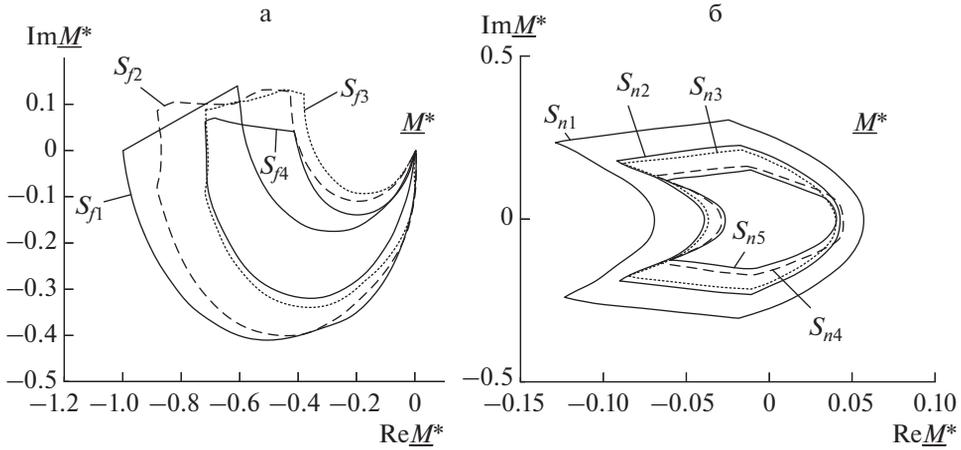


Рис. 4. Области отображения альтернативных режимов: $S_{f1} \dots S_{f4}$ – режимы β_{f2} , $S_{n1} \dots S_{n5}$ – режимы β_n , а именно: S_{f1} – при отключенной линии l_{2b} , S_{f2} – при отключенной линии l_{2a} , S_{f3} – КЗ на l_{2a} , а S_{f4} – КЗ на l_{2b} , когда обе линии включены; S_{n1} – режим β_{n1} , S_{n2} – режимы β_{n2a} при отключенной линии l_{2b} , S_{n3} – режимы β_{n2b} при отключенной l_{2a} ; S_{n4} , S_{n5} – режимы β_{n2a} и β_{n2b} , когда вторая линия включена.

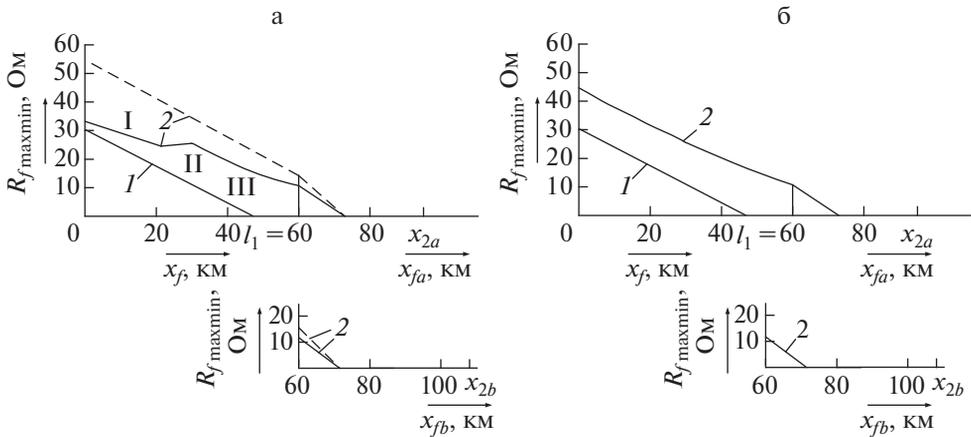


Рис. 5. Объектные характеристики дистанционной защиты. Сплошной линией – на основе алгоритма с унификацией, пунктирной – на основе алгоритма с обучением а – при симметричных КЗ, б – при междуфазных КЗ 1 – первой ступени, 2 – второй ступени.

$\underline{Z}^0 = 0.1 + j0.4$ Ом/км и независимо варьируемыми нормальными параметрами $\underline{E}_s = E_s \angle \psi_s$, $\underline{E}_{ri} = E_{ri} \angle \psi_{ri}$, $i = 1, 2$; $E_s = k_s U_{\text{НОМ}}$, $E_{ri} = k_{ri} U_{\text{НОМ}}$; $k_s, k_{ri} = 0.95 \dots 1.05$; $\psi_s, \psi_{ri} = -15^\circ \dots 15^\circ$; $\underline{Z}_s = Z_s \angle \varphi_s$, $\underline{Z}_{ri} = Z_{ri} \angle \varphi_{ri}$, $Z_s, Z_{ri} \in (Z_{\min}, Z_{\max})$, $Z_{\min} = 0.5$ Ом, $Z_{\max} = 30$ Ом, $\varphi_s, \varphi_{ri} = 70^\circ \dots 90^\circ$. В β_n -режимах варьируется еще и угол включения $\gamma = -30^\circ \dots 30^\circ$. В режимах КЗ значения переходных сопротивлений варьируются в разных режимах: при КЗ вне зоны – $R_{f\beta} = 0 \dots \infty$, а при КЗ в зоне – $R_{f\alpha} = 0 \dots 100$ Ом. При-

менялась первая модификация алгоритмической модели (рис. 2в), которая обходится без эквивалентирования ненаблюдаемых ветвей.

Объектная характеристика, полученная для унифицированного исполнения индикатора КЗ (рис. 5а), имеет вид ломаной линии, участки которой, пронумерованные римскими цифрами, определяются различными отрезками граничных линий L_f и L_n , локализирующих отображения альтернативных режимов (рис. 3). Участки I и II определены отрезками L_{1n} и, соответственно, L_{2n} прямоугольника L_n (рис. 3б), а участок III определен отрезком L_{f1} окружности L_f (рис. 3а).

Распознавание несимметричных КЗ. Условия распознавания несимметричных КЗ несколько отличаются от тех, что свойственны симметричным КЗ. Распознаванию несимметричных КЗ благоприятствует то обстоятельство, что симметричные режимы электропередачи, отмеченные ранее символом β_n (рис. 2а), исключаются из числа альтернативных режимов, в перечне которых остаются только КЗ вне зоны, обозначенные как β_f . Имеет место позитивный информационный эффект. Как плату за него можно расценить некоторое усложнение процедуры распознавания. Ее необходимо дополнить операцией фазовой селекции – определением поврежденных фаз [7]. Приводимая иллюстрация (рис. 5б) относится к междуфазным замыканиям, воспроизводимым имитационной моделью по рис. 2а. Объектная характеристика получена при той же характеристике отстройки от КЗ вне зоны, что и для симметричных КЗ (рис. 3а).

Отдельного рассмотрения заслуживает задача распознавания КЗ на землю. Унифицированная характеристика сохраняется и в этом случае, но алгоритмическая модель модифицируется, включая в свой состав канал преобразования напряжения нулевой последовательности.

ВЫВОДЫ

1. Метод информационного анализа и его приложение – метод алгоритмических моделей – делают возможной унифицированную индикацию повреждения не только наблюдаемой части электропередачи, но и ее ненаблюдаемых ветвей. Унификация обеспечивается способностью алгоритмических моделей учитывать априорную информацию о контролируемом объекте и локализовать отображения наблюдаемых режимов, альтернативных повреждениям в заданной части объекта.

2. Среди замеров, которые могут быть сформированы, и выходных величин алгоритмических моделей в текущем и чисто аварийном режимах особое место занимает отношение комплекса аварийной составляющей напряжения к комплексу предшествующего напряжения. Именно на плоскости этого замера задаются унифицированные характеристики, ограничивающие области локализации альтернативных режимов.

3. Чувствительность дистанционной защиты с унифицированной характеристикой к несимметричным КЗ выше, чем к симметричным, что объясняется сокращением числа альтернативных режимов и, как следствие, блокирующих модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н., Никонов И.Ю.* Унификация характеристик индикатора повреждения в ограниченной части линии электропередачи. Известия РАН. Энергетика (в редакции)
2. *Иванов С.В., Лямец Ю.Я.* Метод информационного анализа, Ч. 1 и 2. Известия РАН. Энергетика, 2016. № 1. С. 38–57.
3. *Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н.* Метод алгоритмических моделей. Релейщик, 2017. № 3. С. 16–19.
4. *Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Атишшкин А.Б.* Распознавание аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов. Электричество, 2018. № 9. С. 29–38.
5. *Нагай В.И.* Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 2002. 312 с.

6. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С. и др. Обучаемая релейная защита. Ч. 1 и 2. Электричество, 2012. № 2. С. 15–19; № 3. С. 12–18.
7. Патент РФ № 2642506. Способ распознавания поврежденных фаз линий электропередачи при неполнофазном замыкании на землю. – БИ, 2018, № 33 \ Ю.Я. Лямец, М.В. Мартынов, П.И. Воронов, А.Н. Маслов.

**Recognition of Damage in Non-Observed Branches of Electric Transmission.
Part 1. Electro-Transmission with Branches**

Yu. Ya. Liamets^{a, #}, M. V. Martynov^a, and A. N. Maslov^a

^a*Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russia*

[#]*e-mail: yu.ya.liamets@gmail.com*

Previously, theoretical and applied prerequisites for the unification of characteristics separating the modes of the observed power transmission and separating, as a result, short circuits in the protected zone from alternative modes were discovered. In this article, the approach is extended to more complex structures in which there are unobservable branches. They can form a branch at the end of the main line or separate intermediate branches from it. The main line is observed from one side, and the protected zone extends beyond its limits, entering unobservable branches. It is shown how the theoretical positions of the information analysis method and the practical techniques of the algorithmic model method are applied in these cases.

Keywords: power transmission, unobserved branches, damage, recognition, unification