

Определение поврежденных проводов при коротком замыкании в многопроводной сети

ЛЯМЕЦ Ю.Я., МАРТЫНОВ М.В., МАСЛОВ А.Н.

К решению задачи распознавания повреждённых проводов в n -проводной сети привлечены методы адаптивной релейной защиты, получившие развитие в недавнее время. Множество режимов повреждения отдельного провода разделяется на подмножества частных режимов. Каждое подмножество в процессе обучения распознающей структуры (фазового селектора) отображается в виде областей на плоскостях замеров. Режимы воспроизводятся имитационной моделью сети. Особую роль играет алгоритмическая модель, формирующая замеры из наблюдаемых токов и напряжений. Она моделирует неповреждённую сеть, является составной частью фазового селектора и преобразует входные величины в напряжения, отнесённые к выходу n -проводной сети. Замеры представляют собой отношения комплексных выходных и входных напряжений. В качестве примера рассмотрен фазовый селектор для трёхфазной сети. Методика выявления повреждённых проводов исключает необходимость в перестройке областей отображения подмножеств частных режимов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многопроводная сеть, распознавание повреждений, обучение, фазовый селектор, алгоритмическая модель

Модуль релейной защиты, распознающий повреждённые провода, называется фазовым селектором или же избирателем повреждённых фаз [1–5]. Фазовая селекция реализуется относительно просто, если информация о текущем режиме повреждения дополняется информацией о предшествующем режиме и, как следствие, определением аварийных составляющих электрических величин. Источники аварийных составляющих из мест повреждения указывают на повреждённые провода. Однако воспользоваться аварийными составляющими не всегда возможно. Во-первых, предшествующего режима может не быть, скажем, при включении линии, уже повреждённой или получившей повреждение при включении. Во-вторых, информация о двух режимах сочетается при условии, что угол передачи остаётся неизменным. Данное условие нарушается в режимах качаний и спустя некоторое время после момента повреждения. В отсутствие дополнительной информации возникает труднопреодолимая проблема разграничения замыканий с одной и той же особой фазой, например, однофазного КЗ фазы A и двухфазного КЗ на землю фаз B и C . Между тем, распознаванию повреждений способствует не только наблюдение предшествующего режима системы, но и априорная информация о её параметрах и структуре, а кроме того, методы обучения релейной защиты с использованием имитационных моделей контролируемых объектов [6], равно как и методы разграничения разнотипных режимов с использованием алгоритмических моделей, и критерии распознавания повреждений [7].

В 1999 г. на семинаре, проходившем в компании ABB Relays (г. Вастерас, Швеция), была поставлена задача поиска универсальных алгоритмов фазовой селекции, распознающая способность которых приближалась бы к абсолютной распознаваемости каждого из возможных видов короткого замыкания¹. Актуальность задачи ощущалась тогда и сохраняется поныне в связи с тем, что в микропроцессорной релейной защите фазовая селекция реализует среди прочего функцию общего критерия повреждения (general fault criteria), исключающего срабатывания защиты в нормальных режимах.

Результаты разработки фазового селектора, отвечающего поставленным требованиям, приведены в [8, 9]. Распознавание повреждений осуществляется там в многомерном дискретном пространстве совокупности замеров, что затрудняет тиражирование разработки, несмотря на всю её универсальность. Настоящая статья посвящена новой модификации, обладающей достаточно высокой распознающей способностью, но не требующей дискретизации пространства отображений.

Постановка задачи. В n -проводной сети, где $\nu=1, n$ – индекс произвольного провода (рис. 1,а), возможно n типов повреждений, различающихся числом k повреждённых проводов. Пусть N_k – число вариантов повреждения k -го типа, причём повреждённые провода могут быть в любом сочетании. Если C_n^k – число сочетаний из n по k , то

¹ В постановке задачи, в обсуждении и тестировании алгоритмов принимали участие сотрудники компании Zakonjsek J., Dr. Saha M., Dr. Lindahl S., Dr. Akke M.

$$N_k = C_n^k, \quad k = \overline{1, n}.$$

Общее число вариантов повреждения проводов в n -проводной системе

$$N_\Sigma = \sum_{k=1}^n C_n^k.$$

Согласно биному Ньютона

$$2^n = (1+1)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k,$$

так что

$$N_\Sigma = 2^n - 1.$$

Пусть $p = \overline{1, N_\Sigma}$ – номер варианта повреждения сети, \underline{H}_q – один из комплексных замеров, формируемых для распознавания повреждённых проводов. Обучение распознающей структуры заключается в отображении на плоскостях \underline{H}_q подмножеств разнообразных режимов повреждения сети. Отображения образуют области $S_q(d)$, где d – символ режима повреждения. Разные области одной и той же плоскости будут, конечно же, пересекаться друг с другом, что препятствует распознаванию и создаёт две задачи – построение распознающей структуры и определение способа формирования замеров.

Процедуры распознавания повреждения и формирования замеров можно без ущерба для общности рассмотреть на примере трёхфазной сети ($n=3$; $k=1,2,3$; $N_1=N_2=3$, $N_3=1$; $N_\Sigma=7$). Ограничимся шестью замерами ($m=6$): тремя фазными \underline{H}_q , $q=A,B,C$, и тремя линейными: $q=AB,BC,CA$. В данном случае на каждой из шести плоскостей \underline{H}_A , \underline{H}_B , \underline{H}_C , \underline{H}_{AB} , \underline{H}_{BC} , \underline{H}_{CA} должны быть отображены все или только определённая часть режимов короткого замыкания (см. таблицу). Сложное повреждение, каким является двухфазное замыкание на землю, целесообразно подразделить на несколько подвариантов. Если i – номер подварианта, то $S_{qi}(d)$ – область отображения соответствующего подмножества режимов наблюдаемой сети.

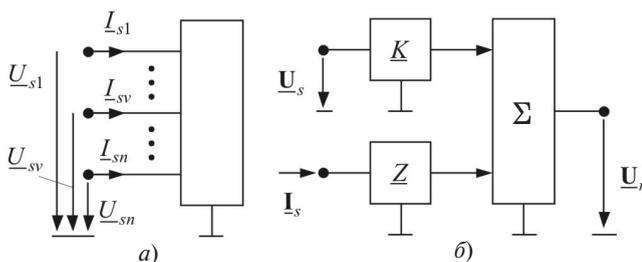


Рис. 1. Многопроводная сеть (а) и её алгоритмическая модель (б)

Номер варианта повреждения сети, p	Фаза	Режим повреждения (символ) d	Область отображения $S_q(d)$
1 2 3	A B C	$K_A^{(1)}$ $K_B^{(1)}$ $K_C^{(1)}$	$q = A, B, C$
4 5 6	A, B B, C C, A	$K_{AB}^{(1)}$ $K_{BC}^{(1)}$ $K_{CA}^{(1)}$	$q = AB, BC, CA$
4 5 6	A, B B, C C, A	$K_{ABi}^{(1,1)}$ $K_{BCi}^{(1,1)}$ $K_{CAi}^{(1,1)}$	$q = \begin{cases} A, B, C \\ AB, BC, CA \\ i = 1, 4 \end{cases}$
7	A, B, C	$K^{(3)}$	$q = A, B, C$

Принятая нумерация вариантов модели двухфазного замыкания на землю приведена на рис. 2.

Метод распознавания. Построим процедуру распознавания в инверсном порядке, исключая одну за другой все альтернативные ситуации. Заметим, что в этом случае взаимные пересечения областей $S_q(d)$ не будут влиять на результат. Суть метода инверсного распознавания заключается в том, что целью поиска становится сам факт повреждения того или иного провода вне зависимости от варианта повреждения. На повреждение k -го провода указывает выполнение двух условий:

- а) отрицательный результат проверки предположения о тех вариантах повреждения p , в которых не присутствует k -й провод;
- б) подтверждение любого варианта с его участием.

Так, для констатации повреждения фазы A необходимо убедиться в выполнении следующих условий на основе операции «И» с логическим нулём в правой части либо операции «ИЛИ» с логической единицей:

$$q = \begin{cases} A, B, C & (\underline{H}_q \in S_q(d)) = 0; \\ A, B, C & (\underline{H}_q \notin S_q(d)) = 1; \end{cases} \left. \vphantom{q} \right\} d = K_B^{(1)}, K_C^{(1)}, \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} AB, BC, CA & (\underline{H}_q \in S_q(d)) = 0; \\ A, B, C & (\underline{H}_q \notin S_q(d)) = 1; \end{cases} \left. \vphantom{q} \right\} d = K_{BC}^{(2)}, \quad (2)$$

$$q = \begin{cases} A, B, C \\ AB, BC, CA \end{cases} \left. \vphantom{q} \right\} d = K_{BCi}^{(1,1)}, i = \overline{1, 4}. \quad (3)$$

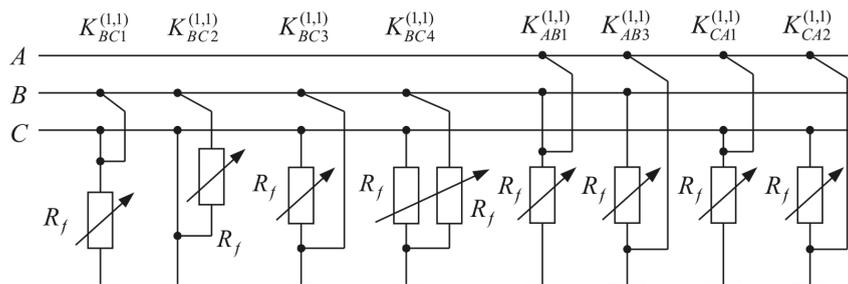


Рис. 2. Модель двухфазного замыкания на землю с одним варьируемым сопротивлением

Выполнение условий (1)–(3) свидетельствует о том, что из дальнейшего рассмотрения могут быть исключены все замыкания, в которые не вовлечена фаза A . Следовательно, их надлежит считать необходимыми условиями распознавания её повреждения. Возможно, и достаточными, если предусмотрена ещё и проверка выполнения общего критерия повреждения. Вместе с тем очевидно, что при замыкании с участием фазы A должно выполняться хотя бы одно из следующих условий на основе логической операции «ИЛИ» с логической единицей в правой части:

$$q = K_A^{(1,1)}, K^{(3)} (\underline{H} \in S_A(d)) = 1; \quad (4)$$

$$q = K_{ABi}^{(1,1)}, K_{CAi}^{(1,1)} (\underline{H}_A \in S_{Ai}(d)) = 1; \quad (5)$$

$$(\underline{H}_{AB} \in S_{AB}(K_{AB}^{(2)})) U (\underline{H}_{CA} \in S_{CA}(K_{CA}^{(2)})) = 1; \quad (6)$$

$$(\underline{H}_{AB} \in S_{ABi}(K_{ABi}^{(1,1)})) U (\underline{H}_{CA} \in S_{CAi}(K_{CAi}^{(1,1)})) = 1. \quad (7)$$

Выполнение условий (1)–(3) и какого-либо из четырёх условий (4)–(7) свидетельствует только о повреждении фазы A . Но после проведения аналогичных процедур в отношении фаз B и C проясняется общая картина повреждения сети.

Формирование замеров. Алгоритмическая модель неповреждённого объекта оказалась инструментом распознавания повреждений имеющейся априорной информации [7–9]. Алгоритмическая модель становится неадекватной в случае повреждения, что отражается на характере формируемых ею замеров, способствуя распознаванию повреждений. Применительно к задаче фазовой селекции метод алгоритмических моделей интерпретируется следующим образом. Алгоритмическая модель многопроводной сети (рис. 1,б) преобразует наблюдаемые векторы напряжения и тока $\underline{U}_s, \underline{I}_s$ в вектор напряжения на выходе сети \underline{U}_r в предположении, что сеть не повреждена. Модели преобразования напряжения и тока \underline{K} и \underline{Z} на рис. 1,б разделены, как если бы входные сигналы являлись физическими величинами.

Адекватность или неадекватность алгоритмической модели по отношению к реальной сети ощущимо влияет на соотношения выходных и входных напряжений алгоритмической модели. Отсюда и принципы формирования фазных и линейных замеров:

$$\underline{H}_v = \frac{U}{U_{sv}}, \quad v = A, B, C; \quad (8)$$

$$\underline{H}_{v,v-1} = \frac{U_{rv} - U_{r,v-1}}{U_{sv} - U_{s,v-1}}, \quad (9)$$

где \underline{U}_v – элемент вектора \underline{U} ; $v-1$ – фаза, отстающая от фазы v .

Обучение фазового селектора. Алгоритмическая модель, входящая в качестве составной части в структуру фазового селектора, обеспечивает формирование замеров (8), (9) и тем самым наделяет его способностью к обучению. Цель обучения – определение областей $S_q(d)$ отображения замеров подмножеств однопроводных режимов имитационной модели контролируемого объекта. Рассмотрим в качестве примера симметричную трёхфазную сеть (рис. 3,а), с параметрами имитационной модели: фиксированные: $U = 110$ кВ; $\underline{Z}_{si} = (1 + j10)$ Ом; $\underline{Z}_{s0} = (1,2 + j12)$ Ом; $\underline{Z}_{ri} = (1 + j10)$ Ом; $\underline{Z}_{r0} = (1,2 + j12)$ Ом; $\underline{Z}_1^0 = (0,15 + j0,4)$ Ом/км; $\underline{Z}_0^0 = (0,3 + j1,21)$ Ом/км; $l = 100$ км;

варьируемые: $\delta = (-30^\circ \div 30^\circ)$; $x_f = 0 \div 100$ км; $R_f = 0 \div 100$ Ом; $\eta_s = 0,85 \div 1,05$ отн. ед.; $\eta_r = 0,85 \div 1,05$ отн. ед.

Алгоритмическая модель (рис. 3,б) ограничивается двумя параметрами \underline{Z}_1 и \underline{Z}_0 , которые задаются условиями наилучшего распознавания повреждённых проводов. Очевидно, что должно быть соблюдено неравенство $\underline{Z}_1 > \underline{Z}_1^0 l$, $\underline{Z}_0 > \underline{Z}_0^0 l$ (\underline{Z}_1^0 и \underline{Z}_0^0 – удельное сопротивление прямой и нулевой последовательностей; l – длина линии). Кроме того, в этой модели $\underline{U}'_{sv} = \underline{U}_{sv} - \underline{U}_{s0}$; $\underline{I}'_{sv} = \underline{I}_{sv} - \underline{I}_{s0}$; \underline{U}_{s0} и \underline{I}_{s0} – величины нулевой последовательности.

Обучение проводилось в режимах однофазного замыкания ($K_A^{(1)}$), междуфазного ($K_{BC}^{(2)}$), двухфазно-

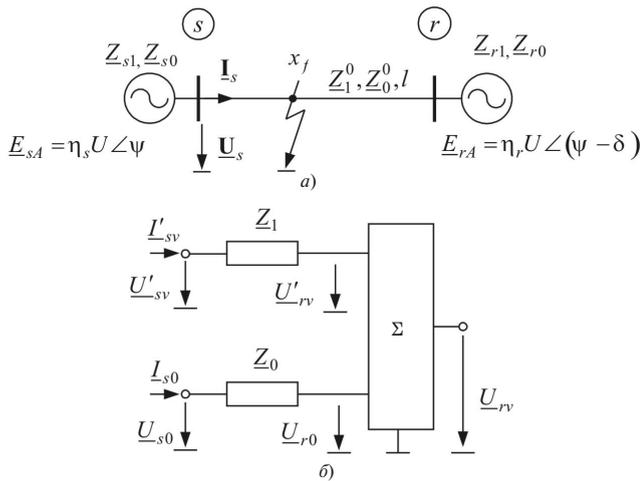


Рис. 3. Модели симметричной трёхфазной сети: а – имитационная, б – алгоритмическая

го на землю ($K_{BC}^{(1,1)}$) и симметричного трёхфазного замыкания ($K^{(3)}$). Во всех случаях модели повреждения обходятся единственным варьируемым переходным сопротивлением R_f , в том числе и при двухфазном замыкании на землю (рис. 2). Режимы, имитируемые в последнем случае, являются граничными в том смысле, что отображаются на границах областей $S_q(K_{BCi}^{(1,1)})$ [10].

По итогам обучения фазовый селектор обретает совокупность областей $S_q(d)$, перечисленных ранее в таблице. Для оценивания распознающей способности фазового селектора привлечём метод объектных характеристик [7]. Пусть \mathbf{x} – вектор варьируемых параметров имитационной модели, состоящий из вектора нормальных параметров \mathbf{x}_{norm} и аварийных параметров x_f, R_f :

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{norm}^T, x_f, R_f]^T;$$

$$\mathbf{x}_{norm}^T = [\delta, \eta_s, \eta_r].$$

Вектор $\mathbf{x} \in G$ ассоциируется с определённым режимом имитационной модели, а область G , в которой определён этот вектор – со множеством режимов. Специфика задачи фазовой селекции предполагает, что объектная характеристика будет определяться индивидуально для каждого вида повреждения. Так, для замыкания $K_A^{(1)}$ объектную характеристику определит оптимизационная процедура:

$$R_f \max \min (x_f, K_A^{(1)}) = \max_{R_f} \min_{\mathbf{x}_{norm}} [\mathbf{x} \in G(K_A^{(1)}), \underline{H}_q \notin S_q(d)], \tag{10}$$

где $G(K_A^{(1)})$ обозначает множество соответствующих режимов, а ограничивающее условие $\underline{H}_q \notin S_q(d)$ означает выполнение всех трёх условий (1)–(3).

Результат применения процедуры (10) ко всем видам замыкания в имитационной модели по рис. 3,а даёт оценку распознающей способности фазового селектора на основе алгоритмической модели по рис. 3,б. Объектные характеристики на рис. 4 получены для модели с сопротивлениями $Z_1 = Z_1^0 l + Z_{r1}$, $Z_0 = Z_0^0 l + Z_{r0}$. Повреждённые провода распознаются при всех видах замыканий во всех местах электропередачи, правда, с разной чувствительностью к переходному сопротивлению R_f . Хуже всего поддаются распознаванию повреждения фазы А при замыкании $K_{AB}^{(1,1)}$ с участием отстающей фазы. Следовательно, оптимизация алгоритмической модели должна иметь целью повышение распознающей способности фазового селектора именно при таком виде замыкания. Имеется в виду не только определение оптимальных значений параметров алгоритмической модели, в случае рис. 3,б – сопротивлений Z_1 и Z_0 , но и расширение перечня замеров, объединяемых операцией «И». Так, к (8), (9) целесообразно добавить соотношения между выходными напряжениями алгоритмической модели.

На рис. 4 не приведены объектные характеристики при замыканиях $K_{AB1}^{(1,1)}$, $K_{AB3}^{(1,1)}$, $K_{CA2}^{(1,1)}$, $K_{CA1}^{(1,1)}$. Дело в том, что в таких режимах складываются особо благоприятные условия для распознавания повреждения фазы А вследствие её металлического замыкания на землю или на фазу В и задача успешно решается для каждого из перечисленных режимов. Но есть отличие режима $K_{CA1}^{(1,1)}$ от трёх других, иллюстрацией чего служит рис. 5. Для распознавания повреждения фазы А в этих трёх режимах достаточно единственного замера \underline{H}_A , так как области их отображения на плоскости \underline{H}_A не пересекаются ни с одной из областей отображения альтернативных режимов $K_B^{(1)}$, $K_C^{(1)}$, $K_{BC}^{(2)}$, $K_{BCi}^{(1,1)}$, при которых фаза А не повреждена.

Режим $K_{CA1}^{(1,1)}$ составил исключение. На плоскости \underline{H}_A область его отображения пересеклась с областью отображения альтернативного режима $K_B^{(1)}$, следовательно, в данном случае одного замера недостаточно. Потребовался ещё один замер \underline{H}_C , на плоскости которого области режимов $K_{CA1}^{(1,1)}$ и $K_B^{(1)}$ не пересекаются, что свидетельствует о выполнении условия (1) для $d = K_B^{(1)}$, $q = A, C$ при всех замыканиях $K_{CA1}^{(1,1)}$.

Распознаваемость повреждения фазы зависит от вида повреждения. Физические основы этого явления связаны с представлениями о чисто аварийном

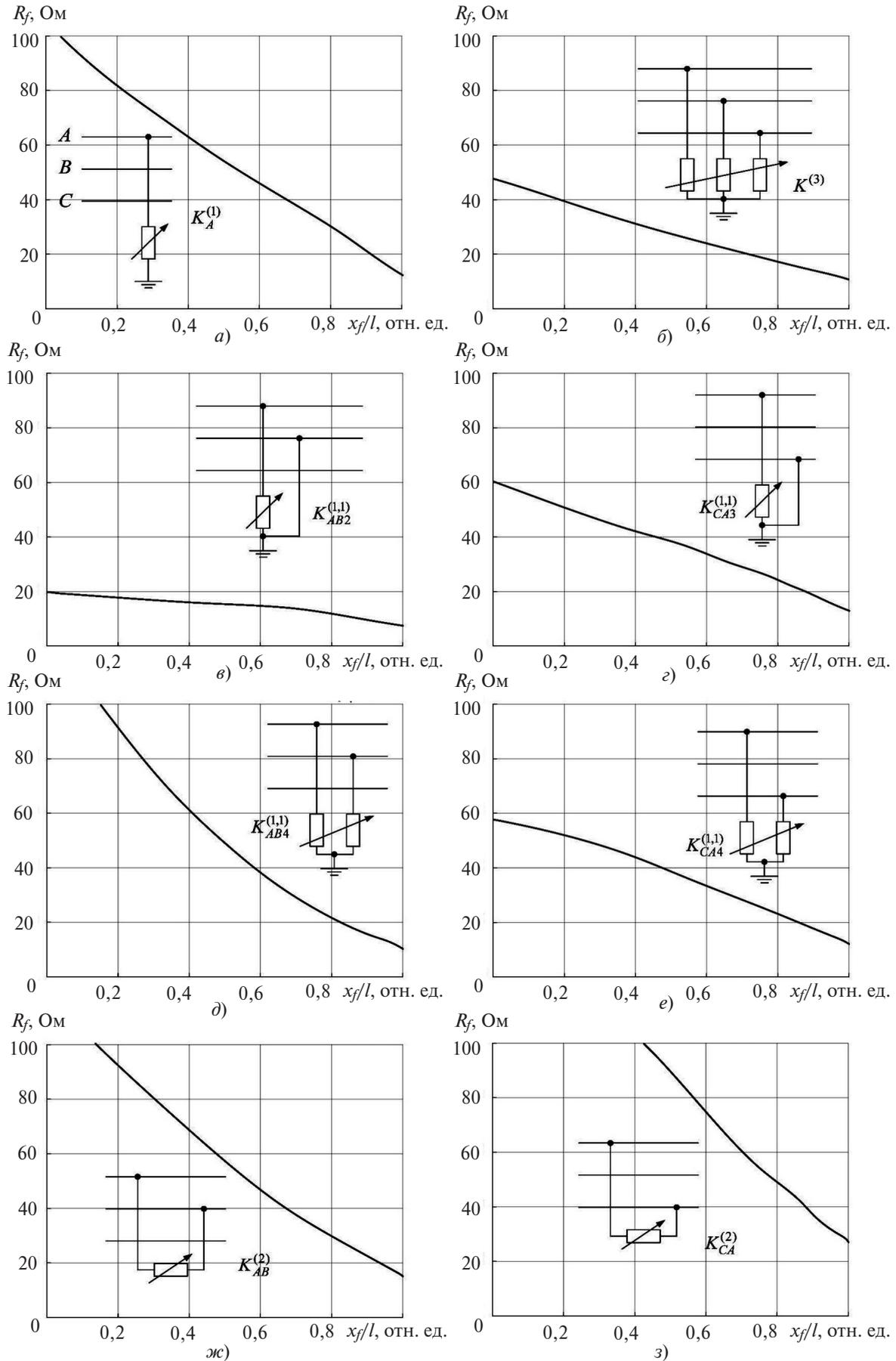


Рис. 4. Объектные характеристики фазового селектора

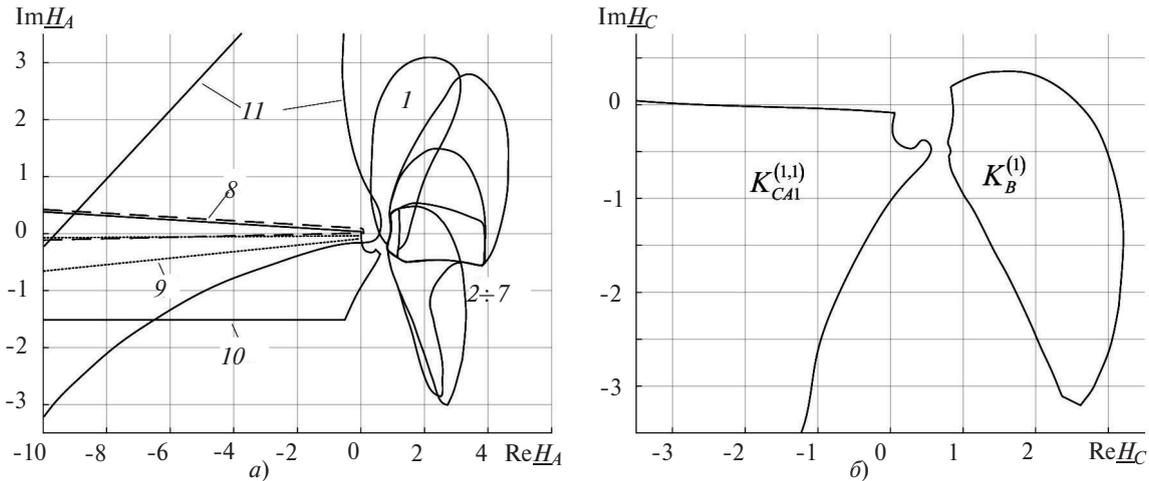


Рис. 5. Распознавание повреждения фазы А при двухфазных замыканиях на землю: а – по одному замеру \underline{H}_A ; б – по двум замерам \underline{H}_A и \underline{H}_C : 1 – $K_B^{(1)}$; 2 – $K_C^{(1)}$; 3 – $K_{BC}^{(2)}$; 4–7 – $K_{BCi}^{(1,1)}$, $i=1\div 4$; 8 – $K_{AB3}^{(1,1)}$; 9 – $K_{CA2}^{(1,1)}$; 10 – $K_{AB1}^{(1,1)}$; 11 – $K_{CA1}^{(1,1)}$

режиме электрической сети, источники которого располагаются в месте замыкания [11]. Их можно изобразить в виде ЭДС, равных фазным напряжениям предшествующего режима $\underline{U}_{fвпд}$ в месте повреждения с координатой x_f (рис. 6). Аварийная составляющая $\underline{I}_{sAав}$ наблюдаемого тока \underline{I}_{sA} является реакцией на одну, две или все три ЭДС $\underline{U}_{fвпд}$ в зависимости от вида замыкания. Реакция на ЭДС $\underline{U}_{fAпд}$ свидетельствует о повреждении фазы А, а реакция на ЭДС $\underline{U}_{fBпд}$ и $\underline{U}_{fCпд}$ эту информацию искажает. Ожидаемым результатом искажения информации, естественно, следует считать понижение распознающей способности фазового селектора. Рассмотрим в качестве примера междуфазные замыкания $K_{AB}^{(2)}$ и $K_{CA}^{(2)}$ (рис. 7). Источником чисто аварийного режима в том и другом случаях является ЭДС, равная линейному напряжению предшествующего режима в месте замыкания $\underline{U}_{fABпд} = \underline{U}_{fAпд} - \underline{U}_{fBпд}$ или $\underline{U}_{fACпд} = \underline{U}_{fAпд} - \underline{U}_{fCпд}$. На рис. 8 сопоставлены годографы тока $\underline{I}_{sAав}$ в режимах коротких замыканий $K_{AB}^{(2)}$, $K_{CA}^{(2)}$ при изменении сопротивления R_f от нуля до бесконечности. Дуги годографов опираются на хорды $\underline{I}_{sAав}^{K3}$ – векторы тока $\underline{I}_{sAав}$ при $R_f \rightarrow 0$. Там же показан годограф той части тока $\underline{I}_{sAав}$, которая представляет собой реакцию на напряжение $\underline{U}_{fAпд}$ и, следовательно, определяет угловой сектор повреждения. Как видим, годографы междуфазных замыканий частично располагаются за пределами этого сектора, причём по-разному. Расположение годографа замыкания $K_{CA}^{(2)}$ можно расценить как благоприятное: часть дуги при больших значениях R_f находится в угловом секторе реакции на напряжение

$\underline{U}_{fAпд}$, что способствует распознаванию повреждения фазы А. Аналогичная часть годографа замыкания $K_{AB}^{(2)}$ располагается вне этого сектора. Разное влияние фаз В и С на распознавание повреждения фазы А при междуфазных замыканиях (рис. 4, ж, з) имеет физическое объяснение: линейное напряжение $\underline{U}_{fABпд}$ опережает фазное $\underline{U}_{fAпд}$, а $\underline{U}_{fACпд}$ от него отстаёт. Сеть имеет индуктивный характер, ток отстаёт от воздействующего на сеть напряжения, вследствие чего расположение вектора $\underline{U}_{fACпд}$ оказывается предпочтительным.

Иначе обстоит дело при двухфазном замыкании на землю. Дадим объяснение явлению, приведенному на рис. 4, д, е. При замыканиях $K_{AB4}^{(2)}$, $K_{CA4}^{(2)}$ менее благоприятным оказалось влияние фазы С, а не В, как в предыдущем случае. Очевидно, что на этот раз источник $\underline{U}_{fBпд}$ действует согласно с источником $\underline{U}_{fAпд}$ (рис. 9), а не против него, как на рис. 7. Пояснение, почему так происходит: если сопротивление R_f значительно превосходит индуктивное сопротивление сети как эквивалентного ге-

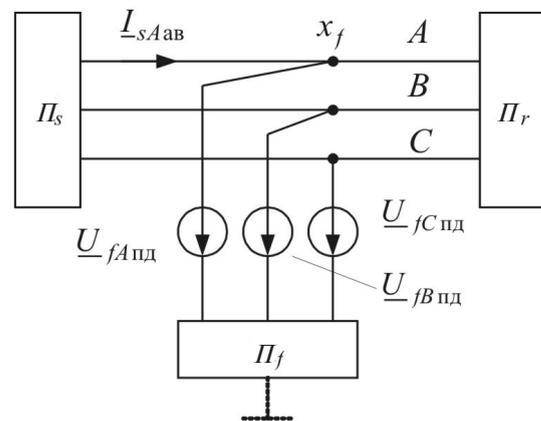


Рис. 6. Имитационная модель чисто аварийного режима: Π_s , Π_r – пассивные модели системы; Π_f – модель повреждения

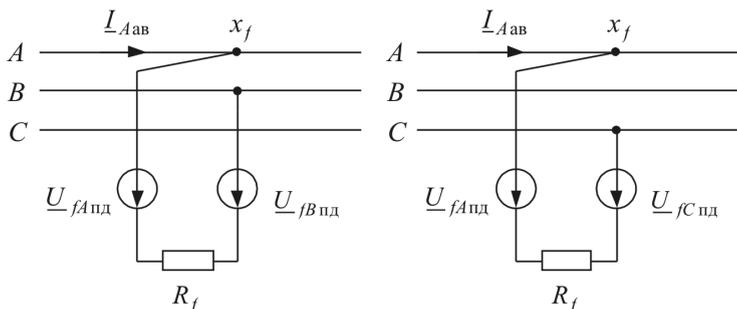


Рис. 7. Источники чисто аварийного режима при замыкании между фазой A и другой фазой

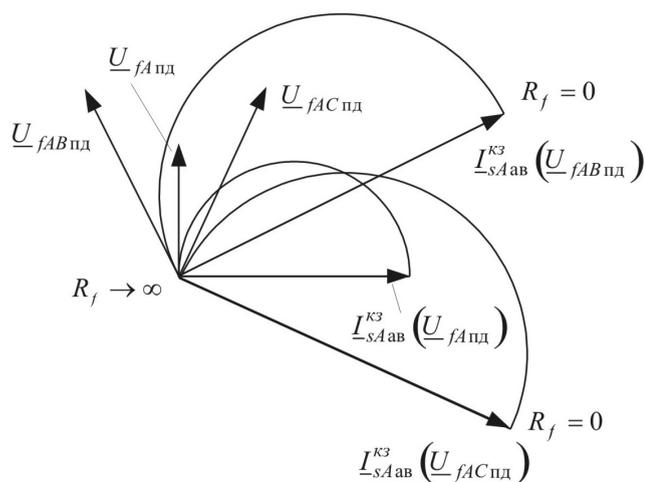


Рис. 8. Годографы тока $I_{sAав}$ при $R_f \rightarrow \infty$ в режимах $K_{AB}^{(2)}$, $K_{CA}^{(2)}$

нератора относительно места повреждения, то ЭДС $U_{fvпд}$ могут быть преобразованы в эквивалентные источники тока $J_{fv} = U_{fvпд} / R_f$. Ток нулевой последовательности в месте повреждения

$$I_{f0} = (J_{fA} - J_{fB}) = (U_{fAпд} + U_{fBпд}) / 3R_f$$

создаётся согласным действием двух источников, что подтверждает высказанную гипотезу, но для доказательства этого недостаточно. Остаётся безнулевая составляющая тока замыкания в фазе A:

$$I'_{fA} = I_{fA} - I_{f0} = (2U_{fAпд} - U_{fBпд}) / 3R_f$$

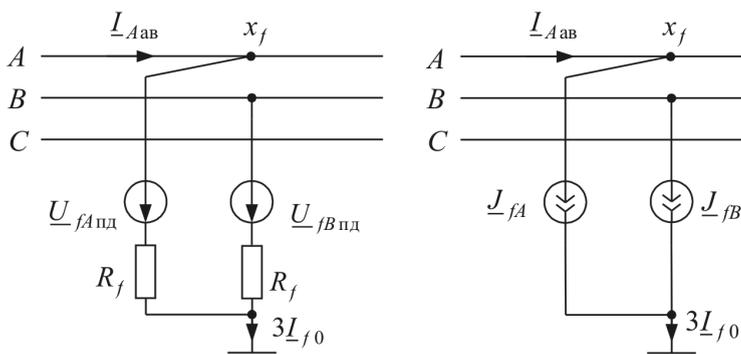


Рис. 9. Источники чисто аварийного режима при замыкании $K_{AB4}^{(1,1)}$

Здесь источник фазы B действует против удвоенного источника фазы A. Если бы распознавание проводилось только по безнулевым составляющим наблюдаемых величин, влияние фазы B было бы негативным. Но в алгоритмической модели сети (рис. 3,б) модуль сопротивления Z_0 превосходит модуль Z_1 и в выходных напряжениях алгоритмической модели сильнее сказывается влияние источника фазы B на нулевую последовательность тока, чем на безнулевую составляющую тока фазы, повреждение которой является целью распознавания.

Выводы. 1. В решении задачи распознавания повреждённых проводов востребованы разнообразные методы адаптивной релейной защиты: локализации альтернативных режимов контролируемого объекта, алгоритмических моделей неповреждённого объекта двухкоординатных замеров, обучения распознающей структуры сигналами имитационной модели объекта, отображения подмножеств однотипных режимов в виде областей на плоскостях замеров, оценки распознающей способности модуля, прошедшего обучение, по методу объектных характеристик.

2. Процедура исключения альтернативных ситуаций выявляет повреждённые провода без каких-либо перестроений областей отображения разнообразных режимов многопроводной системы.

3. Сложные повреждения, такие как двухфазные замыкания на землю, целесообразно имитировать набором автономных моделей с одним варьируемым переходным сопротивлением. Каждая модель приводит в этом случае к оценке распознающих свойств фазового селектора одной объектной характеристикой.

4. Соотношения выходных и входных напряжений алгоритмической модели многопроводной сети оказываются эффективными замераами в связи с тем, что модель неповреждённой сети передаёт напряжения повреждённых и неповреждённых проводов с разной степенью адекватности реальному объекту.

5. Вторая из двух фаз, затронутых коротким замыканием, по-разному влияет на распознаваемость первой фазы. Отстающая фаза при междуфазном замыкании ухудшает распознаваемость по сравнению с опережающей фазой, что объясняется встречным действием источников чисто аварийного режима. В тех же случаях двухфазного короткого замыкания на землю, где эти источники действуют согласно, вторая повреждённая фаза оказывает противоположное влияние на распознаваемость первой фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шнейерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007.
2. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Computer relaying for power systems. 2nd ed. Research Studies. — Press Limited, 2009.
3. **Apostolov A., Duffy C., Tholomier D.** Advanced methods for faulted phase selection and directional detection in numerical distance relays. — Proc. of 52th. Annual Conf. for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, 1999.
4. **Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E.** Fault Location of Power Networks. London, Springer, 2010.
5. **Akke M.** Fault classification for distance protection. — Proc. of IEEE/PES Conf. and Exhibition «Transmission and Distribution», Yokohama, 2002.
6. **Пат. РФ № 2584268.** Способ адаптации дистанционной защиты и определителя места повреждения линии электропередачи с использованием ее модели/А.Л. Куликов, П.А. Колобанов, М.Д. Обалин. — БИ, 2016, № 14.
7. **Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В., Воронов П.И.** Обучаемая релейная защита. Ч. 1, 2. — Электричество, 2012, № 2, с. 15–19; № 3, с. 12–18.

8. **Ефимов Е.Б.** Оптимальная фазовая селекция коротких замыканий в линиях электропередачи: Автореф. дис... канд. техн. наук. Чебоксары, Чувашский университет, 2002.

9. **Пат. РФ № 2247456.** Способ релейной защиты энергообъекта/ Ю.Я. Лямец, Е.Б. Ефимов, Г.С. Нудельман. — БИ, 2005, № 6.

10. **Лямец Ю.Я., Мартынов М.В.** Граничная задача релейной защиты. — Электричество, 2013, № 5, с. 49–56.

11. **Fikri M., El-Sayed M.** New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines. — IEE Proc., 1988, vol. 135, No. 5, pp. 436–440.

[13.05.2019]

А в т о р ы: **Лямец Юрий Яковлевич** — доктор техн. наук., профессор Чувашского госуниверситета (ЧГУ), диссертацию защитил в 1994 г.

Мартынов Михаил Владимирович — кандидат техн. наук, ведущий инженер-исследователь ООО «Релематика», диссертацию защитил в 2014 г.

Маслов Александр Николаевич — магистрант ЧГУ, инженер-исследователь ООО «Релематика».

Elektrichestvo, 2019, No. 9, pp. 22–29

DOI:10.24160/0013-5380-2019-9-22-29

Recognition of Failed Wires during a Short-Circuit Fault in a Multiwire Network

LYAMETS Yuriy Ya. (*Chuvash State University (ChSU), Cheboksary, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

MARTYNOV Mikhail V. (*LLC «Relematika», Cheboksary, Russia*) — Research Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

MASLOV Alexander N. (*LLC «Relematika», Cheboksary, Russia*) — Research Engineer

The adaptive relay protection methods, which have received development in recent years, are engaged in solving the problem of recognizing failed wires in an n-wire network. The multitude of individual wire failure modes is divided into subsets of partial failure modes. In the course of training the recognizing structure (phase selector), each subset is represented in the form of domains on the measurement planes. The failure modes are replicated by the simulating network model. An algorithmic model, which produces measurements from the observed currents and voltages, plays a special role. This model, which simulates the healthy network, is a constituent part of the phase selector and converts the input quantities into voltages related to the n-wire network output. The measurements come as the ratios of the output and input voltage phasors. As an example, the phase selector for a three-phase network is considered. The procedure of revealing failed wires eliminates the need to restructure the domains reflecting the subsets of partial modes.

К е у w o r d s: failure recognition, multiwire network, training, phase selector, algorithmic model

REFERENS

1. **Shneyerson E.M.** *Tsifrovaya reley'naya zashchita* (Digital relay protection). M., Energoatomizdat, 2007.
2. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Computer relaying for power systems. 2nd ed. Research Studies. — Press Limited, 2009.
3. **Apostolov A., Duffy C., Tholomier D.** Advanced methods for faulted phase selection and directional detection in numerical distance relays. Proc. of 52th. Annual Conf. for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, 1999.
4. **Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E.** Fault Location of Power Networks. London, Springer, 2010.
5. **Akke M.** Fault classification for distance protection. — Proc. of IEEE/PES Conf. and Exhibition «Transmission and Distribution», Yokohama, 2002.
6. **Pat. RF № 2584268.** *Sposob adaptatsii distantsionnoy zashchity i opredelitel'ya mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi s ispol'zovaniyem yeye modeli* (Pat. Of the Russian Federation No. 2584268. A method for adapting the distance protection and the determinant of the place of damage to the transmission line using its model)/A.L. Kulikov, P.A. Kolobanov, M.D. Obalin. Bulletin of inventions, 2016, No.14.

7. **Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V., Nudel'man G.S., Romanov Yu.V., Voronov P.I.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 2, pp. 15–19; No. 3, pp. 12–18.

8. **Yefimov Ye.B.** *Optimal'naya fazovaya selektsiya korotkikh zamykaniy v liniyakh elektroperedachi: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* (Optimal phase selection of short circuits in power lines: author. Diss. ... Cand. Sci. (Eng.)). Cheboksary, Chuvash University, 2002.

9. **Pat. RF № 2247456.** *Sposob reley'noy zashchity energoob'yekta/ Yu.Ya. Lyamets, Ye.B. Yefimov, G.S. Nudel'man* (Pat. Of the Russian Federation No. 2247456. Method of relay protection of a power facility/ Yu.Ya. Lyamets, E.B. Efimov, G.S. Nudelman). Bulletin of inventions, 2005, No. 6.

10. **Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 5, pp. 49–56.

11. **Fikri M., El-Sayed M.** New algorithm for distance protection of high voltage transmission lines. — IEE Proc., 1988, vol. 135, No. 5, pp. 436–440.

[13.05.2019]