

Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи

ЛЯМЕЦ Ю.Я., ВОРОНОВ П.И., МАРТЫНОВ М.В.

Применительно к алгоритмам дистанционной защиты разграничиваются два вида адаптации – прямая и косвенная. Прямая заключается в модификации областей срабатывания в зависимости от режима, предшествовавшего короткому замыканию на защищаемом объекте. Косвенная адаптация сводится к формированию замера защиты с использованием аварийной составляющей наблюдаемого тока. Два адаптивных алгоритма сравниваются по распознающей способности между собой и с неадаптивным алгоритмом. Области срабатывания реле сопротивления определяются путем обучения сигналами имитационной модели линии электропередачи. О распознающей способности реле говорят объектные характеристики – зависимости между переходным сопротивлением и координатой места замыкания, ограничивающие область определения распознаваемых режимов короткого замыкания. Анализ учитывает асинхронные режимы электропередачи и действие блокировки при качаниях, свидетельствует об информационном преимуществе прямой адаптации.

Ключевые слова: электропередача, асинхронный режим, дистанционная защита, адаптация, обучение

Микропроцессорная техника открывает благоприятную перспективу для полномасштабной реализации адаптивных защит, использующих всю доступную информацию о состоянии контролируемого объекта. Существующие способы адаптации модулей релейной защиты можно подразделить на два типа – прямой и косвенной адаптации. Прямая адаптация предполагает видоизменение характеристики срабатывания модуля в зависимости от ситуации, складывающейся на объекте. Например, характеристике срабатывания реле сопротивления придаётся зависимость от тока обратной последовательности [1, 2]. В более общем случае прямая адаптация проводится в дискретном пространстве, подразделенном на ячейки [3, 4]. Его координаты – замеры, осуществляемые релейной защитой. Область срабатывания задаётся совокупностью номеров ячеек, в которых отображаются контролируемые режимы (а-режимы), но куда не попадают альтернативные режимы (b-режимы).

Способы косвенной адаптации в релейной защите ведут своё начало от широко известного реле Бреслера [5]. Их можно интерпретировать с помощью представлений об алгоритмических моделях объекта, осуществляющих преобразование наблюдаемых величин в напряжения и токи места предполагаемого повреждения [6, 7].

Оба типа адаптации рассматриваются в статье на примере ключевой для дистанционной защиты задачи контроля зоны повреждения линии электропередачи. Необходимый инструментарий предоставляет метод обучения релейной защиты с учителем – имитационной моделью защищаемого объ-

екта в а- и b-режимах, а также метод объектных характеристик для оценивания чувствительности защиты к переходному сопротивлению короткого замыкания и определения сопротивлений, при которых место замыкания становится нераспознаваемым [8].

Представления о распознаваемости замыканий как физическом свойстве наблюдаемого объекта сформировались ещё в своё время в ходе совместных исследований со шведским отделением компании АВВ [9] – пионером внедрения адаптивных алгоритмов релейной защиты [1, 2]. Но до сих пор не были получены ответы на вопросы теоретического характера, важные для приложений: насколько явление нераспознаваемости ограничивает чувствительность адаптивной дистанционной защиты, в том числе в асинхронных режимах линий электропередачи; имеется ли различие в распознаваемости места и зоны замыкания; можно ли сопоставить распознающую способность защит с прямой и косвенной адаптацией; как сравнить адаптивные алгоритмы защиты по их распознающей способности между собой и с неадаптивным алгоритмом.

Нераспознаваемые режимы. Линии электропередачи как объекту одностороннего наблюдения присущи физические явления неопределённости режимов короткого замыкания [10]. Неопределённость заключается в том, что одни и те же электрические величины наблюдаются при замыкании в любом месте линии через своё для каждого места переходное сопротивление. Неопределённость очевидным образом приводит к нераспознаваемости мест некоторых замыканий, что и было показано в [9, 10].

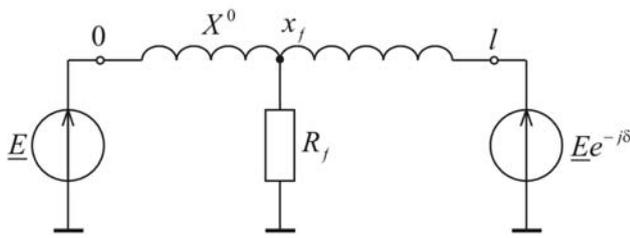


Рис. 1. Схема простейшей имитационной модели для случая симметричного трёхфазного замыкания

Здесь же предстоит охарактеризовать взаимосвязь между неопределённостью и нераспознаваемостью замыканий применительно к задаче дистанционной защиты.

Рассмотрим явление неопределённости на примере линии без потерь с двухсторонним питанием от систем бесконечной мощности. В двухпроводной модели, отвечающей случаю симметричного трёхфазного замыкания, три варьируемых параметра: угол передачи d , координата места замыкания x_f и переходное сопротивление R_f (рис. 1). Фиксированы удельные сопротивление X^0 , длина линии l . Модули ЭДС систем полагаются равными. Явление неопределённости возникает при определенной взаимосвязи варьируемых параметров. В [9], где предпринят вывод этой зависимости, итоговое выражение дано для значений угла d в четвертой четверти ($d \in (-90^\circ, 0)$), что исключает из рассмотрения короткие замыкания на фоне асинхронных режимов. Соотношение, свободное от ограничения диапазона вариации угла d , выглядит следующим образом:

$$\frac{R_{f\text{нр}}(x_f/l, d)}{X^0 l} = \frac{2}{\sin \delta} \left(1 - \frac{x_f}{l} \right) \frac{X^0 x_f}{l} \sin^2 \frac{d}{2} - \frac{1}{2} \frac{1}{\sin \delta} \quad (1)$$

Каждой зависимости $R_{f\text{нр}}(x_f)$, получаемой из (1) для того или иного значения угла d , соответствует единственное значение наблюдаемого тока $I(d)$. Как следствие, замыкания в разных местах x_f через сопротивления $R_{f\text{нр}}(x_f)$ неразличимы. Нечётная функция (1) даёт в первом и втором квадрантах угла d зеркальные отражения зависимостей, построенных соответственно для четвертого и третьего квадрантов. На графиках рис. 2 физически нереальные части кривых при $R_{f\text{нр}} < 0$ отмечены пунктиром. В четвертом квадранте, где нет таких частей (рис. 2,а), нераспознаваемость в зоне защиты адекватна нераспознаваемости мест замыкания. В первом квадранте, где $R_{f\text{нр}} < 0$, нераспознаваемость не проявляется вовсе.

В третьем квадранте функция (1) знакопеременна (рис. 2,б). Во втором квадранте она инверсна той, что показана для третьего квадранта. Для характерного угла $d = 180^\circ$ она уходит в бесконечность во всех местах линии, кроме её середины и конца (рис. 2,в). Координата критического места, где $R_{f\text{нр}} = 0$, равна

$$\frac{x_{f\text{кр}}}{l} = \frac{1}{2 \sin^2(d/2)}, \quad (2)$$

её график приведён на рис. 3. Поведение функции (1) накладывает свой отпечаток на условие нераспознаваемости применительно к дистанционной защите. Пусть l_3 – длина защищаемой зоны ($l_3 < l$). В третьем квадранте (рис. 2,б), если

$$l_3 > x_{f\text{кр}}, \quad (3)$$

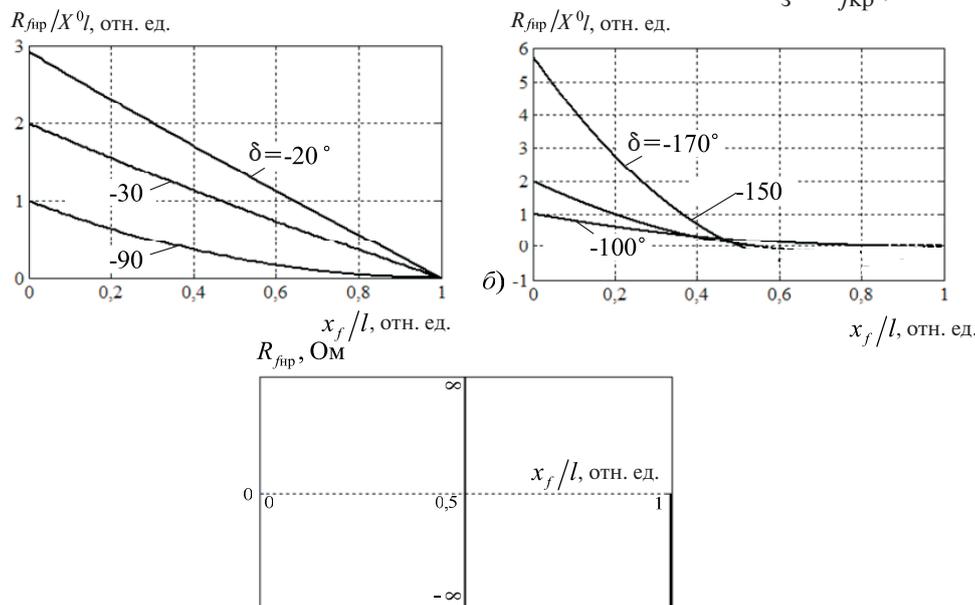


Рис. 2. Характеристика нераспознаваемости трёхфазных коротких замыканий: а – при угле передачи в четвертом квадранте; б – в третьем квадранте; в – при $d = 180^\circ$

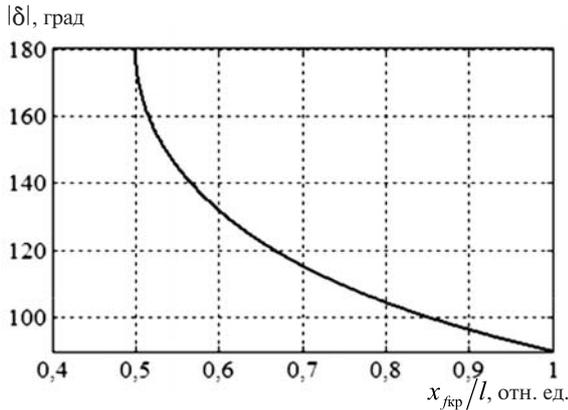


Рис. 3. Взаимосвязь координаты критического места замыкания и угла передачи

зависимость $R_{фнр}(x_f)$ вне зоны становится нереальной:

$$R_{фнр}(x_f) < 0, x_f > l_3, \tag{4}$$

т.е. нераспознаваемость не проявляется. Во втором квадранте, для которого зависимости рис. 2,б инвертируются, неравенство (4) не может быть удовлетворено при любом соотношении между l_3 и $x_{фкр}$. Следовательно, нераспознаваемость проявляется при замыканиях во всех местах x_f , где

$$R_{фнр}(x_f) > 0, x_f \in (x_{фкр}, l_3). \tag{5}$$

Постановка задачи. Каждому алгоритму защиты присуща своя распознающая способность; соответственно, каждый из двух способов адаптации может повлиять на неё лишь в строго определенной степени. Ставится задача оценить и сравнить возможности прямой и косвенной адаптации. С тем чтобы исключить влияние прочих факторов, ограничивающих распознающую способность, области срабатывания реле, действующих по разным алгоритмам, будут формироваться по единой методике обучения с учителем. В данном случае роль учителя возлагается на имитационную модель линии электропередачи (рис. 4) с тремя варьируемыми параметрами x_f , R_f и d без ограничения диапазона изменения угла передачи. Влияние блокировки при качаниях на распознающую способность защиты учитывается отдельно.

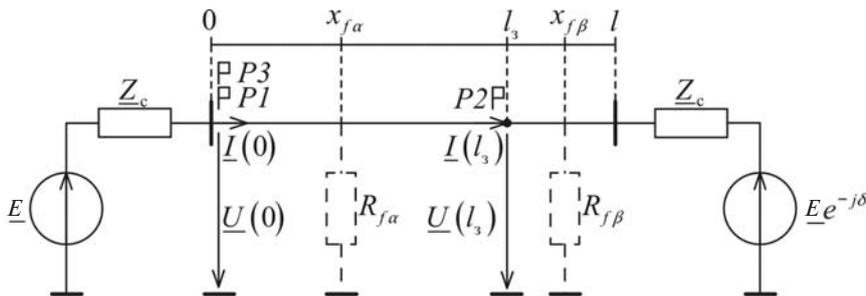


Рис. 4. Схема обучающей имитационной модели линии электропередачи

В модели по рис. 4 фиксированы значения сопротивлений $Z_c = 1 + j10$ Ом, $Z^0 = 0,1 + j0,43$ Ом/км и ЭДС $E = 220 / \sqrt{3}$ кВ. Длина линии $l = 100$ км, протяжённость защищаемой зоны $l_3 = 85$ км. Аварийные параметры с индексом **a** относятся к замыканиям в зоне, $R_{фа} \in (0, 100)$ Ом), с индексом **b** – к замыканиям вне зоны, $R_{фб} \in (0, \Gamma)$, где верхний предел отвечает нормальному режиму; $x_{фа} \in (0, l_3)$, $x_{фб} \in (l_3, l)$. Переходные сопротивления $R_{фа}$ и $R_{фб}$ показаны штрихами, так как режим короткого замыкания создается только одним из них.

Регистрируемые величины – комплексы тока и напряжения в начале линии; $\underline{I}_{пд}(0)$, $\underline{U}_{пд}(0)$ – в предшествующем режиме; $\underline{I}_{тк}(0)$, $\underline{U}_{тк}(0)$ – в текущем режиме короткого замыкания. В имитационной модели проводится обучение трёх реле сопротивления: **P1** реагирует на замер $\underline{Z}_{тк}(0) = \underline{U}_{тк}(0) / \underline{I}_{тк}(0)$ без какой-либо адаптации; **P2** представляет собой известное виртуальное реле, относимое к концу защищаемой зоны (рис. 4) и действующее по способу косвенной адаптации, коль скоро в его замере $\underline{Z}_{та}$ присутствует аварийная составляющая тока $\underline{I}_{ав}$:

$$\underline{Z}_{та} = \underline{U}_{тк}(l_3) / \underline{I}_{ав}(l_3);$$

$$\underline{U}_{тк}(l_3) = \underline{U}_{тк}(0) - Z^0 l_3 \underline{I}_{тк}(0)$$

без учета распределенной емкости $\underline{I}_{ав}(l_3) = \underline{I}_{ав}(0)$.

Виртуальное реле обладает высокой распознающей способностью и не имеет «мертвой» зоны [7], но его поведение при замыканиях на фоне асинхронного режима ранее не рассматривалось. Наконец, реле **P3**, наделенное свойством прямой адаптации. Оно реагирует на тот же замер $\underline{Z}_{тк}$, что и неадаптивное реле **P1**. Прямая адаптация осуществляется в идеализированной форме, когда характеристика срабатывания непрерывно модифицируется в зависимости от значения угла передачи. Эффективность прямой адаптации оценивается при таких значениях d , где явление нераспознаваемости замыканий вводит наиболее существенные ограничения или имеет любопытные особенности.

Процедуры и результаты обучения реле. Пусть Z_p – общее обозначение замера комплексного сопротивления $\underline{Z}_{тк}$ или $\underline{Z}_{та}$, на которое реагирует то или иное реле.

Процесс обучения включает в себя несколько операций: первая – отображение на плоскости Z_p различных режимов имитационной модели; вторая – процедура триангуляции – окаймление граничными линиями областей отображения S_a и S_b соответственно **a**- и **b**-режимов [11]; третья – определение

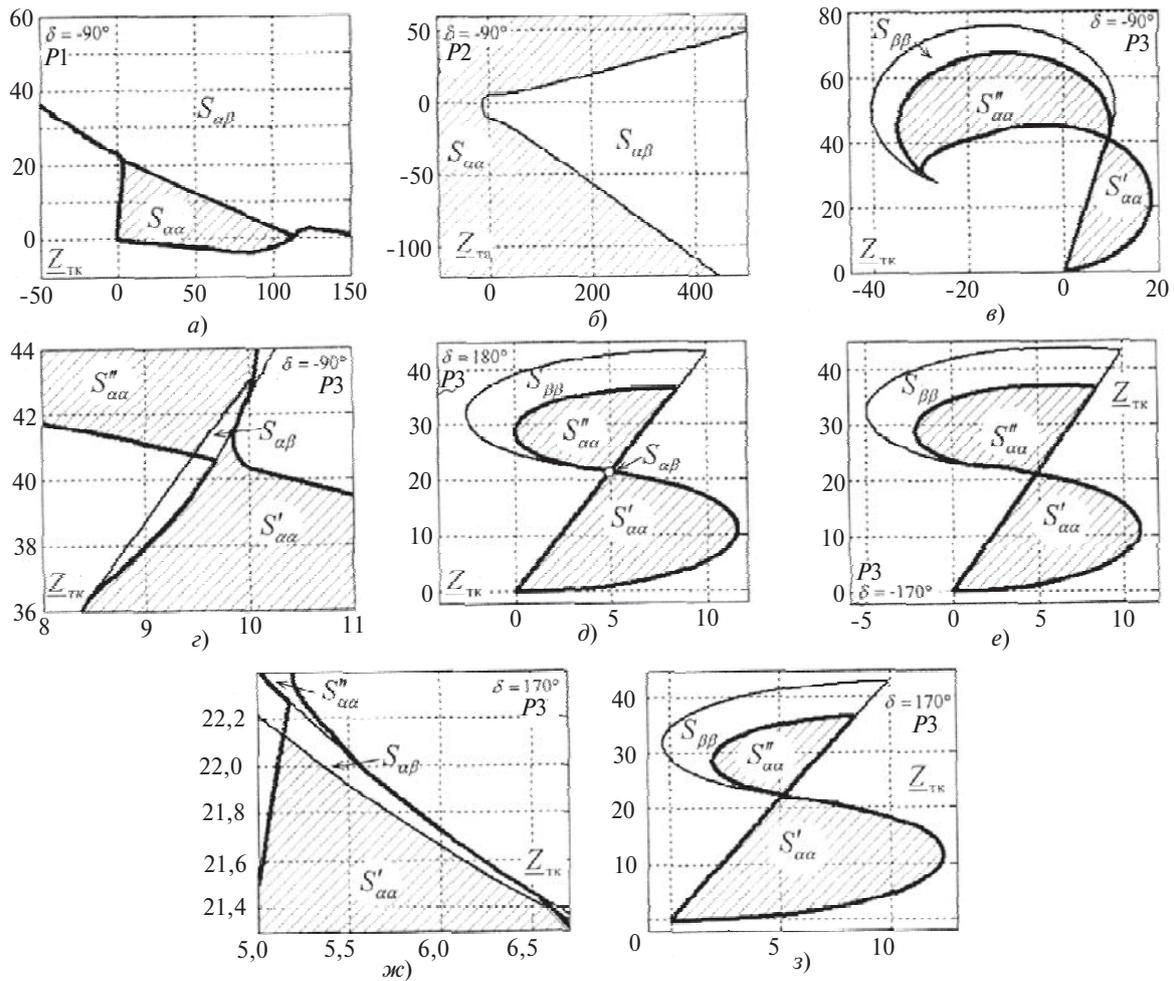


Рис. 5. Области срабатывания реле сопротивления трёх типов (сопротивление – в Ом)

области срабатывания реле $S_{aa} = S_a \setminus S_b$ как разности областей S_a и S_b . Результаты обучения реле приведены на рис. 5. Наряду с областями S_{aa} там указываются ещё и важные для понимания свойств реле области $S_{ab} = S_a \cap S_b$ – пересечения областей S_a и S_b . В S_{ab} входит та часть области S_a , в которой соответствующее реле не в состоянии отличить а-режимы от b-режимов. В области $S_{bb} = S_b \setminus S_a$ отображаются одни лишь альтернативные режимы. В остальных не помеченных местах плоскостей не отображается ни один из множества рассматриваемых режимов.

Результаты обучения реле $P1$, как и $P2$, иллюстрируются только одним графиком для каждого из них (рис. 5а, б). Характеристики реле $P3$, модифицируемые в зависимости от значения угла d , представлены на большем числе иллюстраций (рис. 5, в–з). Заметим, что при всех значениях угла d , для которых даны иллюстрации, область срабатывания S_{aa} разделяется на две части отображения режимов, параметры которых близки к функции (1). В мелком масштабе водораздел между подобластями S''_{aa} и S'_{aa} выглядит точкой при всех

значениях d (рис. 5, в, д, ж). В крупном масштабе обнаруживаются принципиальные различия. При $d = -90^\circ$ (рис. 5, в) и $d = 170^\circ$ (рис. 5, з) область S_{bb} вклинивается между S''_{aa} и S'_{aa} , вследствие чего создаётся небольшая область S_{ab} , лишаящая S''_{aa} и S'_{aa} непосредственного соприкосновения, а при $d = -170^\circ$ область S_{ab} вообще не обнаруживается, что свидетельствует об отсутствии нераспознаваемых а-режимов. Различие в результатах обучения реле $P3$ при $d = 170^\circ$ и $d = -170^\circ$ объясняется тем, что в данной имитационной модели выполняются как условия (3), (4), так и условие (5).

Объектные характеристики реле. Процедуру обучения реле можно охарактеризовать как прямое преобразование F , отображающее область G параметров имитационной модели в область S на плоскости замера: $S = F(G)$, $S_a = F(G_a)$, $S_b = F(G_b)$. После определения области срабатывания S_{aa} становится востребованным обратное преобразование $f(S_{aa}) = F^{-1}(S_{aa}) = G_{aa}$, формирующее область параметров имитационной модели в распознаваемых режимах. Проекция области G_{aa} на плоскость

x_{fa} , R_{fa} окаймляется объектной характеристикой, которая для фиксированного значения угла δ определяется процедурой:

$$R_{f \max}(x_{fa}) = \underset{R_{fa}}{\operatorname{extrarg}} [Z_p(x_{fa}, R_{fa}) \cap S_{aa}] \quad (6)$$

Операция «arg», примененная к выражению в квадратных скобках, выделяет те значения переходного сопротивления R_{fa} , при которых происходит срабатывание реле, а операция «extr» определяет границы диапазона срабатывания $R_{f \max}(x_{fa})$ и

$R_{f \min}(x_{fa})$ и 0 при замыканиях в том или ином месте x_{fa} . Процедура (6) применена к областям S_{aa} на рис. 5. Результаты, приведённые на рис. 6, свидетельствуют о том, что прямая адаптация придаёт дистанционной защите наивысшую распознающую способность.

Модуль блокировки защиты при качаниях подвергает распознаваемые режимы дополнительной селекции, ограничивая диапазон изменения аварийной составляющей тока: $I_{ав}$ и $I_{уст}$; ток уставки

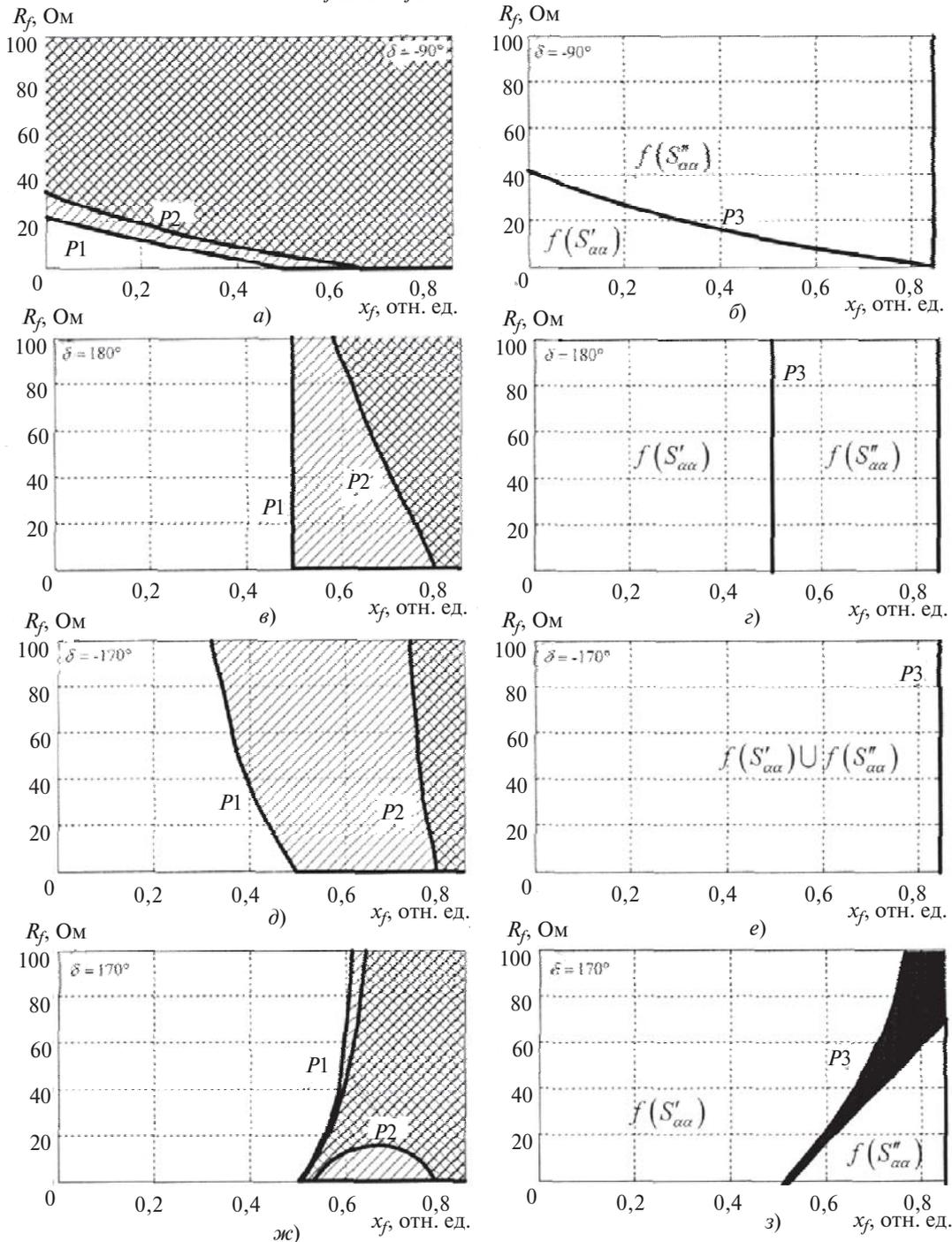


Рис. 6. Объектные характеристики реле сопротивления трёх типов (не заштрихованы объектные области срабатывания реле; отмечены области несрабатывания: простой штриховкой – P1; двойной – и P1, и P2; тёмным фоном – P3)

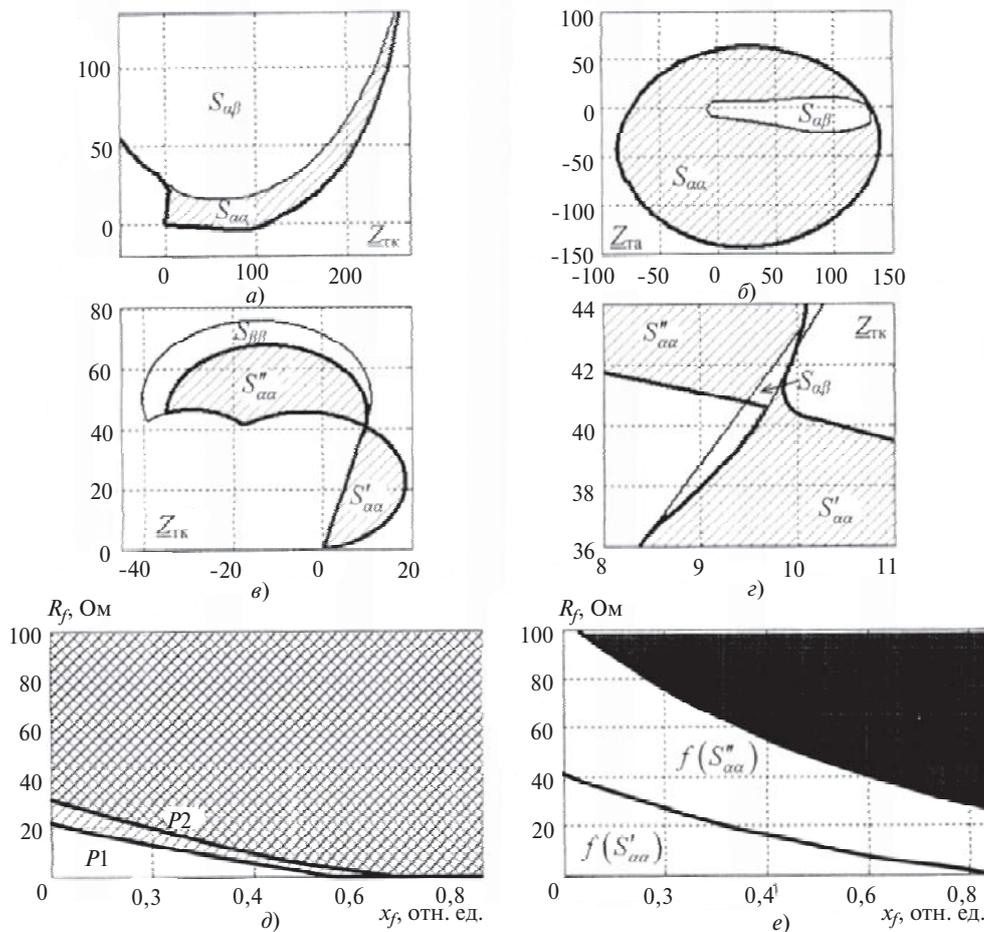


Рис. 7. Обучение с учётом блокировки при качаниях: а – область срабатывания реле $P1$; б – то же $P2$; в, г – то же $P3$ при $d = -90^\circ$; д – объектная характеристика $P1$ и $P2$; е – то же $P3$ (сопротивление в Ом)

$I_{уст}$ определяется при металлическом замыкании в конце защищаемой зоны. Для модели по рис. 4 $I_{уст} = 845$ А.

Селекция а-режимов негативно влияет на объектные характеристики защиты. Коль скоро это неизбежно, хотелось бы подвергнуть такой же селекции и альтернативные б-режимы, учитывая действие блокировки на стадии обучения защиты, что объективно способствует расширению области срабатывания S_{aa} . Результаты применения именно такого подхода к учёту действия блокировки при качаниях приведены на рис. 7. Сравнение областей срабатывания на рис. 7,а–г с соответствующими областями на рис. 5,а–в, а также объектных характеристик на рис. 7,д, е с характеристиками на рис. 6,а говорит об осязательном влиянии дополнительной селекции обучающих режимов имитационной модели. Безусловно, преимущество реле с прямой адаптацией сохраняется. Области срабатывания S_{aa} , $S_{\check{a}a}$ и $S_{\check{b}a}$ видоизменяются. Имеют место не только количественные, но и качественные изменения. Так, при $d = -90^\circ$ без учёта блокировки области S_{ab} ограничивались по сути одной точкой

на стыке областей $S_{\check{a}a}$, $S_{\check{b}a}$ и S_{ab} (рис. 5,в), в то время как с учётом блокировки область S_{ab} приобретает заметные размеры (рис. 7,г). Соответственно, изменяются и области распознавания G_{aa} . Если без блокировки область $G_{\check{a}a} = f(S_{\check{a}a})$ не имела ограничения вплоть до $R_f = 100$ Ом (рис. 6,а), то с учётом блокировки размеры этой области ограничиваются двумя объектными характеристиками (рис. 7,е).

Выводы. 1. Прямая адаптация, заключающаяся в модифицировании условий срабатывания защиты в зависимости от состояния электропередачи в предшествующем режиме, придаёт дистанционной защите более высокую распознающую способность, чем косвенная.

2. Возможности адаптации защиты ограничиваются явлением нераспознаваемости части коротких замыканий. Нераспознаваемость проявляется по-разному в каждом из четырёх квадрантов изменения угла передачи, чередующихся в асинхронном режиме.

3. В задаче распознавания зоны повреждения линии электропередачи условия нераспознаваемости формулируются иначе, нежели в задаче распо-

знавания места повреждения. Так, в третьем квадранте угла передачи нераспознаваемость места проявляется всегда, а нераспознаваемость зоны может не проявиться.

4. Блокировка дистанционной защиты при качаниях, вводящая дополнительную селекцию наблюдаемых режимов, может быть учтена на этапе обучения защиты с тем, чтобы дополнительные ограничения затронули не только контролируемые, но и альтернативные им режимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент США № 5796258. Adaptive quadrilateral characteristic distance relay/L. Yang, 1998.
2. Патент США № 7872478. Method and adaptive distance protection relay for power transmission lines/M. Saha, E. Rosolowski, J. Izykowski, 2011.
3. Патент РФ № 2247456. Способ релейной защиты энергообъекта/Ю.Я. Лямец, Е.Б. Ефимов, Г.С. Нудельман. — БИ, 2005, № 6.
4. Патент РФ № 2248077. Способ дистанционной защиты линии электропередачи/Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, Е.Б. Ефимов, В.А. Ефремов. — БИ, 2005, № 7.
5. А. с. № 66343 (СССР). Устройство для защиты высоковольтных линий передачи от замыканий между фазами/А.М. Бреслер, 1944.
6. Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи. — Электричество, 1996, № 12, с. 2—7.
7. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Эволюция дистанционной релейной защиты. — Электричество, 1999, № 3, с. 8—15.

8. 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.

9. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О., Ефимов Е.Б., Законьшек Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 1, 2, 3. — Электричество, 2001, № 2, с. 16—23; № 3, с. 16—24; № 12, с. 9—22.

10. Liamets Y., Ivanov S., Nudelman G. The phenomena of uncertainty and ambiguity in identification of faults in electrical systems. — SIGRE SC B5 Colloquium, 2005, Calgary (Canada). Paper 313, pp. 1—7.

11. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В. Граничная задача релейной защиты. — Электричество, 2013, № 10, с. 16—22.

[03.03.15]

Авторы: Лямец Юрий Яковлевич окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического университета. В 1994 г. защитил во ВНИИЭ докторскую диссертацию «Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем». Председатель НТС исследовательского центра (ИЦ) «Бреслер». Профессор кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета (ЧГУ).

Воронов Павел Ильич окончил в 2014 г. магистратуру факультета энергетики и электротехники ЧГУ. Аспирант ЧГУ, инженер-исследователь ИЦ «Бреслер».

Мартынов Михаил Владимирович окончил в 2011 г. магистратуру факультета энергетики и электротехники ЧГУ. В 2014 г. в ЧГУ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи». Инженер-исследователь ИЦ «Бреслер».

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 10, pp. 13–20.

The recognition of the adaptive capacity of the power line distance protection

LYAMETS Yuriy Yakovlevich (Research Centre «Bresler» (RC «Bresler»), Cheboksary, Russia) — Chairman of the Scientific and Technical Council, Professor of the Chuvash State University (ChSU), Dr. Sci. (Eng.)

VORONOV Pavel Il'ich (RC «Bresler», Cheboksary, Russia) — Research Engineer, Ph.D. student of the ChSU

MARTYNOV Mikhail Vladimirovich (RC «Bresler», Cheboksary, Russia) — Research Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

Distance protection algorithms are differentiated into two types of adaptation — direct and indirect. Direct algorithms modify tripping characteristics depending on the mode of operation that preceded a short circuit in the object under protection. Indirect adaptation is added up to the formation of the measurement using the emergency component of the observed current. Recognition ability of both adaptive algorithms and non-adaptive algorithm is compared. Tripping characteristics of resistance relay are determined by training signals of transmission line simulation model. Recognition ability of relay is presented by the object characteristics - the relationship between the transition resistance and the coordinates of the circuit, which limit the domain of definition of recognized short circuit mode. The analysis takes into account the asynchronous modes of action and power swing blocking, indicates informational advantage of direct adaptation.

Key words: *electric power transmission, asynchronous mode, distance protection, adaptation, training*

REFERENCES

1. **Patent USA No. 5796258.** Adaptive quadrilateral characteristic distance relay/L. Yang, 1998.
2. **Patent USA No. 7872478.** Method and adaptive distance protection relay for power transmission lines/M. Saha, E. Rosolowski, J. Izykowski, 2011.
3. **Patent RF No. 2247456.** Sposob releinoi zashchity energoobyekta (The method of the object relay protection)/Yu.Ya. Lyamets, Ye.B. Yefimov, G.S. Nudel'man. Bulletin of inventions, 2005, No.6.
4. **Patent RF No. 2248077.** Sposob distantsionnoi zashchity linii *elektroperedachi* (The method of the power lines distance protection)/Yu.Ya. Lyamets, G.S. Nudel'man, Ye.B. Yefimov, V.A. Efremov. Bulletin of inventions, 2005, No. 7.
5. **A.s. No. 66343 (SSSR).** Ustroistvo dlya zashchity vysokovol'tnykh linii peredachi ot zamykanii mezhdru fazami (The device for protection of high-voltage transmission lines fault between phases)/A.M. Bresler, 1944.
6. **Lyamets Yu.Ya., Nudel'man G.S., Podshivalin N.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1996, No. 2, pp. 2–7.
7. **Lyamets Yu.Ya., Nudel'man G.S., Pavlov A.O.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1999, No. 3, pp. 8–15.
8. **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.
9. **Lyamets Yu. Ya., Nudel'man G.S., Pavlov F.O., Yefimov Ye.B., Zakonskek Ya.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 2, pp. 16–23; No. 3, pp. 16–24; No. 12, pp. 9–22.
10. **Liamets Y., Ivanov S., Nudelman G.** The phenomena of uncertainty and ambiguity in identification of faults in electrical systems. — SIGRE SC B5 Colloquium, 2005, Calgary (Canada). Paper 313, pp. 1–7.
11. **Lyamets Yu.Ya., Martynov M.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 10, pp. 16–22.