

Граничная задача релейной защиты

ЛЯМЕЦ Ю.Я., МАРТЫНОВ М.В.

Рассматриваемая задача связана с отображением режимов имитационной модели защищаемого объекта на плоскости замеров. Всё множество параметров имитационной модели рассмотрено с точки зрения их участия в формировании линии граничных замеров, охватывающей область отображений. Важной составной частью решаемой задачи является построение прообраза линии граничных замеров в трёхмерных объектных подпространствах, входящих в объектное пространство более высокой размерности, где задаётся область определения параметров имитационной модели.

Ключевые слова: релейная защита, граничная задача, имитационная модель, отображение режимов, замер

Микропроцессорная техника привела к смене поколений релейной защиты. Но на характеристиках срабатывания защиты это событие практически не отразилось. Ни на их форме, ни на методе построения, о чем легко судить по монографиям разных лет [1, 2]. Характеристика полигональной формы задается на плоскости небольшим числом граничных замеров. Стремление не увеличивать это число было вполне объяснимо на начальном этапе внедрения микропроцессоров, когда вычислительные ресурсы были весьма ограничены. Ныне же, когда они неизмеримо выросли, число граничных замеров можно было бы увеличить с таким расчетом, чтобы чувствительность защиты ненамного уступала предельно достижимому уровню. В этой связи возникает вопрос о процедуре задания граничных замеров.

Каждая точка характеристики срабатывания защиты отображает некоторый режим имитационной модели защищаемого объекта. Идея, ведущая, как представляется, к общей процедуре построения характеристики срабатывания, заключается в предварительном определении ее прообраза — непрерывного множества режимов, задаваемых в объектном пространстве значениями вектора x варьируемых параметров имитационной модели. Располагая прообразом характеристики и имитационной моделью объекта, можно задать на плоскости замеров z любое число граничных замеров.

Будем рассматривать поиск прообраза как процедуру обучения релейной защиты [3, 4]. В роли учителей выступают имитационные модели защищаемого объекта в отслеживаемых и альтернатив-

The problem in question is concerned with mapping the operating modes of a protected plant's simulation model in the plane of measurements. The entire set of simulation model parameters is considered from the viewpoint of their participation in generating the line of boundary measurements enveloping the region of images. One of important constituent parts of the problem being solved consists in constructing a preimage of the line of boundary measurements in 3D object subspaces included in the object space of a higher dimension, in which the definition domain of the simulation model parameters is specified.

Key words: relay protection, boundary problem, simulation model, imaging of operating modes, measurements

ных режимах (а- и b-режимы). Области существования а- и b-режимов G_a и G_b задаются в форме многогранников в объектных m_a - и m_b -мерных пространствах C_a и C_b . Что же касается каждого конкретного режима, то он задаётся m_a -мерным вектором x_a или m_b -мерным вектором x_b варьируемых параметров соответствующих имитационных моделей: $x_a \in G_a \in C_a$, $x_b \in G_b \in C_b$.

Цель обучения формулируется следующим образом: требуется не допустить срабатывания защиты в области G_b и обеспечить срабатывание в возможно большей части области G_a .

Важнейшую роль в обучении защиты играет граничная задача отображения объектной области G на плоскость замера z . Отображением будет плоская фигура S , окаймлённая граничной линией L_S . Решение задачи заключается в поиске граничных замеров $z_{гр} \in L_S$, а также в определении прообраза линии граничных замеров L_S — множества $x_{гр}$, таких, что $F(x_{гр}) = z_{гр}$, где F — оператор преобразования режима имитационной модели в замер релейной защиты.

Границе отображения и её прообразу присущ ряд закономерностей, сформулированных в [3] в виде теорем. Теорема о соразмерности утверждает, что прообразом граничной линии L_S в объектном пространстве C любой размерности также является линия $L_G \in G$. Во всех рассматривавшихся примерах оказывалось, что линия прообраза проходит по поверхности объектной области G , не заходя внутрь неё. Вряд ли можно предполагать, что иное не встречается. Но в пользу именно такого поведения прообраза говорит теорема о коллинеарности на

линии L_S векторов производных замера по варьируемым параметрам. Если G – многогранник, то прообраз предпочитает путь, идущий по его рёбрам, лишь изредка переходя с одного ребра на другое через соответствующую грань. Движению вдоль ребра многогранника G отвечает изменение только одного параметра имитационной модели $x_i, \hat{i} \overline{1,m}$.

За рамками рассмотрения в [3, 4] остались существенные фрагменты граничной задачи: ранжирование варьируемых параметров модели по степени их участия в формировании линии L_S , представление прообраза L_G при числе варьируемых параметров $m > 3$.

Рассмотрим различные аспекты граничной задачи на примере имитационной модели электропередачи в режиме короткого замыкания с шестью варьируемыми параметрами (рис. 1, табл. 1). Наблюдаемые величины – ток \underline{I} и напряжение \underline{U} , формируемый замер – комплексное сопротивление $\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$. В табл. 1: $K = E_s / E_r$, $d = \arg(E_s / E_r)$, $X_f = X^0 x_f$, X^0 – удельное индуктивное сопротивление линии; x_f – координата места повреждения. Помимо X^0 к числу фиксированных параметров принадлежит ещё длина линии l ; в расчетах принято $X^0 l = 100$ Ом. Длина защищаемой зоны принята равной $l/2$, следовательно, сопротивление X_f в а-режимах изменяется в пределах от 0 до 50 Ом, а в б-режимах – от 50 до 100 Ом. Кроме того, различаются диапазоны переходных сопротивлений: в а-режимах их значения ограничены значением 100 Ом, а в б-режимах они варьируются без ограничения по верхнему уровню.

Таблица 1

Режим	Значение параметра (числитель – нижнее (inf); знаменатель – верхнее (sup))					
	d, град	X_f , Ом	R_f , Ом	K , отн.ед.	X_s , Ом	X_r , Ом
a, b	-60/60	–	–	0,95/1,05	0/100	0/100
a	–	0/50	0/100	–	–	–
b	–	50/100	0/∞	–	–	–

Объектные области G_a и G_b представляют собой в данном примере шестимерные многогранники. На плоскости замера \underline{Z} они отображаются в форме плоских фигур S_a и S_b с граничными линиями L_{Sa} и L_{Sb} соответственно. В условиях рассматриваемой задачи характеристикой срабатывания органа сопротивления служит граничная линия L_{Saa} разностной области замеров $S_{aa} = S_a \setminus S_b$, получаемой вычитанием области S_b из S_a .

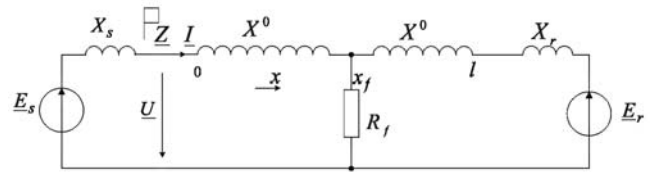


Рис. 1. Имитационная модель двухпроводной линии без потерь в а- и б- режимах короткого замыкания

Граничную линию L_{Sa} и ее прообраз L_{Ga} желательно получить в полном размере независимо от б-режимов с тем, чтобы располагать целостной картиной отображения а-режимов, в которых желательно срабатывание защиты. Полного отображения б-режимов, наоборот, не требуется, достаточно располагать лишь пересечением областей S_a и S_b , а именно областью $S_{ab} = S_a \cap S_b$, в которой срабатывание недопустимо.

Как оказалось, в рассматриваемом примере линия граничных замеров L_{Sa} , взятая в целом (рис. 2,а), состоит из одного протяженного участка и большого числа заметно меньших участков (рис. 2,б). Протяжённый участок представляет собой годограф вектора \underline{Z} при вариациях угла передачи d и фиксации остальных пяти параметров: X_{fa} , X_s и R_{fa} на верхнем уровне, а K и X_r – на нижнем. Изрезанная часть линии граничных замеров (рис. 2,б) сформирована в значительной степени вариациями аварийных параметров X_{fa} и R_{fa} . Два малозаметных участка, помеченные буквами $f_a g_a$ и $o_a p_a$, сформированы вариациями коэффициента K (участок $f_a g_a$) и совместными вариациями R_{fa} и K (участок $o_a p_a$). Что же касается параметра X_r , то его роль оказалась тривиальной: на протяжении всей граничной линии он сохраняет неизменным свое нижнее значение $X_{r inf} = 0$.

Для построения прообраза L_{Ga} линии граничных замеров в данном случае оказалось достаточным привлечь четыре подпространства: два трёхмерных (рис. 3,а и г) и два двумерных (рис. 3,б и в). В подпространствах латинскими буквами отмечены а-режимы имитационной модели; отображения этих режимов на плоскости \underline{Z} обозначены теми же буквами (рис. 2,б). В двух случаях отображение обозначено двумя буквами h_a, i_a и k_a, l_a . Так происходит потому, что множество режимов модели отображается в единственную точку плоскости \underline{Z} : множество на участке $h_a i_a$ (рис. 3,а) – в точку h_a, i_a , на участке $k_a l_a$ (рис. 3,б) – в точку k_a, l_a , на участке $m_a n_a$ (рис. 3,г) – в точку m_a, n_a .

Обозначения граничных режимов и их отображений подчинены на рис. 2 и 3 следующему правилу: в первую очередь отмечаются те, векторы параметров которых располагаются в вершинах многогранника G_a , таких оказалось семь, от a_a до g_a (табл. 2). Затем отмечаются векторы параметров

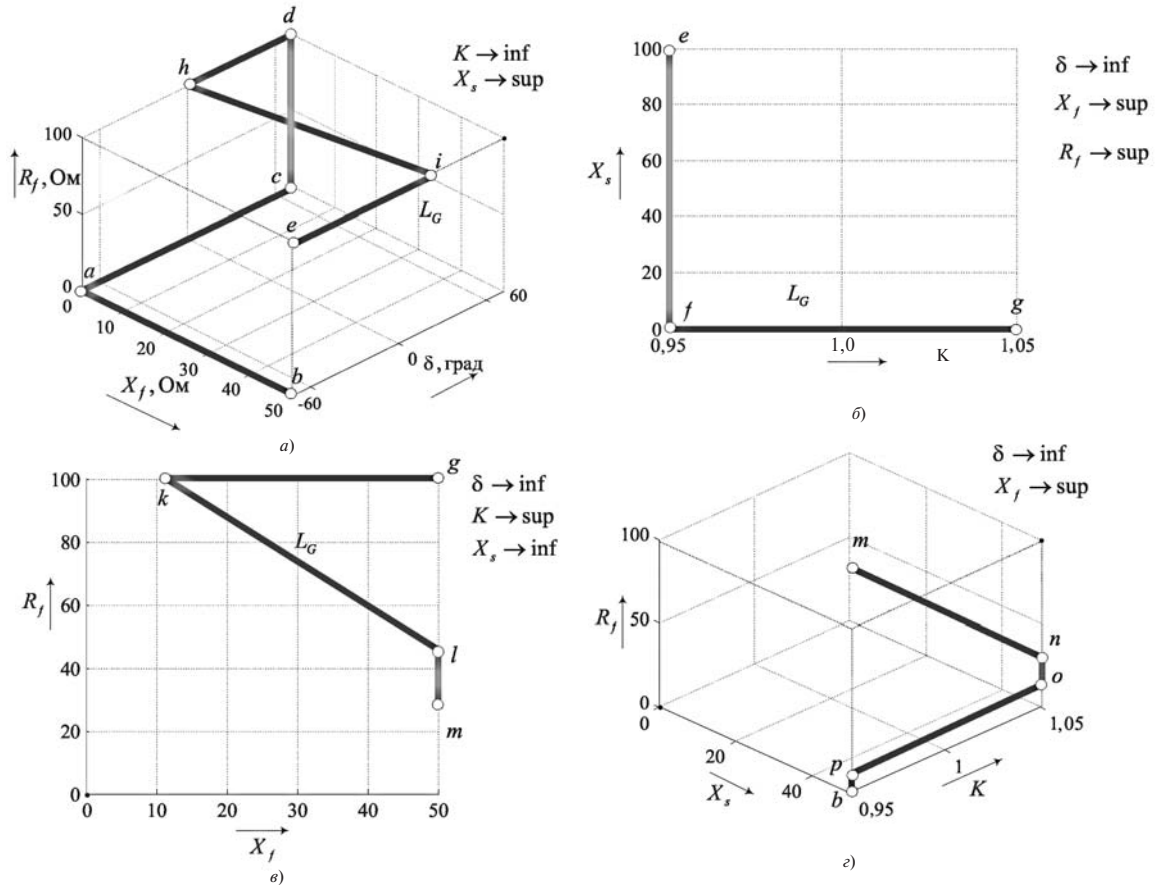


Рис. 3. Прообраз L_{Ga} в объектных подпространствах (значение шестого параметра во всех подпространствах одно и то же: $X_r \textcircled{=} \text{inf}$)

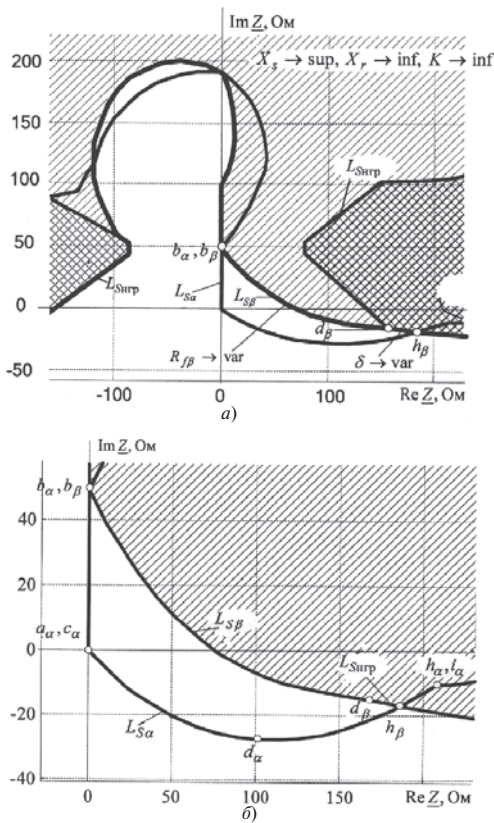
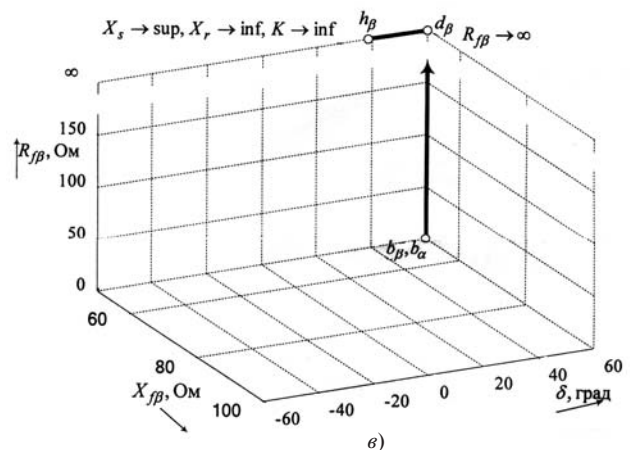


Рис. 4. Области отображения в-режимов, пересекающиеся с областью отображения а-режимов (а,б) и прообраз верхней границы области S_{aa} (в)

чередования участков. Покажем, что информацию такого рода можно получить, оставаясь в рамках трехмерного объектного пространства и рассматривая семейство линий L_{Sa} при изменении какого-либо четвертого параметра.

На рис. 5 приведено решение задачи при $d, X_{fa}, R_{fa} \textcircled{=} \text{var}$ и произвольных фиксированных значениях трех других параметров. Отличия от общего решения на рис. 3 и 4 очевидны. Область S_a заметно меньшего размера. Уменьшилось и число



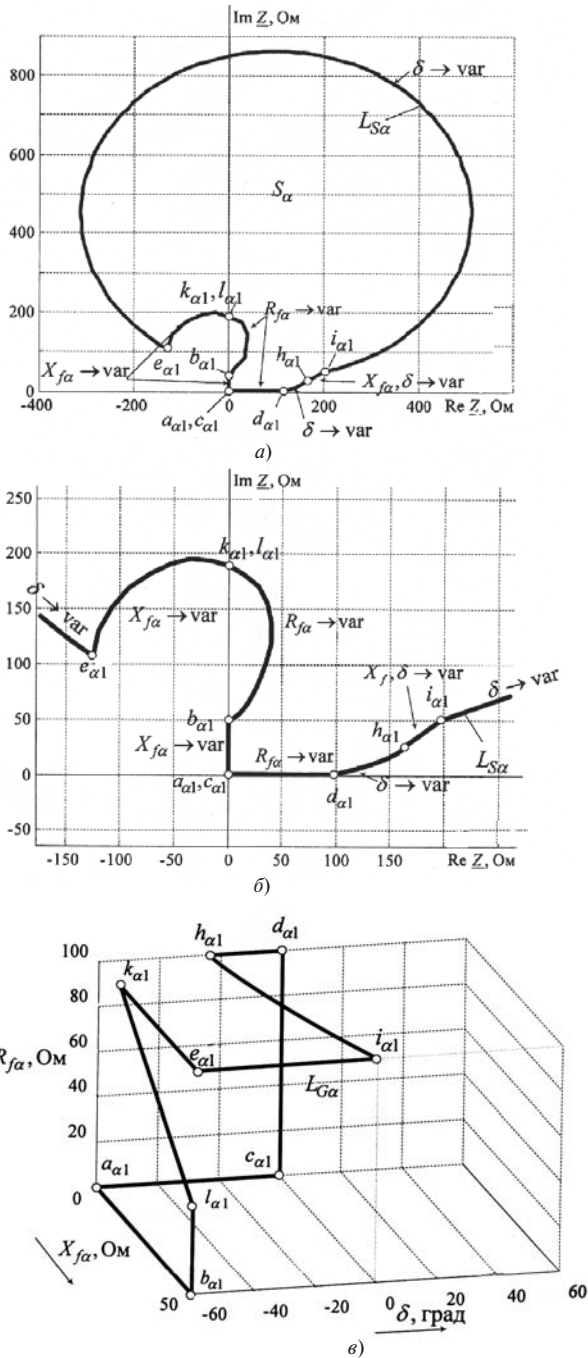


Рис. 5. Линия граничных замеров $L_{S\alpha}$ (а, б) и ее прообраз $L_{G\alpha}$ в трехмерном объектном пространстве с координатами $d, X_{f\alpha}, R_{f\alpha}$ (в) и фиксированных значений параметров $K = 1, X_s = 0, X_r = 0$

участков линии $L_{S\alpha}$ и ее прообраза $L_{G\alpha}$, который в этом случае не выходит за пределы отрицательной полуоси угла d . Все режимы линии прообраза (рис. 5, в) могут быть сопоставлены с режимами на рис. 3, в связи с чем они обозначены теми же буквами, но с индексом «1». Любопытно, что отображения режимов h_{a1} и i_{a1} здесь не совпадают (в отличие от h_a и i_a на рис. 2) и между ними располагается отображение участка $h_{a1}i_{a1}$, идущего по грани $d, X_{f\alpha}$ при $R_{f\alpha} \textcircled{R} \text{sup}$.

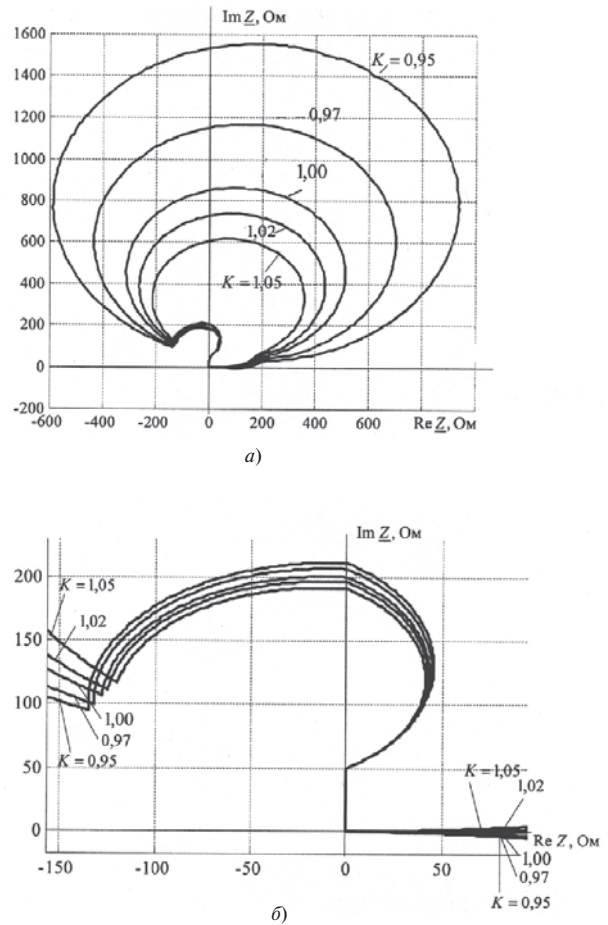


Рис. 6. Влияние вариаций параметра K на линию граничных замеров при $X_s = X_r = 0$

Главный же вывод из анализа рис. 4: все три параметра $d, X_{f\alpha}, R_{f\alpha}$ явственно влияют на формирование границы.

Влияние каждого из трёх остальных параметров показано на рис. 6—8, где приведены линии граничных замеров, формируемых параметрами $d, X_{f\alpha}, R_{f\alpha}$ при различных значениях K, X_s или X_r . Рис. 6, б демонстрирует плавный переход от граничного значения K_{inf} к новому граничному значению K_{sup} . Аналогично этому на рис. 7, б можно видеть плавный переход от граничного значения $X_{s sup}$ к новому значению $X_{s inf}$, причём параметр X_s начинает переход раньше, чем K . Подмеченное явление позволяет сделать предположение о существовании участка линии $L_{S\alpha}$ с вариацией параметра X_s и участка с вариацией K , причём первый должен располагаться левее второго, что в полной мере видно на рис. 2, б (участки $e_a f_a$ и $f_a g_a$). Параметр X_r ни к чему подобному не приводит. Его влияние заключается только в том, что по мере уменьшения до нуля он монотонно расширяет линию граничных замеров (рис. 8).

Влияние вариаций параметров K и X_s на линию граничных замеров ощущается, но оно не идёт ни в какое сравнение с влиянием первой группы

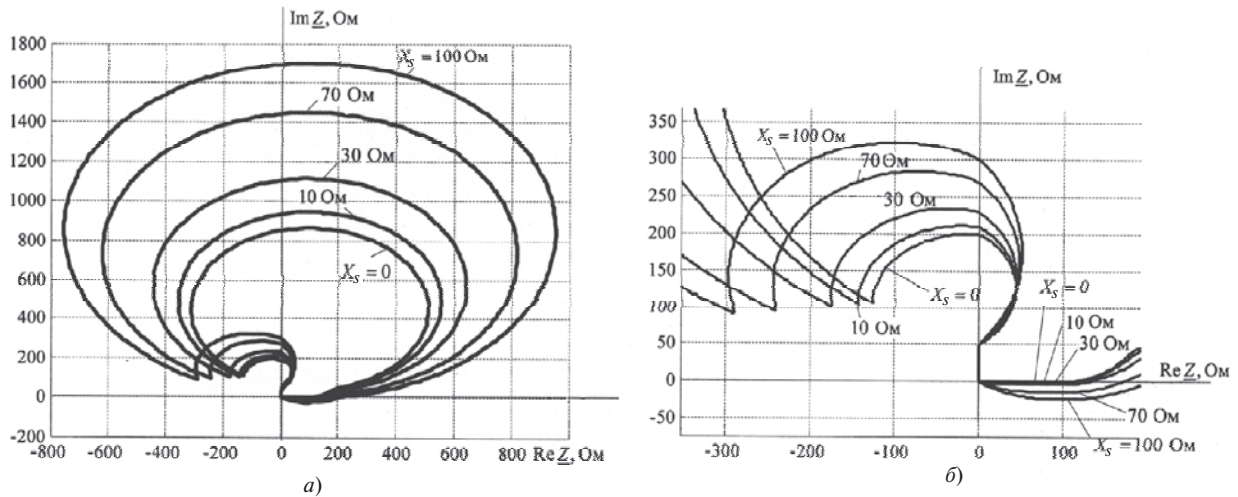


Рис. 7. Влияние вариаций параметра X_s на линию граничных замеров при $K = 1, X_r = 0$

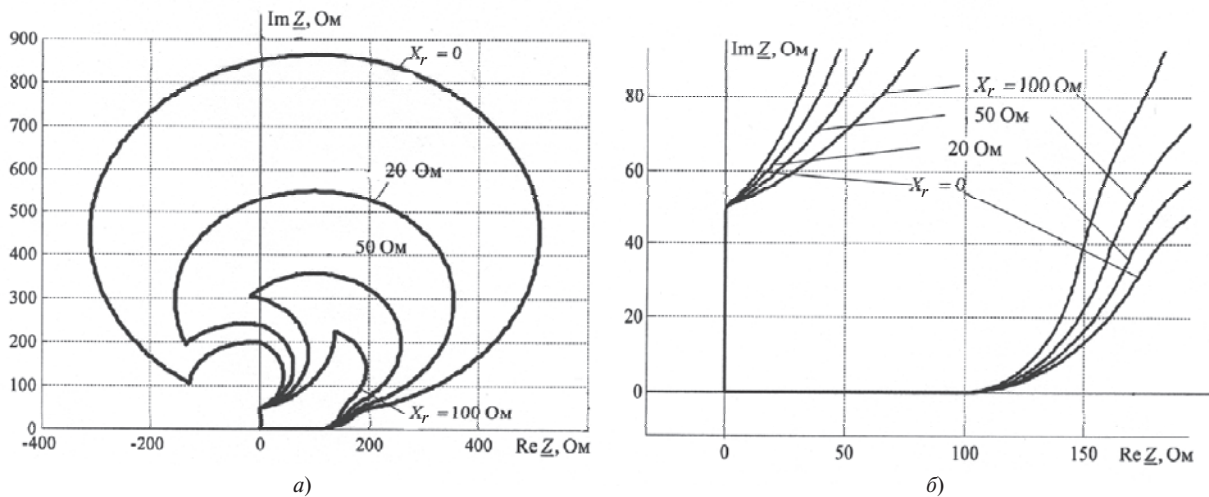


Рис. 8. Влияние вариаций параметра X_r на линию граничных замеров при $K = 1, X_s = 0$

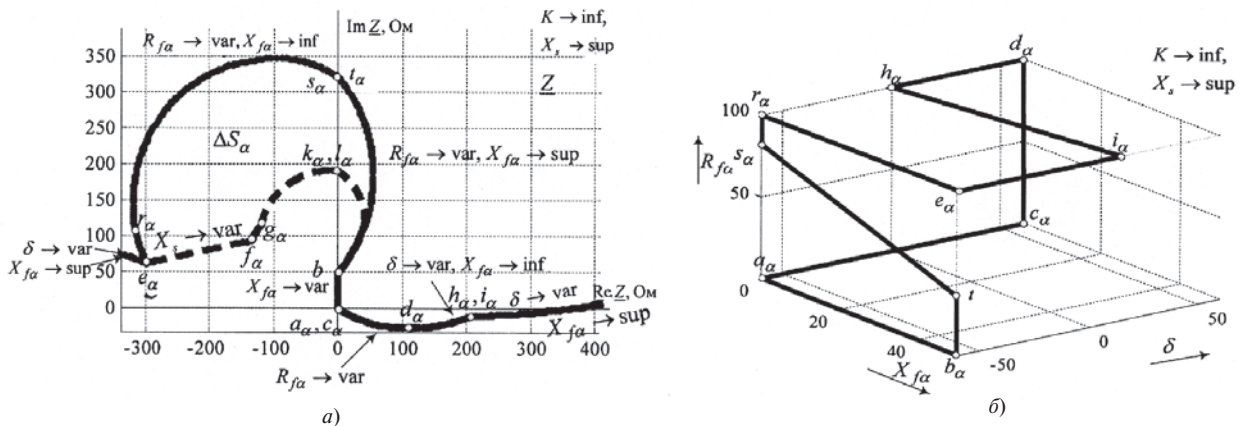


Рис. 9. Линия граничных замеров (а) и её прообраз (б) при $K \rightarrow \text{inf}, X_s \rightarrow \text{sup}$ и вариации параметров d, X_{fa}, R_{fa} ; - - - - часть граничной линии по рис. 2,б

параметров, а именно d, X_{fa}, R_{fa} . Естественно желание зафиксировать значения K и X_s на тех пределах, которые обеспечивают наибольший размер области замеров ($K \rightarrow \text{inf}, X_s \rightarrow \text{sup}$).

Процедура построения граничной линии при этом заметно упрощается, однако отодвигаются

внутри области те небольшие участки границы (рис. 2,б), которые формировались под влиянием вариаций K или X_{fa} ($e_a f_a, f_a g_a$) или же при иных значениях этих параметров ($g_a k_a, l_a m_a, n_a o_a, o_a p_a$). Построение линии L_{Sa} при $K \rightarrow \text{inf}, X_s \rightarrow \text{sup}$ приведено на рис. 9, где показано, что

упрощение затронуло участок границы $e_a f_a g_a k_a l_a b_a$, который заменил новый участок $e_a r_a s_a t_a b_a$. Прообразы этих участков (рис. 3 и рис. 9, б) позволяют отметить, что в области DS_a , заключённой между ними, отображаются режимы коротких замыканий через наиболее высокие переходные сопротивления и при отрицательных углах передачи.

Выводы. 1. Процедура задания характеристики срабатывания релейной защиты требующимся числом граничных замеров допускает формализацию при условии обращения к прообразу характеристики – множеству режимов имитационной модели защищаемого объекта. Оно состоит из подмножества отслеживаемых режимов (а-режимы) и подмножества альтернативных режимов (b-режимы). Второе своим отображением накладывает ограничение на размеры области срабатывания защиты.

2. Решение многомерной граничной задачи подтверждает существование двух тенденций в расположении прообраза линии граничных замеров: идти по поверхности области объектных параметров, а если область имеет форму многогранника, то следует проходить в основном по его рёбрам, переходя на грани лишь в редких случаях. Выявилась своеобразная иерархия среди параметров имитационной модели объекта, ранжируемых по степени их влияния на линию граничных замеров. К первой группе относятся те, вариации которых создают значимые участки этой линии; ко второй – те, которые создают малозаметные участки. Наконец, к третьей – те, что сохраняют на всей граничной линии единственное значение. Фиксация параметров, отнесённых ко второй группе, на тех уровнях, которые максимально расширяют область замеров, исключает отображения части режимов. Прообра-

зы, получаемые в результате решения полной и упрощённой задач, позволяют заметить, что они не относятся к числу таких наиболее опасных, как металллические короткие замыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон Э.М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
3. Лямец Ю.Я., Кержаев Д.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. – Изв. Вузов. Электромеханика, 2009, № 4, с. 24–30; 2010, № 2, с. 53–59; № 4, с. 53–58.
4. Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С. и др. Обучаемая релейная защита. – Электричество, 2012, № 2, с.15–19; № 3, с. 12–18.
5. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. и др. Распознаваемость повреждений электропередачи. – Электричество, 2001, № 2, с. 16–23; № 3, с.16–24; № 12, с. 9–22.
6. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. и др. Многомерная релейная защита. – Электричество, 2009, № 10, с. 17–25; № 11, с. 9–15; 2010, № 1, с. 9–15.
7. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалина И.С., Романов Ю.В. Эффекты многомерности в релейной защите. – Электричество, 2011, № 9, с. 48–54.

[19.03.13]

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

Мартынов Михаил Владимирович окончил в 2012 г. Чувашский государственный университет. Инженер-исследователь ИЦ «Бреслер».

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах на русском и английском языке. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

- полные имена и отчества всех авторов;
- какой факультет, какого вуза и когда закончил;
- когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;
- место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.