

2. Гармаш В.С. Метод контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя. — Энергетика, 1990, № 10.

3. Петухов В. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения. — Новости электротехники, 2008, №1(49).

4. Лукьянов М.М. Новые принципы виброакустической диагностики изношенного силового электрооборудования. — Электрика, 2001, № 2.

5. Еремеев С.Н. Профилактическое обслуживание электродвигателей высоконагруженного технологического оборудования. — Электрика, 2001, № 3.

*Авторы: Крупенин Николай Владимирович окончил факультет электроизоляции и кабельной техники Московского энергетического института*

*та в 1982 г. Кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка обмоточных проводов для погружных электродвигателей» защитил в 1980 г. Заместитель генерального директора ФГУП ВЭИ.*

*Голубев Александр Витальевич окончил Московский инженерно-физический институт по специальности «Экспериментальная ядерная физика» в 1981 г. Защитил докторскую диссертацию по ядерным энергетическим установкам. Начальник отдела ФГУП ВЭИ.*

*Завидей Виктор Иванович окончил факультет космических исследований Московского физико-технического института в 1973 г. Докторскую диссертацию по специальной теме защитил в 2010 г. Главный научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*

(Продолжение публикации статей сотрудников ВЭИ к юбилею института — в следующем номере.)

\* \* \*

## Эффекты многомерности в релейной защите

ЛЯМЕЦ Ю.Я., НУДЕЛЬМАН Г.С., ПОДШИВАЛИНА И.С., РОМАНОВ Ю.В.

*Рассматривается удобная для реализации структура многомерной защиты — группа реле, совместно обучаемых на уставочных плоскостях с учётом существующих в группе логических связей. Отмечаются проявляющиеся в такой структуре эффекты абсолютной и относительной нераспознаваемости некоторых подмножеств отслеживаемых режимов защищаемого объекта, условного отображения альтернативных режимов, самоустранения относительной нераспознаваемости при разделении области варьируемых параметров объекта.*

**Ключевые слова:** релейная защита, многомерность, обучение, имитационная модель, объектное пространство

Многомерной интерпретации релейной защиты и её обучению посвящены статьи [1, 2], в которых также конкретизируются детали, представляющие наибольший интерес для приложений, и на простых примерах поясняются неочевидные эффекты, возникающие при обучении многомерной защиты.

Под обучением понимается процедура задания областей срабатывания модулей релейной защиты (измерительных органов) с учётом логических связей между ними. Примем такую реализацию многомерной защиты, когда обучение и последующая её работа совершаются на нескольких уставочных плоскостях  $A_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  [3–5]. «Учителями» релейной защиты служат имитационные модели энергообъектов. Режим модели задаётся  $m$ -мерным вектором

*A suitable for implementation structure of multidimensional protection comprising a group of relays passing joint education in setpoint planes taking into account the logic links existing in the group is considered. The effects of absolute and relative failure to recognize some subsets of monitored operating modes of the protected plant, conditional representation of alternative modes, and self elimination of relative non-recognizability in dividing the region of variable parameters of the plant, which arise in such a structure, are pointed out.*

**Key words:** relay protection, multidimensionality, education, simulating model, object space

её параметров  $x$ . Различаются множества отслеживаемых и альтернативных режимов ( $\alpha$ - и  $\beta$ -режимы). Имитационная модель воспроизводит наблюдаемые процессы, а входные цепи релейной защиты преобразуют их в замеры  $z_i$  — точки плоскостей  $A_i$ , в частном случае комплексных. Общий вектор замера  $z = [z_1, \dots, z_i, \dots, z_n]^T$  получается  $2n$ -мерным. В процессе обучения осуществляются преобразования  $z_{\alpha i} = F_{\alpha i}(x_\alpha)$ ,  $z_{\beta i} = F_{\beta i}(x_\beta)$ ,  $x_\alpha \in G_\alpha$ ,  $x_\beta \in G_\beta$ , где  $F$  — задаваемые операторы,  $G_\alpha$  и  $G_\beta$  — заданные объектные области определения параметров  $x_\alpha$  и  $x_\beta$ . На плоскости  $A_i$  области  $G_\alpha$  и  $G_\beta$  отображаются фигурами  $S_{\alpha i} = F_{\alpha i}(G_\alpha)$ ,  $S_{\beta i} = F_{\beta i}(G_\beta)$ , ограниченными линиями  $L_{\alpha i}$ ,  $L_{\beta i}$ .

**Автономный модуль (одиночное реле).** Процедура обучения модуля, не имеющего логических связей

с другими модулями, иллюстрируется на единственной в данном случае плоскости  $A_1$  (рис. 1). Обучение отдельно взятого модуля имеет целью построение отображений  $S_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}(G_{\alpha})$  и  $S_{\beta 1} = F_{\beta 1}(G_{\beta})$  (рис. 1,а). Далее алгоритм обучения разветвляется.

1. В первом варианте из уставочной области  $S_{\alpha 1}$  выделяется собственная область  $\alpha$ -режимов  $S_{\alpha\alpha 1} = S_{\alpha 1} \setminus S_{\beta 1}$ , после чего задаётся область срабатывания реле  $S_{ср}$ . Остаётся взаимная область  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов  $S_{\alpha\beta 1} = S_{\alpha 1} \setminus S_{\alpha\alpha 1} = S_{\alpha 1} \cap S_{\beta 1}$ , в которой сосредоточены отображения нераспознаваемых на плоскости  $A_1$  режимов  $x_{\alpha} \in G_{\alpha\beta} = F_{\alpha}^{-1}(S_{\alpha\beta})$ .

Условие нераспознаваемости конкретного режима  $x_{\alpha}$  выражается равенством двумерных векторов

$$z_{\alpha}(x_{\alpha}) = z_{\beta 1}(x_{\beta} \in G_{\beta}) \quad (1)$$

или адекватным ему неравенством с процедурой минимизации и малой константой  $\epsilon$

$$\min_{x_{\beta}} \text{dist}(z_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}(x_{\alpha}), z_{\beta 1} = F_{\beta 1}(x_{\beta} \in G_{\beta})) < \epsilon. \quad (2)$$

Существование в области  $G_{\beta}$  режимов  $x_{\beta}$ , обеспечивающих выполнение условий (1) или (2), является причиной нераспознаваемости режима  $x_{\alpha}$ . Распознаваемые режимы располагаются в объектной области  $G_{\alpha\alpha 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(S_{\alpha\alpha 1})$ , а нераспознаваемые – в объектной области  $G_{\alpha\beta 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(S_{\alpha\beta 1})$ , где оператор  $F^{-1}$  обозначает процедуру отображения, обрат-

ную по отношению к прямому отображению  $F$ . Область  $G_{\alpha}$  разделяется на две части в общем случае гиперповерхностью  $H_{\alpha\beta 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(L_{\alpha\beta 1})$ , где  $L_{\alpha\beta 1}$  – линия раздела уставочной области  $S_{\alpha 1}$  на собственную  $S_{\alpha\alpha 1}$  и взаимную  $S_{\alpha\beta 1}$  части (рис. 1,б).

Явление нераспознаваемости объясняется отображением некоторых подмножеств  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов в одну и ту же точку взаимной уставочной области  $S_{\alpha\beta 1}$ . На рис. 1,в показан замер  $z_1 \in S_{\alpha\beta 1}$ . Его прообразы  $\Delta G_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(z_1)$  и  $\Delta G_{\beta 1} = F_{\beta 1}^{-1}(z_1)$  изображены линиями в трёхмерных областях  $G_{\alpha\beta 1}$  и  $G_{\beta}$ . Множества режимов  $\Delta G_{\alpha 1}$  и  $\Delta G_{\beta 1}$  в данном случае неразличимы.

2. Во втором варианте не предполагается выделять из области  $S_{\alpha 1}$  распознаваемую часть  $S_{\alpha\alpha 1}$ . Вместо этого используются два независимых модуля с областями срабатывания соответственно  $S_{\alpha 1}$  и  $S_{\alpha\beta 1}$  (как вариант –  $S_{\beta 1}$ ). Первый разрешает срабатывание реле, а второй – запрещает, выполняя блокирующую функцию (рис. 2).

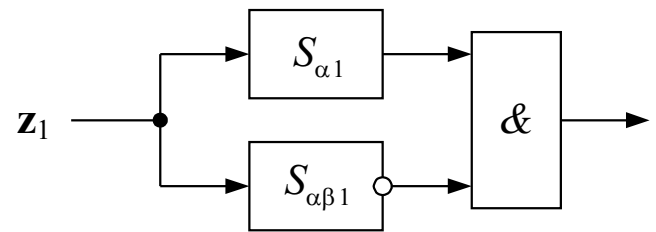


Рис. 2. Схема двухмодульной структуры реле с блокировкой

Выделим из множества  $G_{\beta}$  те режимы  $x'_{\beta}$ , которые образуют своими отображениями взаимную область  $S_{\alpha\beta 1}$  (рис. 1). Они определяются выражением

$$z'_{\beta 1} = F_{\beta 1}(x'_{\beta} \in G_{\beta}) \in S_{\alpha 1}, \quad (3)$$

которое можно назвать условным отображением  $\beta$ -режимов на плоскость  $A_1$ . В свою очередь, формирование области  $S_{\alpha\beta 1}$  можно представить в виде процедуры объединения результатов условного отображения (3):

$$S_{\alpha\beta 1} = [\cup z'_{\beta 1}(x'_{\beta} \in G_{\beta})] \subset S_{\alpha 1}. \quad (4)$$

**Условные отображения  $\beta$ -режимов на  $n$  уставочных плоскостей.** Обобщим представления об условном отображении  $\beta$ -режимов, введённом выражениями (3) и (4), на произвольное число плоскостей  $A_i$  с нанесёнными на них областями  $\alpha$ -режимов  $S_{\alpha i}$  (рис. 3). В этом случае особыми  $\beta$ -режимами  $x'_{\beta}$  будут те, отображения которых попадают во все области  $S_{\alpha i}$ :

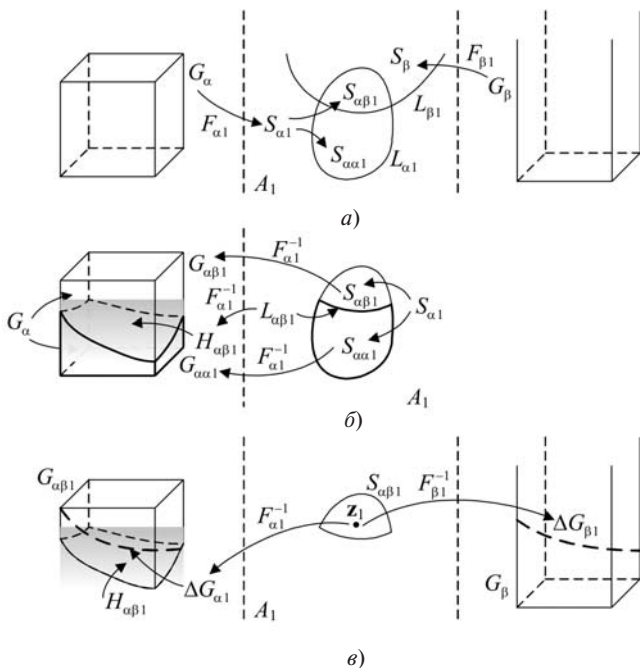


Рис. 1. Иллюстрация первой версии алгоритма обучения одиночного реле: а – прямые отображения объектных областей; б – обратные отображения уставочных областей (обведены собственные  $\alpha$ -области); в – интерпретация явления нераспознаваемости

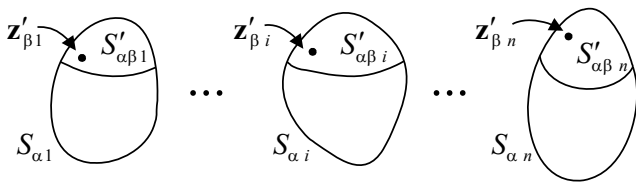


Рис. 3. Области условного отображения альтернативного режима

$$z'_{\beta i} = F_{\beta i}(x'_{\beta} \in G_{\beta}) \in S_{\alpha i}, i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Множество точек на каждой из плоскостей  $A_i$  определит взаимную область условного отображения:

$$S_{\alpha\beta i} = \{ \cup z'_{\beta i}(x'_{\beta} \in G_{\beta}) \subset S_{\alpha i}, i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Обратим внимание на принципиальное отличие взаимных областей  $S'_{\alpha\beta i}$  от простых пересечений областей  $S_{\alpha i} = F_{\alpha i}(G_{\alpha})$  и  $S_{\beta i} = F_{\beta i}(G_{\beta})$ . Области  $S'_{\alpha\beta i}$  не больше пересечений:

$$S'_{\alpha\beta i} \subseteq S_{\alpha\beta i} = (S_{\alpha i} \cap S_{\beta i}). \quad (7)$$

Эффект от условного отображения достигается в структуре, включающей в себя  $n$  модулей с характеристиками срабатывания  $S'_{\alpha\beta i}$  и выходами, соединёнными по схеме «И» (рис. 4).

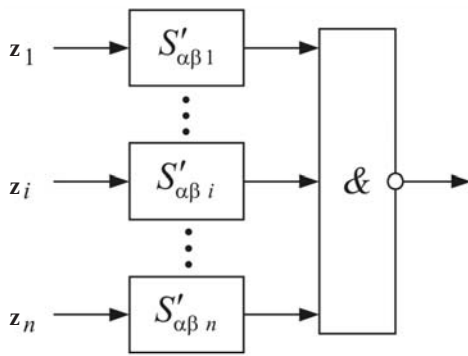


Рис. 4. Структура, прошедшая обучение на основе условного отображения и предназначенная блокировать действие защиты

**Многомерная защита на группе уставочных плоскостей.** Тривиальная структура защиты, в которой задействованы  $n$  уставочных плоскостей, представляет собой формальное объединение  $n$  реле, прошедших автономное обучение (рис. 5).

Нетривиальное решение заключается в условном отображении, обобщающем структуру одиночного реле по рис. 2 на систему из  $n$  реле (рис. 6). По условию (7) структура рис. 6 заведомо превосходит по своей распознающей способности структуру по рис. 5. Тому же способствует и соединение блокирующих модулей  $S'_{\alpha\beta i}$  по схеме «И».

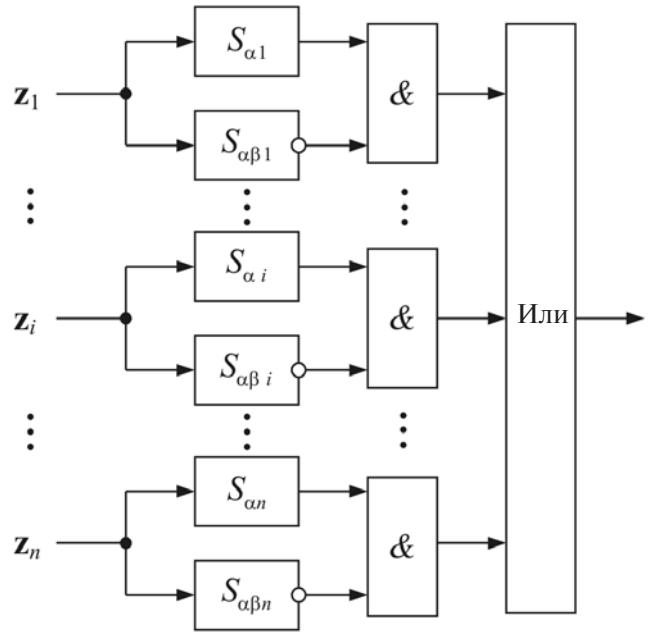


Рис. 5. Объединение автономных реле

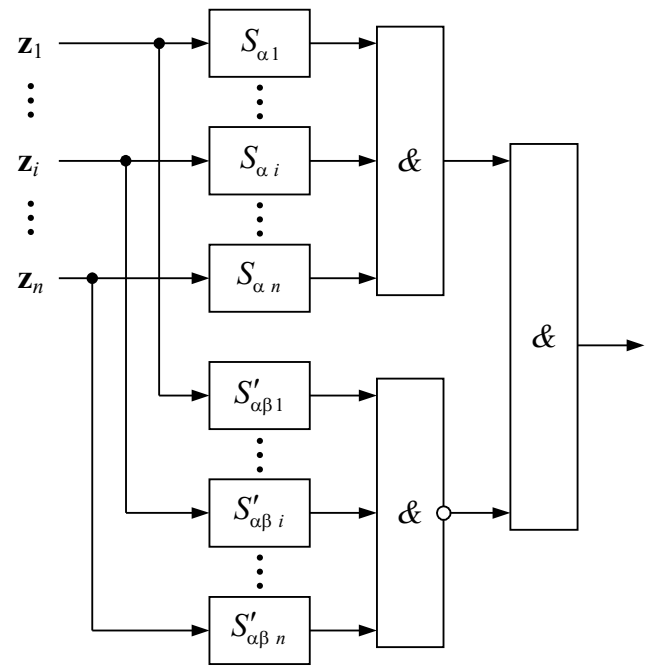


Рис. 6. Структура многомерной защиты с блокировкой по методу условного отображения

**Нераспознаваемые режимы.** Распознаваемость конкретного режима  $x_{\alpha}$  не зависит от размера и расположения объектной области  $G_{\alpha}$ . В многомерной защите условие нераспознаваемости (1) обобщается на все  $n$  уставочных плоскостей, принимая вид  $n$  равенств двумерных векторов:

$$z_{\alpha i}(x_{\alpha}) = z_{\beta i}(x_{\beta} \in G_{\beta}), i = \overline{1, n}; \quad (8)$$

аналогично обобщается неравенство (2), например по минимаксному критерию:

$$\min_{x_\beta} \max_i \text{dist}(z_{\alpha i}(x_\alpha) z_{\beta i}(x_\beta \in G_\beta)) < \varepsilon. \quad (9)$$

Условия (8) и (9), инвариантные к области  $G_\alpha$ , говорят об абсолютной нераспознаваемости режима  $x_\alpha$ . Смысл этого понятия заключается в том, что  $x_\alpha$  остаётся нераспознаваемым при неограниченном стягивании области  $G_\alpha$  к точке  $x_\alpha$ .

Явление относительной нераспознаваемости (или потенциальной распознаваемости) режима  $x_\alpha$  обусловлено обучением защиты по методу условного отображения  $\beta$ -режимов, вследствие чего выполнение  $n$  условий

$$z_{\alpha i} = F_{\alpha i}(x_\alpha) \in S'_{\alpha\beta i}, \quad i = \overline{1, n} \quad (10)$$

приводит к блокированию защиты (рис. 3, 4, 6). Если для констатации абсолютной нераспознаваемости режима  $x_\alpha$  необходимо убедиться в совпадении всех  $n$  его отображений  $z_{\alpha i}$  с отображениями  $z_{\beta i}$  любого, но одного и того же  $\beta$ -режима  $x_\beta \in G_\beta$ , то для относительной нераспознаваемости достаточно более мягкого условия совпадения  $z_{\alpha i}$  с условными отображениями  $z'_{\beta i} \in G_{\alpha i}$  разных  $\beta$ -режимов из области  $G_\beta$ .

**О числе уставочных плоскостей.** Условное отображение  $\beta$ -режимов создаёт ситуацию, при которой никакую из возможных плоскостей нельзя отвергнуть априори, объявив её избыточной. Поясним данное положение на примере выпуклой области отображения распознаваемых режимов с граничной гиперповерхностью  $L$ , определённого в многомерном пространстве с координатами  $y_k$  (рис. 7). Пусть  $n$  – число участков многоугольника, аппроксимирующего линию  $L$ . Введём  $n$  дополнительных осей  $z_i$ , перпендикулярных каждой одной из сторон многоугольника и исходящих из общего начала внутри фигуры. Координаты  $z_i$  выражаются через  $y_1, y_2$ , а условие попадания замера в многоугольник записывается в виде  $n$  неравенств:

$$z_i < a_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

где значения  $a_i$  – см. рис. 7.

Условия (11) реализуются  $n$  соединенными по схеме «И» реле с одной подводимой величиной  $z_i, i = \overline{1, n}$ . Чем больше число  $n$ , тем полнее аппроксимируется линия  $L$ . Рассмотренный пример обобщается на пространство произвольной размерности, а также и на его подпространства. На рис. 7 подпространством служит ось  $z_i$ , в то время как в обучении защиты ставка сделана на подпространства в виде уставочных плоскостей с координатами  $z_{i1}, z_{i2}$  – элементами вектора  $z_i$ .

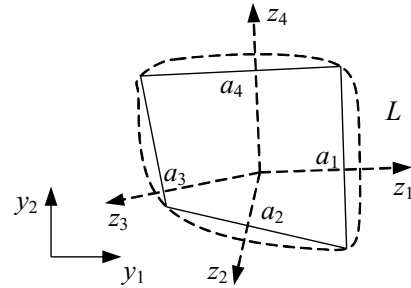


Рис. 7. Иллюстрация роли числа координат  $n$

В многомерном уставочном пространстве граничная гиперповерхность области распознаваемых режимов также разделяется на  $n$  частей; предполагается, что каждая из них может быть описана функционалом  $\Phi$  двух функций вектора  $y$  с элементами  $y_k$ :

$$\Phi_i[f_{i1}(y), f_{i2}(y)] = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где знак функционала выбирается с таким расчётом, чтобы условия попадания в многомерную область имели единообразный вид:

$$\Phi_i(z_{i1}, z_{i2}) > 0, \quad z_{i1} f_{i1}(y), \quad z_{i2} = f_{i2}(y).$$

Очевидно следующее положение: чем достовернее описание частей граничной поверхности двумя функциями  $f_{i1}, f_{i2}$  (12), тем меньшим числом  $n$  уставочных плоскостей удастся обойтись при решении поставленной задачи.

**Метод разделения области  $G_\alpha$ .** Зададимся целью свести к нулю взаимные области условного отображения  $S'_{\alpha\beta i}$ , что позволит исключить из структуры многомерной защиты канал блокировки, присутствующий на рис. 6.

Первый шаг в направлении решения поставленной задачи очевиден: из области  $G_\alpha$  следует изъять подобласть абсолютно нераспознаваемых режимов  $\Delta G_{a.n}$ . Остаётся область распознаваемых режимов  $G_p = G_\alpha \setminus \Delta G_{a.n}$ , куда входит в том числе и множество потенциально распознаваемых режимов  $\Delta G_{п.р} \subset G_p$ , размер которого напрямую связан с размером области  $G_p$ .

Второй шаг представляет собой самостоятельную задачу – требуется разделить область  $G_p$  на минимальное число частей  $G_h, h = 1, 2, \dots$ , каждая из которых не должна содержать нераспознаваемых режимов. Обучение защиты выполняется автономно на каждой из частей. Если  $S_{hi} = F_{\alpha i}(G_h), i = \overline{1, n}$ , то в уставочных областях  $S_{hi}$  должно быть гарантировано несрабатывание в любом из  $\beta$ -режимов  $x_\beta \in G_\beta$  хотя бы какого-нибудь одного из  $n$  реле. Пусть  $q$  – общее обозначение номера несрабатыва-

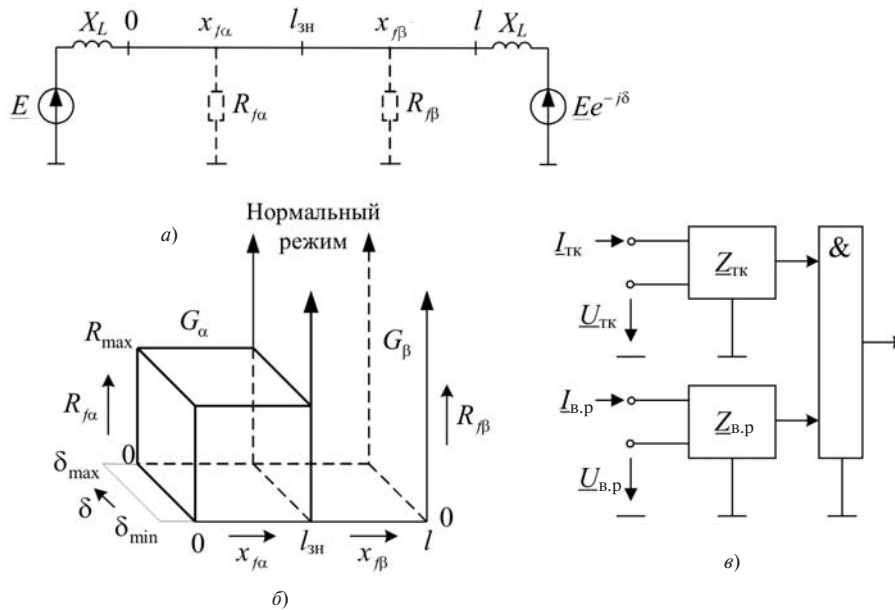


Рис. 8. Имитационная модель (а), объектные области варьируемых параметров (б) и обучаемая структура (в)

шего реле. Условие, которому подчиняется объектная подобласть  $G_h$ , сводится к двум выражениям:

$$z_{\beta q} = F_{\beta q}(x_\beta \in G_\beta) \notin S_{hq} = F_{\alpha q}(G_h), \quad q \in \overline{1, n}; \quad (13)$$

$$z_{\beta i} = F_{\beta i}(x_\beta \in G_\beta) \in S_{hi} = F_{\alpha i}(G_h), \quad i \in \overline{1, q-1}; \quad q+1, n. \quad (14)$$

В более общем случае, приписывая выполняющемуся условию  $F_{\beta i}(x_\beta) \in S_{hi}$  значение логической единицы, а невыполняющемуся – логического нуля, можно представить свойство подобласти  $G_h$  в следующем виде:

$$\bigcap_{i=1}^n [F_{\beta i}(x_\beta) \in S_{hi}] = 0. \quad (15)$$

Обучение защиты по методу разделения объектной области подразделяется на несколько этапов. На первом этапе по (8) и (9) определяется множество абсолютно нераспознаваемых режимов  $\Delta G_{a.n}$ . На втором этапе проверяется гипотеза о том, что исходная область  $G_\alpha$  рассекается геометрическим местом  $\Delta G_{a.n}$  на распознаваемые части  $G_h$ . Если предположение не подтверждается, то подобласти  $G_h$  формируются путём наращивания окрестностей заведомо распознаваемых режимов  $x_\alpha$ . На третьем этапе определяются отображения  $S_{hi}$  на уставочных плоскостях. Четвёртый этап отводится ранжированию в-режимов. Для каждого номера  $q$  из общего числа  $n$  определяется множество режимов  $G_{\beta q}$ , отображение которых на  $q$ -й уставочной плоскости  $S_{\beta q} = F_{\beta q}(G_{\beta q})$  не пересекается с областью  $S_{hq}$ :

$$S_{\beta q} \cap S_{hq} = \emptyset, \quad (16)$$

в то время как отображения на все прочие плоскости размещаются в областях  $S_{hi}$ ,  $i \neq q$ :

$$F_{\beta q}(G_{\beta q}) = S_{\alpha\beta i}^{(q)} \subset S_{hi}, \quad i \in \overline{1, q-1}; \quad \overline{q+1, n}. \quad (17)$$

Условие (16) согласуется с (13), а условие (17) – с (14). Нижние индексы символа  $S_{\alpha\beta i}^{(q)}$  означают частичные взаимные области на всех плоскостях кроме  $q$ -й. Верхний же индекс означает, что на  $q$ -й плоскости  $\beta$ -режимам, отображённым в  $S_{\alpha\beta i}^{(q)}$ , принадлежит область  $S_{\beta q}$ , не пересекающаяся с  $S_{hq}$ .

**Обучение дистанционной защиты на паре уставочных плоскостей.** Рассмотрим в качестве примера задачу распознавания трёхфазного замыкания в заданной зоне электропередачи, соединяющей источника бесконечной мощности. Имитационная модель  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов представлена общей схемой, режимы различаются диапазонами изменения координаты места замыкания  $x_f$  (рис. 8,а). Модель с распределённой индуктивностью и тремя варьируемыми параметрами (рис. 8,б): один нормальный – угол передачи  $\delta$  и два аварийных – координата  $x_f$  и переходное сопротивление  $R_f$ . Диапазоны изменения варьируемых параметров:  $\delta_{max} = -\delta_{min} = 60^\circ$ ,  $R_{f\alpha} = 0 \div R_{max}$  ( $R_{max} = 100$  Ом);  $R_{f\beta}$  изменяется от нуля до бесконечности, последнее соответствует нормальному режиму, также относящемуся к числу  $\beta$ -режимов;  $x_{f\alpha} = 0 \div l_{зн} = 50$  км),  $x_{f\beta} = l_{зн} \dots (l = 100$  км). Кроме границ диапазонов к числу неварьируемых параметров относятся удельное сопротивление линии  $X^0 = 0,4$  Ом/км и сопротивление систем  $X_L = 10$  Ом.

Обучаемая структура составлена из двух реле (рис. 8,б): обычного реле, реагирующего на текущий замер  $Z_{ТК} = U_{ТК} / I_{ТК}$ , определяемый по напряжению и току текущего режима, и виртуального реле, реагирующего на замер  $Z_{В,П} = U_{В,П} / I_{В,П}$ , где  $U_{В,П}$  и  $I_{В,П}$  – напряжение и аварийная составляющая тока в конце защищаемой зоны в предположении, что замыкание произошло именно там. В принятой модели по рис. 8,а:  $U_{В,П} = U_{ТК} - jX^0 U_{ЗН} I_{ТК}$ ,  $I_{В,П} = I_{ТК} - I_{ПД}$ , где  $I_{ПД}$  – ток, наблюдавшийся в предшествующем режиме.

Результаты обучения структуры дистанционной защиты в составе двух реле по рис. 8,б представлены на рис. 9–12. На рис. 9 показан результат выявления абсолютно нераспознаваемых режимов. Множество этих режимов располагается на затемнённой поверхности  $\Delta G_{а,н}$ , которая рассекает область  $\alpha$ -режимов  $G_\alpha$  на две части – нижнюю  $G_1$  и верхнюю  $G_2$ . Заметим, что многогранник  $G_\alpha$  на рис. 9 повернут относительно исходного положения на рис. 8,б, что позволяет рассмотреть поверхность абсолютно нераспознаваемых режимов и две трёхмерные фигуры потенциально распознаваемых режимов. Чувствительность защиты к переходному сопротивлению  $R_f$  ограничена поверхностью  $\Delta G_{а,н}$ , поэтому потенциальная распознаваемость области  $G_2$  имеет чисто теоретическое значение. Практический интерес представляет только нижняя область  $G_1$ .

На рис. 10 показаны отображения области  $G_1$  на уставочные плоскости  $S_{11} = F_{\alpha 1}(G_1)$  и  $S_{12} = F_{\alpha 2}(G_1)$ . Далее проводится испытание обучаемой структуры всеми режимами области  $G_\beta$ . Режимов  $x_\beta$ , которые отображались бы одновременно в  $S_{11}$  и  $S_{12}$ , не оказалось, следовательно, объектная область  $G_1$  свободна от явления относительной нераспознаваемости. Остаётся вопрос о тех  $\beta$ -режимах, кото-

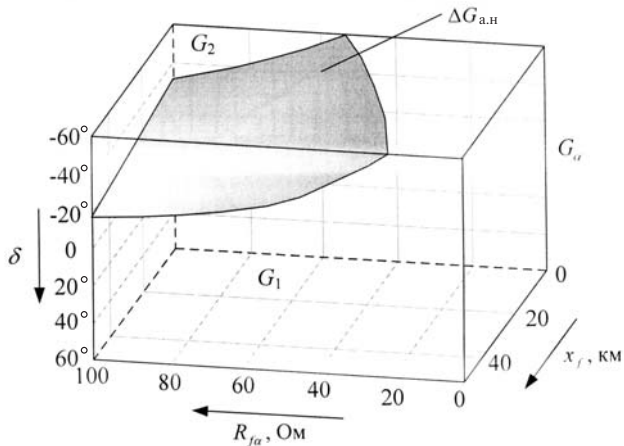


Рис. 9. Множество абсолютно нераспознаваемых режимов – поверхность  $\Delta G_{а,н}$  в составе заданной трёхмерной области  $\alpha$ -режимов  $G_\alpha$

рые попадают только в одну из двух уставочных областей  $S_{11}$  и  $S_{12}$ .

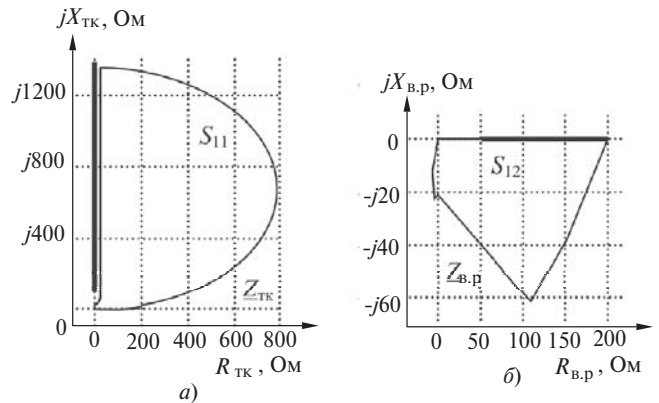


Рис. 10. Отображения потенциально распознаваемых режимов области  $G_1$  на уставочных плоскостях: а – замер текущего сопротивления; б – замер сопротивления на зажимах виртуального реле; — — — отображения абсолютно нераспознаваемых режимов – области  $\Delta G_{а,н}$

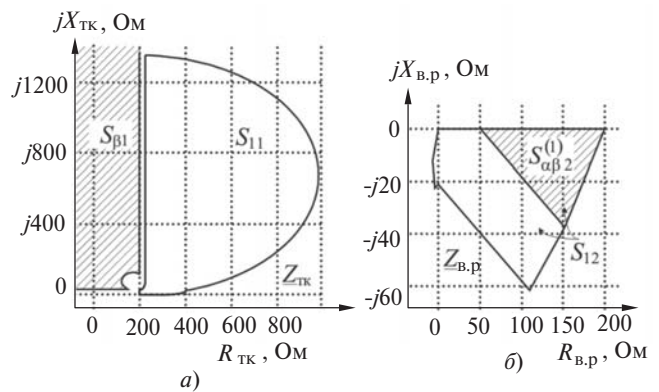


Рис. 11. Отображение в плоскости  $Z_{ТК}$  тех  $\beta$ -режимов, которые попадают в область  $S_{12}$ : а – замер обычного реле сопротивления; б – то же виртуального

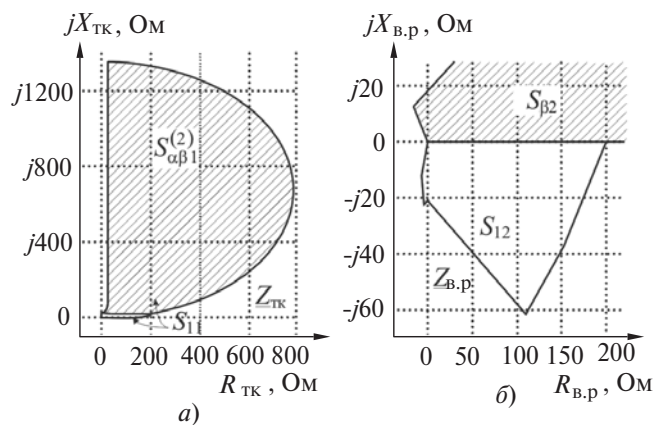


Рис. 12. Отображение в плоскости  $Z_{В,П}$  тех  $\beta$ -режимов, которые попадают в область  $S_{11}$ : а и б – см. рис. 11

На рис. 11 на плоскости  $\underline{Z}_{в.р}$  показана взаимная  $\alpha\beta$ -подобласть  $S_{\alpha\beta 2}^{(1)}$  в составе области  $S_{\alpha 2}$ .

Верхний индекс означает, что на первой плоскости  $\underline{Z}_{тк}$   $\beta$ -режимам, отображённым в  $S_{\alpha\beta 2}^{(1)}$ , соответствует область  $S_{\beta 1}$ , не пересекающаяся с  $S_{11}$ . Аналогично на рис. 12 взаимосвязаны область  $S_{\alpha\beta 1}^{(2)}$  — отображения  $\beta$ -режимов в  $S_{11}$ , и область  $S_{\beta 2}$ , соприкасающаяся с  $S_{12}$ , но не пересекающаяся с нею. Таким образом, отображения  $S_{11}$  и  $S_{12}$  в целом правомерно идентифицировать с областями срабатывания пары реле сопротивления, прошедших совместное обучение.

**Выводы.** 1. Несложная реализация многомерной релейной защиты в виде группы реле, объединённых схемой «И», общей информационной базой и процедурой совместного обучения, обладает эффектом условного отображения альтернативных режимов, способствующим их размежеванию с отслеживаемыми режимами.

2. Наряду с абсолютной нераспознаваемостью некоторых режимов контролируемого объекта обнаруживается ещё и эффект относительной нераспознаваемости, напрямую связанный с размером области варьируемых параметров объекта в отслеживаемых режимах.

3. Оптимальное разделение области потенциально распознаваемых режимов на отдельные части создаёт эффект самоустранения явления относительной нераспознаваемости, а в практическом плане — к обеспечению селективности защиты без применения блокировки.

4. В рассмотренном примере обнаруживается эффект естественного разделения области отслеживаемых режимов на подобласти, избавленные от явления относительной нераспознаваемости. Подобласти разграничиваются поверхностью абсолютно нераспознаваемых режимов.

5. Метод условных отображений альтернативных режимов приводит к легко реализуемой структуре многомерной релейной защиты. Одновременно из этого метода вытекает алгоритм определения

характеристик срабатывания отдельных модулей такой защиты.

*В исследованиях принимал участие студент ЧГУ П.И. Воронов.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. и др.** Многомерная релейная защита: ч. 1. Теоретические предпосылки; ч. 2. Анализ распознающей способности реле; ч. 3. Эквивалентирование моделей. — Электричество, 2009, № 10; № 11; 2010, № 1.
2. **Лямец Ю.Я., Кержаев Д.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В.** Граничные режимы в методике обучения релейной защиты: ч. 1. Граничные условия и обучающие процедуры. — Изв. вузов. Электромеханика, 2009, № 4.
3. **Патент РФ № 2316780.** Способ релейной защиты энергообъекта/Ю.Я. Лямец, Н.А. Иванов. — БИ, 2008, № 4.
4. **Патент РФ № 2316871.** Способ релейной защиты энергообъекта/Ю.Я. Лямец, Д.В. Кержаев. — БИ, 2008, № 4.
5. **Патент РФ № 2316872.** Способ релейной защиты энергообъекта/Ю.Я. Лямец, С.В. Иванов, А.Н. Подшивалин. — БИ, 2008, № 4.

[29.11.10]

*Авторы: Лямец Юрий Яковлевич окончил в 1962 г. энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). 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».*

*Нудельман Года Семенович окончил в 1960 г. энергетический факультет НПИ. В 1983 г. защитил в НПИ кандидатскую диссертацию по проблеме повышения эффективности функционирования релейной защиты линий электропередачи. Председатель совета директоров ОАО «ВНИИР».*

*Подшивалина Ирина Сергеевна окончила в 2006 г. магистратуру Чувашского госуниверситета (ЧГУ) по программе «Автоматика энергосистем». Зав. сектором ИЦ «Бреслер».*

*Романов Юрий Вячеславович окончил в 2006 г. магистратуру ЧГУ. В 2009 г. защитил в ЧГУ кандидатскую диссертацию «Метод информационного анализа процессов в электрических системах в приложении к защитам генераторов и линий электропередачи». Зав. сектором ИЦ «Бреслер».*

\* \* \*

### К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).