

## Дискретная форма представления информации о защищаемом объекте в приложении к адаптивному реле

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

*Исследуются закономерности, лежащие в основе дискретной структуры пространства произвольной размерности. С их помощью определяются границы дискретных областей и проверяется их односвязность. Примером применения дискретного пространства служит реле сопротивления с прямой адаптацией. В ячейках дискретного пространства отображается информация о предшествующем режиме электропередачи. Адаптивное и сравниваемое с ним неадаптивное реле обучаются в асинхронных режимах. Адаптация обеспечивает при этом селективное действие без ущерба для распознающей способности реле.*

**Ключевые слова:** релейная защита, дискретное пространство, адаптация, область срабатывания, объектная характеристика

Современная техника сбора, передачи и хранения информации способствует расширению информационно-аналитической базы релейной защиты. Возникает общая задача эффективного использования всей доступной информации. Пути её решения ведут к многомерному пространству, предназначенному для отображения информации о состоянии защищаемого объекта [1]. Область отображения подлежит окаймлению и проверке на односвязность. Вычислительная геометрия располагает алгоритмами окаймления областей в непрерывном пространстве (задачи триангуляции и тесселяции [2]), но они сложны для технических приложений. В статье рассматривается дискретное пространство, состоящее из однотипных ячеек прямоугольной формы. Структура областей и их границы в таком пространстве подчиняются простым закономерностям.

Функциональная роль области, состоящей из множества ячеек, определяется видом информации, вносимой в отдельно взятую ячейку. Простейшее применение дискретного пространства ограничивается логической информацией. Если задаётся область срабатывания защиты [3], то в ячейки этой области закладывается логическая единица – символ срабатывания, а в прочие ячейки – логический ноль, символ несрабатывания. В более сложном случае в каждую ячейку выделенной области закладываются значения некоторых параметров, например, параметров имитационной модели объекта, возможно, после её эквивалентирования [4]. В статье рассматривается ещё одно применение – реализация алгоритма прямой адаптации дистанционной защиты линии электропередачи.

**Структура дискретного пространства.** Предметом рассмотрения являются геометрия ячейки и её соседство с другими ячейками, что важно для проверки односвязности массива ячеек и определения тех из них, которые располагаются на его границе.

Пусть  $z_i, i = \overline{1, m}$  – координаты  $m$ -мерного пространства. Каждая координатная ось разделяется на интервалы  $\Delta z_i$ . Интервалы пронумерованы,  $k_i = \text{ent}(z_i / \Delta z_i)$  – номер произвольного интервала на  $i$ -й оси (рис. 1,а). Образует код ячейки из номеров её проекций на координатные оси, представив его в виде вектора  $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m]^T$ . Рассмотрим ячейку  $\mathbf{K}$  вместе с примыкающими к ней окрестными (соседними) ячейками. Все вместе они образуют прямоугольный массив в  $3^m$  ячеек. Ячейка  $\mathbf{K}$  занимает в нем особое центральное положение, а остальные ячейки можно отнести к той или иной группе по типу соприкосновения с центральной ячейкой. Проекцию данного массива на каждую ось составляют три отрезка (рис. 1,а), а на координатную плоскость – 9 прямоугольников, примыкающих к проекции  $\text{Pr}_{i,j+1} \mathbf{K}$  центральной ячейки (рис. 1,б). Пусть порядок  $n = 0, m-1$  является количественной оценкой степени соприкосновения окрестной и центральной ячеек. Значение  $n=0$  говорит о том, что у них всего лишь общая вершина,  $n=1$  – общее ребро,  $n=2$  – общая грань наименьшего второго порядка,  $n=m-1$  – общая грань наивысшего порядка, что означает теснейшее соприкосновение ячеек. С другой стороны,  $n$  – число общих проекций окрестной и центральной ячеек. Коль скоро на  $m-n$  осях нет общих проекций, таких соседей можно насчитать  $2^{m-n}$  для каждого набора из  $m-n$  осей:

$$\binom{m}{m-n} \equiv \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!}$$

Обозначим  $N_m^n$  число граней  $n$ -го порядка и, соответственно, число окрестных ячеек такого порядка. Для общности можно принять, что вершина

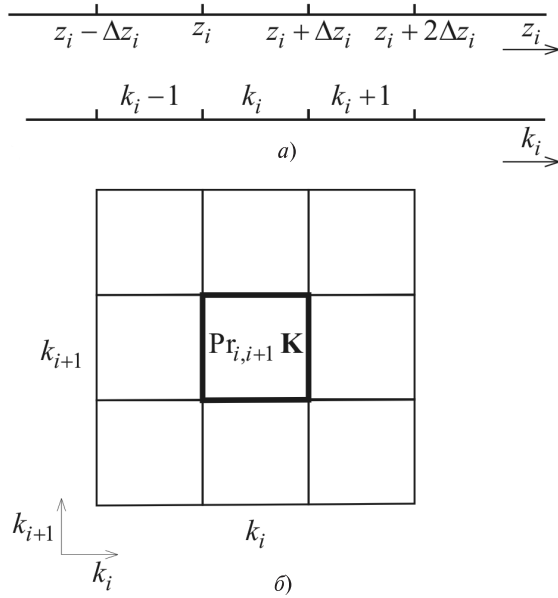


Рис. 1. Проекция массива ячеек: а – на координатную ось; б – на координатную плоскость (двумерное подпространство)

и ребро многогранника – это грани нулевого и первого порядка. Для любого значения  $n$

$$N_m^n = \binom{m}{n} 2^{m-n}. \tag{1}$$

Общее число окрестных ячеек  $N_m$  может быть определено по-разному. С одной стороны,

$$N_m = 3^m - 1, \tag{2}$$

с другой –

$$N_m = \sum_{n=0}^{m-1} N_m^n = \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m}{n} 2^{m-n}. \tag{3}$$

Тождество выражений (2) и (3) легко установить с помощью бинома Ньютона:

$$3^m = (2+1)^m = 1 + \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m}{n} 2^{m-n}.$$

Зная число (1) однотипных окрестных ячеек произвольной ячейки  $K$ , нетрудно установить, является ли она внутренней ячейкой массива или располагается на его границе. В последнем случае предстоит ещё определить, какие её грани выходят на границу массива. Всё определяется тем, «соседи» какого порядка  $n$  и в каком количестве выпадают из общего числа (2) всех окрестных ячеек.

**Дистанционная защита с прямой адаптацией.** Суть прямой адаптации состоит в модифицировании области срабатывания защиты в зависимости от режима линии электропередачи, предшествующего короткому замыканию. Воспользуемся дискретным пространством для отображения информации о предшествующем режиме, заложив в каждую ячейку описание характеристики срабатыва-

ния реле сопротивления на комплексной плоскости  $\underline{Z}_{\text{ТК}} = \underline{U}_{\text{ТК}} / \underline{I}_{\text{ТК}}$ , где  $\underline{U}_{\text{ТК}}$  и  $\underline{I}_{\text{ТК}}$  – комплексы напряжения и тока в текущем режиме короткого замыкания.

Распознающая способность алгоритма прямой адаптации в идеальной интерпретации исследована в [5]. Идеальный вариант не связан с неизбежными ограничениями, возникающими при реализации. Применительно к дискретному пространству это означает, что в идеальном варианте ячейки стягиваются в точки. Здесь же рассматриваются ячейки реального размера. Реализация алгоритма осуществляется в заранее подготовленном дискретном пространстве предшествующего режима. В симметричном режиме вся информация о состоянии объекта заключена в комплексах двух наблюдаемых фазных величинах – тока  $\underline{I}_{\text{пд}}$  и напряжения  $\underline{U}_{\text{пд}}$ , а именно, в их модулях  $I_{\text{пд}}$ ,  $U_{\text{пд}}$  и разности фаз  $\varphi$ . В качестве координат пространства предшествующего режима выберем активную и реактивную мощности  $P_{\text{пд}}$  и  $Q_{\text{пд}}$ :

$$P_{\text{пд}} + jQ_{\text{пд}} = \underline{U}_{\text{пд}} \underline{I}_{\text{пд}}^*,$$

а также полный ток  $I_{\text{пд}}$ .

Введём обозначение вектора замера в предшествующем режиме:

$$\mathbf{z}_{\text{пд}} = [P_{\text{пд}}, Q_{\text{пд}}, I_{\text{пд}}]^T.$$

Замеры формируются по результатам наблюдения имитационной модели электропередачи с удельным сопротивлением  $Z^0 = 0,1 + j0,43$  Ом/км при длине линии  $l = 100$  км (рис. 2). Сопротивление систем  $\underline{Z}_s = Z_s \exp(j\varphi_s)$  и  $\underline{Z}_r = Z_r \exp(j\varphi_r)$  взяты с фиксированным аргументом  $\varphi_s = \varphi_r = 88^\circ$  и независимо варьируемыми модулями  $Z_s \in (1;10)$  Ом,  $Z_r \in (1;10)$  Ом. Напряжение источников  $E_s = E_r = 220\sqrt{3}$  кВ берётся с независимо варьируемыми множителями  $\lambda_s \in (0,9;1,1)$ ,  $\lambda_r \in (0,9;1,1)$ . Обучение защиты проводится не только в нормальных предшествующих режимах, когда угол передачи  $\delta$  изменяется в ограниченном диапазоне и только в первой и четвертой четвертях, но и в асинхронном режиме, когда угол  $\delta$  изменяется без каких-либо ограничений.

Всего в модели рис. 2 семь варьируемых параметров: пять нормальных, образующих вектор

$$\mathbf{x}_{\text{нор}} = [\delta, Z_s, Z_r, \lambda_s, \lambda_r]^T,$$

и два аварийных – переходное сопротивление  $R_f$  и место замыкания  $x_f$ . В предшествующем режиме варьируются только нормальные параметры, в текущем режиме – ещё и аварийные.

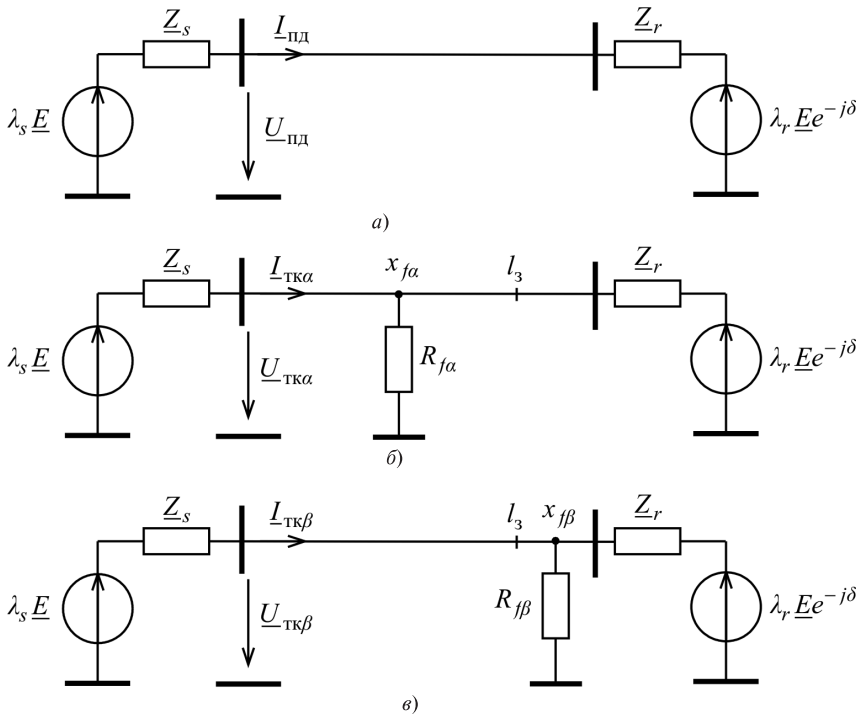


Рис. 2. Обучающая имитационная модель линии электропередачи: а – в предшествующем режиме; б – при замыкании в зоне защиты (α-режим); в – при замыкании вне зоны (β-режим)

На рис. 3 показано трёхмерное дискретное пространство предшествующих режимов  $V_{пд}$ . Они занимают 50 ячеек параллелепипеда, составленного из  $5^3 = 125$  ячеек. Стороны каждой ячейки по осям  $P_{пд}$ ,  $Q_{пд}$ ,  $I_{пд}$  составляют 164 МВт; 160 Мвар; 1,2 кА. Область  $V_{пд}$  не сплошная, в ней имеется внутренняя полость.

Реле сопротивления с прямой адаптацией, как и обычное неадаптивное реле, реагирует на замер  $Z_{тк} = U_{тк} / I_{тк}$ , но различие между ними имеет принципиальный характер. Неадаптивное реле не использует информацию о предшествующем режиме и поэтому располагает единственной характеристикой срабатывания. У адаптивного реле для каждой ячейки  $K_{пд}$  определяется своя характеристика.

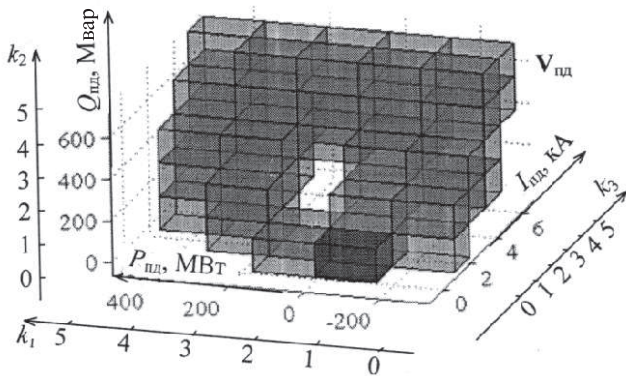


Рис. 3. Дискретная область отображения предшествующих режимов

**Результаты обучения неадаптивного и адаптивного реле сопротивления.** Методика обучения подробно изложена в [5]. Роль «учителя» возлагается на имитационную модель линии в предшествующем режиме (рис. 2,а) и в текущих режимах – контролируемых (α-режимы, рис. 2,б) и альтернативных (β-режимы, рис. 2,в). Контролируемые режимы – замыкания в зоне защиты, где  $x_{fα} \in (0, l_3)$ ,  $l_3 = 85$  км – длина зоны защиты;  $R_{fα} \in (0, 100)$  Ом. Альтернативные режимы – замыкания вне зоны защиты, где  $x_{fα} \in (l_3, l)$ ,  $l = 100$  км,  $R_{fα} > 0$ . Отсутствие верхнего ограничения вариаций переходного сопротивления  $R_{fβ}$  объясняется тем, что нормальные режимы ( $R_{fβ} \rightarrow \infty$ ) тоже относятся к числу β-режимов.

Замеры сопротивлений

$Z_{ткα} = U_{ткα} / I_{ткα}$  и  $Z_{ткβ} = U_{ткβ} / I_{ткβ}$  отображаются на комплексной плоскости  $Z_{тк}$  в виде областей  $S_α$  и  $S_β$ . Область срабатывания реле  $S_{αα}$  определяется как разность двух отображений:  $S_{αα} = S_α \setminus S_β$ . Короткие замыкания в защищаемой зоне, к которым реле оказалось нечувствительным, отображаются в подобласти  $S_{αβ} = S_α \cap S_β$ .

Применяемую далее методику обучения можно назвать строгой, так как она исключает возможность неселективного действия защиты при каких бы то ни было значениях угла передачи  $δ$ . Результат обучения неадаптивного реле предстаёт в виде единственной области  $S_{αα}$  (рис. 4). Обучение адаптивного реле проводится отдельно для каждой ячейки  $K_{пд}$ . К параметрам имитационной модели при этом предъявляется дополнительное условие

$$z_{пд}(x_{nor}) \in K_{пд}, \tag{4}$$

ограничивающее вариации вектора  $x_{nor}$ . На рис. 5 приведена область срабатывания, полученная с учётом условия (4) для зачёрнённой на рис. 3 ячейки с кодом  $K_{пд} = [1, 2, 1]^T$  и сторонами  $P_{пд} \in (-156, 8)$  МВт,  $Q_{пд} \in (-50; 110)$  Мвар,  $I_{пд} \in (0; 1, 2)$  кА. В указанной ячейке отображаются нормальные режимы работы имитационной модели при углах передачи  $δ \in (-30^\circ, -35^\circ)$ . Распознающая способность реле оценивается его объектной характеристикой  $R_{f \min \max}(x_f)$ , определяемой следующей процедурой:

$$R_{f \min \max}(x_f) = \min_{x_{nor}} \max_{R_f} \arg [x_{пд}(x_{nor}) \in K_{пд}];$$



$$\underline{Z}_{TK}(R_f, x_f, x_{nor}) \in S_{\alpha\alpha} \quad (5)$$

Результаты применения операции (5) к обоим реле приведены на рис. 6. Во-первых, требуется объяснить, почему входящее в (5) условие (4) распространено на неадаптивное реле, хотя на этапе обучения этого реле оно не использовалось. Дело в том, что объектные характеристики необходимо определять для одного и того же множества режимов имитационной модели, это уравнивает условия определения распознающей способности реле разного типа. Во-вторых, необходимо объяснить, почему объектная характеристика неадаптивного реле указывает на нулевую чувствительность во второй половине линии. К сжатию области срабатывания неадаптивного реле (рис. 4) привело требование селективности при коротких замыканиях в асинхронном режиме. Адаптивному реле такое требование проблемы не создает, так как режимы с углами передачи  $\delta$  во второй и третьей четвертях отображаются не во всех ячейках  $\mathbf{K}_{ПД}$  и укорочение защищаемой зоны не затрагивает ячейки, в которых отображаются предшествующие режимы с углами передачи в первой и четвертой четвертях.

Интересно оценить последствия повышения изменчивости параметров имитационной модели на распознающую способность реле. Добавим к числу независимо варьируемых параметров углы сопро-

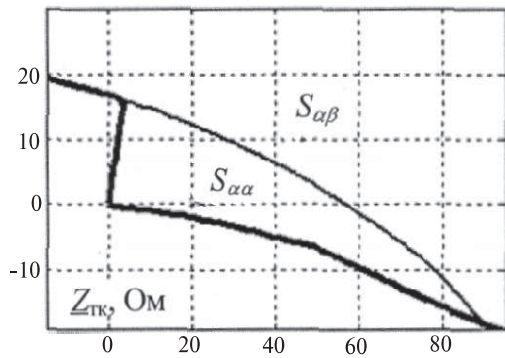


Рис. 4. Область срабатывания неадаптивного реле сопротивления

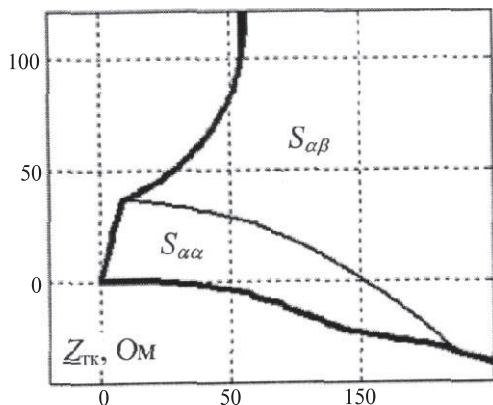


Рис. 5. Область срабатывания адаптивного реле сопротивления для параметров модели, отвечающих условию  $x_{ПД} \in \mathbf{K}_{ПД}$

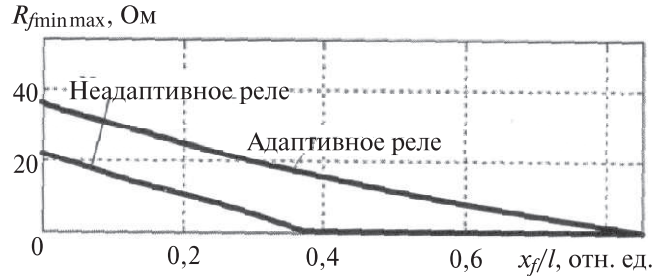


Рис. 6. Объектные характеристики двух реле сопротивления

тивлений систем  $\varphi_s \in (70^\circ, 90^\circ)$  и  $\varphi_r \in (70^\circ, 90^\circ)$ , а верхний предел изменения полных сопротивлений  $Z_s$ , и  $Z_r$  увеличим в 10 раз: до 100 Ом. Изменившаяся область  $\mathbf{V}_{ПД}$  показана на рис. 7. Чтобы вписать её в параллелепипед, состоящий, как и ранее (рис. 3), из 125 ячеек, потребовалось несколько увеличить размеры ячеек по осям  $P_{ПД}$ ,  $Q_{ПД}$ . Теперь стороны каждой ячейки составляют 174 МВт; 186 Мвар; 1,16 кА. Предшествующий режим отображился в 67 ячейках.

Обучение неадаптивного реле привело к неожиданному результату: область  $S_{\alpha\alpha}$  исчезла, что свидетельствует о невозможности обеспечить селективную работу реле в заданном диапазоне изменения параметров модели даже при металлическом замыкании в месте наблюдения.

Адаптивное реле, между тем, сохраняет селективность и в этих утяжелённых условиях. На рис. 8 приведён результат обучения реле для зачернённой ячейки с кодом  $\mathbf{K}_{ПД} = [2, 2, 1]^T$  и сторонами  $P_{ПД} \in (-166; 8)$  МВт,  $Q_{ПД} \in (66; 252)$  Мвар,  $I_{ПД} \in (0; 1,16)$  кА. В ней отображаются режимы модели в угловом диапазоне  $\delta \in (-35^\circ, -25^\circ)$ . Соответствующая объектная характеристика приведена на рис. 9. Она в основных чертах повторяет кривую рис. 6, что имеет объяснение. Объектные характеристики близки по своей форме к прямым, соединяющим точки  $R_{fminmax}(0)$  и  $R_{fminmax}(l_3) = 0$ . Значение  $R_{fminmax}(0)$  определяется левой грани-

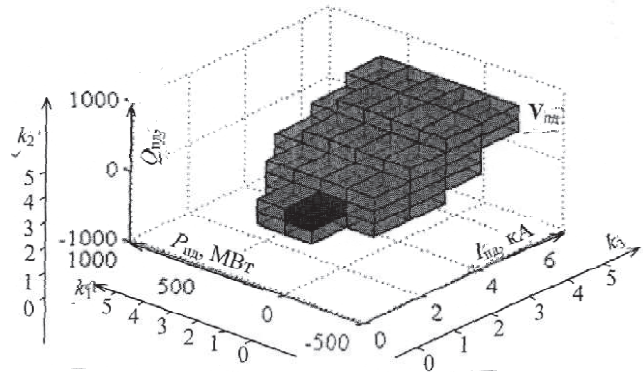


Рис. 7. Дискретная область отображения предшествующих режимов имитационной модели с повышенной изменчивостью

цей области  $S_{\alpha\alpha}$ , это линия максимальной чувствительности. А протяжённость этих границ областей  $S_{\alpha\alpha}$  на рис. 5 и рис. 8 одинакова, хотя сами области и несхожи.

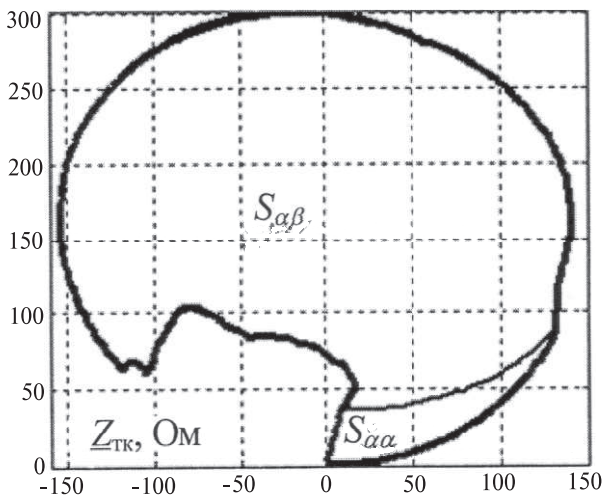


Рис. 8. Область срабатывания адаптивного реле сопротивления для расширенного диапазона изменения параметров имитационной модели

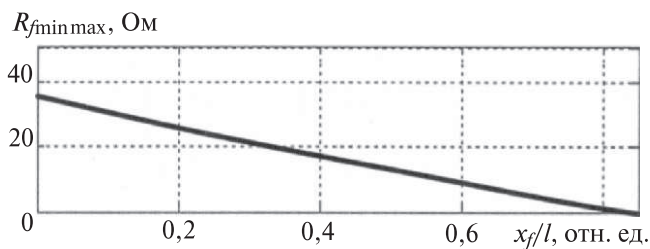


Рис. 9. Объектная характеристика реле с областью срабатывания  $S_{\alpha\alpha}$  по рис. 8

**Выводы.** 1. Области дискретного пространства образуются примыкающими друг к другу элементарными ячейками и подчиняются общим закономерностям, из которых следуют правила определения граничных ячеек и проверки односвязности независимо от размерности пространства.

2. Для реализации метода прямой адаптации релейной защиты необходимо отобразить в дискретном пространстве априорную информацию о защищаемом объекте и определить для задействованных ячеек характеристики срабатывания на плоскости замера, осуществляемого в текущем режиме.

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 9, pp. 29–34.*

3. Обучение реле сопротивления в условиях асинхронного режима с запретом неселективного действия при любых углах передачи выявляет бесспорное преимущество адаптивного реле перед неадаптивным: нераспознаваемость замыканий при некоторых углах передачи не влияет на распознающую способность адаптивного реле при других углах. С повышением вариативности параметров имитационной модели неадаптивное реле утрачивает селективность, а адаптивное реле сохраняет это важнейшее свойство.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В., Кержаев Д.В., Романов Ю.В. Многомерная релейная защита. Ч.1, 2, 3. — Электричество, 2009, №10, с.17–25; №11, с.9–15; 2010, №1, с.9–15.
2. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. — М.: Мир, 1989.
3. Патент РФ №2247456. Способ релейной защиты энергообъекта/Ю.Я. Лямец, Е.Б. Ефимов, Г.С. Нудельман. — БИ, 2005, № 6.
4. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В. Эквивалентирование имитационных моделей электрических сетей. — Электричество, 2015, № 5, с. 22–29.
5. Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В. Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи. — Электричество, 2016, № 5, с. 8–12.

[07.07.2016]

*Авторы: Лямец Юрий Яковлевич окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического университета в 1962 г. 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 факультет энергетики и электротехники ЧГУ в 2014 г. В 2015 г. в ЧГУ защитил кандидатскую диссертацию «Информационные аспекты защиты и локализации повреждений электрической сети». Инженер-исследователь ИЦ «Бреслер».*

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

## Discrete Form of Data Representation About the Protected Object in the Application to the Adaptive Relay

LYAMETS Yuriy Yakovlevich (Chuvash State University (ChSU), Cheboksary, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)  
 VORONOV Pavel Il'ich (Research Centre «Bresler», Cheboksary, Russia) — Engineer, Ph.D. Student  
 MARTYNOV Mikhail Vladimirovich (Research Centre «Bresler» Cheboksary, Russia) — Research Engineer, Cand. Sci. (Eng.)