

Обучаемая релейная защита.

Ч. 2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры¹

ЛЯМЕЦ Ю.Я., МАРТЫНОВ М.В., НУДЕЛЬМАН Г.С., РОМАНОВ Ю.В., ВОРОНОВ П.И.

Распознающая структура представлена в виде набора модулей, каждый из которых разрешает одно из элементарных противостояний пары разнотипных режимов. Модули обучаются на минимально возможном числе уставочных плоскостей. Для обучения используются методы условных отображений в их последовательном и параллельном вариантах.

Ключевые слова: релейная защита, распознавание, обучение, противостояние режимов, условные отображения

Методы условных отображений, представленные в первой части статьи, создают регулярную основу для обучения многомерной релейной защиты [1, 2]. Многомерная структура составляется из двумерных модулей. Каждый модуль реагирует на замер — двумерный сигнал, компоненты которого служат координатами уставочной плоскости. В результате обучения определяются как подходящие замеры, так и области срабатывания соответствующих модулей. Обучающие алгоритмы модифицируют один из двух типов условных отображений — параллельный или последовательный.

Понятие об условных отображениях связано с тем обстоятельством, что на плоскостях A_i замеров z_i , $i=1, n$, отслеживаемые и альтернативные режимы (α - и β -режимы) имитационных моделей защищаемого объекта в процессе обучения модулей релейной защиты отображаются по-разному: α -режимы отображаются безусловно, а β -режимы — только при выполнении определенных условий. Замеры являются функциями режимов, задаваемых векторами x_α или x_β варьируемых параметров соответствующих имитационных моделей. Найдены два типа условных отображений. Их отличает подход к обучению структур, призванных реагировать на замеры $z_{\alpha i} = z_i(x_\alpha)$ и не реагировать на замеры $z_{\beta i} = z_i(x_\beta)$. Первый тип ведет к методу параллельного обучения, когда все n модулей с входными сигналами z_i обучаются совместно. Второму типу отвечает метод последовательного обучения, когда модули обучаются в заданной очередности и на каждом шаге учитываются результаты предыдущих этапов.

The recognizing structure is represented as a set of modules, each of which allows one of elementary oppositions of a pair of dissimilar modes to be resolved. The modules are taught on the minimally possible number of setpoint planes. Methods of conditional images in their series and parallel versions are used for obtaining the results.

Key words: relay protection, recognition, teaching, opposition of modes, conditional images

В информационной теории релейной защиты сложилось представление о распознаваемости аварийных ситуаций на контролируемом объекте и о распознающей способности спроектированной для него релейной защиты [3, 4]. Понятия «распознаваемость» и «распознающая способность» не так близки, как может показаться на первый взгляд. Первое относится к наблюдаемому объекту, являясь его физическим свойством. Второе говорит о качестве наблюдателя. Распознаваемость — тот предел, к которому призвана стремиться распознающая способность создаваемой релейной защиты.

Процедура распознавания призвана преодолеть противостояние между α - и β -режимами, воспроизводимыми соответствующими имитационными моделями объектов. Режимы задаются m_α - и m_β -мерными векторами $x_\alpha \in G_\alpha \subset C_\alpha$, $x_\beta \in G_\beta \subset C_\beta$ параметров имитационных моделей, где G_α и G_β — области определения векторов x_α и x_β в объектных пространствах C_α и C_β соответственно.

Векторы x_α и x_β преобразуются имитационными α - и β -моделями защищаемого объекта в наблюдаемые величины — функции времени $v_\alpha(t)$ и $v_\beta(t)$. Во входных цепях большинства типов релейных защит они, в свою очередь, преобразуются в комплексы \underline{V}_α и \underline{V}_β , изображающие синусоиды основной частоты.

Математическим определением явления абсолютной нераспознаваемости служит равенство:

$$\underline{V}_\alpha(x_\alpha \in G_\alpha) = \underline{V}_\beta(x_\beta \in G_\beta), \quad (1)$$

описывающее в области G_α подобласть абсолютной нераспознаваемости $G_{\alpha,н}$. Практической реализацией равенства (1) служит оптимизационная процедура:

¹ Часть 1 см. «Электричество», 2012, № 2.

$$\min_{x_\alpha \in G_\alpha, x_\beta \in G_\beta} \text{dist}(\underline{V}_\alpha(x_\alpha), \underline{V}_\beta(x_\beta)) \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где ε – малая величина.

Режим x_α , не удовлетворяющий равенству (1) либо условию (2), признается распознаваемым. Пока что неизвестно, удастся ли его распознать, очевидна лишь правомерность постановки задачи распознавания множества потенциально распознаваемых режимов $x_\alpha \in (G_{п.р} = G_\alpha \setminus G_{а.н})$.

Как и в [2–4], считаем, что вектор комплексных входных величин \underline{V} преобразуется в замеры z_i , $i = \overline{1, n}$ – двумерные векторы, в частном случае – комплексы \underline{V}_i . Замеры отображаются точками на уставочных плоскостях A_i , вещественных с координатами z_{i1} , z_{i2} или комплексных с осями $\text{Re}\underline{V}_i$ и $j\text{Im}\underline{V}_i$.

В алгоритмах параллельного и последовательного обучения встречаются разные операции условного отображения. При параллельном обучении условное отображение затрагивает только β -режимы, а при последовательном – еще и α -режимы. При параллельном обучении в областях $S_{\alpha i} = F_{\alpha i}(G_\alpha)$ остаются отображения только тех β -режимов, чьи замеры $S_{\beta i} = F_{\beta i}^{\text{усл}}(G_\beta)$ попадают во все без исключения области $S_{\alpha i}$:

$$z_{\beta i} \in S_{\alpha i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Из множества замеров $z_{\beta i}$, удовлетворяющих условию (3), komponуются блокирующие области $S_{\alpha\beta i} = M(z_{\beta i})$, где M – операция формирования области из множества замеров. Области $S_{\alpha i}$ и $S_{\beta i}$ имеют противоположные предназначения: первые разрешают, а вторые запрещают срабатывание распознающего органа релейной защиты. Разрешающее условие – попадание замеров z_i в соответствующие области $S_{\alpha i}$:

$$z_i \in S_{\alpha i}. \quad (4)$$

Блокирующее условие – попадание всех без исключения замеров z_i в соответствующие области $S_{\alpha\beta i}^{\text{усл}}$:

$$z_i \in S_{\alpha\beta i}^{\text{усл}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4a)$$

Если хотя бы один из замеров нарушает условие (4a), т.е.

$$z_i \notin S_{\alpha\beta i}^{\text{усл}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4б)$$

то блокировка не выполняется. Следовательно, распознающий орган срабатывает при объединении соответствий (4) и (4б).

По аналогии с тем, как соотношения (1) или (2) выделяют из области G_α подобласть абсолютно нераспознаваемых α -режимов $G_{а.н}$, условия срабатывания (4) и (4б) выделяют из нее подобласть распознанных α -режимов $G_{\alpha\alpha}$, а условие блокировки (4a) – подобласть потенциально распознаваемых (относительно нераспознаваемых) α -режимов $G_{п.р}$. Объединение областей $G_{а.н}$ и $G_{п.р}$ даёт подобласть всех остающихся нераспознанными режимов, как абсолютно нераспознаваемых, так и потенциально распознаваемых

$$G_{\alpha\beta} = G_{а.н} \cup G_{п.р}. \quad (5)$$

К алгоритму параллельного обучения:

$$S_{\alpha i} = F_{\alpha i}(G_\alpha); \quad (6)$$

$$z_{\beta i} = F_{\beta i}(x_\beta \in G_\beta) \Big|_{z_{\beta i} \in S_{\alpha i}, i = \overline{1, n}}; \quad (7)$$

$$S_{\alpha\beta i}^{\text{усл}} = M(z_{\beta i}), \quad (8)$$

имеет отношение прямое условное отображение β -режимов (7). В противоположность этому к алгоритму последовательного обучения:

$$S_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}(G_\alpha); \quad (9)$$

$$S_{\beta 1} = F_{\beta 1}(G_\beta); \quad (9a)$$

$$S_{\alpha\beta 1} = S_{\alpha 1} \cap S_{\beta 1}; \quad (9б)$$

для $i \geq 2$

$$z_{\alpha i} = F_{\alpha i}(x_\alpha \in G_\alpha) \Big|_{z_{\alpha i} \in S_{\alpha\beta k}, k = \overline{1, i-1}}; \quad (10)$$

$$z_{\beta i} = F_{\beta i}(x_\beta \in G_\beta) \Big|_{z_{\beta k} \in S_{\alpha\beta k}, k = \overline{1, i-1}}; \quad (10a)$$

$$S_{\alpha i} = M(z_{\alpha i}); \quad (11)$$

$$S_{\beta i} = M(z_{\beta i}); \quad (11a)$$

$$S_{\alpha\beta i} = S_{\alpha i} \cap S_{\beta i}, \quad (11б)$$

имеют отношение обратные условные отображения (11) и (11a), осуществляющие рекуррентную связь плоскости A_i с предыдущими плоскостями A_k , $k = \overline{1, i-1}$. Обратные отображения выявляют те α - и β -режимы, которые на всех предыдущих плоскостях A_k отображаются во взаимных областях $S_{\alpha\beta k}$.

Рассмотрим применение обоих методов условного отображения на примере распознавания по-

вреждения какой-либо фазы электрической сети, например фазы *A*, вследствие какого-нибудь неполнофазного замыкания на землю. Информационную базу распознающей структуры релейной защиты в данном случае составят три тока, наблюдаемых в текущем режиме электропередачи, имитационные модели которой приведены на рис. 1. Параметры имитационных моделей по рис. 1, варьируемые независимо друг от друга, приведены далее:

Параметры α - и (или) β -моделей	Диапазоны изменения
$x_{f\alpha}, x_{f\beta}$	$0 \div l$
$R_{fA\alpha}, R_{fB\alpha}, R_{fC\alpha}$	$0 \div R_{\text{прд}}$
$R_{fB\beta}, R_{fC\beta}$	$0 \div \infty$
$\delta = \arg(E_s / E_r)$	$-60^\circ \div 60^\circ$
X_{s1}	$140 \div 161,72 \text{ Ом}$
X_{r1}	$100 \div 110,39$
X_{s0} / X_{s1}	$0,4 \div 0,5$
X_{r0} / X_{r1}	$2,5 \div 3,0$

Заметим, что при двухфазных земляных КЗ варьируется на одно переходное сопротивление больше, чем при однофазных КЗ. Фиксированы напряжения источников: $E_s = E_r = U_{\text{ф,ном}} = (500 / \sqrt{3})$ кВ, длина линии $l = 278,6$ км, первичные параметры линии прямой и нулевой последовательностей в Ом/км: $X_1^0 = 0,302$; $R_1^0 = 0,12$; $X_0^0 = 0,696$; $R_0^0 = 0,27$. Потери в передающей и приемной системах не учитывались, что ухудшало условия распознавания аварийных режимов. Предельное значение $R_{\text{прд}}$

переходных сопротивлений в α -режимах определялось из условия распознавания всего множества G_α , иначе говоря, из условий $G_\alpha \equiv G_{\alpha\alpha}$, $G_{\alpha\beta} \equiv 0$.

Гальваническая связь с землей одной из фаз электрической системы, в данном случае фазы *A*, сложное событие. Сложность обусловлена, во-первых, существованием трех разнотипных α -режимов: однофазного КЗ $K_{A\alpha}^{(1)}$ и двухфазных $K_{AB\alpha}^{(1)}$, $K_{CA\alpha}^{(1)}$, а во-вторых, их противостоянием с тремя β -режимами: однофазными КЗ $K_{B\beta}^{(1)}$, $K_{C\beta}^{(1)}$ и двухфазным $K_{BC\beta}^{(1)}$. Создание информационного портрета структуры, распознающей сложное повреждение объекта, начинается с разграничения противостоящих элементарных событий. В данной задаче насчитывается девять таких пар, обозначаемых по типу $K_{A\alpha}^{(1)} | K_{B\beta}^{(1)}$ с разделительной чертой между обозначениями соответствующих α - и β -режимов. Каждое элементарное противостояние будет разрешаться отдельным распознающим модулем, а вся распознающая структура будет насчитывать девять модулей, группируемых по три логических операции И (рис. 2). В итоге создаются три подгруппы модулей, каждая из которых сигнализирует о причастности фазы *A* к какому-либо одному из трех возможных видов замыканий на землю. Заметим, что на структуру рис. 2 не возлагается задача распознавания того вида замыкания, при котором оказалась поврежденной фаза *A*, поскольку допускается одновременное срабатывание каких-либо двух или даже всех трех подгрупп модулей, входя-

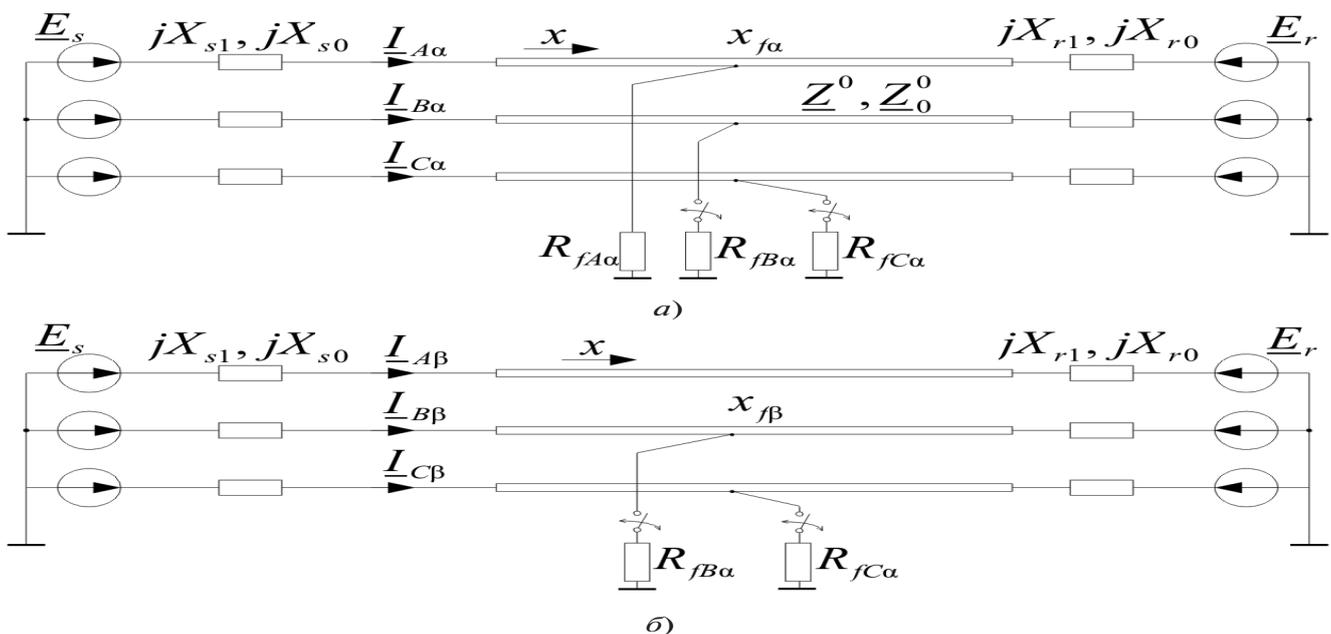


Рис. 1. Имитационные модели электропередачи в α -режимах (а) и в альтернативных им β -режимах (б)

ших в эту структуру. Повреждение фазы *B* (или *C*) выявляется её собственной распознающей структурой.

Информационный портрет распознающей

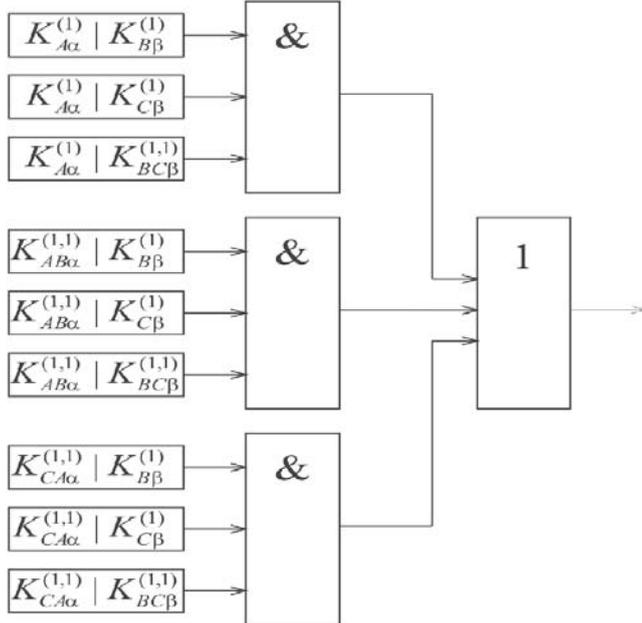
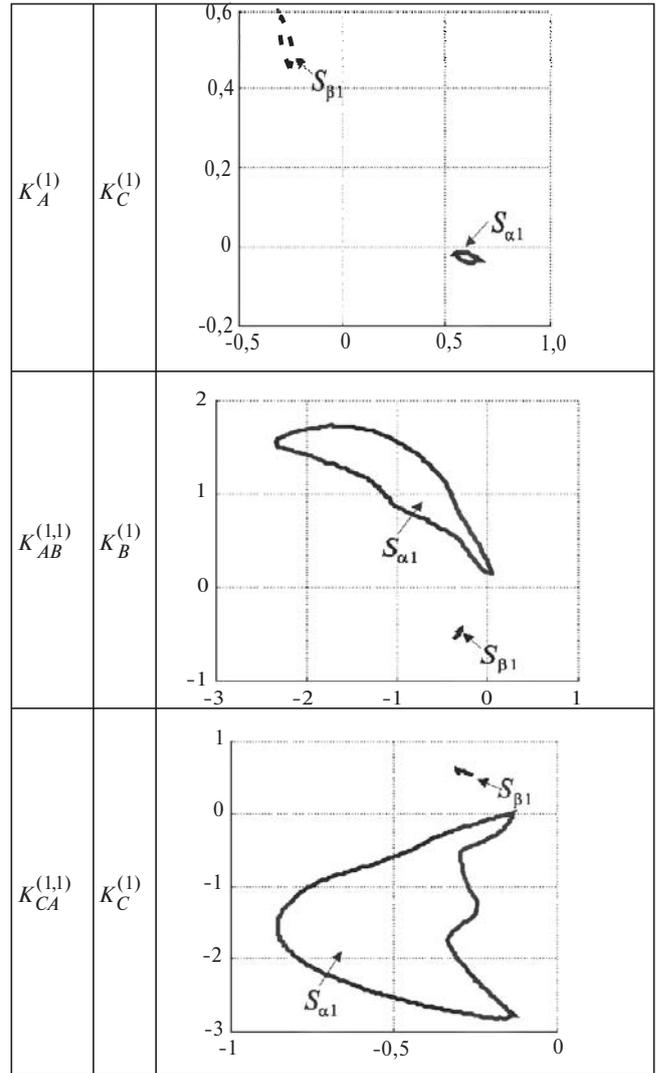
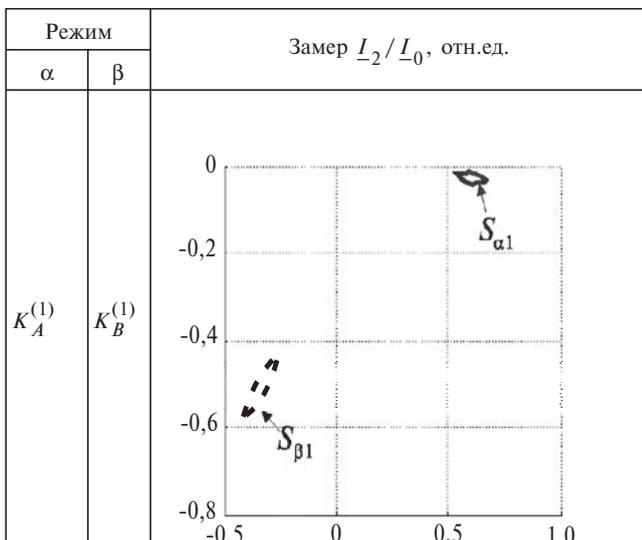


Рис. 2. Структура, распознающая причастность фазы *A* к замыканию на землю

структуры по рис. 2 создан в три этапа и представлен в табл. 1–3. На первом этапе был определен замер, разрешающий автономно часть элементарных противостояний между α - и β -режимами (табл. 1). Таким замером оказалось отношение между токами обратной и нулевой последовательностей I_2 / I_0 . С его помощью удаётся разрешить четыре противостояния из общего числа, равного девяти. Остающиеся пять противостояний не удаётся разрешить на основе какого-либо замера.

Таблица 1



На втором этапе применяется метод последовательных условных отображений, и с его помощью определяются дополнительные замеры, включение которых в общую группу с первым замером I_2 / I_0 позволяет решить остающуюся часть задачи. В результате был найден замер $I_1 (I_2 + I_0)$, характеризующий взаимотношение тока прямой последовательности с суммой токов обратной и нулевой последовательностей. В совокупности с первым замером он позволяет разрешить все пять остающихся противостояний α - и β -режимов (табл. 2). Достижимое при этом предельное значение $R_{пред} = 47$ Ом.

На завершающем третьем этапе применяется метод параллельных условных отображений с тем, чтобы при том же наборе замеров получить более высокую чувствительность, оцениваемую значением $R_{прд}$. Решение задачи обучения модулей, преодолевающее те же пять непростых противостояний, приведено в табл. 3. Значение $R_{прд}$ составило 55 Ом; до этого предела отображения z_i режимов $x_\alpha \in G_\alpha$ удовлетворяют условию (4б) при $n=2$ или, что то же, не удовлетворяют условию (4а). Заме-

Таблица 2

Режим		Замеры	
α	β	I_{-2}/I_{-0} , отн.ед.	$I_{-2}+I_{-0}$, A ²
$K_A^{(1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		
$K_{AB}^{(1,1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		
$K_{AB}^{(1,1)}$	$K_C^{(1)}$		
$K_{CA}^{(1,1)}$	$K_B^{(1)}$		
$K_{CA}^{(1,1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		

Таблица 3

Режим		Замеры	
α	β	I_2/I_0 , отн.ед.	I_2+I_0, A^2
$K_A^{(1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		
$K_{AB}^{(1,1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		
$K_{AB}^{(1,1)}$	$K_C^{(1)}$		
$K_{CA}^{(1,1)}$	$K_B^{(1)}$		
$K_{CA}^{(1,1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		

тим, что повышение чувствительности на 17% стало результатом одной процедуры благодаря предварительным исследованиям, проведенным на двух первых этапах обучения распознающих структур.

Выводы. 1. Информационный портрет распознающей структуры складывается в результате применения нескольких оригинальных методов обучения релейной защиты. Сюда относятся, прежде всего, методы условных отображений как в варианте последовательного обучения, так и параллельного.

2. Информационная интерпретация повреждения защищаемого объекта становится весьма наглядной в форме противостояния совокупности α - и β -режимов. При построении информационного портрета особенно эффективно разделение сложного противостояния на элементарные пары противостоящих режимов с обучением каждого распознающего модуля, разрешающего одно из противостояний на минимально возможном числе уставочных плоскостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. и др. Многомерная релейная защита. Ч.1–3. – Электричество, 2009, №№ 10, 11; 2010, № 1.
2. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалина И.С., Романов Ю.В. Эффекты многомерности при обучении релейной защиты. – Электричество, 2011, № 9.
3. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н., Закончек Я.В. Об информационной теории релейной защиты. – Изв. АЭН РФ, 2009, № 1.

4. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. и др. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч.1–3. – Электричество, 2001, №№ 2, 3, 12.

[17.07.11]

Авторы: Лямец Юрий Яковлевич окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического университета (НПИ) 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».

Мартынов Михаил Владимирович – магистрант Чувашского госуниверситета (ЧГУ). Инженер-исследователь ИЦ «Бреслер».

Нудельман Года Семёнович окончил энергетический факультет НПИ в 1960 г. В 1983 г. защитил в НПИ кандидатскую диссертацию «Токовая направленная защита нулевой последовательности с повышенной эффективностью функционирования для линий электропередачи высокого напряжения». Председатель совета директоров ВНИИР.

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

Воронов Павел Ильич – студент ЧГУ. Техник-исследователь ИЦ «Бреслер».

* * *

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира. Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485