

Обучаемая релейная защита.

Ч.1. Методы условных отображений

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

Приведена классификация методов обучения релейной защиты на нескольких уставочных плоскостях. Методы и вытекающие из них алгоритмы подразделены на два класса: параллельного и последовательного действия. В первом случае обучение на всех плоскостях совершается одновременно. Во втором – в строгой очередности, что упрощает комплектование семейства замеров, отображаемых на плоскостях.

Ключевые слова: релейная защита, обучение, уставочные плоскости, замеры

Очередной этап исследований в области информационной теории релейной защиты принес результаты, дополняющие опубликованные работы [1–5]. Ранее затрагивались те аспекты теории, которые ведут к многомерным структурам релейной защиты [2, 3] и к задаче их обучения, вытекающей из [4], но обобщаемой на произвольное число комплексных или вещественных двухкоординатных замеров [5]. Новые результаты относятся к разработке практически целесообразных методов обучения многомерной защиты, оцениванию её распознающей способности, комплектованию групп замеров из наблюдаемых величин.

Как и в [1–5], будем прибегать к разграничению отслеживаемых и альтернативных режимов (а- и б-режимы). Обучение защиты осуществляется от имитационных моделей а- и б-режимов. Варьируемые параметры имитационных моделей задаются векторами $x_a \in G_a \subset C_a$, $x_b \in G_b \subset C_b$, где G_a и G_b – области определения параметров в объектных пространствах C_a и C_b . Режимы имитационных а- и б-моделей, ассоциируемых соответственно со значениями x_a и x_b , отображаются на n уставочных плоскостях A_i , $i = \overline{1, n}$, в виде замеров $z_{ai} = F_{ai}(x_a)$; $z_{bi} = F_{bi}(x_b)$, где F_{ai} , F_{bi} – операторы преобразований режимов в замеры. Результаты преобразований, сопровождаемых дополнительными условиями, получили название условных отображений режимов защищаемого объекта или же режимов его имитационной модели на плоскостях A_i [5].

A classification of methods for teaching relay protection on a few setpoint planes is presented. The methods and algorithms stemming from them are subdivided into two classes of parallel and sequential action. In the first case, relay protection is taught simultaneously in all planes. In the second case, it is taught in a strict sequence, which makes it easier to set up the family of measurements represented in the planes.

Key words: relay protection, teaching, setpoint planes, measurements

Классификация условных отображений. В [5] рассмотрено условное отображение

$$z_{bi} = F_{bi}^{усл}(x_b), x_b \in G_b, \quad (1)$$

ограничиваемое требованием одновременного попадания всех замеров z_{bi} в области отображения а-режимов:

$$z_{bi}(x_b) \in S_{ai} = F_{ai}(G_a), i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Дальнейшие исследования показали, что существуют и другие типы условных отображений; каждый из них имеет свою область применения в рамках решения общей задачи обучения и сопутствующего ему синтеза структуры защиты.

Различные алгоритмы, реализующие метод условных отображений, представлены в таблице. Они разделены на две группы, различающиеся структурными особенностями процедур обучения модулей релейной защиты. Процедуры поясняются с помощью операций отображения объектных областей или отдельных режимов x на уставочные плоскости A_i . В алгоритмах параллельного типа плоскости равноправны в том смысле, что обучение релейной защиты проводится на каждой из них одновременно и наравне с остальными. В алгоритмах последовательного типа выстраивается иерархическая цепочка обучаемых модулей и уставочных плоскостей соответственно.

Алгоритмы параллельного типа. Группа параллельных алгоритмов подразделена на две подгруппы. В первой не предусматривается деление областей G_a или G_b на отдельные части. Отстройка

Обучение модулей защиты		Схемы рекурсии, условного отображения, критерии	Условия срабатывания	
Структура	Алгоритм			
Параллельная	Без разбиения областей G_α и G_β	Однократное чередование режимов	$a \otimes b$ $S_{ai} = F_{ai}(G_\alpha), i = \overline{1, n},$ $z_{bi} = F_{bi}(x_\beta \hat{G}_\beta) \hat{I} S_{ai},$ $G_\beta = M_x(x_\beta),$ $S_{abi}^{усл} = F_{bi}(G_\beta \hat{I} G_\beta) = M_z(z_{bi})$	$(z_i \hat{I} S_{ai}) \mathbf{I}(z_i \hat{I} S_{abi}^{усл}),$ $i \hat{I} \overline{1, n}$
		Поочередная смена режимов	$a \otimes b$ $z_{ai} = F_{ai}(x_\alpha \hat{I} G_\alpha) \hat{I} S_{abi}^{усл},$ $G_\alpha = M_x(x_\alpha), S_{ai}^{усл} = F_{ai}(G_\alpha),$ $z_{bi} = F_{bi}(x_\beta \hat{I} G_\beta) \hat{I} S_{abi}^{усл},$ $G_\beta = M_x(x_\beta),$ $S_{abi}^{усл} = F_{bi}(G_\beta \hat{I} G_\beta) = M_z(z_{bi})$	$[(z_i \hat{I} S_{ai}) \mathbf{I}(z_i \hat{I} S_{abi}^{усл})] \mathbf{Y},$ $[(z_i \hat{I} S_{ai}^{усл}) \mathbf{I}(z_i \hat{I} S_{abi}^{усл})]$ $i \hat{I} \overline{1, n}$
	С разбиением областей	a	Критерий: $S_{abi} \otimes \mathcal{A}$	Объединение групп срабатывания
		b	Критерий: $G_\beta \otimes \mathcal{A}$	Объединение групп блокирования
Последовательная	С прямым однократным ходом рекурсии	$1 \otimes K \hat{I} \otimes K n$ $S_{ai} = F_{ai}(G_\alpha), S_{bi} = F_{bi}(G_\beta),$ $S_{abl} = S_{al} \mathbf{I} S_{b1}, G_{a1} = F_{a1}^{-1}(S_{abl}),$ $G_{b1} = F_{b1}^{-1}(S_{abl}), S_{a2}^{усл} = F_{a2}(G_{a1}),$ $S_{b2}^{усл} = F_{b2}(G_{b1}), S_{ab2}^{усл} = S_{a2}^{усл} \mathbf{I} S_{b2}^{усл},$ $\dots S_{ai}^{усл} = F_{ai}(G_{a, i-1}),$ $S_{bi}^{усл} = F_{bi}(G_{b, i-1}), S_{abi}^{усл} = S_{ai}^{усл} \mathbf{I} S_{bi}^{усл},$ $G_{ai} = F_{ai}^{-1}(S_{abi}), G_{bi} = F_{bi}^{-1}(S_{abi}), \dots$	$\mathbf{Y} \prod_{i=1}^n [(z_i \hat{I} S_{aai}) \mathbf{I} \prod_{k=1}^{i-1} [(z_k \hat{I} S_{abk})]],$ $S_{aai} = S_{ai} \setminus S_{abi}$	
	С повторением рекурсии	$\otimes 1 \otimes \dots \hat{I} \otimes \dots$ $\neg n \dots \neg$		
	С двухсторонней рекурсией	$1 \otimes K \hat{I} \otimes K n$ $1K \neg iK \neg n$		

Примечание. M_x – множество (область режимов), M_z – область замеров, $S_{ai} \setminus S_{abi}$ – разность множеств (областей).

от b-режимов осуществляется блокирующими модулями с областями срабатывания S_{abi} . Семейство блокирующих модулей действует по схеме И (рис. 1). Из первой подгруппы выделен простейший алгоритм с однократным отображением в процессе обучения защиты сначала а-, а затем b-режимов. Достаточно подробно рассмотренный в [5], в таблице он описан безусловным отображением а-режимов $S_{ai} = F_{ai}(G_\alpha)$ и последующим условным отображением b-режимов x_β , отбирающим из них те x_β , отображения которых z_{bi} попадают сразу во все области S_{ai} . Отличие от описания, приведенного в [5], состоит только в том, что предусматривается объединение режимов x_β во множество G_β и уставочные области блокировки $S_{abi}^{усл}$ определяются как отображения объектной области G_β либо как объединение отдельных отображений z_{bi} .

Остающиеся алгоритмы первой подгруппы, предполагающие обучение с поочередным обраче-

нием то к а-, то к b-режимам, преследуют цель обеспечить срабатывание релейной защиты в тех потенциально распознаваемых режимах x_β , отображения которых попадают во все без исключения области $S_{abi}^{усл}$. Структура такого алгоритма

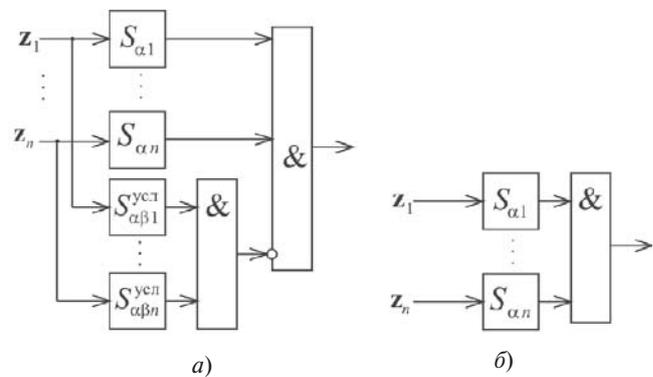


Рис. 1. Простейшая структура распознающего органа параллельного типа: а – при выполнении условия (2) для каких-либо значений $x_\beta \hat{I} G_\beta$; б – при невыполнении условия (2) во всей области G_β

приведена на рис. 2, а операции, дополняющие предыдущий алгоритм, указаны в таблице. Повторное обращение к а-режимам заключается в поиске тех из них, что блокируются областями $S_{abi}^{усл}$, в определении их множества $G_{\mathcal{G}}$ и его отображении на уставочных плоскостях в форме второго семейства областей срабатывания $S_{\mathcal{G}i}^{усл} = F_{ai}(G_{\mathcal{G}})$. Затем в той же последовательности, что и на первом шаге, определяются блокирующие области $S_{\mathcal{G}bi}^{усл}$ – части областей $S_{\mathcal{G}i}^{усл}$. Только на этот раз имеется возможность отображать не всю область G_b , а лишь её часть $G_{\mathcal{G}}$. В результате определяются те b-режимы $x_{\mathcal{G}}$, отображения которых $z_{\mathcal{G}i}$ попадают сразу во все области $S_{\mathcal{G}i}^{усл}$. Множества этих отображений образуют области $S_{\mathcal{G}abi}^{усл}$, а множество $G_{\mathcal{G}}$ режимов $x_{\mathcal{G}}$ будет говорить о том, от какой части b-режимов надлежит блокировать второе семейство областей срабатывания защиты $S_{\mathcal{G}i}^{усл}$. На рис. 2 изображена соответствующая структура, состоящая из основной группы модулей ОГ и из дополнительной группы ДГ.

Вторая подгруппа параллельных алгоритмов предполагает разбиение на отдельные части исходных областей либо G_a , либо G_b , а возможно, их обеих. Общая цель таких разбиений состоит в повышении эффективности распознавания а-режимов, трудно отличимых от b-режимов. Разбиение

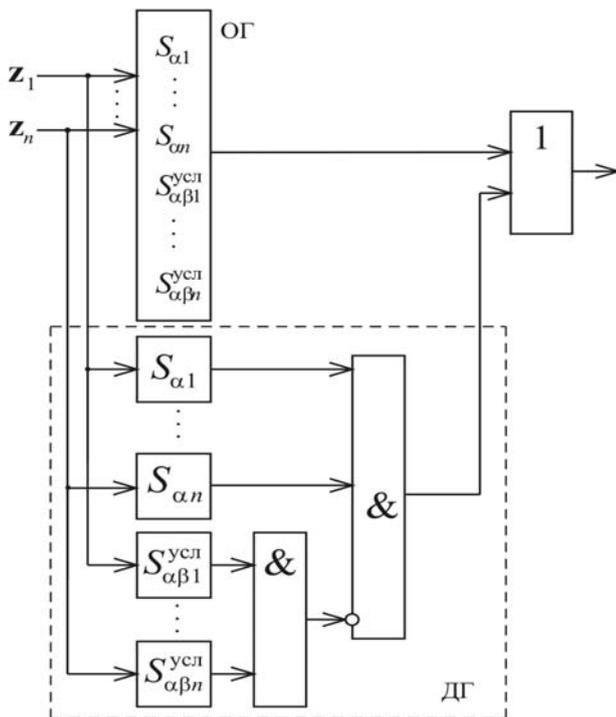


Рис. 2. Структура алгоритма параллельного типа с очередностью обучающих режимов а @ b @ а @ b. ОГ – основная группа; ДГ – дополнительная

области G_a дает возможность исключить блокировку от b-режимов как таковую. Если область G_a дробится на составные части DG_a , то им будут отвечать подобласти срабатывания $DS_{ai} = F_{ai}(DG_a)$. Разбиение области G_b на составные части DG_b преследует иные цели. Области срабатывания защиты остаются неизменными, это $S_{ai} = F_{ai}(G_a)$, а области блокирования образуются семействами DS_{ab} , определяемыми верхним алгоритмом таблицы:

$$z_{bi} = F_{bi}(x_{\mathcal{G}} \hat{=} DG_b) \hat{=} S_{ai};$$

$$DG_{\mathcal{G}} = M_x(x_{\mathcal{G}});$$

$$DS_{abi} = F_{bi}(DG_{\mathcal{G}}) = M_z(z_{bi}).$$

Полное распознавание всех режимов $x_a \hat{=} G_a$ обеспечивается в том случае, если отображения z_{ai} не попадают одновременно во все ячейки DS_{abi} .

Заметим, что разбиение области G_a с требованием отказа от блокировки выглядит более жёстким, чем разбиение области G_b с сохранением блокировок, но в достаточно мелких ячейках DS_{abi} , не затрагивающих а-режимы. Еще одно замечание относится к особенностям алгоритмов разных подгрупп. Первую подгруппу можно отнести к рекурсивному, а вторую – к нерекурсивному типу, поскольку в первой подгруппе повышение распознающей способности достигается за счет наращивания циклов обучения защиты, а во второй – за счет дробления исходных данных.

Алгоритмы последовательного типа. Эта впервые обсуждаемая разновидность обучающих алгоритмов изначально избавлена от необходимости в блокировке срабатывания релейной защиты. Платой за такое преимущество перед алгоритмами параллельного типа становится строгая иерархия обучаемых модулей и разделение процедуры обучения на n , как минимум, самостоятельных этапов (рис. 3). На каждом, допустим i -м, этапе обучение проводится на одной только собственной плоскости A_i . Примем для упрощения, что область срабатывания модуля защиты определяется как собственная а-область $S_{aa} = S_a \setminus S_{ab} = S_a \setminus S_b$ – разность отображений областей G_a и G_b . Условные отображения здесь применяются начиная со второго этапа. На плоскости A_1 определяются безусловные отображения $S_{a1} = F_{a1}(G_a)$, $S_{b1} = F_{b1}(G_b)$, их пересечение

$$S_{abl} = S_{a1} \cap S_{b1} \tag{3}$$

и собственная а-область

$$S_{aal} = S_{a1} \setminus S_{abl} \tag{4}$$

Условия отображения на плоскости A_2 и последующих плоскостях связаны с выделением тех а- и б-режимов, которые не удалось отличить друг от друга на плоскости A_1 . Соответствующие операции представляют собой обратные преобразования взаимной области S_{abl} , а именно

$$G_{a1} = F_{a1}^{-1}(S_{abl}); G_{b1} = F_{b1}^{-1}(S_{abl}), \quad (5)$$

и теперь уже условных отображений на плоскость A_2 :

$$S_{a2}^{усл} = F_{a2}(G_{a1}); S_{b2}^{усл} = F_{b2}(G_{b1}), \quad (6)$$

где в общем случае обнаружатся своя взаимная область

$$S_{ab2}^{усл} = S_{a2}^{усл} \cap S_{b2}^{усл} \quad (7)$$

и остающаяся после её исключения область срабатывания второго модуля

$$S_{aa2}^{усл} = S_{a2}^{усл} \setminus S_{b2}^{усл}. \quad (8)$$

Если бы оказалось, что области $S_{a2}^{усл}$ и $S_{b2}^{усл}$ не пересекаются, это означало бы, что на плоскостях A_1 и A_2 все а-режимы из объектной области распознаются без изъятий. Но в общем случае наращивание группы распознающих модулей потребует продолжения в той же последовательности, что и (5)–(8):

$$G_{a,i-1} = F_{a,i-1}^{-1}(S_{ab,i-1}^{усл}); \quad (9)$$

$$G_{b,i-1} = F_{b,i-1}^{-1}(S_{ab,i-1}^{усл}); \quad (10)$$

$$S_{ai}^{усл} = F_{ai}(G_{a,i-1}); \quad (11)$$

$$S_{bi}^{усл} = F_{bi}(G_{b,i-1}); \quad (12)$$

$$S_{abi}^{усл} = S_{ai}^{усл} \cap S_{bi}^{усл}; \quad (13)$$

$$S_{aai}^{усл} = S_{ai}^{усл} \setminus S_{bi}^{усл}. \quad (14)$$

Рекурсия (9)–(14) доводится до последней плоскости A_n , а далее может быть возвращена на плоскость A_1 или же повернута в обратную сторону.

Процедура обучения релейной защиты по методу условных отображений (рис. 4). Вне зависимости от типа применяемого условного отображения проце-

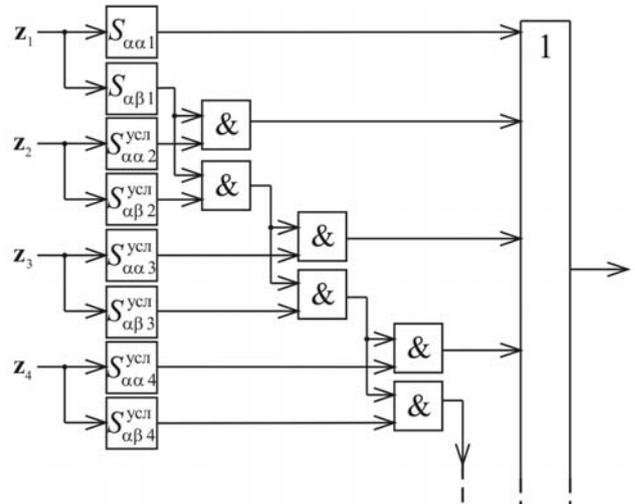


Рис. 3. Структура алгоритма последовательного обучения с прямым ходом рекурсии

дура обучения включает в себя следующие обязательные этапы.

1. Исследование режимов области G_a на абсолютную нераспознаваемость: определение подобласти $G_{a,n}$ абсолютно нераспознаваемых режимов, изъятие её из области G_a , вследствие чего остается множество потенциально распознаваемых режимов $G_{п.р} = G_a \setminus G_{a,n}$ (рис. 4,а). Дальнейшая задача – до-

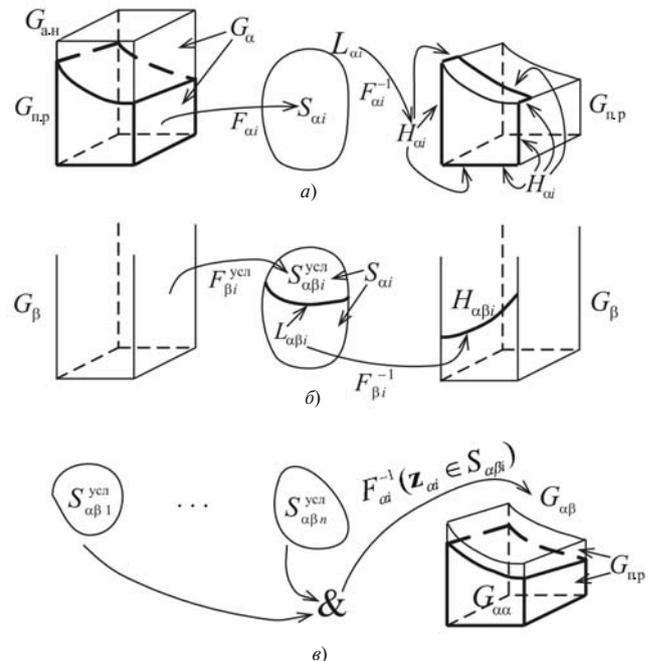


Рис. 4. Иллюстрация процедуры обучения многомерной защиты: а – разделение области G_a на абсолютно нераспознаваемую $G_{a,n}$ и потенциально распознаваемую $G_{п.р}$ части; отображение $S_{ai} = F_{ai}(G_{п.р})$ и определение прообраза $H_{ai} = F_{a1}^{-1}(L_{ai})$ граничной линии L_{ai} ; б – условное отображение $S_{alpha_beta}^{усл} = F_{beta}^{усл}(G_beta)$ области альтернативных режимов и определение прообраза $H_{alpha_beta} = F_b^{-1}(L_{alpha_beta})$ линии раздела L_{alpha_beta} ; в – определение области распознавания $G_{aa} \dot{\cap} G_{п.р}$

биться практического распознавания как можно большей части области $G_{п.р}$.

2. Подбор группы замеров z_i и уставочных плоскостей A_i , $i=1, n$, соответственно. Здесь возможны конкурирующие между собой варианты. Оптимальный вариант появится лишь по завершению всех этапов. Общая рекомендация: желательнее располагать такими плоскостями A_i , на которых образуются компактные односвязные отображения S_{ai} области $G_{п.р}$. Алгоритмы последовательного обучения имеют на данном этапе очевидное преимущество перед параллельными алгоритмами благодаря тому, что вводят в действие уставочные плоскости поочередно, создавая тем самым представление об эффективности каждой из них в отдельности.

3. Отображение объектной области $G_{п.р} \cap G_a$ на плоскостях A_i : результат отображения – плоские уставочные области $S_{ai} = F_{ai}(G_{п.р})$ (рис. 4,а), окаймляемые граничными кривыми L_{ai} , которыми и задаются области S_{ai} . Поиск граничных линий L_{ai} и их прообразов в объектном пространстве $H_{ai} = F_{ai}^{-1}(L_{ai})$ является важной самостоятельной задачей. Согласно свойству соразмерности [4] прообразы границ имеют ту же размерность, что и сами границы. Коль скоро L_{ai} – линия, то и её прообраз H_{ai} – геометрическое место режимов, отображаемых на границу уставочной области S_{ai} , также представляет собой линию (рис. 4,а), гладкость которой на отдельных участках служит критерием точности построения границы.

4. Условное отображение области G_b на уставочных областях S_{ai} (рис. 4,б), определение взаимных областей S_{abi} и, главное, разграничительной линии L_{abi} . Определение её прообраза – множества b -режимов H_{abi} .

5. Определение множества G_{aa} распознанных режимов – тех a -режимов, на которые реагирует защита, прошедшая обучение на n уставочных плоскостях (рис. 4,в). В общем случае останется часть потенциально распознаваемых режимов $G_{ab} \cap G_{п.р}$, не вошедших в область распознавания G_{aa} . Чтобы распознать и их тоже, необходимо прибегнуть к дроблению G_{ab} или к иным приемам, повышающим распознающую способность защиты.

Вывод. Методы условных отображений создают теоретическую базу для разработки алгоритмов обучения многомерной релейной защиты, оперирующей совокупностью замеров, каждый из которых отображается на соответствующей уставочной плоскости. Алгоритмы последовательного обучения

служат инструментом подбора совокупности замеров. Алгоритмы параллельного обучения призваны использовать в полной мере информационные свойства созданного объединения замеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н., Закончек Я.В. Об информационной теории релейной защиты. – Изв. АЭН РФ, 2009, № 1.
2. 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.
3. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Романов Ю.В. Формирование информационной базы многомерной релейной защиты. – Изв. АЭН РФ, 2010, №1 (6).
4. 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; ч. 2. Обучение реле сопротивления; ч. 3. Обучение защит с абсолютной селективностью. – Изв. вузов. Электромеханика, 2009, № 4; 2010, № 2; № 4.
5. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалина И.С., Романов Ю.В. Эффекты многомерности при обучении релейной защиты. – Электричество, 2011, № 9.

[05.07.11]

А в т о р ы : 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) по программе «Автоматика энергосистем». 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».