



PS1 – S1-07



Структуры многомерной релейной защиты

Ю.Я. ЛЯМЕЦ¹, Г.С. НУДЕЛЬМАН², Ю.В. РОМАНОВ³, М.В. МАРТЫНОВ³,
П.И. ВОРОНОВ³

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова¹,
ОАО «ВНИИР»², ООО «ИЦ «Бреслер»³
Россия

www.romanov_uv@ic-bresler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Релейная защита, наблюдатель, электрическая система, режимы.

1 ВВЕДЕНИЕ

С годами память разрабатываемых терминалов микропроцессорной защиты становится всё обширнее, а источников информации о состоянии электрической системы – всё больше. В таких условиях релейная защита способна всё отчётливее проявлять основополагающие черты интеллектуального наблюдателя – способность к распознаванию, адаптации, обучению. В докладе делается акцент на обучение, итогом которого становится задание областей срабатывания и блокировок органов релейной защиты – процедура, обобщающая алгоритмы расчёта уставок. Теоретически возможен известный из вычислительной геометрии путь тесселяции, т.е. построения области срабатывания в многомерном пространстве. Однако практически целесообразным на сегодняшний день представляется иной путь, учитывающий возможности реализации обучающих алгоритмов. Вместо пространства высокой размерности вводится в рассмотрение совокупность двумерных подпространств – вещественных или комплексных плоскостей, на каждой из которых отображается один из замеров, формируемых в терминале защиты [1].

В информационной теории релейной защиты ключевую роль играет представление о противостоящих режимах – отслеживаемых (α -режимы) и альтернативных (β -режимы) [2]. Защита призвана срабатывать в α -режимах, в то время как срабатывание во всех без исключения β -режимах категорически запрещено. Противостояние состоит в том, что второе условие противоречит первому, ограничивая в той или иной мере чувствительность защиты к α -режимам. Именно по этой причине нереально ставить перед защитой задачу срабатывания во всех без исключения α -режимах. Приходится довольствоваться более мягким условием приближения распознающей способности защиты к распознаваемости α -режимов [3]. Распознаваемость – физическое свойство наблюдаемого объекта, проявляющееся сильнее или слабее в зависимости от числа варьируемых параметров имитационных моделей объекта, а также от размера и характера информационной базы релейной защиты как его наблюдателя.

В докладе предлагается проводить обучение, пользуясь оригинальными методами преобразования информации и преодоления противостояния α - и β -режимов. Это, во-первых, методы условных отображений наблюдаемых режимов [4], а во-вторых, методы разделения противостоящих групп режимов на элементарные противостояния. Согласно методам условных отображений, α -режимы, воспроизводимые соответствующими имитационными моделями (α -модели), в процессе своего преобразования не сковываются какими-либо условиями, в то время как на отображения β -режимов накладываются строгие ограничения, благодаря которым

чувствительность защиты при неизменной информационной базе ощутимо повышается. Далее на примерах демонстрируются возможности каждой из двух разработанных модификаций условных отображений – последовательной, когда замеры участвуют в процедуре обучения друг за другом, и параллельной, когда замеры вместе со своими плоскостями образуют группу совместного обучения. Учителями во всех случаях служат имитационные модели защищаемого объекта.

Противостоящие группы режимов, о которых идёт речь в методах элементарных противостояний, могут иметь как естественное, так и искусственное происхождение. В первом случае решается задача распознавания ситуации, встречающейся в нескольких типах α -режимов и не встречающейся в некоторых типах β -режимов. Во втором случае области определения параметров α - и (или) β -моделей дробятся на отдельные части – подобласти определения различных типов α - и (или) β -режимов. Элементарные противостояния имеют место между каждым из типов α -режимов и каждым из типов β -режимов. Результатом преодоления элементарных противостояний становится информационный портрет наблюдателя.

2 УСЛОВНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ

Режимы имитационных моделей объекта в α - и β -режимах задаются m_α и m_β -мерными векторами параметров $\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha \subset C_\alpha$, $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta \subset C_\beta$, где G_α и G_β – области определения параметров в объектных пространствах C_α и C_β . Наблюдатель преобразует сигналы имитационных моделей в замеры $\mathbf{z}_i, i = \overline{1, n}$, – двумерные векторы с координатами z_{i1} и z_{i2} , отображаемые на уставочных плоскостях A_i .

Различаются процедуры параллельного и последовательного условного отображения. Параллельное затрагивает только β -режимы, а последовательное – ещё и α -режимы. Алгоритм параллельного отображения включает в себя операцию безусловного отображения объектной области G_α на все n плоскостей A_i , в результате чего образуются плоские фигуры $S_{\alpha i}$. Далее осуществляется условное отображение области G_β в пределах фигур $S_{\alpha i}$. Фиксируются лишь те отображения, которые попадают во все без исключения области $S_{\alpha i}$

$$\mathbf{z}_{\beta i}^{\text{усл}} \in S_{\alpha i}, i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Множество отображений, удовлетворяющих n условиям (1), образуют блокирующие области $S_{\alpha\beta}^{\text{усл}} \subset S_{\alpha i}$. Если каждая из областей $S_{\alpha i}$ выполняет разрешающую функцию, то совокупность подобластей $S_{\alpha\beta i}$ выполняет противоположную функцию блокировки релейной защиты. На рис. 1 приведены две структуры распознающего органа параллельного типа. В одной из них условие (1) выполняется, а в другой – нет, но проверка в процессе обучения наблюдателя оно подлжит в любом случае, и с этой точки зрения всегда сохраняет за собой ключевую роль.

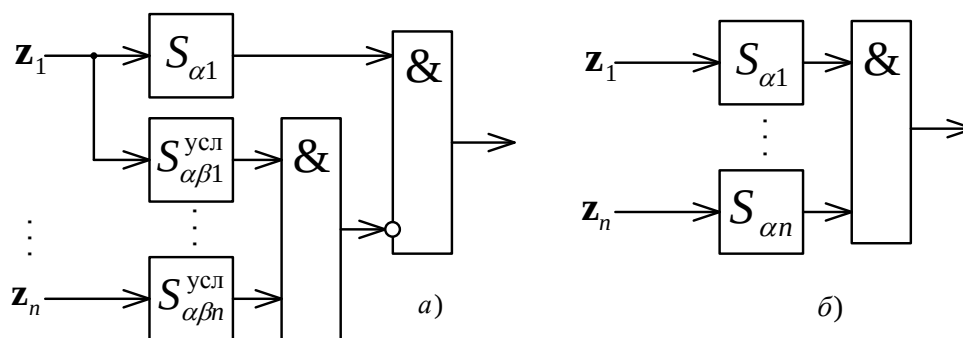


Рис. 1: Структуры распознающего органа параллельного типа
а – при выполнении условия (1) для каких-либо значений $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta$,
б – при невыполнении условия (1) во всей области G_β

3 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ

В этом случае обучение производится в n этапов, следующих друг за другом в строгой иерархической последовательности (рис. 2). На первом этапе выявляется область нераспознанных режимов

$$S_{\alpha\beta 1} = S_{\alpha 1} \cap S_{\beta 1}, \quad (2)$$

где $S_{\beta 1}$, как и $S_{\alpha 1}$, – безусловные отображения областей G_α и G_β . Отображения становятся условными со второго этапа. На i -ом этапе отображение $z_{\alpha i}^{\text{усл}}$ области G_α фиксируется при выполнении $(i-1)$ -го условия

$$z_{\alpha 1} \in S_{\alpha\beta 1}, \quad (3)$$

$$z_{\alpha k}^{\text{усл}} \in S_{\alpha\beta k}^{\text{усл}}, \quad k = \overline{2, i-1}, \quad (4)$$

$$S_{\alpha\beta k}^{\text{усл}} = S_{\alpha k}^{\text{усл}} \cap S_{\beta k}^{\text{усл}}. \quad (5)$$

Отображение $z_{\beta i}^{\text{усл}}$ области G_β фиксируется при таком же числе соответствующих условий

$$z_{\beta 1} \in S_{\alpha\beta 1}, \quad (6)$$

$$z_{\beta k}^{\text{усл}} \in S_{\alpha\beta k}^{\text{усл}}, \quad k = \overline{2, i-1}. \quad (7)$$

Операции (3)-(7) осуществляют рекуррентную связь уставочной плоскости A_i с предшествующими плоскостями A_k , $k = \overline{1, i-1}$.

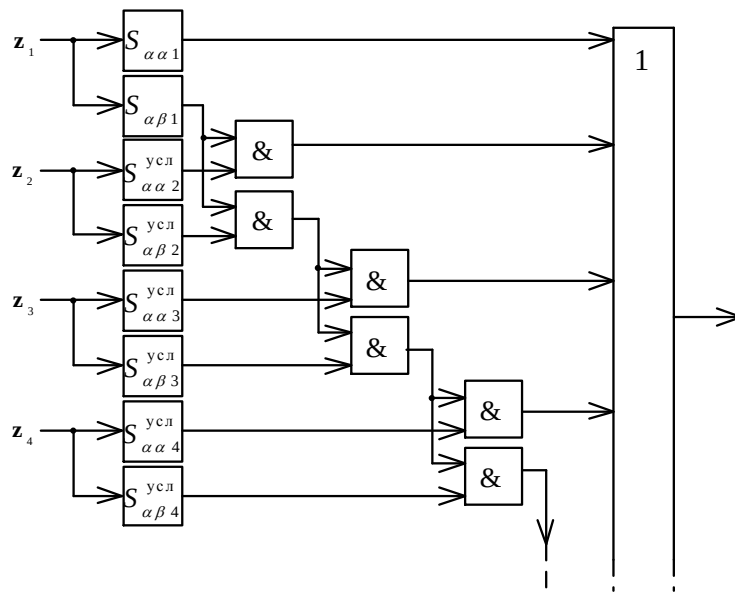


Рис. 2: Структура распознающего органа последовательного типа

4 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОТИВОСТОЯНИЯ РЕЖИМОВ

Возьмём пример естественного сложного противостояния режимов, на котором проиллюстрируем процедуры разделения на элементарные противостояния и построения информационного портрета распознающих структур по рис. 1 и 2. Допустим, решается задача фазовой селекции при земляных замыканиях. Требуется распознать повреждение одной из фаз электрической системы, скажем, фазы А. Сложность данного события обусловлена тем, что возможны три разнотипных α -режима: однофазное КЗ $K_{A\alpha}^{(1)}$ и двухфазные $K_{AB\alpha}^{(1,1)}$ и $K_{CA\alpha}^{(1,1)}$, а также три разнотипных β -режима: однофазные КЗ $K_{B\beta}^{(1)}$, $K_{C\beta}^{(1)}$ и двухфазное $K_{BC\beta}^{(1,1)}$. Как видим, сложное противостояние в данном примере состоит из девяти элементарных. На рис. 3 каждое элементарное противостояние обозначено по типу $K_{A\alpha}^{(1)} | K_{B\beta}^{(1)}$. В структуре, распознающей гальваническую связь фазы А с землёй, каждое элементарное противостояние преодолевается

автономным модулем, а все девять модулей группируются по три операциями И. Группа сигнализирует о возможной причастности фазы А к соответствующему виду замыкания на землю, однако не гарантирует распознавания вида замыкания, так как здесь не исключается одновременное срабатывание двух или всех трех групп модулей в составе структуры по рис. 3.

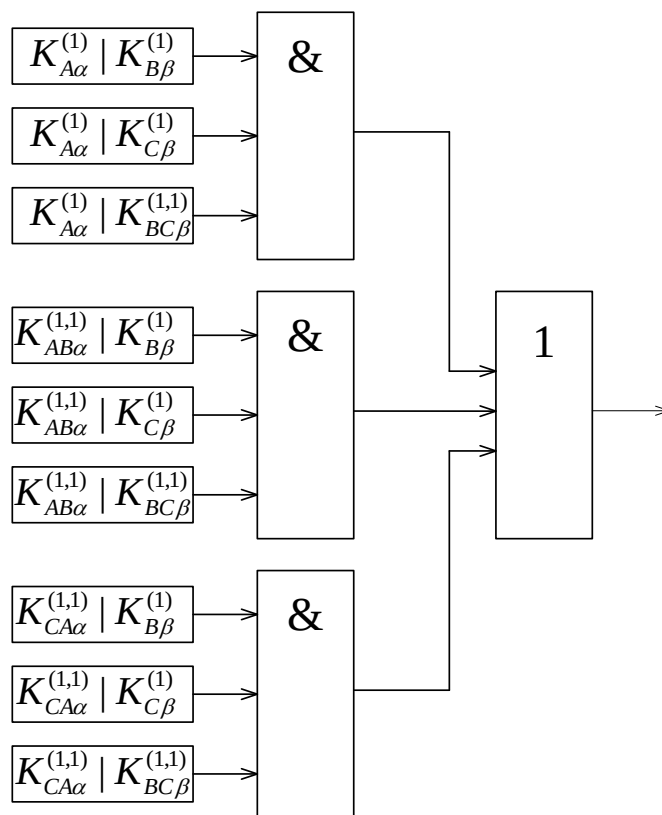


Рис. 3: Структура, распознающая гальваническую связь фазы А с землей

5 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОРТРЕТ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Построением информационного портрета решается следующая задача. Даны имитационные модели наблюдаемого объекта, например линии электропередачи, в α - и β -режимах (рис. 4). Области определения варьируемых параметров G_α и G_β имитационных моделей заданы диапазонами изменения каждого параметра (табл. 1). Выявлены элементарные противостояния α - и β -режимов, вследствие чего структура наблюдателя строится по типу рис. 3.

Каждый из входящих в неё модулей разрешает одно какое-нибудь элементарное противостояние. Модули обучаются по методам условных отображений. Требуется выяснить, на каких уставочных плоскостях и при каком их числе удастся разрешить каждое из элементарных противостояний.

Предположим, что информационную базу наблюдателя в рассматриваемом примере составляют три тока текущего режима электропередачи, имитационные модели которой приведены на рис. 4. Заметим, что при двухфазных КЗ на землю варьируется на одно переходное сопротивление больше, чем при однофазных КЗ. Фиксированы напряжения источников: $E_s = E_r = U_{ф.ном} = (500/\sqrt{3})$ 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 ухудшает условия распознавания аварийных режимов. Предельное значение $R_{пред}$ переходных сопротивлений в α -режимах определялось из условия распознавания всего множества режимов G_α .

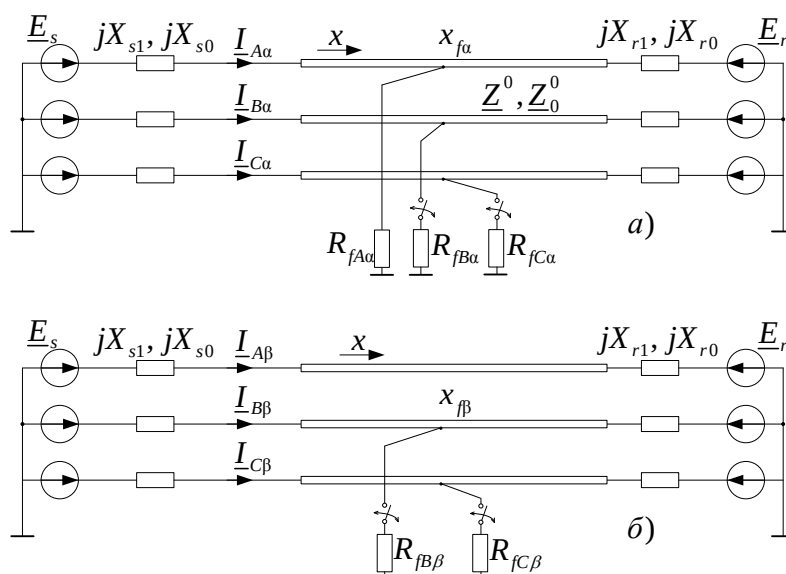


Рис. 4: Имитационные модели электропередачи в α -режимах (а) и в альтернативных им β -режимах (б)

Табл. 1: Варьируемые параметры имитационных моделей по рис. 4

Параметры α - и (или) β -моделей	Диапазоны изменения
$X_{fA\alpha}, X_{fB\beta}$	$0 \dots l$
$R_{fA\alpha}, R_{fB\alpha}, R_{fC\alpha}$	$0 \dots R_{\text{пред}}$
$R_{fB\beta}, R_{fC\beta}$	$0 \dots \infty$
$\delta = \arg(\underline{E}_s / \underline{E}_r)$	$-60^\circ \dots 60^\circ$
X_{s1}	$140 \dots 160 \text{ Ом}$
X_{r1}	$100 \dots 110 \text{ Ом}$
X_{s0} / X_{s1}	$0,4 \dots 0,5$
X_{r0} / X_{r1}	$2,5 \dots 3,0$

Информационный портрет наблюдателя представлен в табл. 2-4. Каждая таблица является итогом одного из этапов его построения. На первом этапе выявлен замер в виде отношения токов обратной и нулевой последовательностей $\underline{I}_2 / \underline{I}_0$, который сам по себе разрешает четыре элементарных противостояния (табл. 2). Остаточные пять потребовали введения ещё одной уставочной плоскости и перехода к условным отображениям. На втором этапе выявлен второй замер $\underline{I}_1(\underline{I}_2 + \underline{I}_0)$ в виде взаимной комплексной мощности двух сигналов – тока прямой последовательности $\underline{I}_1$ и суммы токов обратной и нулевой последовательностей $\underline{I}_2 + \underline{I}_0$. Применение метода последовательных условных отображений к группе из двух замеров разрешает оставшиеся элементарные противостояния (табл. 3). Достигнутое при этом предельное значение $R_{\text{пред}}$ составило 47 Ом.

Метод параллельных условных отображений применен на заключительном третьем этапе с целью повышения чувствительности наблюдателя, характеризуемой значением $R_{\text{пред}}$ (табл. 4). Величина $R_{\text{пред}}$ составила 55 Ом.

Табл. 2: Противостояние режимов, разрешаемое на одной плоскости

Режимы		Замер $\underline{I}_2 / \underline{I}_0$, о.е.
α	β	

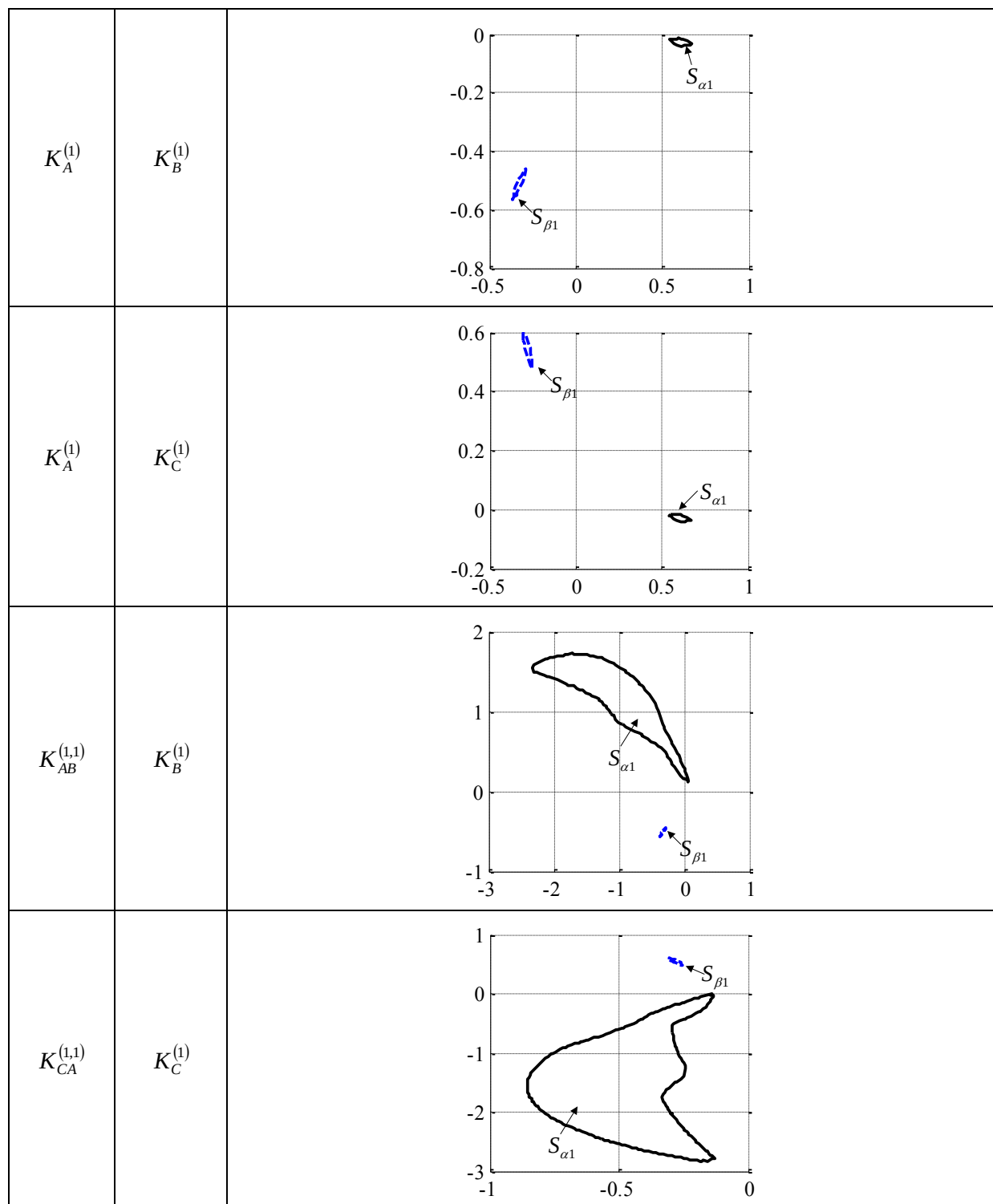


Табл. 3: Последовательные условные отображения на двух плоскостях

Режимы		Замеры	
α	β	$\underline{I}_2 / \underline{I}_0$, о.е.	$\underline{I}_1^* (\underline{I}_2 + \underline{I}_0)^*$, A ² .

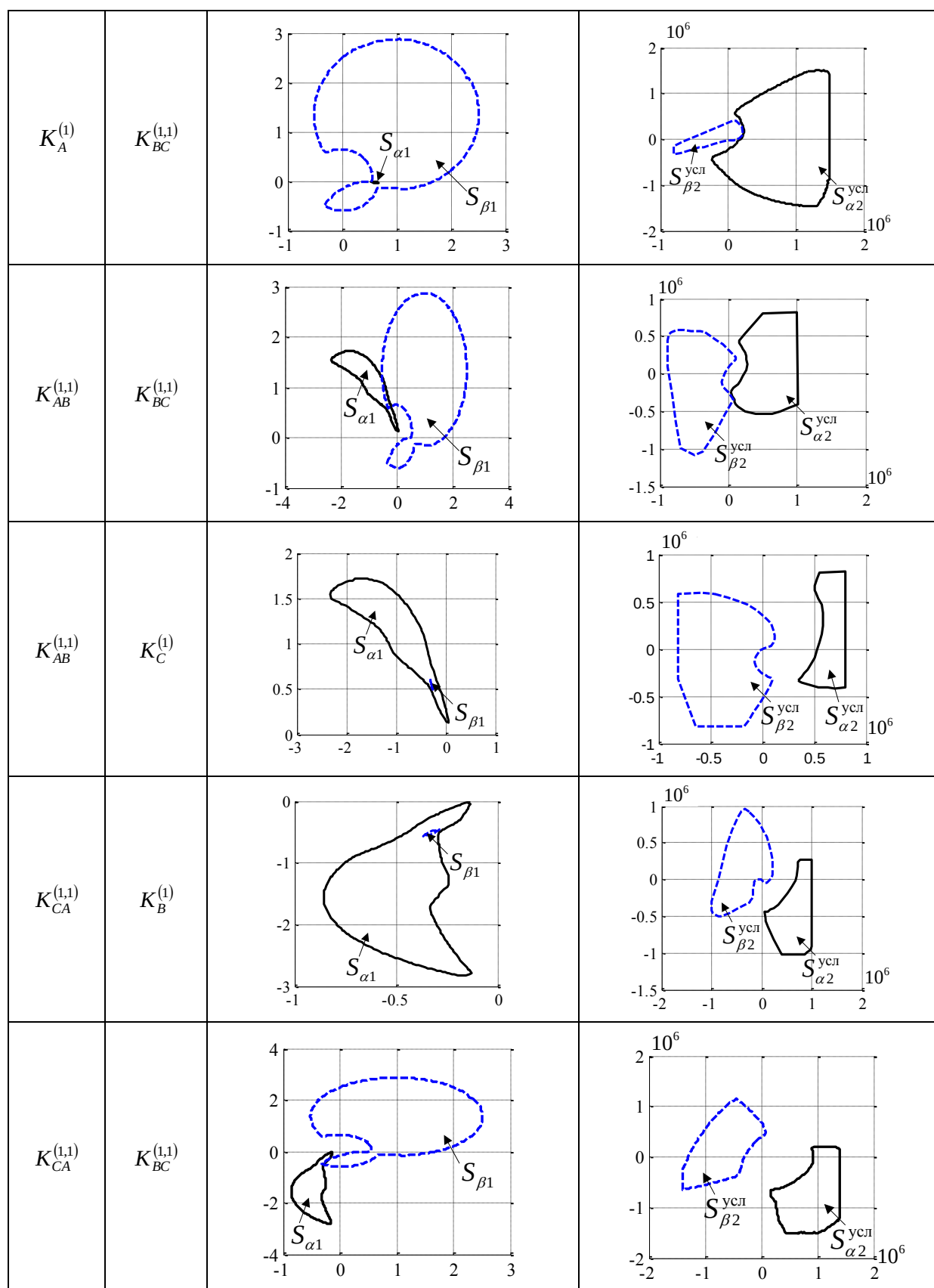
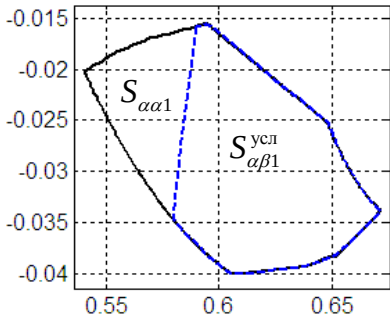
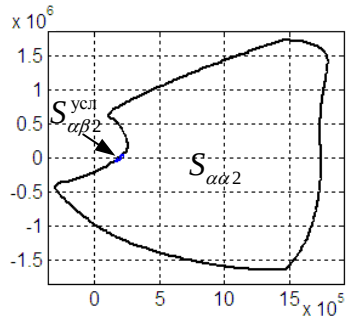
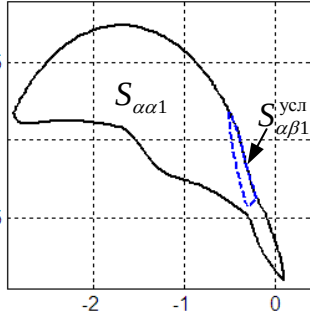
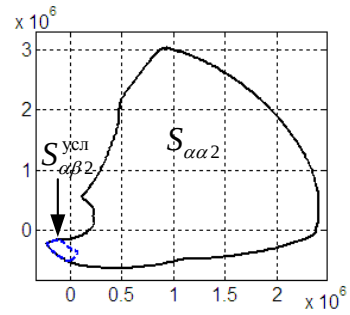
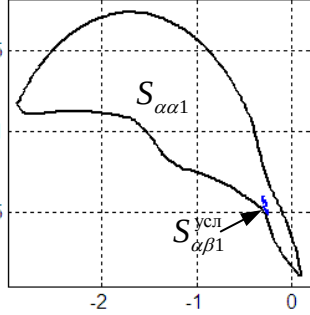
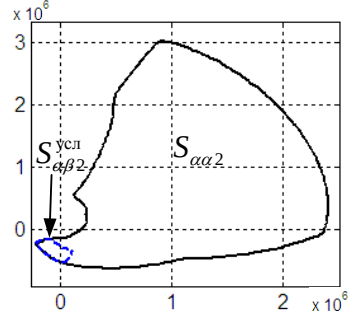
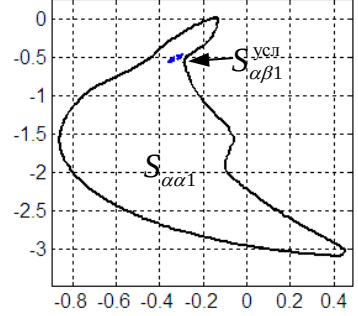
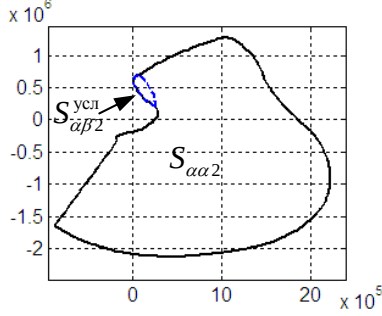
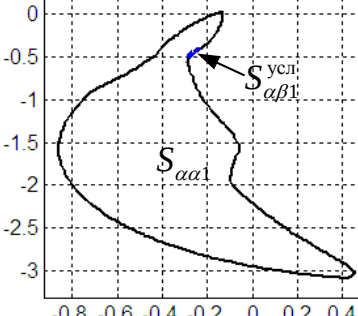
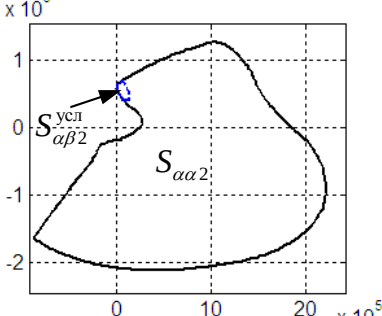


Табл. 4: Параллельные условные отображения на двух плоскостях

Режимы	Замеры
--------	--------

α	β	$\underline{I}_2/\underline{I}_0$, о.е.	$\underline{I}_1 \left(\begin{smallmatrix} * \\ \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \end{smallmatrix} \right), A^2$
$K_A^{(1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		
$K_{AB}^{(1,1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		
$K_{AB}^{(1,1)}$	$K_C^{(1)}$		
$K_{CA}^{(1,1)}$	$K_B^{(1)}$		
$K_{CA}^{(1,1)}$	$K_{BC}^{(1,1)}$		

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерпретация релейной защиты как обучаемого наблюдателя противостоящих α - и β -режимов оказывается продуктивной в целом ряде аспектов. Она закономерным образом повлекла за собой представления об условных отображениях сигналов имитационных моделей в ходе обучения защиты, о разделении сложного противостояния всех типов β -режимов всем типам α -режимам на элементарные противостояния одного типа β -режима одному типу α -режима, о построении информационного портрета задачи распознавания отслеживаемых режимов, решаемой в отдельности для каждого элементарного противостояния. Обобщая, можно заметить, что в результате применения методов условных отображений и разделения сложных противостояний на элементарные происходит своеобразная «атомизация» задач релейной защиты. При этом роль каждого замера определяется не эвристическим путем, а по заранее прописанным чётким правилам.

ЛИТЕРАТУРА

- [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] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н., Закончек Я.В. Об информационной теории релейной защиты. – Известия АЭН РФ, 2009, № 1, С. 32-44.
- [3] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О., Ефимов Е.Б., Закончек Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч.1,2,3. – Электричество, 2001, № 2, С. 16-23; № 3, С. 16-24; № 12, С. 9-22.
- [4] Патент РФ № 2404499, H02H3/40. Способ релейной защиты энергообъекта / Ю.Я. Лямец, С.В. Иванов, А.Н. Подшивалин, Ю.В. Романов, И.С. Подшивалина, БИ, 2010, № 32.