

Алгоритмы релейной защиты с информационной базой произвольного размера

Ю.Я. ЛЯМЕЦ, Г.С. НУДЕЛЬМАН, Ю.В. РОМАНОВ, П.И. ВОРОНОВ,
М.В. МАРТЫНОВ, А.А. БЕЛЯНИН
Исследовательский центр «Бреслер»
ВНИИР
Чувашский государственный университет, кафедра ТОЭ и РЗА
Россия
romanov_uv@ic-bresler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Релейная защита, теоретические основы, обработка сигналов, алгоритмы, модели, граничные задачи.

1 ВВЕДЕНИЕ

Благодаря трудам Г.И. Атабекова [1] теоретические основы релейной защиты (ТОРЗ) дополнили перечень научных дисциплин. Через сорок лет в Чувашском государственном университете (ЧГУ) они стали ещё и учебной дисциплиной на специальности «релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» электроэнергетического факультета (выпускающая кафедра ТОЭ и РЗА). Полезность как научной, так и учебной сторон этой дисциплины никогда не вызывала сомнений, но по мере развития микропроцессорных средств релейной защиты и автоматики (РЗА) она становится всё более востребованной.

Настоящий доклад дополняет прошлогоднее сообщение ЧГУ и исследовательского центра «Бреслер» [2], где работы в области теоретических основ релейной защиты ведутся силами докторантов, аспирантов и магистрантов с привлечением студентов специальности РЗА. В доклад вошли вопросы из относительно новых разделов теоретических основ релейной защиты.

2 ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ РЗА

Интеллект проявляется в способности к распознаванию, адаптации, обучению [3]. В интеллектуальных алгоритмах центральное место занимает граничная задача, касающаяся взаимосвязи режимов защищаемого объекта и характеристик срабатывания защиты. Проиллюстрируем её следующим примером. Имеется имитационная модель объекта – линии с двусторонним питанием (рис.1).

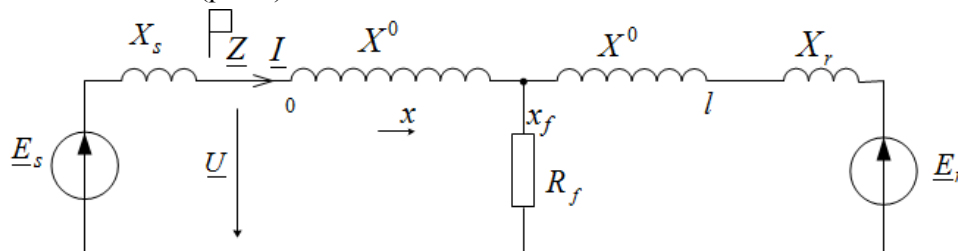


Рис. 1: Имитационная модель двухпроводной линии без потерь в режиме короткого замыкания

Шесть параметров модели варьируются в заданных пределах (табл.1): $K = E_s/E_r$, $\delta = \arg(\underline{E}_s/\underline{E}_r)$, $X_f = X^0 \cdot x_f$, где X^0 – первичный параметр, x_f – координата места замыкания, сопротивления систем X_s и X_r , а также переходное сопротивление R_f . Фиксированы параметры l – длина линии (в расчётах $X^0 l = 100$ Ом) и длина защищаемой зоны $l/2$. Каждый режим имитационной модели определён шестимерным вектором варьируемых параметров $\mathbf{x} = [\delta, X_f, R_f, K, X_s, X_r]^T$. В зоне защиты – это контролируемые α -режимы с $R_{f\alpha \text{ sup}} = 100$ Ом. Вне зоны – альтернативные β -режимы, не имеющие верхнего ограничения на значение переходного сопротивления.

Табл. 1: Диапазоны варьирования параметров модели

№	Параметр	Значения	
		Нижнее inf	Верхнее sup
1	δ , град	-60	60
2	X_f , Ом	0	50
3	R_f , Ом	0	100
4	K , о.е.	0,95	1,05
5	X_s , Ом	0	100
6	X_r , Ом	0	100

В объектном пространстве вектора $\mathbf{x}_\alpha$ область контролируемых режимов G_α отображается на плоскость сопротивлений $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$ в виде плоской фигуры – области замера S_α , ограниченной линией $L_{S\alpha}$. В объектном пространстве линии $L_{S\alpha}$ отвечает прообраз $L_{G\alpha}$ – геометрическое место граничных режимов, отображаемых на линию $L_{S\alpha}$. Границе отображения и её прообразу присущ ряд закономерностей, сформулированных в [4] в виде теорем. Теорема о соразмерности утверждает, что прообразом граничной линии L_S в объектном пространстве любой размерности также является линия $L_G \in G$. Во всех рассматривавшихся примерах оказывалось, что линия прообраза проходит по поверхности объектной области G , не заходя внутрь неё. Вряд ли можно предполагать, что иное не встречается. Но в пользу именно такого поведения прообраза говорит теорема о коллинеарности на линии L_S векторов производных замера по варьируемым параметрам. Если G – многогранник, то прообраз предпочитает путь, идущий по его рёбрам, лишь изредка переходя с одного ребра на другое через соответствующую грань. Движению вдоль ребра многогранника G отвечает изменение только одного параметра имитационной модели $x_i, i \in \overline{1, m}$.

Задача заключается в построении граничной линии $L_{S\alpha}$ и её прообраза $L_{G\alpha}$. Решение приведено на рис. 2 и 3. На преобладающем числе участков линии L_S варьируется только один какой-нибудь объектный параметр. Обход граничной линии L_S сопровождается по преимуществу движением по рёбрам объектной области; движение по граням либо вообще не отображается на плоскости $\underline{Z}$ (участки hi, kl, mn прообраза L_G), либо создаёт малозаметный участок границы, что видно на примере участка *op*.

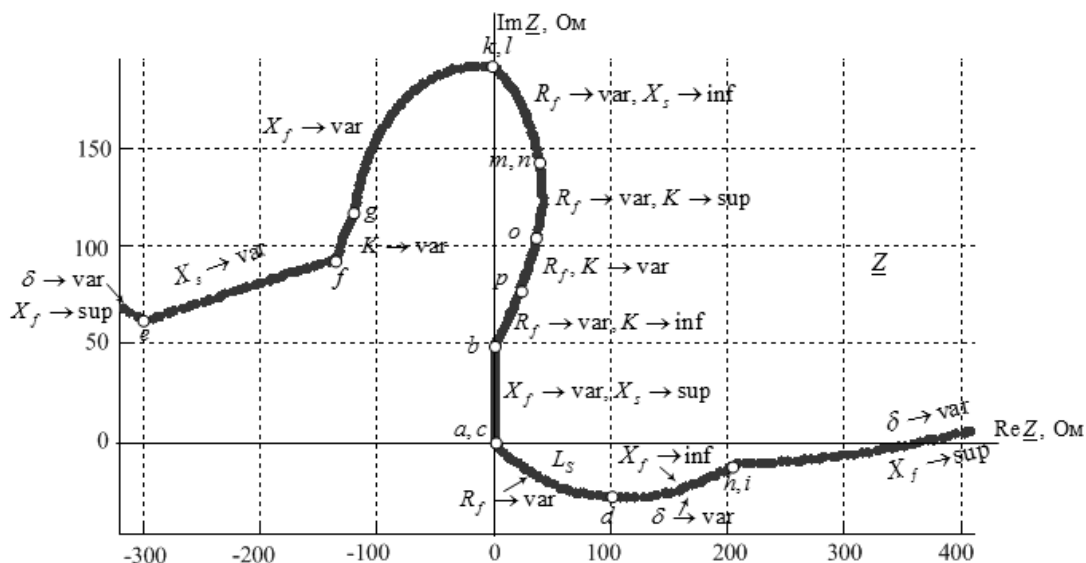


Рис. 2: Линия граничных замеров при отображении режимов имитационной модели, заданных шестимерным многогранником параметров G , на плоскость Z

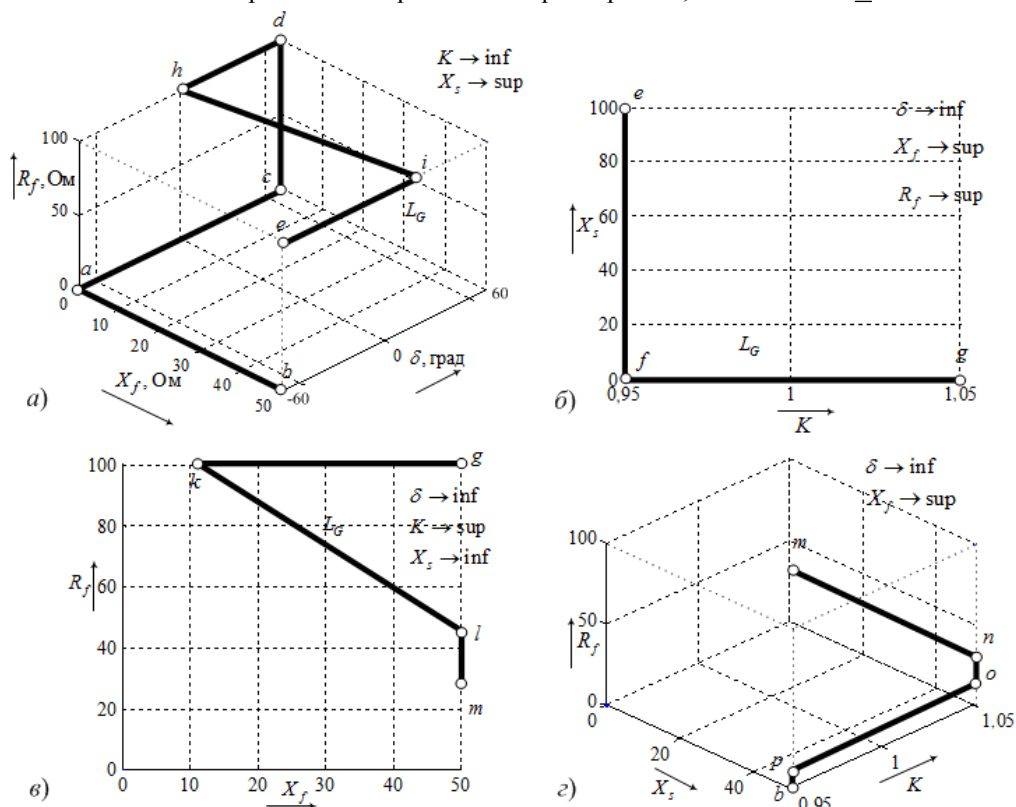


Рис. 3: Прообраз линии граничных замеров в объектных подпространствах

3 АНАЛИЗ И ДЕШУМИЗАЦИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ ПРОЦЕССОВ

Особый интерес для цифровой обработки сложных процессов представляют сингулярный и кратномасштабный анализы. Сингулярному анализу подвергается выборка из N отсчётов наблюдаемой величины: $i(k - N + 1) \dots i(k)$, записанных в дискретном времени $k = \text{ent}(f_d t)$,

f_d – частота дискретизации [5]. Из отсчётов формируется траекторная матрица размера $m \times n$, $m + n = N + 1$

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} i(k-N+1) & \cdots & i(k-N+n) \\ i(k-N+2) & \cdots & i(k-N+n+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ i(k-N+m) & \cdots & i(k) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Пусть $m \geq n$ и количество ненулевых сингулярных чисел $\sigma_p(k)$ матрицы $\mathbf{A}(k)$ равно n . Тогда сингулярное разложение этой матрицы состоит из n слагаемых $\mathbf{A}_p(k)$, каждое из которых связано с одним из сингулярных чисел

$$\mathbf{A}(k) = \sum_{p=1}^n \mathbf{A}_p(k), \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_p(k) = \sigma_p(k) \mathbf{u}_p(k) \mathbf{v}_p^T(k), \quad (3)$$

где $\mathbf{u}_p(k)$ и $\mathbf{v}_p^T(k)$ – ортонормированные векторы, $\mathbf{u}_p(k)$ – m -мерные, а $\mathbf{v}_p(k)$ – n -мерные.

Известно, что сингулярные числа положительны. Запишем их в порядке убывания: $\sigma_1(k) > \sigma_2(k) > \dots > \sigma_p(k) > \dots > \sigma_n(k)$. В каждой задаче, где они используются, существуют критерии, выделяющие из множества n сингулярных чисел подмножество q наибольших по величине, значимых для данной задачи. Отбросив $n - q$ незначительных чисел, понизим ранг матрицы $\mathbf{A}(k)$ до величины q и получим соответствующую оценку исходной матрицы

$$\hat{\mathbf{A}}(k) = \sum_{p=1}^q \mathbf{A}_p(k) = \mathbf{U}(k) \mathbf{S}(k) \mathbf{V}^T(k), \quad (4)$$

$$\mathbf{U}(k) = [\mathbf{u}_1(k), \dots, \mathbf{u}_q(k)], \quad \mathbf{V}(k) = [\mathbf{v}_1(k), \dots, \mathbf{v}_q(k)], \quad \mathbf{S}(k) = \text{diag}(\sigma_1(k), \dots, \sigma_q(k)),$$

где $\mathbf{U}(k)$ – матрица размера $m \times q$, а $\mathbf{V}(k)$ – размера $n \times q$, столбцы этих матриц – суть векторы $\mathbf{u}_p(k)$ и $\mathbf{v}_p(k)$ из формулы (4), $\mathbf{S}(k)$ – диагональная матрица значимых сингулярных чисел.

Каждой частичной матрице $\mathbf{A}_p(k)$ отвечает определённая часть последовательности отсчётов $i(k-N+1) \dots i(k)$ наблюдаемой величины. Преобразование $\mathbf{A}_p(k)$ в $\mathbf{i}_p(k)$ выполняется по методу диагонального усреднения [6].

Подвергнем сингулярному анализу тестовый сигнал, представленный на рис. 4 и описываемый уравнением

$$i(k) = \cos(0,1\pi k) - \exp(-0,1\pi k) + \mathcal{A}(k), \quad (5)$$

где $\mathcal{A}(k)$ – случайная составляющая в виде белого шума, изменяющегося в диапазоне $\pm 0,1$. На рис. 4 также представлены результаты обработки этого сигнала адаптивным фильтром первого порядка ($n-1=1$), описанным в [7]. Рассматривались два варианта: непосредственное применение адаптивного фильтра к сигналу (5) или же применение его после предварительного отделения составляющей $\mathcal{A}(k)$ с помощью сингулярного анализа. Текущее окно наблюдения в обоих случаях охватывало 20 отсчётов при $f_d = 1$ кГц. Как видим, соединение адаптивной фильтрации с сингулярным анализом приводит к ощутимо лучшему результату, чем одна лишь адаптивная обработка входного сигнала.

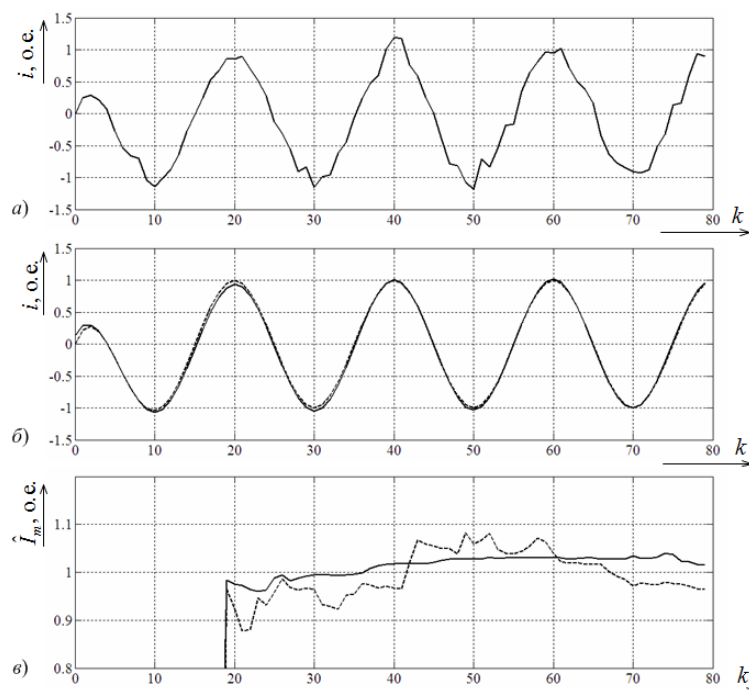


Рис. 4: Сигнал с шумом до и после восстановления

a – исходный сигнал (12); *б* – восстановление посредством сингулярного анализа (сплошная линия), пунктиром показана детерминированная часть исходного сигнала $\cos 0,1\pi k - \exp(-0,1\pi k)$;

в – выделение модуля I_m гармонической составляющей адаптивным фильтром: сплошная линия – с предварительным сингулярным анализом, пунктирная – без такового

Кратномасштабный анализ – разновидность вейвлет-анализа. Включает в себя многоэтапные процедуры декомпозиции и реконструкции, выполняемые с использованием одного и того же набора вейвлет-коэффициентов. Декомпозиция заключается в формировании на каждом этапе сигналов верхней и нижней половины частотного диапазона и в их децимации. Реконструкция производится со своеобразным ограничением (трешолдингом) верхнечастотных сигналов. Благодаря трешолдингу наблюдаемый процесс очищается от шумов. Любопытно, что дешумизация нестационарного процесса, сопровождающегося резким изменением уровня, совершается даже более эффективно, чем стационарного. Необходимо лишь заметить, что окно реконструированного сигнала совпадает с окном наблюдения только в том случае, если применяется вейвлет с двумя коэффициентами (вейвлет Хаара). Чем протяжённее вейвлеты, тем сильнее сокращается число реконструированных отсчётов.

Кратномасштабный анализ удачно сочетается с быстродействующими фильтрами ортогональных составляющих. Он смягчает присущее им негативное свойство усиливать шумы во входных сигналах.

Рассмотрим применение кратномасштабного анализа как дополнения к быстродействующей адаптивной фильтрации ортогональных составляющих входных величин релейной защиты. На рис. 5а приведена реальная осциллограмма тока короткого замыкания на линии 500 кВ «Приморская ГРЭС – подстанция Хехцир-2». На рис. 5б, в пунктиром показаны результаты выделения амплитуды и фазы синусоидальной слагающей адаптивным фильтром, а сплошной линией – итоги применения процедуры кратномасштабного анализа с применением процедуры трешолдинга. Как видим, кратномасштабный анализ обеспечивает дешумизацию обрабатываемого процесса без предварительного его разделения на стационарные участки режимов до и после короткого замыкания. Появляется возможность применять

быстродействующие фильтры ортогональных составляющих, несмотря на то, что они дают усиление шумов во входных сигналах.

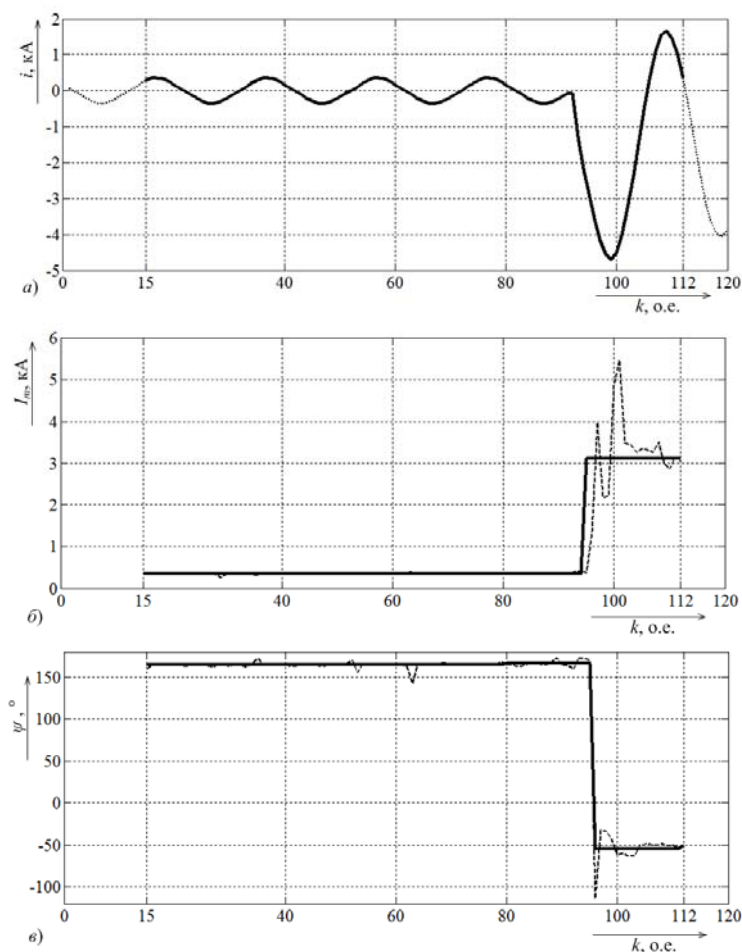


Рис. 5: Результаты обработки реальной осциллограммы тока короткого замыкания

4 АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

В отличие от имитационных моделей, воспроизводящих сигналы реального объекта, алгоритмические модели выполняют функцию преобразования этих сигналов в недоступные наблюдению электрические величины произвольного места объекта, например, места предполагаемого повреждения [8]. Для синусоидального режима алгоритмическая модель строится на основе комплексных матриц обратной передачи многополюсников. В переходном режиме алгоритмическая модель описывается интегральным уравнением Вольтерра. Так, для двухпроводной линии, в общем случае неоднородной, где $u_{\text{вх}}(t)$ и $i_{\text{вх}}(t)$ – наблюдаемые величины начала линии, напряжение $u_{\text{вых}}(t)$ и ток $i_{\text{вых}}(t)$ в произвольном месте линии описываются уравнениями, полученными с помощью интеграла Дюамеля

$$u_{\text{вых}}(0)g(t) + \int_0^t u'_{\text{вых}}(\tau)g(t-\tau)d\tau = i_{\text{вх}}(t) - i_{\text{вх,кз}}(t),$$

$$i_{\text{вых}}(0)h(t) + \int_0^t i'_{\text{вых}}(\tau)h(t-\tau)d\tau = i_{\text{вх}}(t) - i_{\text{вх,хх}}(t),$$

где $g(t)$ – переходная проводимость между выходом и входом, а $h(t)$ – переходная характеристика передачи тока с выхода на вход, индексы "кз" и "хх" обозначают режим на выходе алгоритмической модели при воздействии на вход напряжения $u_{\text{вх}}(t)$.

5 РЗА С РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗОЙ

В настоящее время достигнута техническая возможность объединения результатов наблюдения разных частей сосредоточенного объекта и разных мест протяжённой системы. Алгоритмическая модель способна преобразовывать всю имеющуюся априорную информацию о подконтрольном объекте и текущую информацию о его нынешнем состоянии в напряжения и токи мест предполагаемых повреждений. При двухстороннем наблюдении электропередачи удаётся распознать не только места обычных коротких замыканий, но и замыканий с обрывом проводов и появлением продольных сопротивлений. Заслуживают внимания критерии повреждения. Можно выделить три группы критериев. Простейшие основаны на балансе уравнений модели неповреждённой части сети. Энергетические критерии исходят из резистивности повреждений. Наиболее общий критерий оперирует оценками элементов модели повреждения и невязкой её уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.: Госэнергоиздат, 1957.
- [2] Лямец Ю.Я., Подшивалин А.Н., Романов Ю.В. Теоретические основы релейной защиты: от Атабекова до наших дней. – РЕЛАВЭКСПО-2012, Сборник тезисов и докладов, Чебоксары, 2012, С. 18-23.
- [3] Ю.Я. Лямец, М.В. Мартынов, Г.С. Нудельман, Ю.В. Романов, П.И. Воронов. Обучаемая релейная защита. Ч.1. Методы условных отображений, Ч.2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры. – Электричество, 2012, № 2, С. 15-19, № 3, С. 12-18.
- [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, С. 24-30, 2010, № 2, С. 53-59, № 4, С. 53-58.
- [5] Ю.Я. Лямец, Ю.В. Романов, М.В. Мартынов, П.И. Воронов. Сингулярный анализ процессов в электрических системах. – Изв. РАН. Энергетика, 2012, №5, С. 22-29.
- [6] Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов. – Изд-во С.-Петербургского гос. ун-та, 2004.
- [7] Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания. – Электричество, 2012, №4, С. 9-13.
- [8] Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи. – Электричество, 1996, №12, С. 2-7.