Метод алгоритмических моделей

Обсуждаемый метод и само понятие «алгоритмическая модель» возникли два десятилетия тому назад. К настоящему времени не осталось сомнения в том, что метод алгоритмических моделей оказался эффективным инструментом распознавания факта и места повреждения энергообъекта (задачи защиты и локации). Некоторые черты этого метода, на первый взгляд, представляются парадоксальными и требуют разъяснений. Например, почему моделируется неповрежденный объект, хотя распознается повреждение? Или почему первостепенное внимание обращается на те режимы, в которых объект не поврежден, хотя опять-таки в распознавании нуждается поврежденное состояние? Делается попытка ответить на эти и иные вопросы с помощью элементарного примера.

Авторы:
Лямец Ю.Я.,
Мартынов М.В.,
Маслов А.Н.

К представлениям об алгоритмических моделях привели в свое время две причины. Обе были обусловлены нарастающим интересом к микропроцессорной релейной защите. Первая – техническая, связанная с поиском адаптивных алгоритмов распознавания повреждений линий электропередачи [1–5]. Вторая – методическая. Когда в 1995 г. на кафедре ТОЭ Чувашского университета открылась специальность «релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», сразу же возникла мысль ввести в учебный план дисциплину «теоретические основы релейной защиты (ТОРЗ)», соединяющую курс ТОЭ с курсами релейной защиты и автоматики. Данное научное направление основано в 50-х годах Г.И. Атабековым [6].

С тех пор появились новые задачи. Представляется, что алгоритмические модели могут служить инструментом их решения, будь то задачи релейной защиты или же локации повреждений. Общая задача релейной защиты подчинена требованию селективности действия и заключается в распознавании поврежденного состояния энергообъекта. Задача локации подчинена требованию достижения необходимой точности и заключается в определении места повреждения. Первую задачу решает ограниченное число разнотипных алгоритмических моделей. Во втором случае алгоритмические модели становятся функциями координаты места предполагаемого повреждения. Дальнейшее относится к задаче релейной защиты.

КОНЦЕПЦИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ

Защищаемый энергообъект – часть электрической сети. Пусть вектор $\mathbf{x}$ символизирует режим сети; $\mathbf{x} \in G$, где G – множество режимов. В состав имитационной модели сети входит автономная модель защищаемого объекта. Режимы, обусловленные его повреждением и, следовательно, подлежащие распознаванию, необходимо выделить в особое подмножество G_α. Будем называть их контролируемыми или отслеживаемыми, или, еще проще, α-режимами $\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha$. Остающиеся режимы $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta$ назовем альтернативными или β-режимами. В подмножество G_β входят все нормальные режимы сети, а также повреждения вне защищаемого объекта. Заметим, что $G_\beta \cup G_\alpha = G$.

О защищаемом объекте имеется текущая и априорная информация. Текущая информация предстает в виде вектора токов и напряжений в местах наблюдения: $\mathbf{u}(k) = \left[\mathbf{i}^T(k), \mathbf{u}\ (k)\right]^T$, где k – дискретное время. Априорная информация о структуре и параметрах объекта делает возможным построение модели для его неповрежденного состояния. Она менее определена, чем имитационная модель, не затрагивает остальную часть сети. Более того, в ней могут присутствовать недоопределенные элементы. Например, ветвь намагничивания трансформатора. Или ротор электрической машины. Тем не менее, такие элементы физически обусловлены в том смысле, что их поведение подчиняется известным закономерностям.

Алгоритмическая модель энергообъекта является преобразователем наблюдаемых величин в замеры. Преобразование совершается адекватно реальным процессам, если защищаемый объект

не поврежден, и неадекватно – в случае его повреждения [7, 8]. Таким образом, к числу основных функций релейной защиты относятся следующие:

- разграничение режимов разного типа, что объясняется адекватностью модели наблюдаемому объекту в β-режимах электрической сети и неадекватностью в α-режимах;
- формирование из выходных величин замеров. Это двухкоординатные величины, каждая из них отображается на своей плоскости. На каждый замер реагирует виртуальное реле;
- локализация отображений β-режимов благодаря свойству адекватности и надлежащему подбору замеров;
- обучение виртуальных реле путем активирования алгоритмической модели сигналами имитационной модели, воспроизводящей режимы заданного типа. Прежде всего определяются области отображения S_β множества G_β, что является целью обучения блокирующих виртуальных реле, обеспечивающих селективность действия релейной защиты.

Каждому из разнотипных режимов подмножеств β-режимов может отвечать своя алгоритмическая модель и отдельные виртуальные реле.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ МЕТОДА

Рассмотрим задачу, допускающую аналитическое решение. Требуется разграничить α- и β-режимы сети, которая состоит из линии без потерь, резистивной нагрузки и шин бесконечной мощности (рис. 1). Линия представлена индуктивным сопротивлением X, шины – источником ЭДС $\underline{E}$. Варьируется сопротивление нагрузки R, сопротивление КЗ R_f, а также место КЗ, т.е. сопротивление X_f. Защищаемая часть линии имеет сопротивление X_z. Место КЗ и граница зоны защиты отмечены индексами f и z.

К числу β-режимов в данном примере относятся режимы неизменной нагрузки, которые предшествуют коммутациям (рис. 1а), режимы переключения нагрузки с предшествующего сопротивления R на сопротивление $R_{тк}$ текущего режима (рис. 1б) и режимы КЗ вне защищаемой зоны при $X_f > X_Z$ (рис. 1в). Подлежат распознаванию режимы КЗ в зоне защиты (рис. 1г). Имитационная модель передает наблюдателю – алгоритмической модели – две пары комплексов $\underline{I}_{пд}$, $\underline{U}_{пд}$ и $\underline{I}_{тк}$, $\underline{U}_{тк}$. Об изменении состояния объекта свидетельствует виртуальный чисто аварийный режим (рис. 1д). Авариные составляющие электрических величин: $\underline{I}_{ав} = \underline{I}_{тк} - \underline{I}_{пд}$, $\underline{U}_{ав} = \underline{U}_{тк} - \underline{U}_{пд}$. В данном случае $\underline{U}_{ав} = 0$,

$$\underline{I}_{ав} = \frac{\left(R + j\left(X - X_f\right)\right)^2 \underline{I}_{пд}}{R_f\left(R + jX\right) + jX_f\left(R + j\left(X - X_f\right)\right)}. \quad (1)$$

Алгоритмические модели представлены двумя цепями с расчетом на формирование двух замеров (рис. 2). Индуктивности X и X_Z преобразуют поступающие от объекта величины $\underline{I}$, $\underline{U}$ в алгоритмические напряжения $\underline{U}_1 = \underline{U} - jX\underline{I}$, $\underline{U}_2 = \underline{U} - jX_Z\underline{I}$. Ток передается напрямую: $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}$. Элементами алгоритмической модели являются также формирователи замеров ФЗ1 и ФЗ2, реализующие функции:

$$\underline{Z} = \underline{U}_1 / \underline{I}_1, \quad (2)$$

$$\underline{K} = \underline{U}_{2ав} / \underline{U}_{2пд} \quad (3)$$

Замер $\underline{Z}$ автономен в каждом режиме: $\underline{Z}_{пд} = \underline{U}_{1пд} / \underline{I}_{1пд}$, $\underline{Z}_{тк} = \underline{U}_{1тк} / \underline{I}_{1тк}$, а замер $\underline{K}$ объединяет информацию о сменяющих один другого режимах. Далее алгоритмическую модель допол-

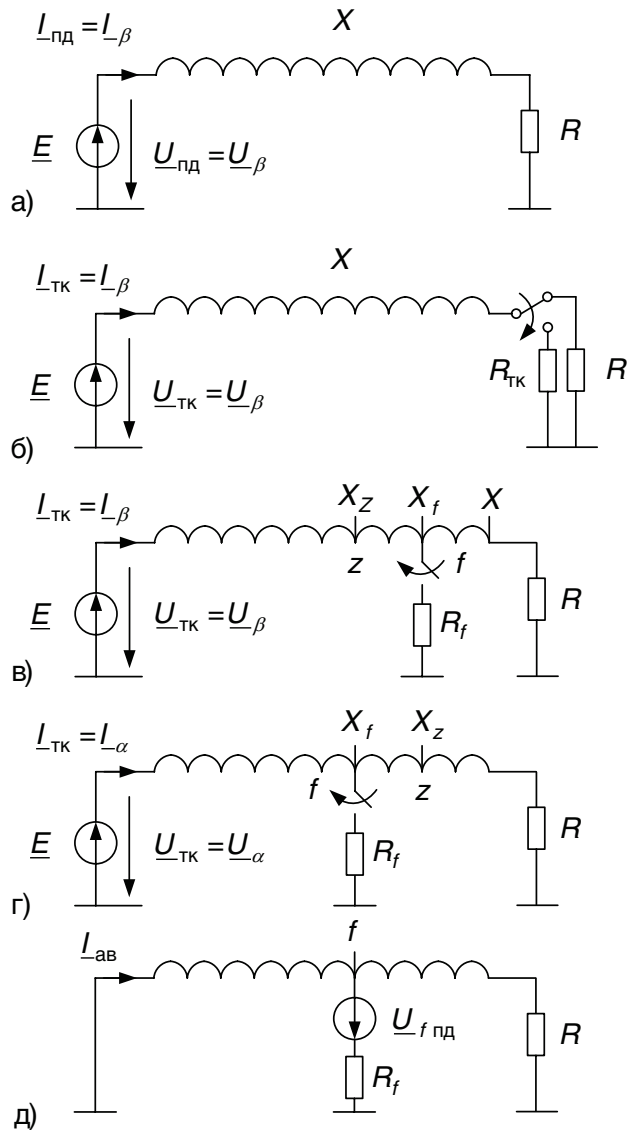

Рис. 1. Имитационная модель сети
а – в предшествующем режиме (β-режим), б – в текущем режиме изменения нагрузки (β-режим), в – в текущем режиме КЗ вне зоны защиты (β-режим), г – в режиме КЗ в зоне (α-режим), д – в чисто аварийном режиме

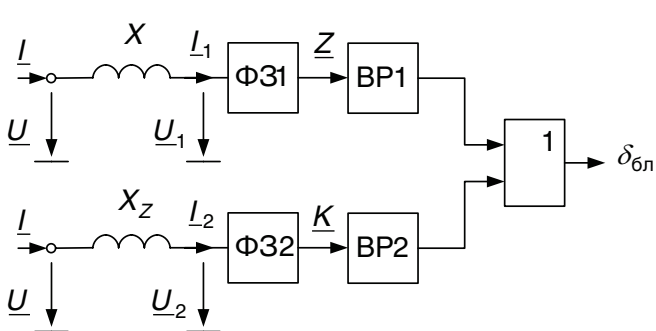

Рис. 2. Алгоритмические модели замещаемой линии

Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Маслов А.Н., ООО «Релематика», Чувашский университет

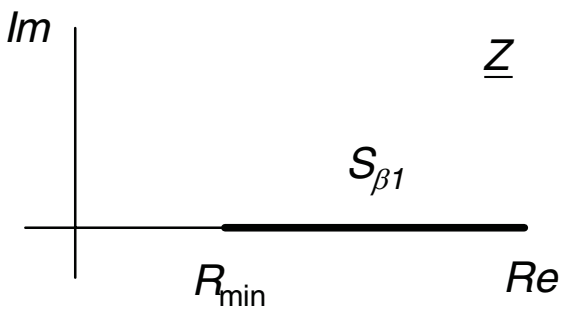

Рис. 3. Отображение нагрузочных режимов на плоскости $\underline{Z}$

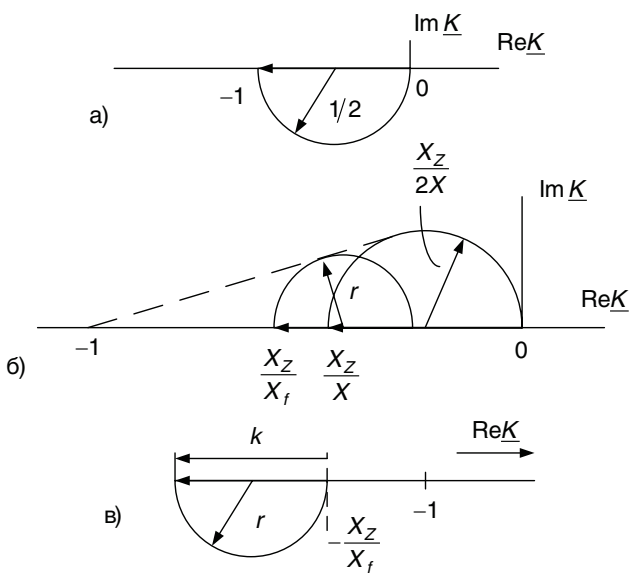

Рис. 4. Годографы замера
а – при $X_f = X_Z$;
б, в – при металлических КЗ,
б – в β-режимах,
в – в α-режимах

няет виртуальные реле ВР1 и ВР2, реагирующие на замеры $\underline{Z}$ и $\underline{K}$. Объединение реле по схеме ИЛИ создает сигнал $\delta_{бл}$, который информирует о наблюдении β-режима и выполняет блокирующую функцию. Заметим, что при подключении некоторого числа виртуальных реле к одной и той же алгоритмической модели их выходы объединяла бы логическая схема И [9].

Сопоставляя имитационную модель в нагрузочных режимах по рис. 1а и 1б и первую ветвь алгоритмической модели, убеждаемся в их адекватности, откуда следует тождество замера и сопротивления нагрузки для данного типа β-режимов:

$$Z_{\beta пд} = R,\ Z_{\beta тк} = R_{тк}. \quad (4)$$

Следовательно, на плоскости $\underline{Z}$ нагрузочные режимы отображаются в оси вещественных (рис. 3); $S_{\beta 1}$ – линейный годограф отображений нагрузочных режимов и вместе с тем – блокирующая область β-режимов данного типа, R_{min} – сопротивление максимально возможной нагрузки.

Тот же замер в α-режимах (рис. 1г) приобретает принципиально иную форму:

$$\underline{Z}_{\alpha тк} = -j(X - X_f) + \frac{R_f(R + j(X - X_f))}{R_f + R + j(X - X_f)}; \quad (5)$$

Мнимая часть замера:

$$\mathrm{Im}\,\underline{Z}_{\alpha тк} = -j(X - X_f)\left[1 - \frac{R_f^2}{(R_f + R)^2 + (X - X_f)^2}\right]. \quad (6)$$

Выражение в квадратных скобках существенно положительное, а так как $X_f \in (0, X_Z)$, то мнимая часть (6) замера (5) существенно отрицательная, откуда следует, что область $S_{\alpha 1}$ отображения замера $\underline{Z}_{\alpha тк}$ располагается в четвертом квадранте комплексной плоскости $\underline{Z}$ на удалении от блокирующей области $S_{\beta 1}$, показанной на рис. 3. Приходим к выводу, что первая алгоритмическая модель локализует нагрузочные режимы идеально, коль скоро не влияет на распознавание α-режимов.

Вторая алгоритмическая модель в предшествующем режиме создает напряжение:

$$\underline{U}_{2пд} = (R + j(X - X_Z))\underline{I}_{пд}, \quad (7)$$

а после перехода в текущий режим она же определяет аварийную составляющую напряжения:

$$\underline{U}_{2ав} = -jX_Z\underline{I}_{ав}, \quad (8)$$

аварийная составляющая входного тока описывается выражением (1). Подставляя (7) и (8) в формулу замера (3), получаем его зависимость от параметров имитационной модели, представленную ниже в форме уравнения годографа вектора $\underline{K}$ – круговой диаграммы, описываемой вектором при изменении сопротивления R_f:

$$\underline{K} = \frac{\underline{K}_0}{1 + \frac{R_f}{Z_э}e^{-j\varphi_э}}, \quad (9)$$

$$\underline{Z}_э = Z_э\angle\varphi_э = \frac{jX_f(R + j(X - X_f))}{R + jX}, \quad (10)$$

где $\underline{K}_0$ – хорда круговой диаграммы, описываемая в свою очередь круговой диаграммой при изменении сопротивления R:

$$\underline{K}_0 = -\frac{X_Z}{X_f}\cdot\frac{R + j(X - X_f)}{R + j(X - X_Z)} = -\frac{X_Z}{X_f} + \frac{k}{1 + \frac{R}{X - X_Z}e^{-j90°}}, \quad (11)$$

$$k = \frac{X_Z}{X_f}\cdot\frac{X_f - X_Z}{X - X_Z} \quad (12)$$

здесь k – хорда круговой диаграммы $\underline{K}_0(R)$. При изменении R от нуля до бесконечности эта диаграмма представляет собой полуокружность с радиусом $r = |k/2|$.

Режимы замыкания вне зоны защиты при $X_f \in (X_Z, X)$ отображаются на плоскости $\underline{K}$ областью S_β, окаймленной граничной линией L_β. Известно, что граничную линию образуют по преимуществу годографы замера, определяемые вариацией одного из параметров имитационной модели, в то время как остальные принимают предельные значения [10]. Вне всяких сомнений, особо значимую часть линии L_β образует замер в режиме КЗ на границе зоны $(X_f = X_Z)$, когда $\underline{K}_0 = -1$. При $R \to \infty$ из (10) имеем $S_\beta\ \varphi_э = \pi/2$, и годограф (9) достигает наибольших размеров, становясь полуокружностью с радиусом 1/2. Вторая по значимости часть – металлические короткие замыкания ($R_f = 0$). В этом случае $\underline{K} = \underline{K}_0$. Годограф, описываемый зависимостью (11) $\underline{K}_0$ от R располагается во втором квадранте. Чем больше смещение $(-X_Z/X_f)$ его дуги в виде полуокружности,

тем меньше ее радиус r. Верхняя часть $L_{\beta t}$ граничной линии L_β проходит по множеству полуокружностей, завершаясь четвертью последней полуокружности при $X_f = X$, когда смещение $(-X_Z/X)$ минимально, но диаметр годографа равен величине смещения (рис. 4б): $k = X_Z/X$.

Адекватное отношение алгоритмической модели к β-режимам сменяется при переходе к α-режимам $(X_f < X_Z)$ становится неадекватным, что проявляется изменением знака хорды (12): из положительного при $X_f > X_Z$ он становится отрицательным, и годограф $\underline{K}_0(R)$ отдаляется от точки $\underline{K} = -1$ (рис. 4в).

На рис. 5 приведены отображения замыканий в линии длиной $l = 100$ км с удельным сопротивлением X^0=0,4 Ом/км при напряжении $U = 110/\sqrt{3}$ кВ для зоны защиты протяженностью $l_з = 80$ км и максимальной мощности нагрузки 50 МВт. Область отображения КЗ вне зоны S_β сосредоточена в относительно небольшой части плоскости $\underline{K}$. Замер, как видим, выполнил локализацию режимов замыкания вне зоны, хотя и неидеально. Область отображения КЗ в зоне S_α, занимающая обширную часть плоскости $\underline{K}$, частично пересеклась с областью S_β. Область пересечения $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\alpha$ определяет степень утраты распознающей способности защитой, реагирующей на замер $\underline{K}$. Границу распознаваемости α-режима обнаруживает объектная характеристика замера

$$R_f(x_f) = \max_{R_f} \min_{R} \left(\underline{K}(R_f, x_f, R) \notin S_{\alpha\beta}\right) = \min_{R_f, R} \left(\underline{K}(R_f, x_f, R) \in S_{\alpha\beta}\right). \quad (13)$$

Результат выполнения процедур (13) показан на рис. 6.

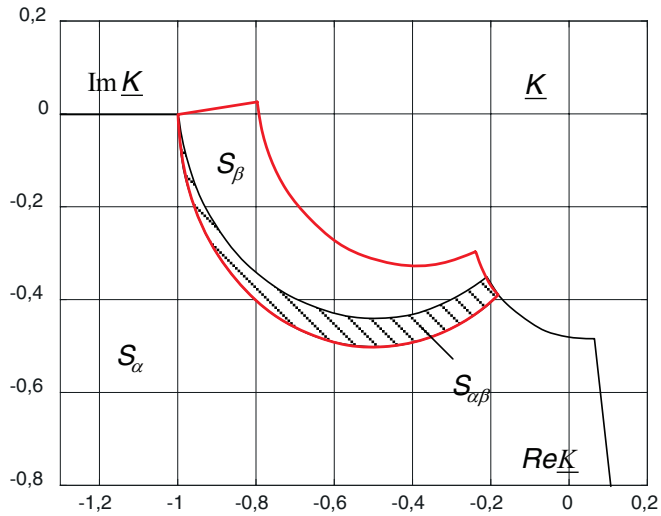

Рис. 5. Расположение областей отображения α- и β-режимов на плоскости $\underline{K}$

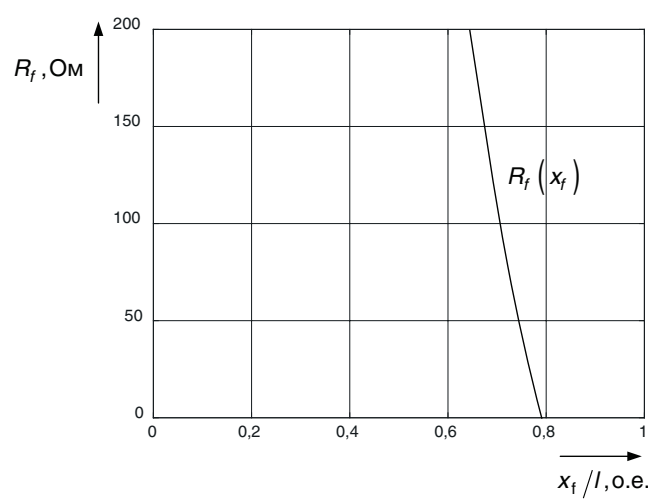

Рис. 6. Объектная характеристика распознавания КЗ в зоне защиты $x_f < 0{,}8l$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод алгоритмических моделей вобрал в себя ряд приемов, нацеленных на распознавание повреждений контролируемого объекта. Сюда входят разделение режимов электрической сети на контролируемые и альтернативные, локализация альтернативных режимов благодаря адекватному отношению к ним алгоритмических моделей, выявление контролируемых режимов на этот раз по неадекватному поведению тех же моделей, формирование замеров из выходных величин алгоритмических моделей в двух сменяющих один другого режимах, обучение виртуальных реле – оконечных элементов алгоритмических моделей – от имитационной модели электрической сети, наконец, разграничение внутри подмножества альтернативных режимов отдельных разнотипных групп и локализация каждой группы автономной алгоритмической моделью.

В практическом отношении алгоритмическая модель воспринимается как структурный элемент – формирователь замера для целей релейной защиты или локации повреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лямец Ю.Я., Ильин А.А., Нудельман Г.С.* Цифровые имитационные и алгоритмические модели в релейной защите и автоматике электрических систем. – Тез. докл. Всеросс. межвуз. научн.-техн. конф. «Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, Чуваш. ун-т., 1996, С. 106–108.

2. *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.

3. *Лямец Ю.Я., Ефремов В.А.* Итерационные алгоритмические модели электрических систем. – Тез. докл. науч. конф. «Техн. науки. Сегодня и завтра», Чебоксары, изд-во «КЛИО», 1997, С. 179–181.

4. *Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О.* Эволюция дистанционной релейной защиты. – Электричество, 1999, № 3, С.8–15.

5. *Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О.* Алгоритмические модели электрических систем. – Труды академии электротехн. наук Чуваш. респ., 1999, № 1–2, С. 10–21.

6. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.,Л.: Госэнергоиздат, 1957.

7. *Лямец Ю.Я., Белянин А.А., Воронов П.И., Мартынов М.В.* Адекватность или неадекватность модели как критерии состояния объекта. – Тез. докл. 10-й Всеросс. межвуз. науч.-техн. конф. «Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, Чуваш. ун-т, 2016, С. 244–246.

8. *Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Мартынов М.В., Атнишкин А.Б., Широкин М.Ю.* Модель неповрежденного энергообъекта как индикатор повреждения. – Электротехника, 2017, № 7, С. 60–65.

9. *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.

10. *Лямец Ю.Я., Мартынов М.В.* Граничная задача релейной защиты. – Электричество, 2013, № 10, С. 16–22.