

Синтез универсального многомерного измерительно-пускового органа релейной защиты

ШАРЫГИН М.В., КУЛИКОВ А.Л., ПЕТРОВ А.А.

Расширение функционала и эффективности работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) стало возможным с использованием микропроцессорной техники, позволяющей более полно анализировать поступающую от измерительных устройств информацию. Повышения чувствительности РЗА можно добиться увеличением числа наблюдаемых параметров, характеризующих режим работы защищаемого элемента электрической сети. Показан подход к разработке универсального многомерного измерительно-пускового органа, использующего заданную комбинацию измеряемых параметров, и способного заменить собой большинство существующих измерительных и пусковых органов, а также быть использованным в составе многопараметрического устройства релейной защиты. Многомерный контроль режима электрической сети приводит к необходимости настройки уставок измерительно-пускового органа с помощью сеточных функций и прямоугольной аппроксимации областей срабатывания, что позволяет строить защитные характеристики произвольной формы. Для уменьшения объема хранимой информации и снижения вычислительной нагрузки на процессор применяется технология уточнения уставок, позволяющая максимально приблизить характеристику защиты к идеальной. Приведены примеры настройки многопараметрического пускового органа с помощью технологии условных уставок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая сеть, релейная защита, многопараметрическая защита, измерительно-пусковой орган, условная уставка, сеточная функция

Применяемая сегодня концепция распределенной релейной защиты сетей 6–35 кВ была разработана около ста лет назад и сохранилась до наших дней почти в неизменном виде. Развитие этого сегмента релейной защиты не затрагивало ключевых основ, ее «краеугольных камней»: согласование защит и обеспечение селективности за счет выдержек времени, ограничения зон действия, блокирования в допустимых режимах. Высокая сложность распределенной системы релейной защиты и ее высокая ответственность определили плавный эволюционный путь развития без революционных скачков: даже цифровые устройства РЗА реализуют, по сути, те же алгоритмы, что и аналоговые устройства. До сих пор все виды релейной защиты имеют проверенные десятилетиями собственные уникальные измерительные и пусковые органы, логическую часть.

Вместе с тем техническое совершенство традиционных защит распределительных сетей далеко от идеала: они имеют низкую чувствительность и зачастую быстрое действие. Развитие рыночных основ в энергетике приводит к ускоренному устареванию традиционных защит: они не смогут обеспечить требуемый уровень эффективности функционирования в микрогрид.

Повышение технического совершенства РЗА распределительных сетей возможно за счет применения новых методов [1–6] и, в первую очередь, информационного подхода [1, 2]. Одним из пер-

спективных методов повышения чувствительности РЗА является статистический метод принятия решения при распознавании аварийных и ненормальных режимов сети [7–11]. Этот метод позволяет по строгим математическим выражениям выбирать наиболее ценные измеряемые параметры режима электросети, что в результате существенно повышает распознаваемость режимов и чувствительность РЗА.

Постановка задачи. Для практической реализации статистического метода принятия решения целесообразно использовать условные уставки РЗА – сеточные функции особого вида по произвольным осям измеряемых параметров режима электросети [12]. Измерительно-пусковой орган цифровой релейной защиты, основанный на технологии условных уставок, позволит адаптивно повышать чувствительность РЗА к текущим режимам электросети без перезагрузки и обновления программной части устройства РЗА: менять размерность измерений, переходить на более информативные признаки режима.

Новый измерительно-пусковой орган позволит заменить собой большинство уникальных измерительных и пусковых органов традиционных защит – любой цифровой терминал РЗА сможет реализовывать требуемый вид традиционной РЗ относительно селективности или РЗ с измеряемыми параметрами, отличными от традиционных РЗ. Это удешевит и упростит устройства РЗ.

Кроме того, новый измерительно-пусковой орган позволит не допускать отказа устройства РЗ при отказах его измерительных преобразователей или систем связи с ними путем автоматического исключения измерений от отказавших измерительных преобразователей и перехода на сокращенный вектор измеряемых величин. Это увеличит надежность системы РЗ.

Вопросы расчета условных уставок для произвольной электросети, согласования всех защит, использующих условные уставки, подробно изложены в [7, 11]. Таким образом, для полной реализации технологии условных уставок необходимо синтезировать универсальный многомерный измерительно-пусковой орган для цифровых устройств релейной защиты, который будет использовать готовые, рассчитанные условные уставки для определения времени срабатывания защиты в темпе автоматического процесса.

Предлагаемое решение. Пусть в произвольный момент t ведется наблюдение за множеством параметров режима сети: $\Phi(t) = \{\varphi\}$. В общем случае пространство наблюдаемых параметров Ψ может быть многомерным, тогда одно наблюдение представляется матрицей-вектором и обозначается как $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N\}$, где N – число наблюдаемых параметров режима; φ_n – n -й параметр ($n=1, \dots, N$); например, действующее значение гармоники 50 Гц тока присоединения в момент времени наблюдения для некоторого заданного «окна» данных. При этом для простоты обозначения орт пространства наблюдений Ψ примем, что φ_n характеризуется одним действительным числом.

Технология условных уставок позволяет поставить однозначное соответствие между произвольным многомерным замером Φ и временем срабатывания РЗ $t_{с.з.}$, т.е. математически условные уставки – это функционал $F_{с.з.}$, который выполняет отображение вида $t_{с.з.} = F_{с.з.}(\Phi) = F_{с.з.}\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N\}$.

Область значений функционала $F_{с.з.}(\Phi) = [0; \infty]$. Область определения функционала $F_{с.з.}(\Phi)$ в общем случае составляет $\varphi_n = [-\infty; +\infty]$, однако для каждой n -оси этот отрезок может быть существенно сокращен. Например, для оси действующих значений тока область определения может быть $[0; 100]$ кА, для оси действующих значений напряжения область определения может быть $[0; 1,1]$ отн.ед.

В практике РЗА обычно принято задавать функционал $F_{с.з.}(\Phi)$ с помощью аналитических зависимостей или полигональных областей. Но традиционные РЗ имеют упрощенные функционалы $F_{с.з.}(\Phi)$: одномерные или двумерные плоскости срабатывания, простейшие полигональные области срабатывания (круг, полуплоскость, ромб, трапеция и т.д.).

В перспективных защитах функционал $F_{с.з.}(\Phi)$ может иметь три и более измерений и будет задаваться областями произвольной формы (приспособленными под конкретные защищаемые зоны). Поэтому функционал $F_{с.з.}(\Phi)$ целесообразно задавать с помощью сеточных функций [13] и прямоугольной аппроксимацией областей срабатывания, т.е. с помощью условных уставок [12] – рис. 1. Это наиболее простой способ, не требующий больших вычислительных мощностей от устройств РЗ, поскольку вычисление функционала $F_{с.з.}(\Phi)$ в этом случае требует только операций сравнения.

Для оптимизации количества информации, требуемой для хранения условных уставок в устройстве РЗ и их передачи по информационной сети, сеточные функции необходимо выполнять с вложенными слоями, число которых ограничивается только целесообразностью дальнейшего уточнения условий выявления аварийных режимов и определяется факторами:

быстродействие и объем доступной памяти устройства РЗ (фактор требует уменьшения числа слов);

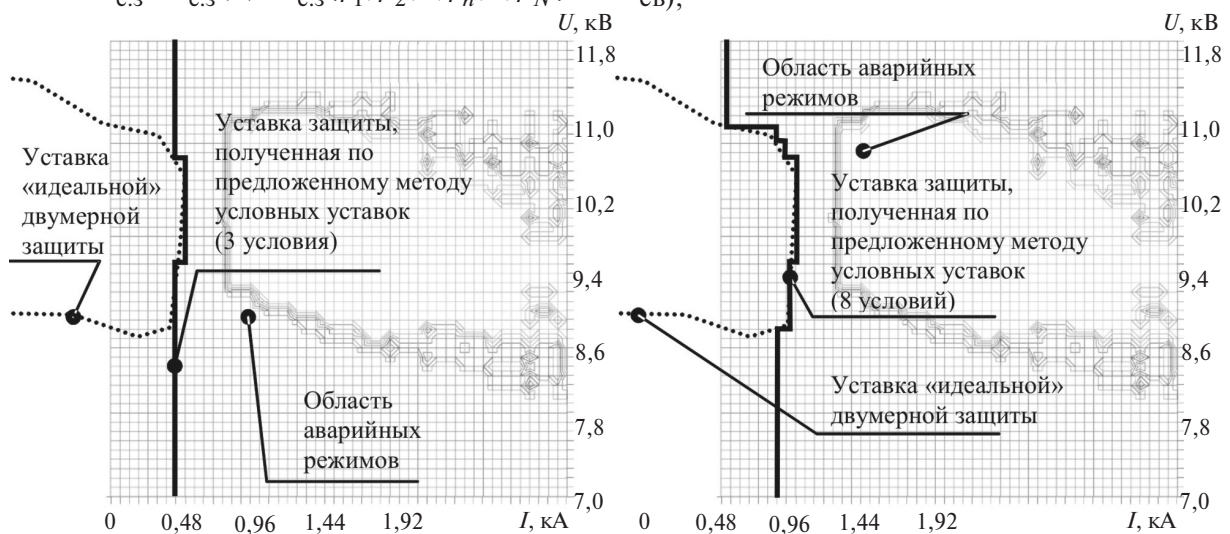


Рис. 1. Пример применения условных уставок для увеличения чувствительности двумерной РЗ: а – уставка, состоящая из трех условий; б – уставка, состоящая из восьми условий

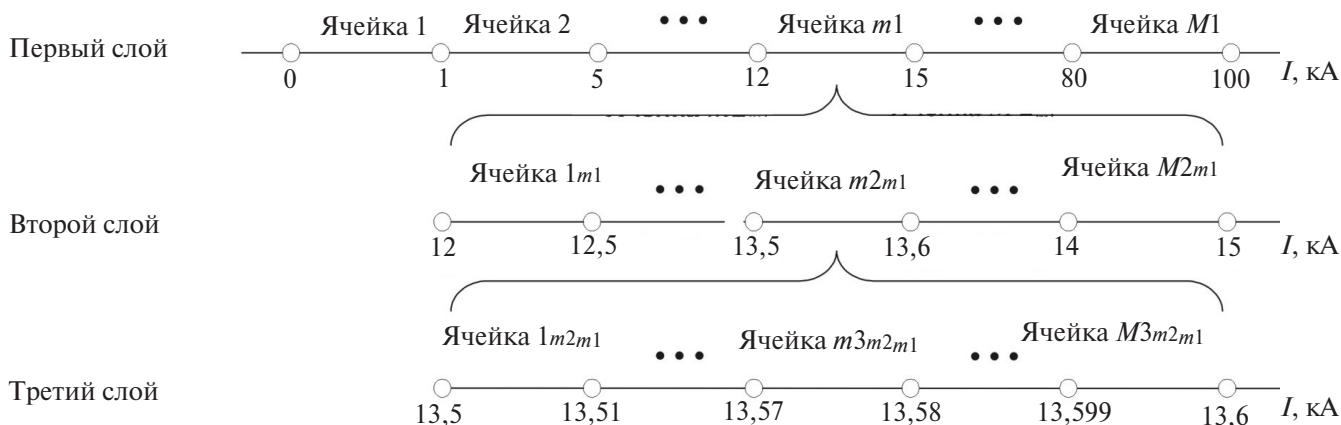


Рис. 2. Вложенные слои сеточной функции на примере уточнения уставок по оси тока

наличие необходимости увеличения вероятности распознавания РЗ (фактор требует увеличения числа слоев).

Область, ограниченная самым первым («грубым») слоем, должна охватывать все пространство возможного существования параметра. Области последующих («уточняющих») слоев ограничиваются одной из уточняемых ячеек исходного (предыдущего) слоя. В этом случае функционал $F_{с,3}(Φ)$ будет вычисляться последовательно: от верхнего «грубого» слоя до последнего нижнего уточняющего слоя. Пример использования вложенных «уточняющих» слоев приведен на рис. 2.

Описание уставок многомерного пускового органа заключается в настройке его областей срабатывания и включает общую и индивидуальную части настройки слоев.

- Общая часть характеризуется параметрами:
- число осей измерения N , где $N \geq 1$;
- общее число слоев защиты S , где $S \geq 1$;

контролируемая по каждой из N осей величина, выбор которой заключается в присвоении элементам вектора $P_dimension$, имеющего размер N , соответствующего индекса из универсального списка (пример приведен далее).

Индивидуальная настройка слоев защиты включает параметры:

1) вектор сетки n -й оси s -го слоя $P_grid_{n,s}(1, \dots, K_{\max}^{(n,s)})$, содержащий координаты ячеек, на которые разбивается ось n ; информация представляется в виде одномерного массива действительных чисел, размер которого на единицу больше числа ячеек оси слоя;

2) время срабатывания защиты, определяемое для каждой ячейки s -го слоя N -мерного пускового органа, задается в виде соответствующей ему N -мерной матрицы $P_operatingtime_s$; при этом, если ограниченная ячейкой пускового органа область пространства наблюдений Ψ представляет собой нормальный режим работы оборудования, то соответствующий ей элемент $P_operatingtime_s$ принима-

ет значение, равное бесконечности: в случае, если ячейка s -го слоя содержит вложенный «уточняющий» слой, то соответствующий ей элемент $P_operatingtime_s$ равен -1 .

Пример перехода от «грубого» к уточняющему слою для определения времени срабатывания двумерной двухступенчатой защиты, реагирующей на действующее значение тока и фазу между током и напряжением, с временем срабатывания ступеней $t_{с,31} = 0,1$ с и $t_{с,32} = 0,5$ с, приведен на рис. 4.

Таким образом, условная уставка пускового органа включает: общее число осей измерения N , число слоев уставок S , вектор контролируемых величин $P_dimension$, набор одномерных матриц $P_grid_{n,s}$ для всех осей каждого слоя и набор N -мерных матриц $P_operatingtime_s$ для каждого слоя ($n \in N, s \in S$).

Для приведенной модели данных условной уставки алгоритм работы многомерного измерительно-пускового органа представлен на рис. 3.

Начальная версия универсального списка индексов $P_dimension$ приведена далее:

1. Максимальное действующее значение тока среди всех фаз
2. Действующее значение тока фазы
3. То же прямой последовательности
4. —" — обратной последовательности
5. —" — нулевой последовательности
6. Максимальное действующее значение линейного напряжения среди всех фаз
7. Действующее значение линейного напряжения фазы
8. То же прямой последовательности
9. —" — обратной последовательности
10. —" — нулевой последовательности
11. Фазный сдвиг между током и напряжением прямой последовательности
12. То же обратной последовательности
13. Активное сопротивление контура фаз
14. Реактивное сопротивление контура фаз



Рис. 3. Обобщенный циклический алгоритм работы многомерного измерительно-пускового органа РЗ (поиск времени срабатывания РЗ $t_{c.3}$ по заданной условной уставке)

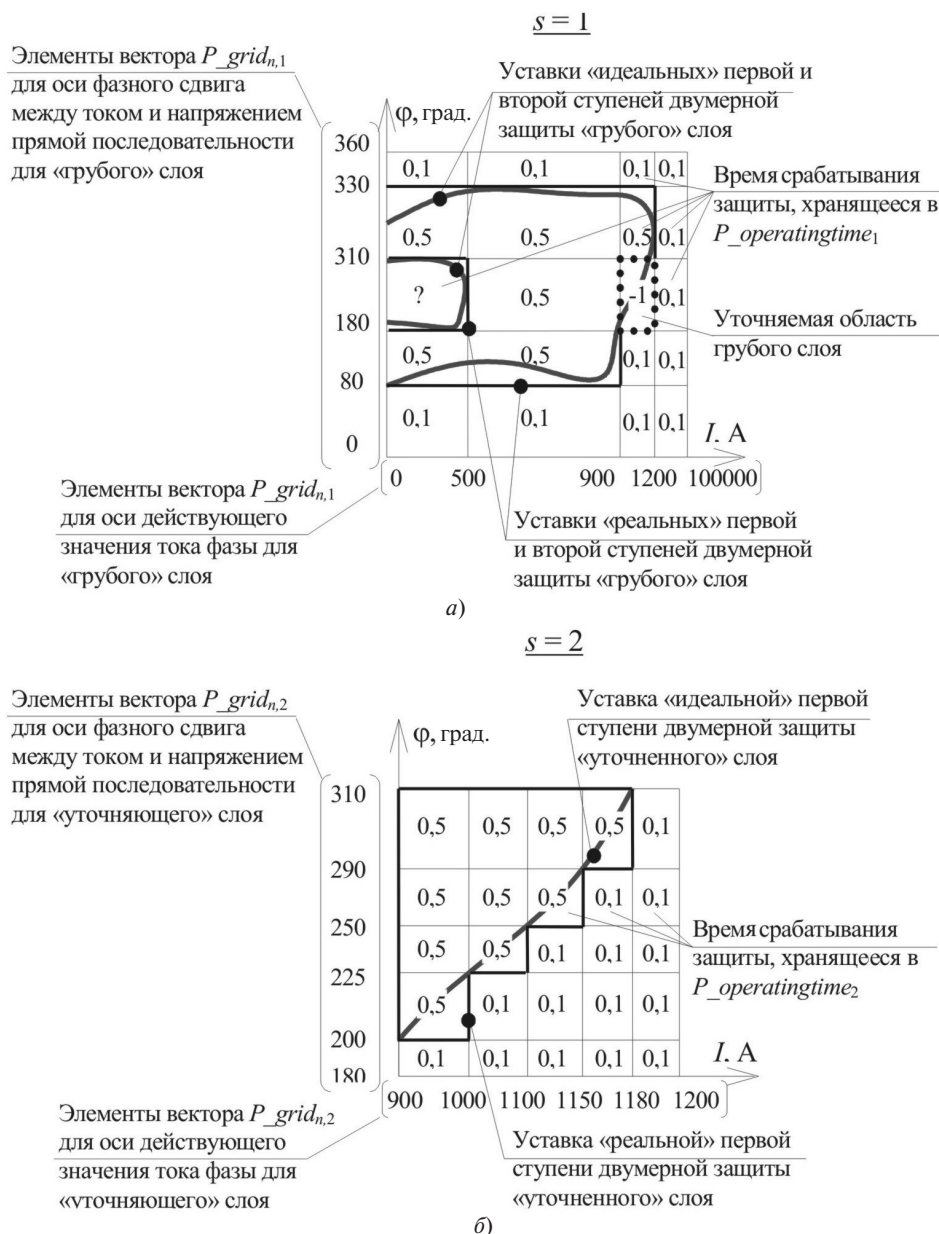


Рис.4. Пример задания условных уставок многопараметрической защиты: *a* – «грубый» слой сетки уставок; *б* – «уточняющий» слой сетки уставок

При развитии списка индексов $P_{dimension}$ следует учесть множество вариативных параметров: параметры режима (ток, напряжение, фазовый сдвиг, мощность);

гармонический состав тока и напряжения; симметричные составляющие тока и напряжения;

показатели тока и напряжения (мгновенное, действующее, среднее значение, интегральная сумма);

разные окна интегрирования;

разные моменты времени или сдвиг времени;

разные фазы, оболочки, цепи, обмотки.

Список индексов должен это учитывать и позволять пополнять список новыми измерениями, поэтому развитие списка должно проводиться по фасетной классификации.

Примеры задания уставок традиционных защит с помощью технологии условных уставок приведены далее.

Пример 1. Простейшая мгновенная токовая отсечка (ТО). Параметр срабатывания отсечки состоит всего из одного действительного числа – тока срабатывания $I_{с,3}$ (рис. 5,а). Таким образом, условная уставка ТО: $N=1$; $S=1$; $P_{dimension} = \{1\}$; $P_{operatingtime_1} = \{\infty; 0\}$; $P_{grid_{1,1}} = \{0; I_{с,3}; 100\}$ (рис. 5,б). Токосовременные характеристики как традиционной ТО, так и ТО, заданной с помощью условной уставки, будут выглядеть одинаково.

Пример 2. Двухступенчатая токовая защита с зависимой токовременной характеристикой медленной ступени (МТЗ). Параметры срабатывания такой защиты состоят из набора значений: тока срабатывания медленной ступени $I_{с,3,МТЗ}$, тока срабатыва-

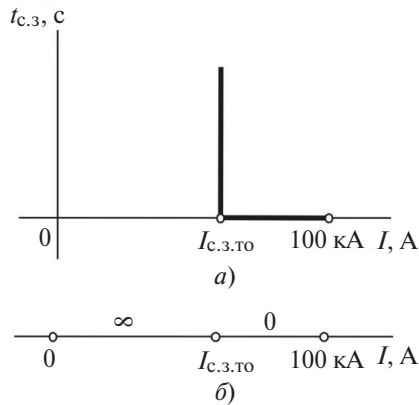


Рис. 5. Токовая отсечка: а – традиционный способ задания уставок; б – задание характеристики с помощью условной уставки

ния быстрой ступени $I_{c.з.то}$ и коэффициентов, задающих зависимую часть характеристики K , α , β (рис. 6,а). Зависимую часть характеристики невозможно точно задать с помощью технологии условной уставки, но можно приблизиться к исходной зависимой кривой с достаточной степенью точности (рис. 6,б). Условная уставка такой защиты: $N=1$; $S=1$; $P_dimension = \{1\}$; $P_operatingtime_1 = \{\infty; t_{c.з1}; t_{c.з2}; t_{c.з3}; t_{c.з4}; 0\}$; $P_grid_{1,1} = \{0; I_{c.з.мтз}; I_1; I_2; I_3; I_{c.з.то}; 100\}$ (рис. 6,в). Создание уточняющих подмассивов (слоев) здесь нецелесообразно, поскольку приведет к росту затрат памяти на хранение уставки.

Пример 3. *Степень дистанционной защиты с круговой характеристикой.* Степень может настраиваться установкой параметров Z_0 , Z_y , φ_y [14]. Вид характеристики реле сопротивления представлен на рис. 7,а. Защита срабатывает только в случае, если рабочая точка комплексного сопротивления попадет в область, ограниченную характеристикой реле. При этом время срабатывания защиты $t_{c.з}$ одинаково для любого положения точки внутри защитной характеристики.

Технология условной уставки не позволяет построить защитную характеристику, идеально совпадающую с круговой характеристикой реле сопротивления (рис. 7,б), однако она позволяет приблизиться к ней с достаточной степенью точности. В связи с этим предлагается уточнять характеристики отдельных ячеек первого («грубого») слоя (рис. 7,в).

Общая часть настройки слоев характеризуется параметрами: $N=2$; $S=5$; $P_dimension = \{13; 14\}$. Индивидуальная часть настройки слоев заключается в заполнении векторов сетки $P_grid_{13,1}$; $P_grid_{13,2}$; $P_grid_{13,3}$; $P_grid_{13,4}$; $P_grid_{13,5}$; $P_grid_{14,1}$; $P_grid_{14,2}$; $P_grid_{14,3}$; $P_grid_{14,4}$; $P_grid_{14,5}$ и матриц $P_operatingtime_1$, $P_operatingtime_2$, $P_operatingtime_3$, $P_operatingtime_4$, $P_operatingtime_5$, значения которых приведены в графическом виде на рис. 7,б и в.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0244 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEF157717X0244).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В., Кержаев Д.В., Романов Ю.В. Многомерная релейная защита. Ч.1. Теоретические предпосылки. – Электричество, 2009, № 10. с. 17–25.
2. Иванов С.В., Лямец Ю.Я. Информационный анализ электрических систем. Ч 1. Явление нераспознаваемости места короткого замыкания. – Известия РАН. Энергетика, 2016, № 1, с. 38–46.
3. Шуин В.А., Добрягина О.А., Шагурина Е.С., Шадрикова Т.Ю. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ. – Электрические станции, 2018, № 7 (1044), с. 38–45.
4. Нагай В.И., Нагай И.В., Сарры С.В., Киреев П.С., Украинцев А.В. Информационные признаки аварийного режима в высоковольтных электроустановках при наличии переходного сопротивления электрической дуги. – Известия вузов. Электромеханика, 2017, т. 60, № 6, с. 84–90.
5. Gao Q. and Rovnyak S. Decision trees using synchronized phasor measurements for wide-area response-based control. IEEE Trans. Power Syst., 2011, vol. 26, No. 2, pp. 855–861.
6. Terzija Y., Valverde G., Cai D., Regulski P., Madani Y., Fitch J., Skok S., Begovic M., and Phadke A. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks. Proc. IEEE, 2011, vol. 99, No. 1, pp. 80–93.
7. Шарыгин М.В., Куликов А.Л. Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017, 286 с.
8. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Определение уставок релейной защиты и автоматика, основанное на статистическом байесовском методе проверки гипотез. – Электричество, 2017, № 7, с. 20–29.
9. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Обеспечение селективности релейной защиты в системах электроснабжения на основе байесовского метода проверки гипотез. – Электричество, 2017, № 9, с. 24–33.
10. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Применение статистического подхода для адаптации автоматика отключения потребителей к их фактической нагрузке. – Электрические станции, 2016, № 12, с. 36–40.
11. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Автоматизированный расчёт и согласование уставок релейной защиты. – Электрические станции, 2017, № 7, с. 29–37.
12. Шарыгин М.В., Куликов А.Л. Принципы объединения пусковых и измерительных органов релейной защиты для повышения ее чувствительности. – Известия РАН. Энергетика, 2018, № 6, с. 38–49.
13. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971, 553 с.
14. Шнейерсон Э.М. Дистанционные защиты. М.: Энергоатомиздат, 1986, 446 с.

[11.03.2019]

А в т о р ы: Шарыгин Михаил Валерьевич – доктор техн. наук, профессор Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексева (НГТУ).

Куликов Александр Леонидович – доктор техн. наук, профессор НГТУ имени Р.Е. Алексева.

Петров Антон Александрович – ведущий инженер АО «Научно-исследовательское предприятие общегосударственного машиностроения».

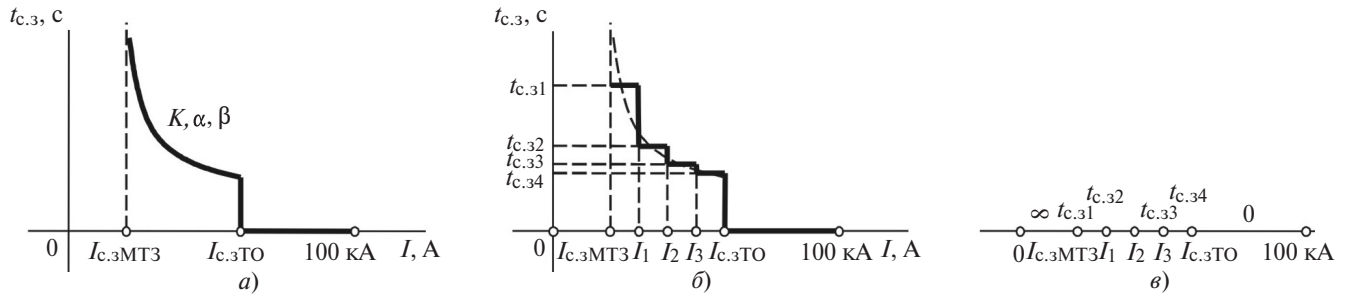
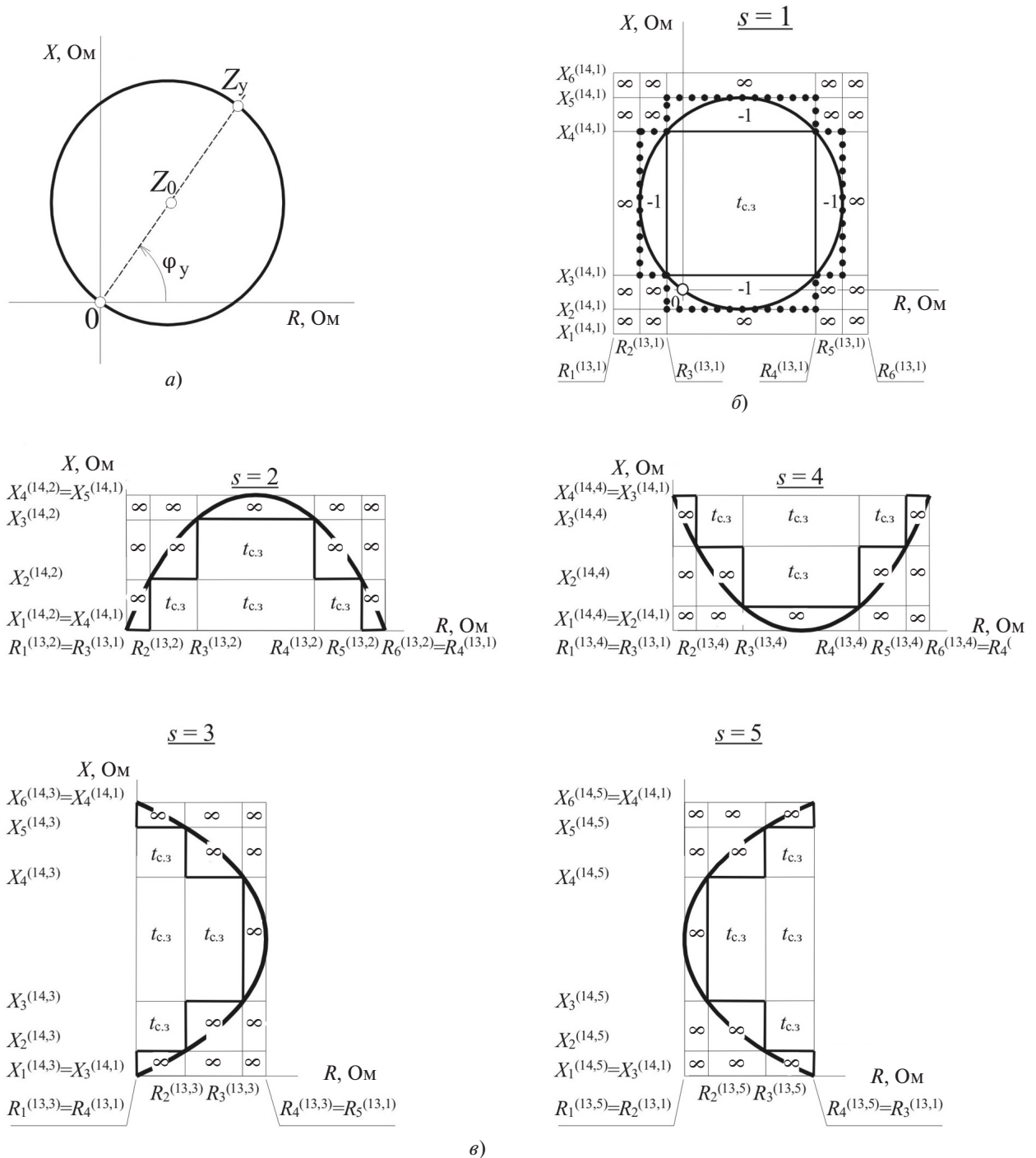


Рис. 6. Зависимая токовременная характеристика медленной ступени двухступенчатой токовой защиты: а – традиционный способ задания уставок; б – прямоугольная аппроксимация зависимой характеристики медленной ступени; в – задание зависимой характе-



в)

Рис. 7. Круговая характеристика реле сопротивления: а – задаваемая традиционным способом; б – «грубый» слой ($s=1$) условной уставки; в – «уточняющие» слои ($s=2 \div 5$) условной уставки

Synthesizing a Universal Multidimensional Relay Protection Measuring and Starting Element

SHARYGIN Mikhail V. (*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.Ye. Alekseyev (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

KULIKOV Alexander L. (*NNSTU, Nizhny Novgorod, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

PETROV Anton A. (*JSC «Scientific-Research Institute of General Mashine-Building», Nizhny Novgorod, Russia*) – Leading Engineer

With the application of microprocessor systems, which allow the information arriving from measurement instruments to be analyzed in a more comprehensive manner, relay protection and automatic control (RP&AC) devices have gained a wider scope of functions and more efficient performance characteristics. Better sensitivity of RP&AC devices can be achieved by increasing the number of observed parameters that characterize the operation conditions of the electric network component being protected. The article describes an approach to developing a universal multidimensional measuring and starting element that uses a specified combination of measured parameters and is able to replace the majority of existing measuring and starting elements, and which can also be used as part of a multiparametric relay protection device. The approach that involves multidimensional monitoring of the electric network operating conditions entails the need of tuning the measuring and starting element setpoints with the use of mesh functions and rectangular approximation of the actuation domains, thus opening the possibility of drawing up protection characteristics with an arbitrary form. For reducing the stored data volume and decreasing the computation burden on the processor, the setpoint refinement technology is used, which allows the protection characteristic to be shaped maximally close to the ideal one. Examples of tuning the multiparametric starting element using the technology of conditional setpoints are given.

Key words: *electric network, relay protection, multiparametric protection, measuring and starting device, conditional setpoint, mesh function*

REFERENCES

1. Lyamets Yu.Ya., Nudel'man G.S., Zinov'yev D.V., Kerzhayev D.V., Romanov Yu.V. *Elektrichestvo – in Russ (Electricity)*, 2009, No. 10. pp. 17–25.
2. Ivanov S.V., Lyamets Yu.Yu. *Izvestiya RAN. Energetika – Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Energy)*, 2016, No. 1, pp. 38–46.
3. Shuin V.A., Dobryaguina O.A., Shagurina Ye.S., Shadrikova T.Ye. *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power stations)*, 2018, No. 7 (1044), pp. 38–45.
4. Nagai V.I., Nagai I.V., Sarry S.V., Kireyev P.S., Ukraintsev A.V. *Izvestiya vuzov – Elektromekhanika – in Russ. (News of Institutions of Higher Learning. Electromechanics)*, 2017, 2017, vol. 60, No. 6, pp. 84–90.
5. Gao Q. and Rovnyak S. Decision trees using synchronized phasor measurements for wide-area response-based control. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2011, vol. 26, No. 2, pp. 855 – 861.
6. Terzija Y., Valverde G., Cai D., Regulski P., Madani Y., Fitch J., Skok S., Begovic M., and Phadke A. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks. *Proc. IEEE*, 2011, vol. 99, No. 1, pp. 80–93.
7. Sharygin M.V., Kulikov A.L. *Zashchita i avtomatika system elektrosnabzheniya s aktivnymi promyshlennymi potrebitelyami (Defence and Automation of the Systems of Power Supply with Active Industrial Consumers)*. Nizhnii Novgorod, NIU RANKhiGS, 2017, 286 p.
8. Kulikov A.L., Sharygin M.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 7, pp. 20–29.
9. Kulikov A.L., Sharygin M.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, No. 9, pp. 24–33.
10. Kulikov A.L., Sharygin M.V. *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power stations)*, 2016, No. 12, pp. 36–40.
11. Kulikov A.L., Sharygin M.V. *Elektricheskiye stantsii – in Russ. (Power Stations)*, 2017, No. 7, pp. 29–37.
12. Sharygin M.V., Kulikov A.L. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. – in Russ. (News of Russian Academy of sciences. Energy)*, 2018, No. 6, pp. 38–49.
13. Samarskii A.A. *Vvedeniye v teoriyu raznostnykh shhem – in Russ. (Introduction to the theory of electric chart)*, Moscow, Nauka, 1971, 553 p.
14. Shneyerson E.M. *Dstantsionnyye zashity (Distance defence)*. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 446 p.

[11.03.2019]