УДК 338.45:621

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЦИФРОВАЯ ЗАЩИТА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Воденников Д. А., *ПАО «Россети Московский регион»,*
Жилкина Ю. В., *канд. экон. наук, ПАО «Россети»*

В настоящей статье представлен усовершенствованный дифференциально-фазный алгоритм, предназначенный для применения в продольной дифференциальной защите (ДЗ) сосредоточенных объектов. Усовершенствованный алгоритм сравнения фаз улучшает точность действия ДЗ в условиях насыщения измерительных трансформаторов тока. В исследовании используется математическая модель дифференциальной защиты силового трансформатора, созданная с учетом группы соединения обмоток трансформатора. Представленный метод защиты позволяет существенно снизить погрешность замера фаз по сравнению с распространенными на практике методами цифровой фильтрации.

Ключевые слова: *релейная защита, дифференциальная защита, силовой трансформатор, дифференциально-фазная защита, насыщение трансформаторов тока.*

HIGH-SPEED DIGITAL PROTECTION OF MEASURING CURRENT TRANSFORMERS

Vodennikov D. A., *PJSC "Rosseti Moscow region",*
Zhilkina Yu. V., *PhD of economic sciences, PJSC "Rosseti"*

This article presents an improved differential-phase algorithm designed for use in longitudinal differential protection (DZ) of concentrated objects. The improved phase comparison algorithm improves the accuracy of the DZ operation in conditions of saturation of measuring current transformers. The study uses a mathematical model of differential protection of a power transformer, created taking into account the connection group of the transformer windings. The presented protection method makes it possible to significantly reduce the error of phase measurement in comparison with the methods of digital filtering that are common in practice.

Keywords: *relay protection, differential protection, power transformer, differential-phase protection, saturation of current transformers.*

Современная цифровая дифференциальная защита (ДЗ) способна определить место возникновения повреждения, сопровождающегося большими аварийными токами, в течение первого периода переходного процесса [1]. Некоторые производители в случае фиксации внешнего повреждения предусматривают блокировку ДЗ на время, достаточное, чтобы повреждение было устранено защитами на смежном участке [2, 3]. Указанные мероприятия обеспечивают отстройку

ДЗ от экстремальных переходных токов небаланса, вызванных насыщением измерительных трансформаторов тока (ТТ) со стальными сердечниками.

Однако блокировка ДЗ или снижение ечувствительности нежелательны, поскольку вследствие развития аварии и отказа защит смежных элементов (вследствие технического несовершенства или в результате ошибок эксплуатации) внешнее короткое замыкание (КЗ) может перейти во внутреннее.

В характеристике срабатывания ДЗ производства компании Siemens предусмотрен участок, при попадании в который рабочей точки происходит отключение защищаемого объекта, даже если ранее было зафиксировано внешнее повреждение [2, 3]. Однако попадание рабочей точки в указанную область и ее длительное нахождение в ней возможно только при отсутствии вытекающего тока нагрузки и при отсутствии подпитки со стороны смежной энергосистемы. Защита фирмы General Electric в случае фиксации внешнего повреждения активирует функцию сравнения фаз основных гармоник токов плеч ДЗ [3]. Однако глубокое насыщение ТТ приводит к существенным погрешностям замера амплитудных и фазовых значений гармоник, что снижает вероятность корректной работы алгоритма [3]. В [3] отмечается, что в случае глубокого насыщения ТТ его угловая погрешность по первой гармонике может достигать 46 электрических градусов (эл. град). Следовательно, необходимо повышение точности работы ДЗ в условиях значительных погрешностей ТТ.

Как указывается в [3, 4], при больших токах внешних и внутренних повреждений предпочтение следует отдавать именно дифференциально-фазному принципу. В связи с вышесказанным, необходимо повысить точность работы дифференциально-фазного принципа в случае глубокого насыщения трансформаторов тока. Поставленная цель может быть достигнута путем выделения временных интервалов переходного процесса, на протяжении которых погрешность работы трансформаторов тока минимальна (далее эти интервалы будут обозначены как интервалы идеальной трансформации). При этом нужно найти надежный метод определения этих интервалов, а также определить порядок использования полученной информации для улучшения работы ДЗ.

Рассмотрим действие этого алгоритма на примере ДЗ силового трансформатора, так как этот случай является одним из самых сложных. Правильная работа алгоритма может быть обеспечена только в случае соединения обмоток силового трансформатора в звезду, поскольку необходим непосредственный контроль токов их вторичных обмоток. Это требование выполнимо для цифровых терминалов релейной защиты, в которых компенсация фазового сдвига между токами плеч ДЗ осуществляется алгоритмически.

Принцип нахождения участков идеальной трансформации при насыщении ТТ предлагается следующий. Предполагается, что ДЗ переходит на дифференциально-фазный принцип работы только после фиксации внешнего КЗ. В этом случае насыщение, приводящее к экстремальным погрешностям, обусловлено значительным содержанием апериодической составляющей в аварийном токе, а в установившемся режиме погрешность ТТ не превышает 10 % [5]. На рис. 1 приведены

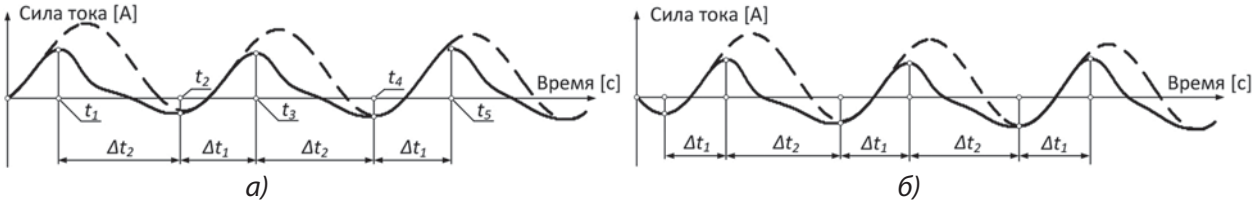


Рис. 1. Первичный (пунктирная линия) и вторичный (сплошная линия) токи в обмотках ТТ при глубоком насыщении магнитного сердечника: а – насыщение ТТ при первой полуволне ПП; б – то же при второй полуволне

осциллограммы первичного и вторичного токов в обмотках измерительного ТТ при насыщении его сердечника под воздействием тока, содержащего апериодическую составляющую.

Насыщение сердечника ТТ может происходить при прохождении первой (рис. 1*а*) или второй (рис. 1*б*) полуволны тока КЗ. Рассмотрим далее первый случай. Насыщение ТТ наступает в моменты времени t_1, t_3 и t_5. Даже в условиях глубокого насыщения измерительный ТТ имеет участки идеальной трансформации, которая начинается приблизительно в моменты времени t_2 и t_4, т. е. тогда, когда первая производная первичного (и вторичного) тока изменяет знак. При насыщении ТТ интервалы времени между моментами смены знака первой производной тока неодинаковы. Условимся обозначать больший из этих интервалов как Δt_2, а меньший – как Δt_1. Для рассматриваемого примера $\Delta t_1 = t_3 - t_2$, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ в первом периоде и $\Delta t_1 = t_5 - t_4$, $\Delta t_2 = t_4 - t_3$ – во втором периоде. Из примера на рис. 1, а видно, что участкам идеальной трансформации соответствуют интервалы Δt_1, а участкам работы ТТ со значительной погрешностью – интервалы Δt_2.

Аналогичные явления наблюдаются, если насыщение ТТ происходит при прохождении второй полуволны тока (рис. 1 *б*). Отличительной чертой этого режима является лишь то, что с момента начала ПП интервал Δt_1 фиксируется раньше интервала Δt_2 (в примере на рис. 1, а первым фиксируется интервал Δt_2). Во всех рассмотренных случаях идеальная трансформация наступает практически в момент начала интервала Δt_1 и продолжается практически до конца этого интервала.

Ввиду наличия апериодической составляющей в аварийном токе метод замера фаз по переходу тока через нуль приводит к значительным погрешностям. По этой причине замер разности фаз необходимо осуществлять в моменты достижения синусоидальным сигналом амплитудного значения, т. е. именно в начале интервала Δt_1. Для этого интервалы Δt_1 и Δt_2 должны регистрироваться для всех сигналов. Разумеется, необходимо хранить в памяти устройства защиты информацию о времени начала интервала Δt_1 и знаке тока в этот момент. Фаза одного из сигналов принимается равной нулю (опорный сигнал). Время отсчитывается с момента обнаружения неисправности.

Если условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$ выполняется для опорного сигнала и для сигнала, сдвиг по фазе которого нужно определить (т. е. оба ТТ насыщаются в ходе ПП), то цифровое устройство рассчитывает фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ по формуле:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta T, \qquad (1)$$

где ω – частота основной гармоники, рад./с;

ΔT – разница по времени между началом интервалов Δt_1 двух сравниваемых сигналов, с.

Если два сравниваемых сигнала имеют разные знаки тока в моменты начала интервала Δt_1, то к рассчитанному по формуле (1) значению прибавляется 180 эл. град.:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta T + 180, \qquad (2)$$

Если условие $\Delta t_1 < \Delta t_2$ выполняется только для одного из сравниваемых сигналов, а для другого сигнала значения Δt_1 и Δt_2 одинаковы (один из ТТ находится в состоянии насыщения), то $\Delta\varphi$ также определяется по формуле (1), а ΔT в этом случае показывает разницу по времени между началом интервала Δt_1 сигнала, для которого выполняется вышеописанное условие, и между пиковым значением второго сигнала того же знака, что и знак первого сигнала в момент начала Δt_1.

Если значения Δt_1 и Δt_2 обоих сигналов равны, если ТТ в данный момент работают без насыщения.

Использование предложенного алгоритма рассмотрено на примере блока «генератор-трансформатор». Он включает в себя силовой трансформатор (СТ) типа ТДЦ-400000/220, к стороне низкого напряжения (НН) подключен синхронный

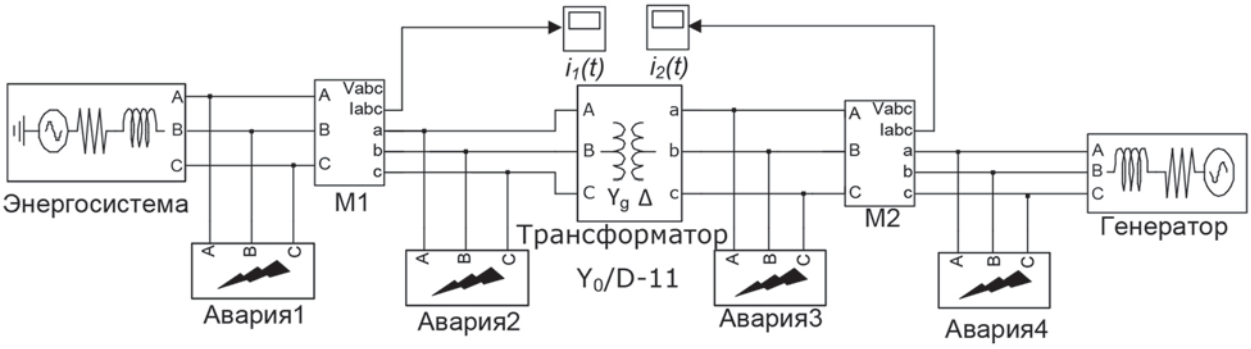


Рис. 2. Структура универсальной математической модели силового трансформатора (СТ) и его дифференциальной защиты в программном пакете Simulink для имитации внешних и внутренних КЗ на разных сторонах силового трансформатора

генератор (СГ) ТВВ-320-2. На стороне НН установлены измерительные ТТ типа ТШ-20-12000/5, на стороне ВН использованы ТТ типа ТФНД-220-IV-2000/1.

Номинальные параметры СГ следующие: номинальная полная мощность $S_{номG}$ = 375 МВ·А, номинальная активная мощность $P_{номG}$ = 320 МВт, номинальное напряжение $U_{номG}$ = 20 кВ, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$ = 0,85, постоянная времени генератора T_{aG} = 0,388 с, реактивное сопротивление по продольной оси X_d = 1,70 о.е., переходное реактивное сопротивление по продольной оси X_d'' = 0,173 о.е.

Номинальные параметры СТ следующие: номинальная полная мощность $S_{номТ}$ = 400 МВ·А, номинальное напряжение обмотки ВН $U_{ВНном}$ = 242 кВ, номинальное напряжение обмотки НН $U_{ННном}$ = 20 кВ, напряжение КЗ $u_к$ = 11 %, мощность потерь КЗ $P_к$ = 880 кВт.

Параметры измерительных ТТ определены по данным [5] и по открытым данным заводов-изготовителей. Параметры ТШ-20-12000/5: номинальная нагрузка $Z_{ном}$ = 1,2 Ом, площадь поперечного сечения сердечника $Q = 7{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^2, длина средней магнитной линии $l_{ср}$ = 2,59 м, число витков вторичной обмотки w_2 = 2400, активное сопротивление вторичной обмотки R_2 = 1,9 Ом. Точное значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки X_2 для данного ТТ не приводится в указанных выше источниках. По данным [5], для ТТ класса напряжения 10–20 кВ, имеющих шинную конструкцию, сопротивление X_2 одного порядка с R_2 и несколько превышает его, поэтому в расчетах приближенно принято X_2 = 2,0 Ом.

Параметры ТФНД 220 IV 2000/1: $Z_{ном}$ = 50 Ом, $Q = 30{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^2, $l_{ср}$ = 1,55 м, w_2 = 2000, R_2 = 11,5 Ом, X_2 = 41,0 Ом.

Приняты следующие параметры энергосистемы со стороны ВН: индуктивное сопротивление X_c = 2,1 Ом, номинальное напряжение U_c = 220 кВ, постоянная времени затухания апериодической слагающей тока КЗ T_a = 0,2 с. Это соответствует условиям работы электрической станции.

Токи ТТ определяются средствами математического моделирования в программном пакете Simulink. Структура модели исследуемого объекта представлена на рис. 2.

СТ с 11-й группой соединения обмоток моделируется с помощью элемента Three-Phase Transformer (Two Windings), СГ и энергосистема – с помощью элементов Three-Phase Source. Замер токов, протекающих от энергосистемы и от генератора, производится соответственно с помощью измерительных блоков «M1» и «M2» (элементы Three-Phase VI Measurement), подключенных к элементам типа Scope. Переходные процессы в СГ приближенно учтены использованием при расчетах сверхпереходного сопротивления. Для получения вторичных токов используется математическая модель ТТ.

Рассмотрим порядок расчета фазового сдвига (фаза А). Отсчет фазового сдвига

производится относительно вектора вторичного тока I_{2A} в обмотке ТТ, установленного в фазе А на стороне ВН СТ. Фаза тока I_{2A} равна нулю.

Для рассматриваемого повышающего СТ с 11-й группой соединения обмоток вектор тока плеча ДЗ в фазе А со стороны ВН $I_{плВН}$ формируется как разность векторов I_{2A} и I_{2B}, где I_{2B} – вектор вторичного тока в обмотке ТТ, установленного в фазе В на стороне ВН СТ. Обозначим фазовый сдвиг между вторичными токами ТТ в фазах А и В на стороне ВН СТ как $\Delta\varphi_{AB}$.

Вектор $I_{плНН}$ обозначает ток плеча ДЗ со стороны НН СТ. Этот ток соответствует вторичному току ТТ, установленного на фазе А на стороне НН СТ. Вектор этого тока имеет значение фазы $\Delta\varphi_{Aa}$, где $\Delta\varphi_{Aa}$ – фазовый сдвиг между вторичными токами I_{2A} и $I_{плНН}$. Сдвиг между фазами токов плеч фазы А $\Delta\varphi_{dA}$ – разность фаз токов $I_{плВН}$ и $I_{плНН}$. При внешнем КЗ векторы токов плеч ДЗ $I_{плВН}$ и $I_{плНН}$ совпадают по фазе, и поэтому $\Delta\varphi_{dA}$ равен нулю.

Рассмотрим поведение защиты при внешнем 2-фазном КЗ на стороне ВН СТ (замыкаются фазы А и В) в условиях, когда энергосистема на стороне ВН отключена. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. Момент возникновения КЗ выбран таким, чтобы апериодическая составляющая была максимальна. Первичные и вторичные токи представлены на рис. 3.

Даже при значительном насыщении ТТ погрешность замера сдвига фаз между вторичными токами не превышает 23 эл. град. (рис. 4). В конце первого периода значение $\Delta\varphi_{AB}$ равно 180 эл. град.,

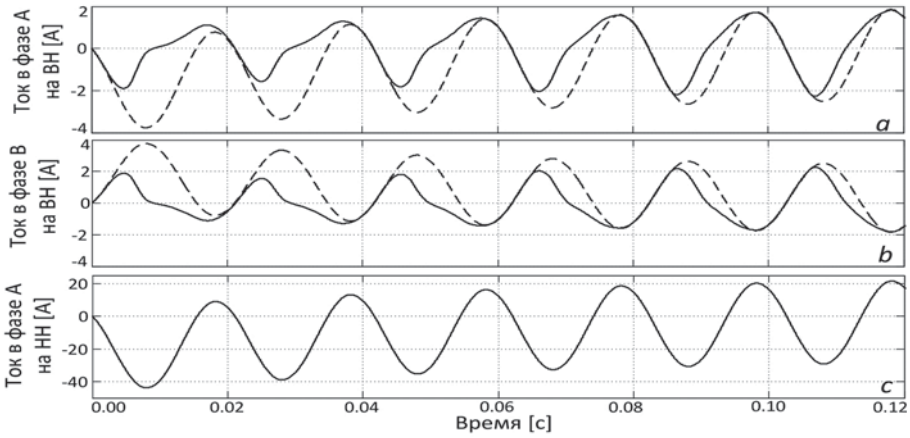


Рис. 3. Результаты моделирования внешнего двухфазного КЗ на стороне ВН силового трансформатора: a – токи в обмотке ТТ на стороне ВН в фазе А (пунктирные линии – первичные токи, сплошные – вторичные); b – то же в фазе В; c – в обмотке ТТ на стороне НН в фазе А

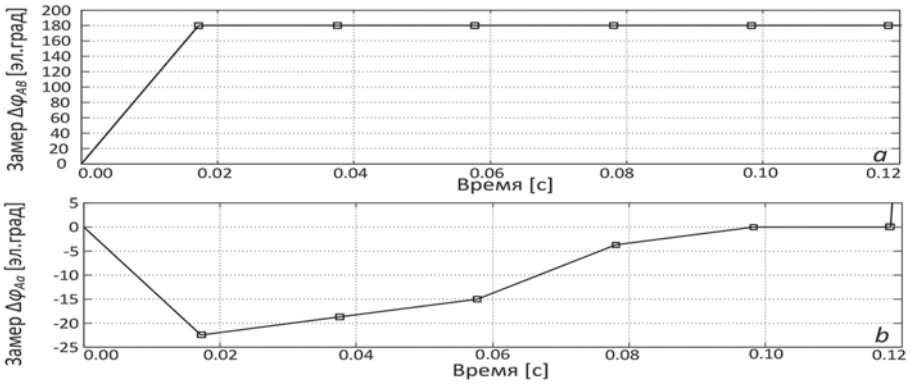


Рис. 4. Результаты измерения угла между фазами по предложенному методу: a – измеренные значения $\Delta\varphi_{AB}$; b – измеренные значения $\Delta\varphi_{Aa}$

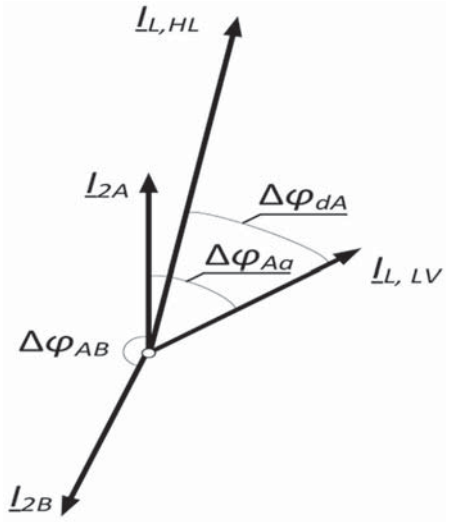


Рис. 5. Оценка значения $\Delta\varphi_{dA}$ по измерениям $\Delta\varphi_{AB}$ и $\Delta\varphi_{Aa}$

значение $\Delta\varphi_{Aa}$ равно 22,5 эл. град. Тогда модуль $\Delta\varphi_{dA}$ в конце первого периода составляет 22,5 эл. град., в конце второго – 18,8 эл. град., в конце третьего – 15,0 эл. град. На рис. 5 показана векторная диаграмма для расчета $\Delta\varphi_{dA}$. Определение значения $\Delta\varphi_{dA}$ для основной гармоники (при использовании цифрового преобразования Фурье) реализуется с помощью программного обеспечения, разработанного отечественным производителем ДЗ (рис. 6). Этот способ дает существенно большую погрешность: в конце первого периода рассчитанное значение модуля $\Delta\varphi_{dA}$ составляет приблизительно 54 эл. град., в конце второго периода – 41 эл. град., в конце третьего – 35 эл. град. Итак, несмотря на глубокое насыщение ТТ, погрешность определения фазового сдвига токов плеч ДЗ по предложенному в данной работе методу невелика.

Как показали дальнейшие численные эксперименты, для надежной отстройки от погрешностей следует принимать угол блокировки равным приблизительно 30 эл. град.

При превышении измеренного фазового сдвига значения угла блокировки следует разрешить действие ДЗ.

ВЫВОДЫ

1. При использовании интервалов идеальной трансформации ТТ алгоритм сравнения фаз более точен, чем метод цифровой фильтрации, который широко используется в микропроцессорных

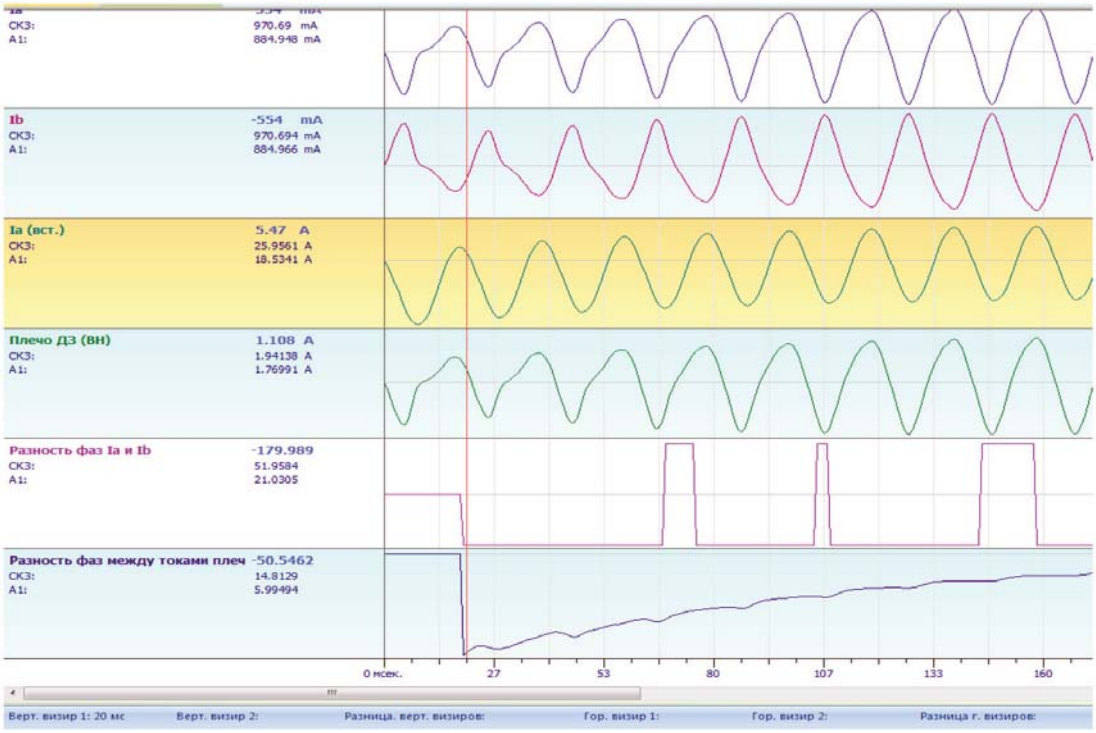


Рис. 6. Определение значения ΔφdA по данным программы FastView 4.3

устройствах защиты, а также исключает необходимость расчета уставок для каждого конкретного объекта защиты. Предложенный алгоритм оперирует малым числом переменных, что повышает быстродействие цифрового устройства ДЗ.

2. При реализации предложенного алгоритма разработчиком конкретного устройства должна быть решена задача определения параметров срабатывания измерительных органов, реагирующих на абсолютные значения входных сигналов, их фаз и производных. Выбор этих параметров необходим для отстройки от влияния помех, однако этот выбор не требует какого-либо вмешательства проектного и эксплуатирующего персонала, что исключает человеческий фактор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Циглер Г.** Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения: пер. с англ. / под ред. чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоиздат, 2005. – 273 с.

2. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

3. **Косых Д.А.** Сравнение технических характеристик современных продольных дифференциальных токовых защит генераторов. Совершенствование релейной защиты // Энергетик. – 2009. – № 12. – С. 23–25.

4. **Кужеков С.Л., Синельников В.Я.** Защита шин электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.

5. **Глазырин В.Е., Торопов Г.Э.** Моделирование переходных процессов в группах трансфор-маторов тока // Сб. научн. тр. НГТУ. – Новосибирск. – 2000. – № 3 (20). – С. 75–82.

КАК СБЕРЕЧЬ ЭНЕРГИЮ И ДЕНЬГИ

energetik.panor.ru

Производственно-технический журнал по вопросам организации повседневной работы специалистов служб главного энергетика.

Журнал **«Главный энергетик»** предлагает эксклюзивные аналитические материалы, связанные с решением задач в различных областях энергетики: производство электроэнергии и электроснабжение, производство и эксплуатация энергооборудования, теплоснабжение, водоподготовка и воздухоочистка, модернизация и ремонт электрооборудования, энергоменеджмент и энергосервис и др. Предпочтение отдается авторским материалам, в которых предлагаются решения конкретных производственных задач. Рассматриваются практические результаты научных исследований в области энергетики; изменения организационной, экономической парадигмы развития отрасли и конкретных организаций; данные о технологических новинках.

Наши эксперты и авторы: Николаев П.Н., ОАО «Кольчугинский завод „Электрокабель“»; **Савинцев Ю.М.,** корпорация «Русский трансформатор», канд. техн. наук; **Жуков В.В.,** член-корр. Академии электротехнических наук РФ, директор Института электроэнергетики, проф.; **Хусаинов Р.М.,** компания «Сантерно», канд. техн. наук; **Быстрицкий Г.Ф.,** проф. МЭИ; **Назин А.Н.,** ЗАО «ЦЭВТ», канд. техн. наук; **Самородов А.В.,** Управление государственного энергетического надзора; **Янсюкевич В.А.,** «Севергазпром»; **Федоров С.А.,** «Манометр-Терма»; **Решетов Л.И.,** ОАО «Ижавто»; **Бородин Б.Н.,** ОАО «Ижавто», и многие другие специалисты.

Издается при информационной поддержке Российской инженерной академии и Московского энергетического института.

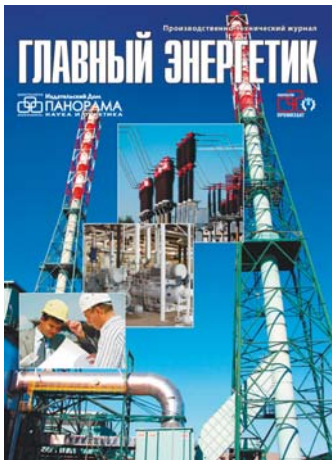
Ежемесячное издание.

Распространяется по подписке и на отраслевых мероприятиях.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ

- **От первого лица**
- **Энергосбережение**
- **Электрохозяйство**
- **Теплоснабжение**
- **Воздухо– и газоснабжение**
- **Диагностика и ремонт**
- **Обмен опытом**
- **Новые разработки**
- **Охрана труда и техника безопасности**

ГЛАВНЫЙ ЭНЕРГЕТИК



На правах рекламы

подписные индексы

82717

П7203

Для оформления подписки через редакцию пришлите заявку в произвольной форме по адресу электронной почты podpiska@panor.ru или позвоните по тел. 8 (495) 274-22-22 (многоканальный).