

Рис. 9. Реакция ФОС с $n = 18$ на синусоидальный входной сигнал:
1, 2 – то же, что на рис. 7

ВЫВОД

Предложенные адаптивные ФОС входных сигналов для микропроцессорных защит отличаются более высокими показателями технического совершенства, чем ранее рассматривавшиеся аналогичного исполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: Учеб. пособие. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 133 с.
2. Романюк Ф. А., Нагорная Е. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 7–8. – С. 16–21.
3. Романюк Ф. А. Формирование ортогональных составляющих вторичных сигналов в микропроцессорных защитах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1998. – № 3–8. – С. 17–23.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 5.05.2004

УДК 621.316.925

ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛЭП

Докт. техн. наук, проф. **НОВАШ В. И.**, инж. ШМЫГИН В. В.

Белорусский национальный технический университет

В цифровых (микропроцессорных) устройствах релейной защиты (РЗ) измерительный орган (ИО) – программный блок, группа операторов в программе, реализующей алгоритм функционирования защиты. В цифровых дистанционных защитах ЛЭП ИО сопротивления – программный блок, вы-

рабатывающий одноразрядный двоичный сигнал о положении вектора сопротивления ЛЭП, измеренного в месте установки защиты (входное сопротивление защиты), по отношению к области срабатывания ИО на комплексной плоскости сопротивлений. Линия, ограничивающая область срабатывания, является характеристикой ИО сопротивления в комплексной плоскости.

Характеристика охватывает область возможного нахождения вектора входного сопротивления при КЗ в заданной зоне действия защиты. Эта область значительно шире отрезка прямой, имеющего место при металлическом КЗ с установившимися синусоидальными токами и напряжениями, вследствие влияния переходного сопротивления в месте КЗ, подпитки места КЗ от смежных источников, погрешностей измерительных трансформаторов и т. п.

Алгоритм функционирования цифрового ИО сопротивления – это последовательность математических операций с цифровыми кодами мгновенных значений тока и напряжения линии, обеспечивающая определение интегральных параметров соответствующих аналоговых сигналов и оценку их соответствия некоторым заданным условиям срабатывания в виде одноразрядного двоичного сигнала. В современных цифровых дистанционных защитах алгоритм функционирования ИО сопротивления содержит операции вычисления вектора входного сопротивления, задания характеристики срабатывания ИО и операторы выработки двоичного выходного сигнала о срабатывании или несрабатывании ИО. В отличие от аналоговых дистанционных защит цифровые защиты с таким алгоритмом функционирования позволяют определять расстояние до места КЗ, что представляет их дополнительные преимущества.

В настоящей статье рассматриваются частотные погрешности определения активной и реактивной составляющих входного сопротивления по алгоритмам, используемым в цифровых дистанционных защитах [1]. Исследование выполнено методом вычислительного эксперимента [2] с использованием компьютерной программы [3]. В отличие от аналоговых дистанционных защит характеристика ИО сопротивления в комплексной плоскости может быть задана не зависящей от частоты. Вследствие этого частотные свойства алгоритма определения входного сопротивления в полной степени характеризуют частотные свойства ИО.

Ниже рассматриваются частотные свойства следующих алгоритмов определения компонентов вектора входного сопротивления:

- алгоритм, основанный на использовании ортогональных составляющих первых гармоник тока и напряжения;
- алгоритм, основанный на использовании двух мгновенных значений тока и напряжения линии, – алгоритм «двух выборок»;
- алгоритм, основанный на модели линии без поперечных связей, – алгоритм «трех выборок».

Алгоритм ортогональных составляющих ориентирован на работу с несинусоидальными периодическими сигналами частотой ω . Синусная $u_{sn}(t)$ и косинусная $u_{cs}(t)$ ортогональные составляющие первой гармоники сигнала $f(t)$ с периодом T для момента времени t определяются формулами разложения Фурье:

$$u_{sn}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \cos(\omega t) dt; \quad u_{cs}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \sin(\omega t) dt.$$

Перейдя от непрерывной функции $f(t)$ к числовой последовательности ее мгновенных значений $f(n\Delta t)$, получим:

$$u_{sn}(n\Delta t) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(n\Delta t - i\Delta t) \cos(\omega(n\Delta t - i\Delta t)); \quad (1)$$

$$u_{cs}(n\Delta t) = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(n\Delta t - i\Delta t) \sin(\omega(n\Delta t - i\Delta t)). \quad (2)$$

Здесь $N = \frac{T}{\Delta t}$ – количество выборок мгновенных значений сигнала на периоде; n – номер текущей выборки, соответствующей моменту времени t ; $f(n\Delta t - i\Delta t)$ – выборки мгновенных значений сигнала в моменты времени $t, t - \Delta t, t - 2\Delta t, \dots, t - (N - 1)\Delta t$.

Выражения (1), (2) обладают частотно-фильтрующими свойствами и являются нерекурсивными цифровыми фильтрами (КИХ-фильтрами) со всеми присущими им особенностями. Частотная характеристика цифрового фильтра имеет периодический характер, ее форма существенно зависит от количества выборок мгновенных значений за период.

Более общие выражения нерекурсивных фильтров для определения ортогональных составляющих первых гармоник несинусоидальных периодических сигналов имеют вид [4]:

$$f_{sn}(n\Delta t) = a_N f(n\Delta t) + \sum_{i=0}^{N-1} a_{i+1} f((i+1)\Delta t);$$

$$f_{cs}(n\Delta t) = b_N f(n\Delta t) + \sum_{i=0}^{N-1} b_{i+1} f((i+1)\Delta t).$$

Численные значения коэффициентов a_i, b_i ($i = 1, 2, \dots, N$) выбираются такими, чтобы удовлетворялись условия получения первых гармоник сигнала $f(t)$ при задаваемых значениях $N, \Delta t$. В компьютерной программе [3] используются цифровые фильтры, обеспечивающие отстройку от аperiodических составляющих и вторых гармоник при оптимальных частотных и динамических характеристиках со следующими параметрами:

$$N = 6; \Delta t = 4 \text{ мс}; a_1 = a_6 = 0,2000; a_2 = a_5 = 0,1236; a_3 = a_4 = -0,3236;$$

$$b_1 = -b_6 = -0,2753; b_2 = -b_5 = 0,3804; b_3 = -b_4 = 0,2351.$$

Компоненты вектора входного сопротивления определяются по ортогональным составляющим векторов тока и напряжения линии:

$$\underline{I} = i_{cs} + j i_{sn}; \quad \underline{U} = u_{cs} + j u_{sn}$$

без определения их интегральных параметров:

$$R_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{cs}} i_{\text{sn}} + u_{\text{sn}} i_{\text{cs}}}{i_{\text{cs}}^2 + i_{\text{sn}}^2}; \quad (3)$$

$$X_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{sn}} i_{\text{cs}} + u_{\text{cs}} i_{\text{sn}}}{i_{\text{cs}}^2 + i_{\text{sn}}^2}. \quad (4)$$

Достоверный выходной сигнал цифровых фильтров устанавливается через один-два периода промышленной частоты после внезапного изменения режима линии. Поэтому алгоритм с использованием ортогональных составляющих вполне приемлем для ИО сопротивления быстродействующих ступеней дистанционных защит ЛЭП 110–220 кВ. Некоторым недостатком алгоритма является большое количество вычислительных операций, что может быть несущественным при высокой производительности современных средств вычислительной техники. Для работы с сигналами, содержащими более высокие гармоники, необходимо использовать цифровые фильтры с повышенной дискретностью входных сигналов.

Алгоритм «двух выборок» определяет вектор синусоидального сигнала известной частоты по двум мгновенным значениям сигнала с интервалом времени Δt :

$$u_1 = u(t - \Delta t) = U_m \sin(\omega t + \psi - \omega \Delta t);$$

$$u_2 = u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Из этих уравнений определяются амплитуда U_m и фаза сигнала в момент времени t

$$\psi_t = \omega t + \psi.$$

Входные сопротивления определяются как отношения векторов линейных напряжений петли КЗ к векторам соответствующих разностей фазных токов. Величины $R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ выражаются непосредственно через выборки мгновенных значений токов и напряжений без предварительного вычисления компонентов векторов $\underline{U}_{\text{вх}}$ и $\underline{I}_{\text{вх}}$. Наиболее простые выражения для $R_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ получаются при частоте сигналов 50 Гц и $\Delta t = 0,005$ с ($\omega \Delta t = \pi/2$):

$$R_{\text{вх}} = \frac{u_1 i_1 + u_2 i_2}{i_1^2 + i_2^2}; \quad (5)$$

$$X_{\text{вх}} = \frac{u_1 i_2 + u_2 i_1}{i_1^2 + i_2^2}. \quad (6)$$

Алгоритм двух выборок отличается сравнительно малым количеством вычислительных операций. Однако достоверными результаты становятся только после затухания аperiodических составляющих в первичных токах КЗ и обусловленных ими искажений вторичных токов трансформаторов тока (ТТ). На линиях 110–220 кВ для этого требуется до 0,3...0,5 с при близких к месту установки защиты КЗ и около 0,1 с – при удаленных КЗ. Алгоритм может быть использован при выполнении ИО сопротивления второй и третьей ступеней дистанционной защиты, работающих с выдержкой времени. К моменту их срабатывания аperiodические составляющие в

токах КЗ и переходные процессы во вторичных цепях ТТ полностью затухают, токи и напряжения, подводимые к ИО, практически синусоидальны. Представляют интерес величины погрешностей определения $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$ при отклонениях частоты от 50 Гц.

Алгоритм, основанный на математической модели линии, мало чувствителен к искажениям форм кривых тока и напряжения, отклонениям частоты сигнала от номинального значения. Математической моделью короткозамкнутой линии без поперечных связей является дифференциальное уравнение

$$u = R_{\text{вх}} i + L_{\text{вх}} \frac{di}{dt} = R_{\text{вх}} i + L_{\text{вх}} i',$$

где u – напряжение в месте установки защиты; i – ток в петле короткого замыкания.

Для определения $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$ с использованием u , i , i' необходимы два сочетания этих величин в моменты времени t_1 и t_2 :

$$u_1 = R_{\text{вх}} i_1 + L_{\text{вх}} i'_1;$$

$$u_2 = R_{\text{вх}} i_2 + L_{\text{вх}} i'_2.$$

Решив эту систему относительно $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$, получаем составляющие входного сопротивления:

$$R_{\text{вх}} = \frac{u_1 i'_2 + u_2 i'_1}{i_1 i'_2 + i_2 i'_1}; \quad X_{\text{вх}} = \frac{u_2 i_1 + u_1 i_2}{i_1 i'_2 - i_2 i'_1}.$$

Существуют различные алгоритмы реализации этих формул, отличающиеся способами вычисления производных. Производная тока простейшим путем определяется как отношение разности между соседними выборками мгновенных значений тока к интервалу времени между ними

$$i' = \frac{i_2 - i_1}{\Delta t}.$$

Значение производной обычно относят к моменту времени t_2 . Однако более точно его следует относить к середине интервала Δt , т. е. к моменту времени $t_2 - 0,5\Delta t$. С учетом этого соображения для более точной реализации выражений для $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$ необходимо иметь три выборки мгновенных значений тока и вычислять производные тока i'_1 , i'_2 следующим образом:

$$i'_1 = \frac{i_2 - i_1}{\Delta t}; \quad i'_2 = \frac{i_3 - i_2}{\Delta t}.$$

Учитывая, что значения производных i'_1 , i'_2 относятся к моментам времени $t_2 - 0,5\Delta t$; $t_3 - 0,5\Delta t$, соответствующие этим моментам времени мгновенные значения тока и напряжения следует определять как: $0,5(u_1 + u_2)$; $0,5(i_1 + i_2)$; $0,5(u_2 + u_3)$; $0,5(i_2 + i_3)$;

Выражения для $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$ приобретают вид:

$$R_{\text{вх}} = \frac{(u_1 + u_2)(i_3 - i_2) - (u_2 + u_3)(i_2 - i_1)}{(i_1 + i_2)(i_3 - i_2) - (i_2 + i_3)(i_2 - i_1)}; \quad (7)$$

$$X_{\text{вх}} = \frac{(u_2 + u_3)(i_1 + i_2) - (u_1 + u_2)(i_2 + i_3)}{(i_1 + i_2)(i_3 - i_2) - (i_2 + i_3)(i_2 - i_1)} \frac{\Delta t}{2} \omega, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi \cdot 50$ – номинальное значение угловой частоты.

Для достаточно точного определения производных величина Δt не должна быть слишком малой и не должна превышать 0,001...0,002 с. Достоверные результаты достигаются при получении не менее трех выборок мгновенных значений сигналов после изменения режима, т. е. через 0,004...0,007 с.

Алгоритм «трех выборок» является наиболее быстродействующим по сравнению с рассмотренными выше. Его можно использовать для первых ступеней дистанционных защит, работающих без выдержки времени. Переходные сопротивления в месте КЗ, не отраженные в математической модели линии, могут приводить к погрешностям определения $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$, особенно заметным на линиях с двусторонним питанием.

Для оценки частотных свойств рассмотренных алгоритмов использовалась компьютерная программа [3]. Программой рассчитываются входные сопротивления защиты линии, работающей в узле нагрузки, с учетом всех факторов, оказывающих заметное влияние на $R_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$ и рекомендуемых [1, 5] к учету при выборе параметров срабатывания защиты. Оценка основных показателей технического совершенства производится визуально по положению конца вектора входного сопротивления относительно графического изображения характеристики ИО соответствующей ступени защиты на экране дисплея (рис. 1). Количественная оценка частотных свойств ИО сопротивления сделана по численным величинам активной и реактивной составляющих вектора входного сопротивления, их отклонениям от расчетных значений, полученных в соответствии с известными документами и литературными источниками.

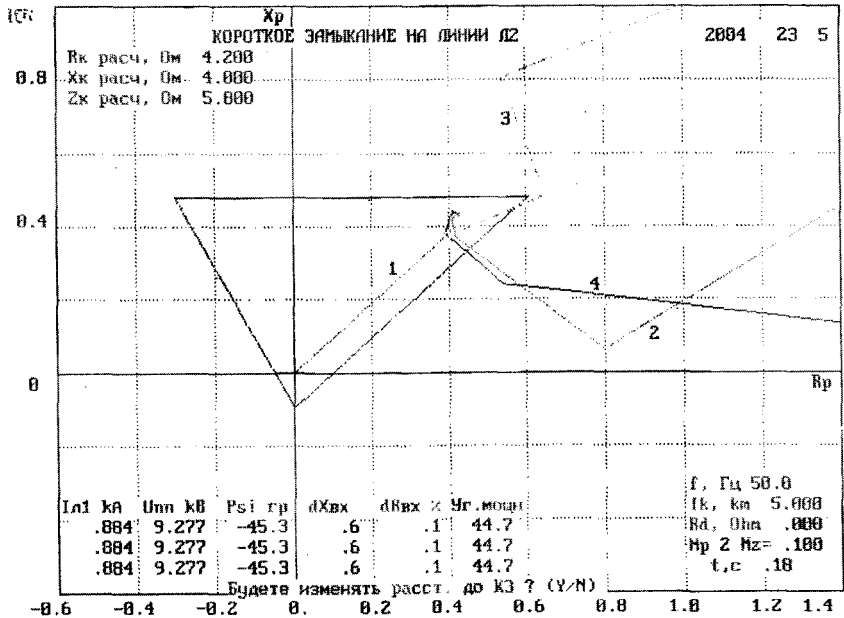


Рис. 1. Трехфазное КЗ во II зоне защиты: 1 – вектор $Z_{\text{к расч}}$; 2 – годограф вектора $Z_{\text{вх AB}}$; 3 – $Z_{\text{вх BC}}$; 4 – $Z_{\text{вх CA}}$

В энергосистеме возможны длительные установившиеся режимы с пониженной частотой всех генерирующих источников до 48 Гц и кратковременные режимы с пониженной частотой до 45 Гц. Кратковременные режимы с повышенной частотой до 55 Гц возможны при больших сбросах нагрузки в результате аварийных отключений системообразующих ЛЭП 110–330 кВ, силовых трансформаторов большой мощности. Даже кратковременное снижение частоты ниже 45 Гц предотвращается автоматической частотной разгрузкой, повышение частоты более 55 Гц вызывает срабатывание автоматов безопасности паровых турбин.

В настоящей работе рассмотрены погрешности в установившихся режимах КЗ с пониженной и повышенной частотами в диапазоне 45...55 Гц. Режимы синхронных качаний, асинхронные режимы требуют дополнительного специального исследования. В качестве оценочных параметров для сравнительной оценки алгоритмов определения входных сопротивлений приняты относительные погрешности определения $R_{вх}$, $X_{вх}$ при коротких замыканиях:

$$\Delta X_{вх} = \frac{X_{вх} - X_{к.расч}}{X_б} \cdot 100 \%;$$

$$\Delta R_{вх} = \frac{R_{вх} - R_{к.расч}}{R_б} \cdot 100 \%.$$

Здесь $R_{вх}$, $X_{вх}$ – составляющие входного сопротивления, определяемые по описанным выше алгоритмам; $R_{к.расч}$, $X_{к.расч}$ – расчетные значения составляющих входного сопротивления; $R_б$, $X_б$ – базисные значения.

Расчетные значения входных сопротивлений зависят от места КЗ: при КЗ на защищаемой линии –

$$X_{к.расч} = l_к \cdot X_{л.уд}; \quad R_{к.расч} = l_к \cdot R_{л.уд} + 0,5R_д;$$

при КЗ на смежных линиях –

$$X_{к.расч} = l_л \cdot X_{л.уд} + l_к \cdot X_{см.уд}; \quad R_{к.расч} = l_л \cdot R_{л.уд} + l_к \cdot R_{см.уд} + 0,5R_д.$$

За базисные величины можно принимать $X_{к.расч}$, $R_{к.расч}$ или сопротивления срабатывания тех ступеней, где происходит КЗ. В настоящей работе за базисные принимались сопротивления срабатывания, что приемлемо для сравнительной оценки алгоритмов.

Алгоритм ортогональных составляющих и алгоритм двух выборок ориентированы на работу при частоте 50 Гц. При отклонениях частоты входные сопротивления определяются с погрешностями, достигающими десятков процентов. Погрешности при некотором постоянном отклонении частоты не являются постоянными величинами, а изменяются во времени по замкнутому циклу, достигая некоторых максимальных и минимальных (максимальных по модулю отрицательных) значений. Длительность одного цикла изменения погрешности зависит от величины отклонения частоты и равна $0,5/|\Delta f|$.

На рис. 2, 3 представлены траектории векторов входного сопротивления при трехфазном КЗ на границе защищаемой зоны ИО I ступени защиты. При снижении частоты (рис. 2) средняя погрешность $X_{вх}$ отрицательна.

Средняя погрешность $R_{вх}$ значительно меньше по абсолютному значению и в основном положительна. При повышении частоты (рис. 3) средняя погрешность $X_{вх}$ положительна, погрешности $R_{вх}$ меньше погрешностей $X_{вх}$ и знакопеременны.

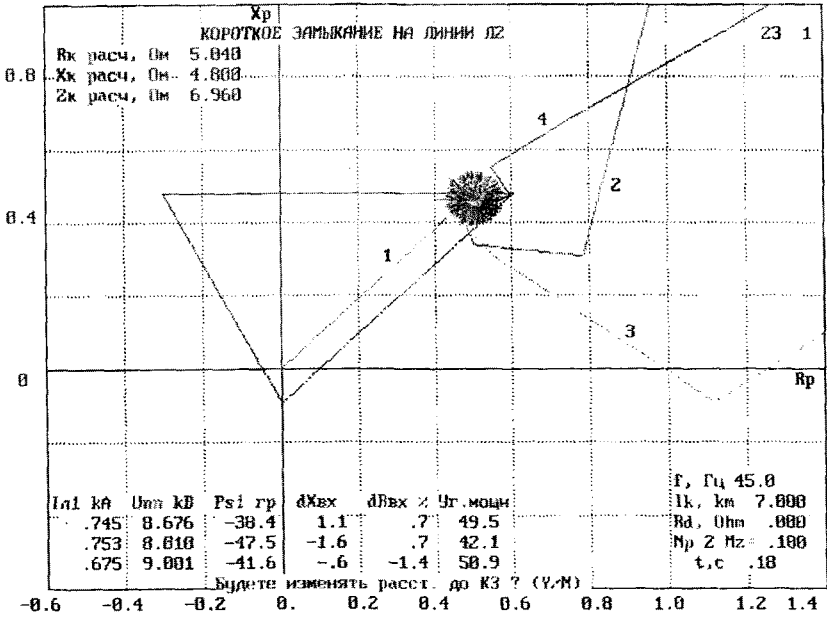


Рис. 2

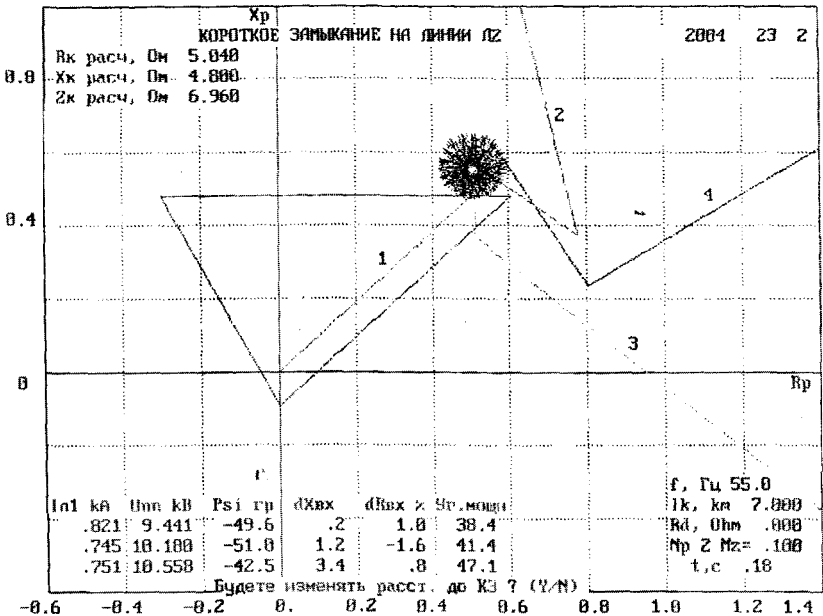


Рис. 3

Алгоритм трех выборок практически нечувствителен к отклонениям частоты. Погрешности $R_{вх}$, $X_{вх}$ не превышают 1...2 %, однако наблюдаются единичные значительные выбросы погрешностей, составляющие десятки процентов.

ВЫВОДЫ

Алгоритм ортогональных составляющих, заключающийся в цифровой фильтрации основных гармоник тока и напряжения, отличается хорошей помехоустойчивостью, но требует большого объема вычислительных операций, чувствителен к изменениям частоты. Алгоритм двух выборок отличается минимальным количеством вычислительных операций, но требует синусоидальности входных сигналов при номинальной частоте, менее помехоустойчив. Алгоритм трех выборок практически не чувствителен к изменениям частоты, но менее помехоустойчив по сравнению с алгоритмом ортогональных составляющих.

Представляют интерес разработка и исследование частотно-независимых алгоритмов функционирования цифровых измерительных органов сопротивления, основанных на цифровой фильтрации входных токов и напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон Э. М. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Романюк Ф. А., Новаш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998.
3. Информационное и математическое обеспечение вычислительного эксперимента в исследовании цифровых измерительных органов дистанционных защит линий 6-10-35 кВ / Ф. А. Романюк, Н. Н. Бобко, Е. В. Глинский и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2. – С. 3–11.
4. Романюк Ф. А., Нагорная Е. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 7–8. – С. 16–21.
5. Федосеев А. М., Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 5.05.2004

УДК 621.311

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ 35 кВ И ВЫШЕ

Докт. техн. наук, доц. **ФУРСАНОВ М. И.**, инженеры **ЗОЛОТОЙ А. А.**, **МУХА А. Н.**,
канд. техн. наук **ПРИВАЛОВ В. И.**, инж. **КРУПА И. В.**

*Белорусский национальный технический университет,
Научно-производственная фирма «Диполь»*

В статье описана автоматизированная система (АС) управления электрическими сетями напряжением 35 кВ и выше, разработанная БНТУ (библиотека прикладных программ для выполнения технологических расчетов электрических сетей 35 кВ и выше) совместно с НПФ «Диполь» (оперативно-информационный комплекс автоматизированной системы управления объектами электроэнергетики). В настоящее время АС находится в опытно-промышленной эксплуатации в электрических сетях РУП «Минскэнерго».