

Авторы:

к.т.н. Рыбалкин А.Д.,

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

им. М.И. Платова,

г. Новочеркасск, Россия,

к.т.н. Шурупов А.А.,

ООО НПП «ЭКРА»,

г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Rybalkin A.D.,

Platov South-Russian State

Politechnic University (NPI),

Novocherkassk, Russia,

Ph.D. Shurupov A.A.,

EKRA Ltd.,

Cheboksary, Russia.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

FEATURES OF CALCULATION ERRORS IN THE IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FUNCTIONING OF MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION

Аннотация: при реализации любого алгоритма функционирования устройств релейной защиты (УРЗ) обязательным этапом является оценка погрешности. При технической реализации алгоритма в дискретной форме, в отличие от реализации в аналоговой форме, возникает ряд особенностей такого расчёта. Согласно ГОСТ 7746-2001, производители трансформаторов тока (ТТ) обязаны гарантировать работу ТТ с погрешностью не больше заданной. При этом все три типа погрешностей, а именно токовая, угловая и полная, вычисляются за время, равное периоду промышленной частоты, то есть вычисляются интегральные значения этих величин. Вопрос о достаточности такого определения погрешностей работы ТТ при подключении к этим ТТ устройств релейной защиты, выполненных на базе микропроцессоров, никто не ставил.

Ключевые слова: сигнал, трансформатор тока, алгоритм, погрешность, микропроцессорное устройство релейной защиты.

Annotation: with the implementation of any algorithm operation of relay protection (PSR), a mandatory step is to estimate the error. With the technical implementation of the algorithm in a digital form, in contrast to the implementation in analog form, there are a number of features of this calculation. In accordance with GOST 7746-2001 manufacturers current transformers (CTs) are required to ensure that the work of the CT with an error not greater than the predetermined. Moreover, all three types of errors, namely current, angular and full calculated for a time equal to the period

1. Постановка задачи

Отличительной особенностью микропроцессорных устройств РЗ следует считать то, что алгоритмы работы как ИО, так и логики защиты реализованы в дискретной форме, в отличие от всех предыдущих поколений РЗ. Следовательно, для расчёта погрешностей, возникающих при обработке информации, поступающей от ТТ и измерительных трансформаторов напряжения (ТН), которая представлена на выходе этих устройств в аналоговой форме, в дискретной форме допустимо и целесообразно применить методы анализа возникновения и распространения ошибок при решении задач на цифровых вычислительных машинах (ЦВМ).

При выборе алгоритмов ИО защит необходимо выполнять их преобразования и сравнение различных алгоритмов с целью выявления наиболее пригодных. В [4] предложено для этой цели использовать метод эквивалентного программирования.

Следуя [2] будем полагать, что методологическая ошибка равна нулю, следовательно, результирующая ошибка на выходе ИО РЗ, реализованного в дискретной форме, равна сумме методической, трансформированной и инструментальной ошибок.

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_T + \sigma_I, \quad (1)$$

где σ_M – методическая составляющая ошибки, σ_T – трансформированная составляющая ошибки, σ_I – инструментальная составляющая ошибки.

Для ответа на этот вопрос необходимо проанализировать, как погрешность, присутствующая в исходных данных (погрешность вторичного тока) распространяется по мере реализации алгоритма и какова будет величина результирующей погрешности в сформированной таким образом величине, которая, в свою очередь, подаётся на вход измерительного органа (ИО).

В соответствии с требованиями ГОСТ 7746-2001, производители трансформаторов тока (ТТ)

of industrial purity, that is calculated integral values of these quantities. The question of the adequacy of the determination of errors work when connected to TT TT this relaying performed based on microprocessors nobody put.

Keywords: signal, current transformer, algorithm error, Protection Relays.



Рыбалкин
Алексей Дмитриевич

Дата рождения: 26.10.1951 г. В 1974 г. окончил энергетический факультет НПИ. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование электромагнитных переходных процессов в токовых цепях РЗ основных электрических сетей объединённых энергосистем». Доцент кафедры «Электрические станции и ЭЭС» ЮРГПУ.



Шурупов
Алексей Александрович

В 1973 г. окончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 г.), старший научный сотрудник. Заведующий отделом защит подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

обязаны гарантировать работу ТТ с погрешностью не больше заданной при протекании по первичной обмотке ТТ вынужденной составляющей тока короткого замыкания (ТКЗ) с кратностью не больше заданной. Этот ГОСТ введён в действие в 2001 году взамен ГОСТ 7746-89, который был введён в действие в 1990 году. При введении в действие последнего ГОСТа (ГОСТ 7746-2001) в него были внесены действующие на тот момент нормы по определению погрешностей работы ТТ. При этом все три типа погрешностей, а именно токовая, угловая и полная вычисляются за время, равное периоду промышленной частоты, то есть вычисляются интегральные значения этих величин. Вопрос о достаточности такого определения погрешностей работы ТТ при подключении к этим ТТ устройств релейной защиты, выполненных на базе микропроцессоров, никто не ставил. Отсутствие такой возможности не позволяет с уверенностью установить, что явилось причиной излишнего срабатывания защиты, сама защита или трансформаторы тока.

Можно показать, что в зависимости от характера нагрузки и относительного содержания свободных составляющих в ТКЗ форма вторичного тока при одной и той же величине токовой погрешности (а также и двух других) будет существенно отличаться [2].

На приведённом ниже рисунке 1 изображены кривые тока КЗ, вторичного тока ТТ при

различном характере нагрузки и относительной мгновенной погрешности при учёте кривой намагничивания методом прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН), что вполне достаточно для качественного (но не количественного) анализа. Выполним качественный анализ.

На рисунке 1 действующее (средне-выпрямленное) значение обоих вторичных токов одинаково.

Как видно из рисунка 1, до момента насыщения ТТ мгновенная погрешность равна нулю. Затем в момент насыщения при активной нагрузке погрешность достигает максимального и равного плюс-минус единице относительного значения и держится до момента выхода ТТ из насыщения. При активно-индуктивной нагрузке в момент насыщения вторичный ток начинает затухать по экспоненциальному закону с постоянной времени вторичной цепи. Реально на практике нагрузка на ТТ всегда носит активно-индуктивный характер, так как даже в случае чисто активной внешней нагрузки присутствует индуктивность вторичной обмотки ТТ. Поэтому по времени входа ТТ в насыщение мгновенная погрешность нарастает и достигает максимума в момент перехода тока КЗ через нуль.

Современные защиты не реагируют непосредственно на величину интегральных характеристик вторичного тока. Алгоритм работы такой

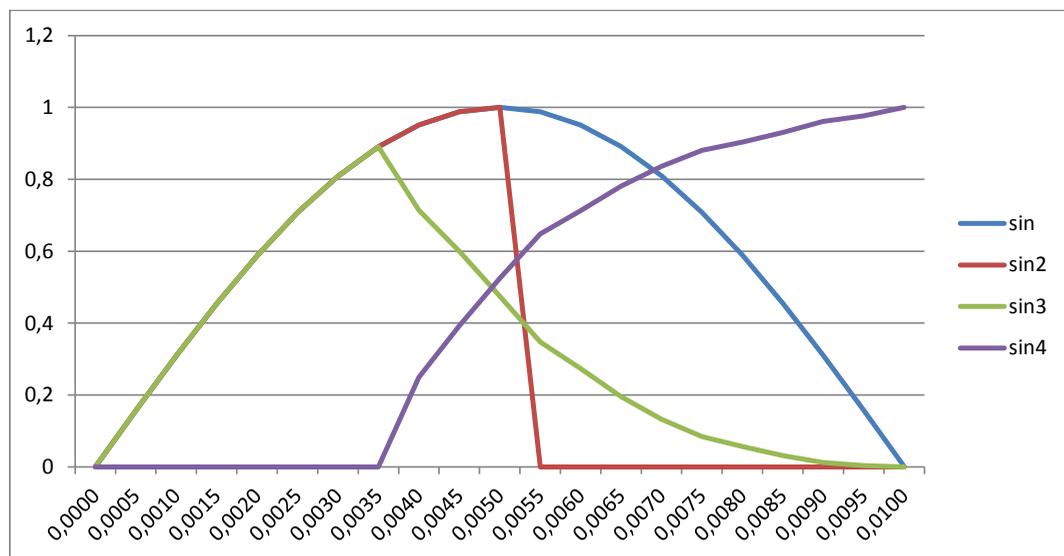


Рис. 1. Кривые переходного тока короткого замыкания (синяя кривая – вынужденная составляющая тока КЗ, красная – вторичный ток ТТ при активной нагрузке, зелёная – вторичный ток ТТ при активно-индуктивной нагрузке, фиолетовая – относительная мгновенная погрешность вторичного тока по отношению к приведённому первичному)

микропроцессорной релейной защиты начинается с проведения замеров. В зависимости от применяемого типа микропроцессора выбирают количество производимых за период промышленной частоты замеров. В настоящее время это количество колеблется от 24 до 48. Естественно, что увеличение числа замеров повышает точность, но увеличивает нагрузку на вычислительные ресурсы системы.

В [3] описана методика оценки влияния погрешности, присутствующей во входных данных (исходных данных) на величину погрешности в выходных данных (распространение ошибок). В [4] описана методика расчёта погрешности величины, которая подаётся на вход ИО релейной защиты в зависимости от величины погрешности вторичного тока трансформатора тока. Там же показано, что даже для несложного ИО релейной защиты (токового) при наличии мгновенной погрешности вторичного тока в несколько процентов величина погрешности выходной величины, которая подаётся на вход ИО, увеличивается в несколько раз и может достигать нескольких десятков процентов.

2. Разработка методики расчёта влияния погрешности вторичного тока на величину погрешности сформированных для ИО релейной защиты сигналов

На рисунке 2 приведена схема ИО релейной защиты в наиболее общем виде.

На вход непрерывно поступает поток дискретных значений электрических величин. Обозначим количество этих величин как m . Далее из этих величин схемами формирования сигналов, которых N , формируется соответственно N величин, каждая из которых в свою очередь поступает на вход схемы сравнения. В зависимости от логики работы схемы сравнения последняя выдаёт сигнал на совершение некоторых действий или бездействие.

В любом случае алгоритмы работы схем формирования сигналов и схемы сравнения состоят из последователь-



Рис. 2. Схема измерительного органа релейной защиты

ной реализации четырёх арифметических операций, а именно:

- сложения;
- вычитания;
- умножения;
- деления.

Рассмотрим влияние ошибок, содержащихся в исходных данных, на величину ошибки в результате.

Сложение

Имеются два приближения X_r и Y_r к двум величинам X и Y , а также соответствующие абсолютные ошибки E_x и E_y . Тогда в результате сложения получим $X + Y = X_r + E_x + Y_r + E_y = (X_r + Y_r) + (E_x + E_y)$.

Таким образом, ошибка суммы, которую обозначим, равна:

$$E_{X+Y} = (E_x + E_y) \tag{2}$$

Вычитание

Тем же путём получим

$$E_{X-Y} = (E_x - E_y) \tag{3}$$

Умножение

При умножении имеем

$$X * Y = (X_r + E_x) * (Y_r + E_y) = X_r * Y_r + Y_r * E_x + X_r * E_y + E_x * E_y.$$

Поскольку ошибки обычно гораздо меньше самих величин, с достаточной для инженерных расчётов точностью пренебрегаем произведением

ошибок и в результате получаем формулу для оценки влияния погрешности в исходных данных на результат выполнения операции умножения:

$$X * Y = (X_r + E_x) * (Y_r + E_y) = X_r * Y_r + Y_r * E_x + X_r * E_y.$$

Итого ошибка произведения равна

$$E_{X*Y} = Y_r * E_x + X_r * E_y. \tag{4}$$

Деление

Имеем
$$\frac{X}{Y} = \frac{X_r + E_x}{Y_r + E_y}.$$

Преобразуем выражение к виду:

$$\frac{X}{Y} = \frac{X_r + E_x}{Y_r} * \left(\frac{1}{1 + \frac{E_y}{Y_r}} \right).$$

Множитель, стоящий в скобках, при

$\left| \frac{E_y}{Y_r} \right| \ll 1$ можно разложить в ряд

$$\frac{X}{Y} = \frac{X_r + E_x}{Y_r} \left(1 - \frac{E_y}{Y_r} + \left(\frac{E_y}{Y_r} \right)^2 - \dots \right).$$

Перемножая и пренебрегая всеми членами, которые содержат произведения ошибок или степени ошибок выше первой, имеем

$$\frac{X}{Y} = \frac{X_r}{Y_r} + \frac{E_x}{Y_r} - \frac{X_r * E_y}{Y_r^2}.$$

Следовательно,

$$E_{x/y} = \frac{E_x}{Y_r} - \frac{X_r * E_y}{Y_r^2}. \tag{5}$$



Выведем формулы для расчёта **относительных ошибок**.

Сложение.

$$\frac{E_{x+y}}{X_r + Y_r} = \frac{X_r}{X_r + Y_r} * \left(\frac{E_x}{X_r} \right) + \frac{Y_r}{X_r + Y_r} * \left(\frac{E_y}{Y_r} \right).$$

Вычитание.

$$\frac{E_{x-y}}{X_r - Y_r} = \frac{X_r}{X_r - Y_r} * \left(\frac{E_x}{X_r} \right) - \frac{Y_r}{X_r - Y_r} * \left(\frac{E_y}{Y_r} \right).$$

Умножение.

$$\frac{E_{x*y}}{X_r * Y_r} = \left(\frac{E_x}{X_r} \right) + \left(\frac{E_y}{Y_r} \right).$$

Деление.

$$\frac{E_{x/y}}{X_r / Y_r} = \left(\frac{E_x}{X_r} \right) - \left(\frac{E_y}{Y_r} \right).$$

Вышеприведённые формулы позволяют вычислить величину ошибки результата после выполнения каждого из четырёх арифметических действий как функции от X_r, Y_r, E_x, E_y .

Ошибка округления в данном арифметическом действии при этом не учитывается. В случае необходимости в дальнейшем подсчитать, как распространяется в последующих арифметических операциях ошибка этого результата, необходимо к вычисленной по одной из четырёх формул прибавить отдельно ошибку округления.

3. Методика расчёта погрешности алгоритма ИО РЗ

Для анализа погрешности алгоритма ИО РЗ при реализации в дискретном виде необходимо рассмотреть её составляющие. В качестве измеряемого сигнала будет рассматриваться переходный ток КЗ, описываемый выражением

$$i = I_m \left[\sin(\omega t - \Psi_i) - \sin \Psi_i e^{-\frac{t}{T_a}} \right] = I_m \left[\cos \Psi_i \sin \omega t + \sin \Psi_i \left(\cos \omega t e^{-\frac{t}{T_a}} \right) \right],$$

где ω – круговая частота, Ψ_i – фаза КЗ, I_m – амплитуда ТКЗ, T_a – постоянная времени первичной сети.

Формулы для расчета методической погрешности в установившемся и переходном режимах:

$$\Delta_{MY} = 2 \left\{ \cos \omega t_n \left(1 - \frac{\sin \omega \Delta t}{\omega \Delta t} \right) + \sin \left[1 - \frac{\sin^2 \left(\omega \frac{\Delta t}{2} \right)}{\left(\omega \frac{\Delta t}{2} \right)^2} \right] \right\}; \quad (6)$$

$$\Delta_{МП} = \Delta_{MY} + \frac{4e^{-\frac{t_n}{T_a}}}{\omega^2 \Delta t^2} \operatorname{sh}^2 \frac{\Delta t}{2T_a} - \frac{e^{-\frac{t_n}{T_a}}}{\omega \Delta t} \operatorname{sh} \frac{\Delta t}{2T_a}, \quad (7)$$

где Δt – шаг квантования по времени.

Из (6) и (7) видно, что с уменьшением Δt методическая погрешность уменьшается. Кроме того, $\Delta_{МП}$ уменьшается с ростом постоянной времени T_a . Минимальная величина постоянной времени T_a при металлическом КЗ для сетей 110 кВ и выше не менее 3 мс. Рассчитанные для этой величины зависимости, а также зависимость $\Delta_{MY}(\Delta t)$ представлены в первой, второй, а также восьмой и девятой строках табл. 1.

Трансформированная составляющая погрешности возникает в результате трансформации входных ошибок аргументов через оставшуюся часть вычислительного процесса [3]. В рассматриваемом алгоритме пять таких аргументов: $\omega, \Delta t, i_{n+1}, i_n, i_{n-1}$. Три последние величины поступают по одному и

тому же каналу и считаются практически в один и тот же момент времени. С учётом того, что в алгоритм входит разность этих величин, влиянием их на трансформированную погрешность можно пренебречь. Обозначая алгоритм работы РЗ через φ и учитывая, что

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_k^n \left(\frac{d\varphi}{dx_k} \right)^2} \sigma_{xk}^2,$$

находим расчётное выражение для вычисления относительной трансформированной составляющей погрешности

$$\Delta_T = \frac{\sigma_T}{2I_{мсп}^2 \omega^2 \Delta t^2} = 2 \left[\left(\frac{i''}{\omega I_{мсп}} \right)^2 + 1 \right] \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\omega^2} + \frac{\sigma_2^2}{\Delta t^2}}, \quad (8)$$

где σ_1, σ_2 – допустимые отклонения по частоте и шагу соответственно.

Величину σ_1 принимаем равной с запасом 6,28 1/c ($f_1 = 1 \text{Гц}$), σ_2 – равной минимальной величине квантования по времени таймера. В таблице 1 (строки 3, 4) приведены зависимости Δ_{TY} и $\Delta_{ТП}$ (строки 10, 11) в функции от шага Δt . Как следует из (8) и таблицы 1, с уменьшением Δt Δ_T увеличивается.

Для расчета инструментальной погрешности строится граф вычислительного процесса, реализующий алгоритм φ и показанный на рис. 3.

При расчете предполагается, что каждая из вновь возникших ошибок округления трансформируется через оставшуюся часть вычислительного процесса аналогично тому, как каждая входная ошибка аргумента трансформируется через весь вычислительный процесс [3]. Обозначим относительную погрешность замера числа в АЦП, равную $\frac{0,5}{2^{NA} - 1}$, где NA –

количество двоичных разрядов АЦП, через $\Delta_{АЦП}$, а относительную погрешность округления результатов вычисления – через σ .

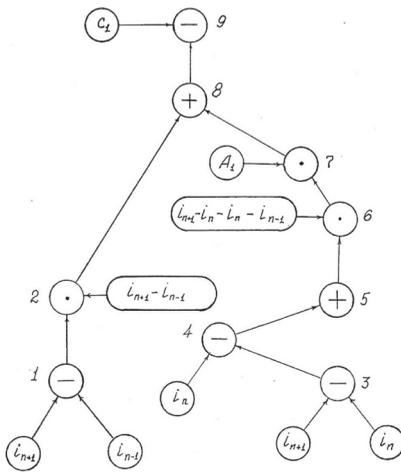


Рис. 3. Граф вычислительного процесса для алгоритма по φ

Табл. 1. Расчёт погрешности алгоритма функционирования реле переменного тока, отстроенного от влияния апериодической составляющей тока

ωt_n	Δt (мкс)	1000	500	200	100	50	10	Примечание
$\pi/2$	$\Delta_{\text{уст}}$	6,5	1,6	0,3	0,1	0,0	0,0	Установившийся режим
0	$\Delta_{\text{уст}}$	3,2	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	
$\pi/2$	$\Delta_{\text{уст}}$	8,0	8,0	8,0	8,4	9,4	25,2	
0	$\Delta_{\text{уст}}$	4,0	4,0	4,0	4,2	4,7	12,6	
$\pi/2$	$\Delta_{\text{уст}}$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	
0	$\Delta_{\text{уст}}$	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
-	$\Delta_{\text{у}}$	17,7	12,2	10,7	10,9	12,0	29,6	Переходный режим $T_a = 3$ мс
$\omega t_{\text{но}}$	$\Delta_{\text{ин}}$	8,0	3,2	2,2	1,8	1,7	1,7	
$\omega t_{\text{но}} + \pi/2$	$\Delta_{\text{ин}}$	6,8	1,9	0,7	0,4	0,4	0,4	
$\omega t_{\text{но}}$	$\Delta_{\text{ин}}$	22,1	22,1	22,1	23,2	25,9	69,5	
$\omega t_{\text{но}} + \pi/2$	$\Delta_{\text{ин}}$	9,6	9,6	9,6	10,1	11,3	30,2	
$\omega t_{\text{но}}$	$\Delta_{\text{ин}}$	2,8	3,0	3,1	3,3	3,3	3,5	
$\omega t_{\text{но}} + \pi/2$	$\Delta_{\text{ин}}$	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	2,4	
-	$\Delta_{\text{н}}$	37,6	30,9	30,0	31,0	33,9	82,1	

Тогда после выполнения девятой операции в соответствии с графом рис. 3, относительная инструментальная погрешность равна

$$\Delta_{\text{и}} = \left| 4\Delta_{\text{АЦП}} (i_{*n+1} - i_{*n-1}) \right| + \left| 5r_1 (i_{*n+1} - i_{*n-1}) \right|^2 + \left| 5A_1 r_1 (i_{*n+1} - i_{*n} - i_{*n} + i_{*n-1}) \right|^2 + A_1 \left| 8\Delta_{\text{АЦП}} (i_{*n+1} - i_{*n} - i_{*n} + i_{*n-1}) \right| + 2A_1 \left\{ \left| r_1 (i_{*n+1} - i_{*n}) (i_{*n+1} - i_{*n} - i_{*n} + i_{*n-1}) \right| + \left| r_1 (i_{*n+1} - i_{*n} - i_{*n} + i_{*n-1}) \right| \right\}$$

Приняв для примера $NA = 10$, $\Delta_{\text{АЦП}} = 4.9 \times 10^{-4}$, $r_1 \approx 10^{-6}$, видим, что погрешностью округления при расчете $\Delta_{\text{и}}$ можно пренебречь и полагать

$$\Delta_{\text{и}} = 4\Delta_{\text{АЦП}} \left\{ \left| (i_{*n+1} - i_{*n-1}) \right| + 2A_1 \left| i_{*n+1} - i_{*n} - i_{*n} + i_{*n-1} \right| \right\} \quad (9)$$

На основании (9) вычислялась величина инструментальной погрешности в установившемся и переходном режимах. Результаты расчета $\Delta_{\text{иу}}$ в установившемся режиме представлены в пятой и шестой строках табл. 3, а в переходном режиме – в двенадцатой и тринадцатой строках. В седьмой и четырнадцатой строках даны оценки погрешности отработки алгоритма

$$\text{при произвольной фазе } \Delta \leq \sqrt{\Delta^2(0) + \Delta^2\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

Из табл. 1 видно, что минимум погрешности выражен слабо и имеет место при шаге $\Delta t \approx 100$ мкс.

Вывод

При реализации алгоритма РЗ как в аналоговой, так и в цифровой формах необходимо учитывать погрешность реализации вызванную погрешностями, возникающими при переходе от символьной записи к операциям с физическими величинами.

Предложено погрешность реализации алгоритма в дискретной форме выражать в виде трёх составляющих, а именно методической, трансформированной и инструментальной составляющих ошибки.

Литература

- ГОСТ 7746-2001. Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока.
- Подгорный Э.В., Хлебников С.Д. Моделирование и расчёты переходных режимов в цепях релейной защиты. – М.: Энергия. – 1974. – 208 с.
- Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на фортране. – М.: Мир. 1977.
- Подгорный Э.В., Рыбалкин А.Д., Фоменко Г.П. Анализ дискретных алгоритмов токовых измерительных органов // Изв. Сев-Кав. научного центра высшей школы. Техн. науки. – №2. – 1983.
- Дорогунцев В.Г., Сараев Г.М. Преобразование и оптимизация алгоритмов измерительных органов цифровой релейной защиты. Труды МЭИ. Вып. 199. – 1974. – С. 84-91.