

Прохождение сигналов релейной защиты через электромагнитные трансформаторы тока

АЛЮНОВ А.Н., БУЛЫЧЕВ А.В., ГУЛЯЕВ В.А.

Представлен новый метод расчета погрешностей трансформаторов тока для релейной защиты. Метод основан на анализе прохождения сигналов синусоидальной формы небольшой длительности. Даны рекомендации по улучшению метрологических свойств трансформаторов тока.

Ключевые слова: релейная защита, трансформаторы тока, погрешность, расчет

A new method for calculating the errors introduced by the current transformers for relay protection is described. The method is based on analyzing the passage of short sine-wave signals. Recommendations on improving the accuracy of current transformers are given.

Key words: relay protection, current transformers, error, calculation

Техника регистрации и обработки сигналов релейной защиты в энергосистемах вступает в новую стадию развития — использование превосходных возможностей микропроцессорной элементной базы. Но ключевыми элементами трактов преобразования сигналов по-прежнему остаются электромагнитные трансформаторы тока (ТТ).

В этих условиях применительно к контролю параметров энергосистем, релейной защите и осциллографированию процессов очень важна неискажающая передача сигналов от источника (первичной цепи) до приемника (устройства обработки сигналов). Реализация желаемых процедур идеальной передачи первичных сигналов во вторичные цепи с помощью ТТ для целей регистрации и автоматизации процессов управления энергосистемами является актуальной научно-технической проблемой, а научно обоснованные предложения, выводы и рекомендации, способствующие ее решению, могут быть полезными для специалистов в области релейной защиты.

Путем математического и физического моделирования одиночных электромагнитных ТТ установлено, что их преобразовательные свойства при использовании в системах релейной защиты в линейных режимах работы достаточно точно отображаются передаточной функцией [1, 2]:

$$H_{\text{ТТ}}(p) = \frac{I_2(p)}{I_1(p)} = \frac{bp}{a_2p^2 + a_1p + a_0},$$

где $I_2(p)$ и $I_1(p)$ — изображения по Лапласу вторичного и приведенного к вторичной цепи пер-

вичного токов; a_0, a_1, a_2, b — постоянные коэффициенты, определяемые параметрами обмоток и сердечника ТТ.

В соответствии с Г-образной схемой замещения ТТ (рис. 1): $a_0 = R_{\text{II}}R_2$; $a_1 = R_{\text{II}}(L + L_2) + LR_2$; $a_2 = LL_2$; $b = R_{\text{II}}L$; $R_2 = r_2 + R_{\text{II}}$; $L_2 = L_{d2} + L_{\text{II}}$; L и R_{II} — приведенные к вторичной обмотке индуктивность намагничивания и активное сопротивление потерь ТТ; L_{d2} и r_2 — индуктивность рассеяния и активное сопротивление вторичной обмотки ТТ; L_{II} и R_{II} — индуктивность и активное сопротивление нагрузки ТТ.

Пусть на вход ТТ на временном интервале от 0 до τ воздействует сигнал $x(t)$ синусоидальной формы:

$$x(t) = \begin{cases} \sin \omega_0 t & \text{при } 0 < t \leq \tau; \\ 0 & \text{при } t < 0, t > \tau. \end{cases}$$

Задача прохождения отрезка синусоидального сигнала через ТТ во временной области приводит к дифференциальному уравнению Абеля, аналитическое решение которого громоздко и его трудно использовать для дальнейшего анали-

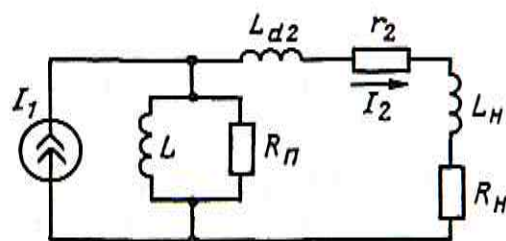


Рис. 1

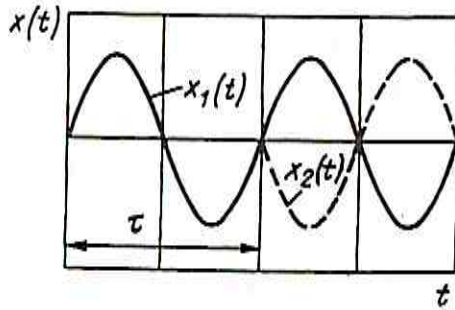


Рис. 2

за [3]. Поэтому для упрощения процедуры анализа и получения наглядных зависимостей входной сигнал можно представить в виде разности двух сигналов (рис. 2):

$$x(t) = x_1(t) - x_2(t).$$

Здесь

$$x_1(t) = \begin{cases} \sin \omega_0 t & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0; \end{cases}$$

$$x_2(t) = \begin{cases} (-1)^n \sin \omega_0 (t - \tau) & \text{при } t - \tau \geq 0; \\ 0 & \text{при } t - \tau < 0; \end{cases}$$

$\tau = \pi n / \omega_0$; n — целое число полупериодов сигнала; ω_0 — угловая частота входного сигнала.

Реакция ТТ на входной сигнал $x(t)$ представляет собой разность двух сигналов:

$$y(t) = y_1(t) - y_2(t),$$

где $y_1(t)$ — реакция ТТ на сигнал $x_1(t)$; $y_2(t)$ — реакция ТТ на сигнал $x_2(t)$.

При воздействии на вход ТТ сигнала $x_1(t)$ изображение по Лапласу выходного сигнала

$$y_1(p) = x_1(p) H_{\text{ТТ}}(p).$$

Здесь $x_1(p) = \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}$ — изображение по Лапласу

входного сигнала $x_1(t)$.

Тогда

$$y_1(p) = \frac{\omega_0}{\omega_0^2 \left(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 1 \right)} \frac{bp}{a_0 \left(\frac{a_2}{a_0} p^2 + \frac{a_1}{a_0} p + 1 \right)}$$

или

$$y_1(p) = \frac{T_0}{T_0^2 p^2 + 1} \frac{b_1 p}{d_2 p^2 + d_1 p + 1},$$

где

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0}; \quad b_1 = \frac{b}{a_0} = \frac{L}{R_2}; \quad d_2 = \frac{a_2}{a_0} = \frac{LL_2}{R_1 R_2};$$

$$d_1 = \frac{a_1}{a_0} = \frac{R_{11}(L + L_2) + LR_2}{R_1 R_2} = \frac{L + L_2}{R_2} + \frac{L}{R_{11}}.$$

Знаменатель дроби $y_1(p)$ целесообразно представить в виде произведения простых множителей. Учитывая реальное соотношение коэффициентов $d_1 > 2\sqrt{d_2}$, можно записать:

$$d_2 p^2 + d_1 p + 1 = (T_1 p + 1)(T_2 p + 1),$$

$$\text{где } T_{1,2} = \frac{d_1}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{4d_2}{d_1^2}} \right).$$

Изображение выходного сигнала можно представить как

$$y_1(p) = \frac{T_0 b_1 p}{(T_0^2 p^2 + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}.$$

Оригинал реакции ТТ на входной сигнал x_1 имеет следующий вид [4]:

$$y_1(t) = T_0 b_1 [-C \sin(\omega_0 t + \Theta) + C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t}].$$

Здесь

$$C = \frac{1}{\sqrt{(T_0^2 + T_1^2)(T_0^2 + T_2^2)}}, \quad C_1 = \frac{T_1}{(T_2 - T_1)(T_0^2 + T_1^2)};$$

$$C_2 = \frac{T_2}{(T_1 - T_2)(T_0^2 + T_2^2)}; \quad \alpha_1 = \frac{1}{T_1}; \quad \alpha_2 = \frac{1}{T_2};$$

$$\Theta = -\arctg \frac{T_1}{T_0} - \arctg \frac{T_2}{T_0} - 90^\circ.$$

При воздействии на вход ТТ сигнала $x_2(t)$

$$y_2(p) = x_2(p) H_{\text{ТТ}}(p).$$

Входной сигнал, считая $\delta = t - \tau$, можно представить в виде:

$$x_2(\delta) = (-1)^n \sin \delta;$$

$$x_2(p) = \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2} (-1)^n.$$

Аналогично решению для $y_1(t)$ определяется реакция:

$$y_2(\delta) = (-1)^n [-C \sin(\omega_0 \delta + \Theta) + C_1 e^{-\alpha_1 \delta} + C_2 e^{-\alpha_2 \delta}] T_0 B_1;$$

$$\Theta = -\arctg \frac{T_1}{T_0} - \arctg \frac{T_2}{T_0} - 90^\circ.$$

Поскольку во многих вновь разрабатываемых устройствах защиты важно иметь на выходе ТТ точные мгновенные значения сигналов, то качество преобразования сигналов ТТ следует характеризовать абсолютной погрешностью преобразования мгновенных значений сигнала, т.е. разностью [5]:

$$\varepsilon(t) = K_{\text{ТТ}} x(t) - y(t),$$

где $K_{\text{ТТ}}$ — идеальный коэффициент передачи ТТ; $x(t)$ и $y(t)$ — входной и выходной сигналы ТТ соответственно.

Для удобства анализа можно принять $K_{\text{ТТ}} = 1$, тогда

$$\varepsilon(t) = x(t) - y(t).$$

На временном интервале от 0 до τ :

$$\varepsilon(t) = \sin \omega_0 t + T_0 b_1 C \sin(\omega_0 t + \Theta) - T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 t} - T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 t};$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t);$$

$$\varepsilon_1(t) = \sin \omega_0 t + K_1 \sin(\omega_0 t + \Theta);$$

$$\varepsilon_2(t) = T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 t} - T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 t},$$

где $K_1 = T_0 b_1 C$.

Связь погрешностей ТТ с его параметрами можно установить, используя граничные параметры частотных характеристик ТТ [1, 2]:

$$f_{\text{н}} = \frac{A_{\text{н}}}{\sqrt{1-A_{\text{н}}^2}} \frac{R_2}{2\pi L} = \frac{A_{\text{н}}}{\sqrt{1-A_{\text{н}}^2}} \frac{1}{2\pi\tau_{\text{ТТ}}}$$

или

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{ТТ}} \lg \varphi_{\text{н}}}.$$

Здесь $f_{\text{н}}$ — нижняя граничная частота ТТ; $A_{\text{н}}$ и $\varphi_{\text{н}}$ — допустимый относительный уровень амплитудной характеристики и допустимый фазовый сдвиг на нижней границе полосы пропускания ТТ; $\tau_{\text{ТТ}}$ — постоянная времени ТТ.

Учитывая реальные соотношения параметров ТТ, можно принять

$$\tau_{\text{ТТ}} = \frac{L}{R_2} = T_1.$$

Как видно, увеличение $\tau_{\text{ТТ}}$, т.е. T_1 , соответствует снижению нижней граничной частоты ТТ.

Учитывая принятое допущение $T_1 = L/R_2$ и соотношение $T_2 \ll T_0$, получим:

$$K_1 = \frac{T_0 T_1}{\sqrt{(T_0^2 + T_1^2)(T_0^2 + T_2^2)}} \approx \frac{T_1}{\sqrt{T_0^2 + T_1^2}};$$

$$\lim_{T_1 \rightarrow \infty} K_1 = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{T_1}{\sqrt{T_0^2 + T_1^2}} = 1;$$

$$\Theta = -\arctg \frac{T_1}{T_0} - \arctg \frac{T_2}{T_0} - 90^\circ.$$

Если принять $T_2/T_0 = 0$, то

$$\lim_{T_1 \rightarrow \infty} \Theta = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \left(-\arctg \frac{T_1}{T_0} \right) - \frac{\pi}{2} = -\pi.$$

Таким образом, увеличение T_1 вызывает снижение ε_1 : $\lim_{T_1 \rightarrow \infty} \varepsilon_1 = 0$.

Следовательно можно констатировать, что расширение полосы рабочих частот ТТ в область нижних частот вызывает снижение периодической составляющей погрешности ТТ.

С учетом допущений, принятых ранее, для аperiodической составляющей погрешности имеем (рис. 3):

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= -\frac{T_0 T_1^2}{(T_2 - T_1)(T_0^2 + T_1^2)} e^{-\alpha_1 t} - \frac{T_0 T_1 T_2}{(T_1 - T_2)(T_0^2 + T_2^2)} e^{-\alpha_2 t} = \\ &= \frac{T_0 T_1}{T_0^2 + T_1^2} e^{-\alpha_1 t} - \frac{T_2}{T_0} e^{-\alpha_2 t}. \end{aligned}$$

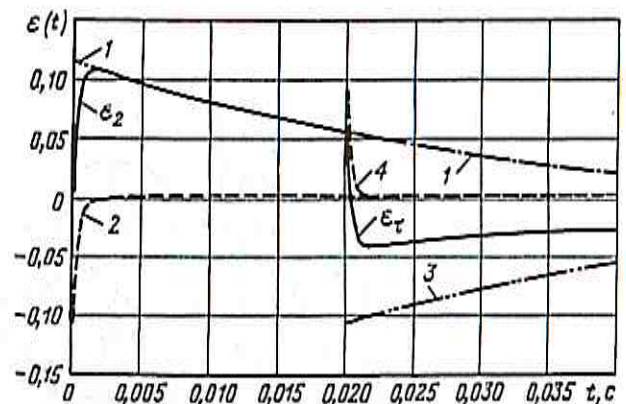


Рис. 3

При реальных параметрах ТТ $\alpha_2 \gg \alpha_1$, поэтому вторая экспонента (кривая 2) затухает значительно быстрее и погрешность ε_2 через несколько десятков микросекунд после начала процесса определяется, в основном, экспонентой $K_2 e^{-\alpha_1 t}$ (кривая 1), где

$$K_2 = \frac{T_1 T_0}{T_1^2 + T_0^2}; \quad \lim_{T_1 \rightarrow \infty} K_2 = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{T_0}{2T_1} = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{0}{2} = 0.$$

Как видно, увеличение T_1 (что эквивалентно снижению нижней граничной частоты ТТ) вызывает уменьшение начального значения первой экспоненциальной составляющей погрешности. Характер второй экспоненциальной составляющей погрешности определяется, в основном, T_2 и практически не зависит от T_1 .

После исчезновения входного сигнала при $t > \tau$ сигнал на выходе ТТ не исчезает мгновенно. Это

вызывает погрешность преобразования при $t > \tau$, равную

$$\begin{aligned} \varepsilon_\tau = & T_0 b_1 C \sin(\omega_0 t + \Theta) - T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 t} - \\ & - T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 t} + (-1)^n [-T_0 b_1 C \sin(\omega_0 \delta + \Theta) + \\ & + T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 \delta} + T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 \delta}]. \end{aligned}$$

При $\delta=0$ для момента времени τ погрешность ε_τ равна ε_1 , т.е. периодическая составляющая равна нулю. Таким образом, погрешность ε_τ определяется суммой четырех экспонент (кривые 1-4):

$$\begin{aligned} \varepsilon_\tau = & -T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 t} - T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 t} + \\ & + T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 \delta} + T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 \delta}. \end{aligned}$$

Для $t=\tau$ можно принять $-T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 t} = 0$, так как коэффициент α_2 велик по сравнению с

продолжительностью наблюдаемого процесса. Тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon_\tau = & -T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 t} - T_0 b_1 C_1 e^{-\alpha_1 \delta} + \\ & + T_0 b_1 C_2 e^{-\alpha_2 \delta}. \end{aligned}$$

Зависимость ε_τ от T_1 аналогична зависимости ε_2 от T_1 , т.е. чем больше T_1 , тем меньше начальное значение экспоненты $T_0 b_1 C_1$.

На рис. 4 показана зависимость погрешности преобразования ТТ отрезка синусоидального сигнала с частотой $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$ и длительностью три полупериода от постоянной T_1 (нижней граничной частоты f_H) и текущего времени t в виде поверхности в трехмерном пространстве.

Для проверки адекватности математической модели изучаемому процессу проведены исследования на физических моделях трансформаторов тока. На рис. 5 показаны картины переход-

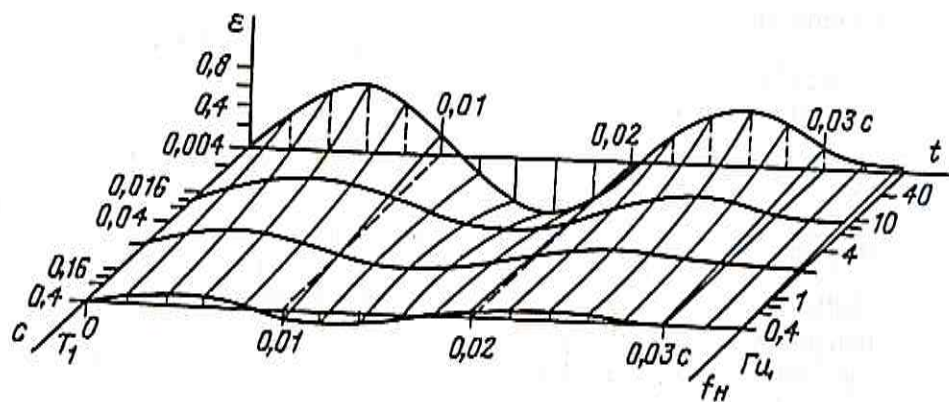


Рис. 4

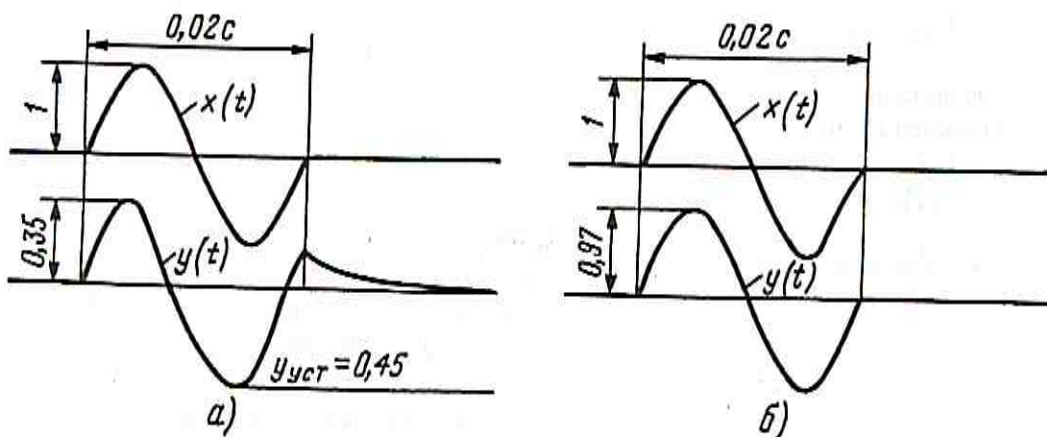


Рис. 5

ных процессов, полученные при физическом моделировании прохождения отрезков сигналов синусоидальной формы через трансформаторы тока с различными постоянными времени T_1 (нижними граничными частотами). Здесь $x(t)$ и $y(t)$ — первичный и вторичный токи ТТ соответственно.

Выходной сигнал ТТ $y(t)$, для которого $T_1 = 0,004$ с (нижняя граничная частота равна 37 Гц), как видно из рис. 5,а, значительно отличается от входного сигнала $x(t)$ по относительному значению амплитуды и фазы. Кроме того, сигнал на выходе ТТ при $t > \tau$, как отмечалось и ранее, отличается от нуля.

Трансформатор тока, для которого $T_1 = 0,4$ с, преобразует входной сигнал с более высокой точностью (рис. 5,б). Его погрешность не превышает 5%.

Сравнительный анализ результатов математического и физического моделирования позволил установить, что использованная математическая модель в достаточной степени адекватна исследуемому процессу, а принятые при теоретическом анализе допущения правомерны.

Выводы. 1. Анализ полученных зависимостей мгновенных значений погрешностей ТТ при преобразовании отрезка сигнала синусоидальной формы указывает на необходимость повышения точности работы ТТ, используемых в современных системах релейной защиты и при осциллографировании аварийных процессов.

2. Трансформаторы тока с большими коэффициентами трансформации (2000/5 и более) и с нижней граничной частотой полосы пропускания до 0,1 Гц, как правило, имеют достаточно хорошие метрологические показатели и могут быть использованы во вновь разрабатываемых системах защиты. Характеристики ТТ с небольшими коэффициентами трансформации (менее 1000/5) и нижней граничной частотой более 0,1 Гц не удовлетворяют требованиям новых систем защиты по неискажающей передаче сигналов, и требуется их улучшение.

3. Сужение полосы пропускания ТТ (особен-

но в области нижних частот) приводит к искажениям выходного сигнала ТТ в переходных режимах при передаче характерных для релейной защиты сигналов. Это служит обоснованием необходимости расширения частотных характеристик ТТ в область нижних частот, что может быть достигнуто за счет увеличения постоянной времени трансформаторов, например при снижении номинального вторичного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев А.В., Ваши В.К. Исследование частотных характеристик трансформаторов тока. — Изв. вузов. Энергетика, 1987, № 8.
2. Ваши В.К., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Кимке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Наука, 1976.
4. Макаров И.М., Менский Б.Б. Линейные автоматические системы. — М.: Машиностроение, 1982.
5. Стогний Б.С. Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения. — Киев: Наукова думка, 1984.

[15.01.04]

Авторы: Алюнов Александр Николаевич окончил электроэнергетический факультет Вологодского государственного технического университета (ВоГТУ) в 2001 г. Аспирант кафедры «Электроснабжение» ВоГТУ.

Булычев Александр Витальевич окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института (ВоПИ) в 1980 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей» в С. Петербургском государственном техническом университете. Заведующий кафедрой «Электроснабжение» ВоГТУ.

Гуляев Валерий Алексеевич окончил электроэнергетический факультет ВоПИ в 1980 г. Директор по развитию и ресурсам Северной энергетической управляющей компании.