

# ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ИХ КОРРЕКЦИЯ

*Александр В. Журавель, магистр, Эдуард Г. Куренный, профессор, доктор технических наук, sunty\_sony@mail.ru*

*Донецкий национальный технический университет*

While measuring the fast flowing currents, a dynamic error appears. It is caused by inertia of the current transformer. Problems to estimate and improve the dynamic error are considered in the article in question. The processes occurring in the current transformers may be described by the linear differential equations. In order to improve the dynamic error, the harmonic method is applied, it using both amplitude-frequency and phase- frequency characteristics.

При измерении быстропротекающих токов возникает динамическая погрешность, которая обусловлена инерционностью трансформаторов тока. Эту погрешность необходимо оценить и скорректировать. В системах электроснабжения такая задача возникает при записи колебаний электрической нагрузки, несинусоидальных токов конденсаторных установок и замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, импульсных токов.

Измерительные трансформаторы работают в области линейных характеристик системы «первичный ток  $i_1$  – вторичный ток  $i_2$ », поэтому процессы в них описываются линейными дифференциальными уравнениями. Для краткости ограничимся уравнением первого порядка[1]

$$Tsi_2 + i_2 = \frac{i_1}{k}, \quad (1)$$

где  $s$  – оператор Лапласа,  $k$  – коэффициент трансформации,  $T$  – постоянная времени трансформатора и измерительной цепи.

В этом случае имеем передаточную функцию [2]

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (2)$$

амплитудно – частотную функцию. (АЧФ)

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad (3)$$

фазочастотную функцию (ФЧФ)

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T. \quad (4)$$

где  $\omega$  – угловая частота измеряемого синусоидального сигнала.

Постоянная времени может быть найдена опытным путем или расчетным – по схеме замещения трансформатора. При отсутствии сведений ее можно ориентировочно оценить по допустимой угловой погрешности  $\Delta\varphi$ , которая приводится в каталогах при  $\omega_1 = 100\pi$  рад/с и измеряется в угловых минутах.

Приравняв (4) к  $\Delta\varphi$ , получим:

$$T = \frac{1}{\omega_1} \operatorname{tg} \left| \frac{\Delta\varphi}{60} \right| = \frac{1}{100\pi} \operatorname{tg} \left| \frac{\Delta\varphi}{60} \right|, \quad (5)$$

где учтено, что угловая минута в 60 раз больше одного радиана.

Например, для трансформаторов с классом точности 0,2; 0,5 и 1% нормируются значения погрешностей  $\pm 10'$ ,  $\pm 40'$  и  $\pm 80'$ . Учитывая, что угловая секунда в 60 раз превышает один радиан, согласно (5) получим искомые значения постоянной времени: 9,3; 37 и 74мкс.

На рис.1 приведены АЧФ для этих значений постоянной времени, где через  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  обозначена частота измеряемого сигнала: A1(f), A2(f) и A3(f) – для T=9,3; 37 и 74 мкс.

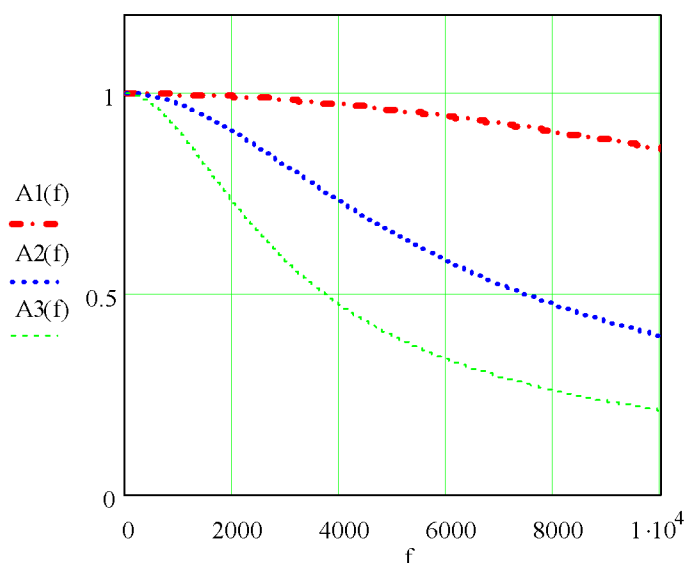


Рис.1 Амплитудно - частотные функции трансформаторов тока

При номинальной частоте 50 Гц АЧФ, умноженная на k, практически не отличается от единицы: 0,999996, 0,99993 и 0,99973, в то время при наибольшей частоте 2000 Гц учитываемых гармоник отличия более существенны: 0,993, 0,907 и 0,732.

Перейдем к коррекции записанных графиков тока. В общем случае из (1) найдем выражение

$$i_1 = k(i_2 + T i_2'), \quad (6)$$

из которого следует, что для получения искомого неискаженного процесса достаточно к каждой ординате процесса  $i_2(t)$  прибавить корректирующий множитель  $T i_2'$ . Коррекцию можно выполнить в темпе реального времени, добавив в измерительную цепь форсирующее звено первого порядка с параметром T.

Погрешность коррекции определяется точностью дифференцирования. Если записанный график тока аппроксимируется дифференцируемой функцией, то погрешность отсутствует.

Для иллюстрации в табл.1 приведены данные об амплитудах  $I_2$  и фазах  $\psi_2$  гармоник тока дугового замыкания на землю в сети 6 кВ с изолированной нейтралью, который измерялся с использованием трансформатора тока с классом точности 1%.

Таблица 1

n	$I_2$	$\psi_2$ , рад	$\frac{I_1}{k}$	$\Psi_1$ , рад	$\delta_A$ , %	$\delta_\psi$ , %
1	1	-0,699	1,0003	-0,673	0,03	3,92
2	0,135	-0,509	1,0011	-0,463	0,11	10,04
5	0,231	-0,856	1,0067	0,972	0,67	-11,91
7	0,455	-3,930	1,0132	4,091	1,32	-3,94
13	0,05	-0,402	1,0447	-0,294	4,47	36,73

Токи выражались в относительных единицах относительно амплитуды первой гармоники. Значения частотных характеристик рассчитывались при  $T = 7,4 \cdot 10^{-5}$  с.

Скорректированные параметры гармоник:

$$\frac{I_1}{k} = \frac{I_2}{A(\omega)}, \quad \psi_1 = \psi_2 - \varphi(\omega). \quad (7)$$

Относительные погрешности измерения амплитуд и фаз гармоник в процентах [3]:

$$\delta_A = \left( \frac{kI_2}{I_1} - 1 \right) 100 = [A(\omega) - 1] 100, \quad \delta_\psi = \left( \frac{\psi_2}{\psi_1} - 1 \right) 100 = \frac{100\varphi(\omega)}{\psi_1}.$$

При исследовании случайных процессов, для которых понятие гармоник теряет смысл, погрешности статистических характеристик оцениваются по спектральной плотности записанного процесса или по его корреляционной функции – с использованием переходной функции трансформатора

$$h(t) = \frac{1}{k} \left( 1 - e^{-t/T} \right). \quad (8)$$

#### Анализ результатов

Достоверность измеряемых токов должна подтверждаться анализом динамических погрешностей, вносимых трансформатором тока. Методы коррекции позволяют восстановить исходный процесс, что расширяет область применимости трансформаторов тока со сравнительно малыми классами точности. В паспортах трансформаторов тока целесообразно приводить данные постоянных времени, как о существенном потребительском свойстве трансформаторов тока.

#### Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. И доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. М., «Высшая школа», 1973. 752с.
2. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989. 301с.
3. Электрические измерения // Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985.416с.