

УДК 621.316.925

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ В МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Докт. техн. наук, доц. РОМАНИУК Ф. А.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Под фазой синусоидального сигнала подразумевается аргумент функции

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где  $U_m$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  — амплитуда, угловая частота и начальная фаза сигнала.

Фаза сигнала  $\psi = \omega t + \varphi$  является линейной функцией времени  $t$  и может изменяться в широких пределах. В силу периодичности (1) пределы изменения  $\psi$  можно ограничить значениями  $0-2\pi$  или  $\pm\pi$ .

Значение  $\psi$  в микроконтроллерных системах защиты и автоматики (МСЗА) практического интереса не представляет, поскольку полную информацию о синусоидальном сигнале дают результаты измерений  $U_m$  и  $\omega$ . При нескольких синусоидальных сигналах в общем случае разных частот:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1); \\ u_2(t) &= U_{m2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (2)$$

разность  $\delta = (\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_1 - \varphi_2$  характеризует степень взаимосвязи  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ . Величина  $\delta$  называется фазовым сдвигом и может выступать в МСЗА в качестве информационного параметра.

Методы определения фазовых сдвигов, используемые в МСЗА, должны быть быстродействующими. При этом  $\delta$  не должна зависеть как от входных сигналов в широком диапазоне их изменения, так и от отклонений частоты от номинальной.

Сущность цифрового способа определения фазовых сдвигов по отсчетам мгновенных значений сигналов, удовлетворяющего этим требованиям, заключается в следующем. Фазовый сдвиг  $\delta_n$  двух синусоидальных сигналов (2) можно определить по известным в заданный момент времени фазам первого  $\psi_{1n}$  и второго  $\psi_{2n}$  сигналов

$$\delta_n = \psi_{1n} - \psi_{2n}. \quad (3)$$

Фазы  $\psi_{1n}$  и  $\psi_{2n}$  устанавливают связь между мгновенными значениями ортогональных составляющих (ОС) каждого сигнала [1] — синусными  $u_{sn}$  и косинусными  $u_{cn}$ :

$$\begin{aligned} u_{1sn} &= U_{m1n} \sin \psi_{1n}; \\ u_{1cn} &= U_{m1n} \cos \psi_{1n}; \\ u_{2sn} &= U_{m2n} \sin \psi_{2n}; \\ u_{2cn} &= U_{m2n} \cos \psi_{2n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Поэтому, если известны мгновенные значения ОС каждого сигнала, то из (4) определяются модули их фаз:

$$\begin{aligned} |\psi_{1n}| &= \arccos \frac{u_{1cn}}{(u_{1sn}^2 + u_{1cn}^2)^{\frac{1}{2}}}; \\ |\psi_{2n}| &= \arccos \frac{u_{2cn}}{(u_{2sn}^2 + u_{2cn}^2)^{\frac{1}{2}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Фаза синусоидального сигнала в диапазоне от 0 до  $\pi$  может быть представлена положительными значениями углов, а в диапазоне от  $\pi$  до  $2\pi$  — отрицательными. При таком представлении знак фазы для соответствующего момента времени совпадает со знаком мгновенного значения синусной ОС. С учетом этого будем иметь:

$$\begin{aligned} \psi_{1n} &= \text{sign}(u_{1sn})|\psi_{1n}|; \\ \psi_{2n} &= \text{sign}(u_{2sn})|\psi_{2n}|. \end{aligned} \quad (6)$$

К непосредственно используемым величинам при определении фазового сдвига по формуле (3) с учетом (5) и (6) относятся отсчеты мгновенных значений ОС синусоидальных сигналов. Для их выделения из сложных входных токов и напряжений целесообразно применение частотно-независимых формирователей ортогональных составляющих (ФОС). Принципы построения и основные характеристики таких ФОС при реализации с использованием  $n = 5; 6; 7; 8$  отсчетов входного сигнала подробно рассмотрены в [2]. Следует отметить, что при таком подходе обеспечивается определение фазовых сдвигов без частотной составляющей погрешности.

Основное влияние на точность получения  $\delta_n$  оказывают апериодическая составляющая и высшие гармоники, степень подавления которых зависит от параметров ФОС. Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что погрешность определения  $\delta_n$  от воздействия апериодической составляющей с амплитудой, равной 10 % амплитуды основной гармоники, и постоянной времени 0,08 с может достигать 2,5°; 0,5°; 1,5°; 0,15° при выделении ОС формирователями с параметрами, соответствующими  $n = 5; 6; 7; 8$ . Наибольшее влияние на точность получения  $\delta_n$  оказывают четные гармоники, которые не полностью подавляются ФОС. Так, погрешность от четвертой гармоники с амплитудой, равной 50 % амплитуды основной гармоники, может достигать

2°; 2,4°; 0,23°; 0,5° для реализаций ФОС с числом отсчетов соответственно  $n = 5; 6; 7; 8$ . Погрешность, обусловленная третьей гармоникой с тем же уровнем амплитуды, для всех реализаций ФОС не превышает 0,05°. С увеличением номера гармоники ее влияние на точность определения  $\delta_n$  снижается.

Параметры ФОС оказывают основное влияние на необходимое для определения  $\delta_n$  время при подаче входных сигналов. При допустимой погрешности 1° это время составляет 1,8; 2,0; 1,5; 1,6 периода промышленной частоты, когда ОС выделяются ФОС с  $n = 5; 6; 7; 8$  соответственно.

В МСЗА для вычисления функции  $\arccos x_n$ , входящей в (5), может использоваться зависимость [3]

$$\arccos x_n = \frac{\pi}{2} - \arcsin x_n, \quad (7)$$

где

$$-1 \leq x_n \leq 1.$$

Определение в дискретные моменты времени в (7)  $\arcsin x_n$  можно производить с помощью степенного ряда [3]

$$\arcsin x_n = x_n + \frac{1}{6} x_n^3 + \frac{3}{40} x_n^5 + \frac{15}{336} x_n^7 + \dots \quad (8)$$

Степенной ряд (8) при больших значениях аргумента сходится медленно, поэтому требуется вычисление большого числа его членов. Для сокращения объема расчетов целесообразно диапазон изменения функции разбить на три части, в каждой из которых аргумент степенного ряда имеет более узкие пределы. Значения  $x_n$  и формулы для определения  $|\psi_n|$  во всех частях диапазона приведены в табл. 1.

Выражения для вычисления модуля фазы

Таблица 1

$x_n$	$y_n$	$ \psi_n $
$1 \geq x_n > \frac{\sqrt{2}}{2}$	$y_n = \sqrt{1 - x_n^2}$	$ \psi_n  = \pi \delta_{*n}$
$\frac{\sqrt{2}}{2} \geq x_n > -\frac{\sqrt{2}}{2}$	$y_n = x_n$	$ \psi_n  = \frac{\pi}{2} - \pi \delta_{*n}$
$-\frac{\sqrt{2}}{2} \geq x_n \geq -1$	$y_n = \sqrt{1 - x_n^2}$	$ \psi_n  = \pi - \pi \delta_{*n}$

Поскольку новый аргумент изменяется в диапазоне  $\frac{\sqrt{2}}{2} \geq y_n > -\frac{\sqrt{2}}{2}$ , в степенном ряду для  $\arcsin y_n$  достаточно сохранить члены до 11-й степени аргумента включительно. Для сокращения объема вычислений целесообразно также выполнить экономизацию ряда с использованием полиномов Чебышева [4]. В результате получен полином седьмой степе-

ни для вычисления относительного значения фазового сдвига  $\delta_{*n}$ , который преобразован по схеме Горнера и имеет вид

$$\delta_{*n} = y_n \left( y_n^2 (0,06045 y_n^2 - 0,01692) + 0,06523 + 0,31736 \right). \quad (9)$$

Приближенное вычисление функции  $\arccos x_n$  обуславливает дополнительную погрешность определения  $\delta_n$ . Однако, как показали исследования, эта погрешность не превышает  $0,065^\circ$  и имеет наибольшее значение в области углов, близких к  $\pm 180^\circ$ .

### ВЫВОД

Предложенный способ позволяет определять фазовые сдвиги сигналов с неодинаковыми частотами без погрешностей при их отклонении от номинальных значений и может использоваться в МСЗА электроустановок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент RU 2029962C1, МКИ 6 G01R 25/00. Способ определения разности фаз двух синусоидальных сигналов / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, А. А. Тивоненко. — № 5023914/10; Заявл. 18.12.1991; Опубл. 27.02.1995 // Бюл. № 6.
2. Романюк Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в микроконтроллерных защитах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1998. — № 3. — С. 17— 23.
3. Бронштейн М. И., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1986. — 547 с.
4. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на Фортране / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 584 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 2.02.2000

УДК 621.313.322

## **ЦИФРОВОЙ КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И РЕГИСТРАЦИЯ НЕНОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С ВОДОРОДНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ И ЕГО СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Канд. техн. наук СОПЬЯНИК В. Х.

*Научно-исследовательское государственное предприятие «БелТЭИ»*

В настоящее время тепловой контроль мощного генератора и его систем охлаждения выполнен на традиционных измерительных средствах (самопишущих и показывающих приборах, световых табло и т. п.) и установке централизованного контроля А701-03, предназначенной для сбора, обработки, контроля и регистрации технологической информации, характеризующей в основном тепловое состояние турбогенератора.