

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 , ω и φ — 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 ψ можно ограничить значениями $0-2\pi$ или $\pm\pi$.

Значение ψ в микроконтроллерных системах защиты и автоматики (МСЗА) практического интереса не представляет, поскольку полную информацию о синусоидальном сигнале дают результаты измерений U_m и ω . 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 δ называется фазовым сдвигом и может выступать в МСЗА в качестве информационного параметра.

Методы определения фазовых сдвигов, используемые в МСЗА, должны быть быстродействующими. При этом δ 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 δ_n двух синусоидальных сигналов (2) можно определить по известным в заданный момент времени фазам первого ψ_{1n} и второго ψ_{2n} сигналов

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

Фазы ψ_{1n} и ψ_{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 π может быть представлена положительными значениями углов, а в диапазоне от π до 2π — 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 δ_n оказывают апериодическая составляющая и высшие гармоники, степень подавления которых зависит от параметров ФОС. Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что погрешность определения δ_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 δ_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 δ_n снижается.

Параметры ФОС оказывают основное влияние на необходимое для определения δ_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 δ_{*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 δ_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 ТЕПЛООВОГО 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.