

Фазовое разделение каналов измерительных цепей датчиков

В. П. АРБУЗОВ, С. Е. ЛАРКИН, М. А. МИШИНА

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: avitel@pnzgul.ru

Предложены способы фазового разделения каналов в измерительных цепях датчиков, которые позволяют исключить погрешность, обусловленную конечным значением коэффициента усиления операционного усилителя, и обеспечивают инвариантное к параметрам кабеля преобразование информативного параметра датчика.

Ключевые слова: измерительная цепь, фазовое разделение каналов, коррекция погрешности преобразования.

The methods of phase division of channels in sensors measuring circuits allowing to exclude the finite value of operating amplifier gain factor error and to ensure the conversion of sensor informative parameter invariant to cable parameters are suggested.

Key words: measuring circuit, phase division of channels, error conversion correction.

Фазовое разделение каналов как разновидность метода их временного разделения в измерительных цепях датчиков позволяет повысить точность преобразования пассивных параметров элементов параметрического преобразователя (ПП) датчика в активную электрическую величину. Сущность данного метода состоит в том, что разделение каналов преобразования ПП датчика во времени осуществляется в пределах периода тест-сигнала путем сдвига фазы тока или напряжения, подаваемых на элементы ПП датчика, которые одновременно подключены к преобразователю пассивной величины в активную [1, 2]. Для реализации этого метода необходимо выполнить ряд условий, обеспечивающих, во-первых, разделение во времени каналов преобразования пассивных параметров элементов ПП датчика в активную электрическую величину (ток или напряжение), во-вторых, возможность выделения из выходного сигнала активного преобразователя (АП) составляющих, пропорциональных параметрам элементов ПП датчика, и, в-третьих, функционирование измерительной цепи (ИЦ). Сформированные согласно этим условиям тест-сигналы, подаваемые на элементы ПП, должны составлять систему базисных функций временного разделения каналов [3], которая для ИЦ, реализующей метод фазового разделения каналов, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} U_1(t) &= \sum_{k=1}^n U_{k1} \sin k\omega t; \\ U_2(t) &= \sum_{k=1}^n U_{k2} \sin(k\omega t + k\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U_{k1}, U_{k2} — амплитуды k -й гармоники первого $U_1(t)$ и второго $U_2(t)$ тест-сигналов; φ, n — соответственно фазовый сдвиг между тест-сигналами $U_1(t)$, $U_2(t)$ и число их гармоник.

Простейшими, с точки зрения реализации тест-сигналов, являются генераторы периодических колебаний, среди которых наиболее распространены генераторы синусоидаль-

ных колебаний. Применение последних позволяет сформировать тест-сигналы, функциональные зависимости которых образуют систему базисных функций

$$\left. \begin{aligned} U_1(t) &= U_0 \sin \omega t; \\ U_2(t) &= U_0 \sin(\omega t + \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

что соответствует наличию в этих сигналах только одной (первой) гармоники, т. е. в системе (1) $k = 1$, а $U_{11} = U_{12} = U_0$.

На примере ИЦ емкостных датчиков рассмотрим способы фазового разделения их каналов. На рисунке приведена схема активного преобразователя АП, выполненная на основе операционного усилителя ОУ, ко входу которого кабелем (C_k — емкость кабеля) подключены рабочий C_x и опорный C_o конденсаторы ПП датчика, а в обратной связи включен конденсатор емкостью C . Напряжения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, функции которых описываются системой (1), подаются на конденсаторы ПП датчика и на выходе АП присутствует сигнал

$$U_{Oy}(t) = -[U_1(t)C_x/C + U_2(t)C_o/C](1 + \gamma), \quad (3)$$

где γ — погрешность преобразования емкостей конденсаторов ПП датчика в напряжение, обусловленная конечным значением коэффициента усиления ОУ.

Преимущества, заложенные в дифференциальной и квазидифференциальной конструкциях датчиков, проявляются в полной мере только тогда, когда в качестве информативного параметра для квазидифференциального датчика выступает либо отношение емкостей C_o/C_x или C_x/C_o , либо относительное изменение рабочей емкости $(C_x - C_o)/C_x$ или $(C_x - C_o)/C_o$, а для дифференциального датчика с емкостями C_1 и C_2 — отношение $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$, поскольку в этом случае автоматически обеспечивается логометрическая коррекция погрешности датчика, позволяющая существенно снизить его температурную погрешность [4] и исключить

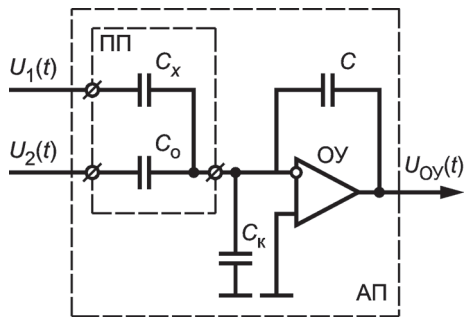


Схема активного преобразователя АП:

ПП — параметрический преобразователь; ОУ — операционный усилитель; C_x , C_o , C — конденсаторы соответственно рабочий, опорный и обратной связи; C_k — емкость кабеля

влияние диэлектрической проницаемости межэлектродной среды на результат измерения.

При фазовом разделении каналов элементы ПП датчика одновременно подключены к преобразователю пассивной величины в активную. Поэтому различия в способах фазового разделения каналов определяются процедурой разделения выходного сигнала АП на составляющие, пропорциональные параметрам элементов ПП датчика. Рассмотрим вариант непосредственной дискретизации выходного напряжения АП (см. рисунок) с целью получения выходного сигнала ИЦ емкостного датчика, пропорционального отношению емкостей опорного и рабочего конденсаторов датчика. Подставив в (3) функции тест-сигналов из системы (2), получим

$$U_{Oy}(t) = - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega t + U_0 \frac{C_o}{C} \sin (\omega t + \varphi) \right] (1 + \gamma). \quad (4)$$

Если считать, что в правой части (4) все параметры тест-сигналов и значения емкостей конденсаторов ПП неизвестны, то для их определения необходимо составить и решить систему уравнений, найти мгновенные значения выходного сигнала U_{Oy_i} АП в моменты времени t_i . При этом число уравнений, а следовательно, и отсчетов U_{Oy_i} зависит от числа неизвестных в (4):

$$\left. \begin{aligned} U_{Oy_0} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega t_0 + U_0 \frac{C_o}{C} \sin (\omega t_0 + \varphi) \right] (1 + \gamma); \\ U_{Oy_1} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega t_1 + U_0 \frac{C_o}{C} \sin (\omega t_1 + \varphi) \right] (1 + \gamma); \\ &\dots \\ U_{Oy_n} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega t_n + U_0 \frac{C_o}{C} \sin (\omega t_n + \varphi) \right] (1 + \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если принять, что отсутствуют сведения о параметрах тест-сигналов, а известны значения U_{Oy_i} в моменты t_i , то в системе (5) будет шесть неизвестных: U_0 , C_x , C_o , C , ω и φ . Отсюда следует, что для определения выходного сигнала ИЦ необходимо решить систему шести нелинейных уравнений. Аналитическое решение рассматриваемой системы затрудни-

тельно, применение же численных методов требует мощного вычислительного устройства с хорошим быстродействием и большим объемом памяти.

Другой вариант решения этой системы уравнений подразумевает использование структурной избыточности ИЦ, за счет которой уменьшается число неизвестных параметров, а сами уравнения сводятся к линейному виду. При реализации такого варианта прежде всего необходимо добиться линеаризации уравнений системы, исключив из-под знака синуса неизвестные величины, для чего надо знать частоту и фазовый сдвиг φ тест-сигналов $U_1(t)$, $U_2(t)$. Кроме того, для определения мгновенных значений выходного напряжения U_{Oy_i} АП требуется равномерная дискретизация, например, с шагом Δt . Тогда система (5) примет вид

$$\left. \begin{aligned} U_{Oy_0} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega t_0 + U_0 \frac{C_o}{C} \sin \omega (t_\varphi + t_0) \right] (1 + \gamma), \\ U_{Oy_1} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega (t_0 + \Delta t) + U_0 \frac{C_o}{C} \sin \omega (t_\varphi + t_0 + \Delta t) \right] \times \\ &\times (1 + \gamma), \\ &\dots \\ U_{Oy_n} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega (t_0 + n \Delta t) + \right. \\ &\left. + U_0 \frac{C_o}{C} \sin \omega (t_\varphi + t_0 + n \Delta t) \right] (1 + \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где t_0 — начало дискретизации; $t_\varphi = \varphi/\omega$ — запаздывание по времени $U_2(t)$ относительно $U_1(t)$.

Для определения времени t_0 следует синхронизировать начало выборки с сигналом $U_1(t)$. Тогда $t_0 = 0$ в системе (6). Стабилизация амплитуды U_0 синусоидальных тест-сигналов позволяет исключить еще одну переменную. С учетом изложенного система (6) сводится к виду

$$\left\{ \begin{aligned} U_{Oy_1} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin \omega \Delta t + U_0 \frac{C_o}{C} \sin \omega (t_\varphi + \Delta t) \right] (1 + \gamma), \\ U_{Oy_2} &= - \left[U_0 \frac{C_x}{C} \sin 2\omega \Delta t + U_0 \frac{C_o}{C} \sin \omega (t_\varphi + 2\Delta t) \right] (1 + \gamma). \end{aligned} \right.$$

Решая данную систему уравнений относительно C_x и C_o и определяя выходной сигнал ИЦ как отношение C_o к C_x , получаем

$$Z_{\text{вых}} = \frac{C_o}{C_x} = - \frac{U_{Oy_2} \sin \omega \Delta t - U_{Oy_1} \sin 2\omega \Delta t}{U_{Oy_2} \sin \omega (t_\varphi + \Delta t) - U_{Oy_1} \sin \omega (t_\varphi + 2\Delta t)},$$

откуда следует, что выходной сигнал ИЦ не зависит от погрешности АП.

Выражения для выходного сигнала ИЦ с информативным параметром другого вида можно получить аналогично.

Таким образом, способ фазового разделения каналов, основанный на непосредственной дискретизации выходного сигнала АП, заключается в определении выходного сигнала датчика путем решения системы уравнений, описывающих выходной сигнал АП в разные моменты времени, причем количество уравнений, а следовательно, и количество отсчетов выходного сигнала АП определяется числом неизвестных параметров этого сигнала, наличие которых зависит от структурной избыточности ИЦ датчика.

Если в (3) принять неизвестными только значения емкостей ПП, то для определения выходного сигнала ИЦ требуется решить систему, состоящую из двух линейных уравнений, но при этом необходимо знать коэффициенты при C_x и C_o . Следовательно, кроме напряжений $U_{OY}(t)$ в два разных момента времени, например t_1 и t_2 , должны быть известны еще и напряжения $U_1(t)$, $U_2(t)$ в те же моменты времени:

$$\begin{cases} U_{OY_1} = U_{OY}(t_1) = -\left[U_1(t_1)\frac{C_x}{C} + U_2(t_1)\frac{C_o}{C}\right](1+\gamma), \\ U_{OY_2} = U_{OY}(t_2) = -\left[U_1(t_2)\frac{C_x}{C} + U_2(t_2)\frac{C_o}{C}\right](1+\gamma). \end{cases}$$

Решение этой системы относительно C_x и C_o позволяет определить функцию преобразования ИЦ

$$Z_{\text{вых}} = \frac{C_o}{C_x} = -\frac{U_{OY}(t_2)U_1(t_1) - U_{OY}(t_1)U_1(t_2)}{U_{OY}(t_2)U_2(t_1) - U_{OY}(t_1)U_2(t_2)}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что, во-первых, выходной сигнал ИЦ не зависит от погрешности γ и, во-вторых, для получения выходного сигнала ИЦ, пропорционального отношению емкостей конденсаторов ПП датчика, необходимо определить мгновенные значения напряжений $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_{OY}(t)$ в моменты времени t_1 , t_2 и вычислить искомым выходной сигнал согласно (7). Отсюда способ фазового разделения каналов, основанный на одновременной дискретизации тест-сигналов и выходного сигнала АП для двух моментов времени, заключается в определении выходного сигнала датчика путем решения линейной системы уравнений, описывающих выходной сигнал АП в разные моменты времени.

В предложенных выше способах определения выходного сигнала ИЦ необходимо составить и решить систему уравнений. В то же время выходной сигнал АП, описываемый (3), представляет собой сумму базисных функций, умноженных на весовые коэффициенты, каждый из которых пропорционален одной из емкостей конденсаторов ПП датчика. Для выделения информации о значении каждой из емкостей ПП из выходного напряжения $U_{OY}(t)$ АП это напряжение следует разложить на составляющие в системе базисных функций $\{U_1(t), U_2(t)\}$. В результате получим два сигнала U_{OY_1} и U_{OY_2} , один из которых зависит только от C_x , а второй — от C_o . Один из вариантов получения указанных составляющих состоит в определении мгновенных значений выходного сигнала АП в моменты времени t_1 и t_2 , когда одна из его составляющих равна нулю. С учетом используемой в ИЦ системы базисных функций (2) имеем $t_1 = nT$ и $t_2 = -\varphi/\omega + nT$, где T — период напряжения тест-сигнала; $n = 0, 1, 2, \dots$. В этом случае выделенные составляющие описываются выражениями

$$U_{OY_1} = U_{OY}(t_1) = -U_0 \frac{C_o}{C} (1 + \gamma) \sin \varphi;$$

$$U_{OY_2} = U_{OY}(t_2) = -U_0 \frac{C_x}{C} (1 + \gamma) \sin(-\varphi),$$

а выходной сигнал ИЦ пропорционален отношению емкостей опорного и рабочего конденсаторов при $\varphi \neq \pi$:

$$Z_{\text{вых}} = U_{OY_1}/U_{OY_2} = -C_o/C_x.$$

Из полученного выражения следует, что выходной сигнал ИЦ зависит только от емкостей конденсаторов ПП датчика и не зависит ни от погрешности АП, ни от фазового сдвига между напряжениями. Последнее указывает на то, что векторы функций базисной системы $\{U_1(t), U_2(t)\}$ могут образовывать как прямоугольную, так и косоугольную систему координат.

Для разложения выходного напряжения АП на составляющие U_{OY_1} и U_{OY_2} также можно использовать фазочувствительное выпрямление выходного напряжения $U_{OY}(t)$ АП относительно напряжений, составляющих систему базисных функций $\{U_1(t), U_2(t)\}$. Выходное напряжение фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ) выражается в виде

$$U_{\text{ФЧВ}} = \frac{1}{T} \int_{\psi T/2\pi}^{\psi T/2\pi + T/2} U_{\text{вх}}(t) dt,$$

где $U_{\text{вх}}(t)$ — входное напряжение ФЧВ; ψ — фазовый сдвиг между $U_{\text{вх}}(t)$ и опорным напряжением.

Согласно последнему соотношению и с учетом (4) после преобразований найдем

$$U_{OY_1} = -\frac{U_0}{\pi C} (C_x + C_o \cos \varphi)(1 + \gamma);$$

$$U_{OY_2} = -\frac{U_0}{\pi C} (C_o + C_x \cos \varphi)(1 + \gamma).$$

Из последних выражений следует, что при использовании ФЧВ выходной сигнал АП можно разложить на составляющие, каждая из которых будет пропорциональна емкости только одного из конденсаторов, при условии, что фазовый сдвиг между напряжениями, подаваемыми на конденсаторы ПП, составит $\pm \pi/2$. Поэтому фазочувствительное выпрямление для разложения выходного напряжения АП на составляющие можно применять только в прямоугольной системе координат, образованной векторами функций базисной системы $\{U_1(t), U_2(t)\}$. При $\varphi = \pm \pi/2$ имеем

$$U_{OY_1} = -C_x \frac{U_0}{\pi C} (1 + \gamma); U_{OY_2} = -C_o \frac{U_0}{\pi C} (1 + \gamma).$$

Выходной сигнал ИЦ принимает вид

$$Z_{\text{вых}} = U_{OY_2}/U_{OY_1} = C_o/C_x$$

и не зависит от параметров АП.

Следовательно, способ фазового разделения каналов ИЦ датчиков, заключается в вычислении выходного сигнала датчика по значениям составляющих выходного напряжения АП, полученных либо путем дискретизации его выходного сигнала в моменты времени, когда одна из составляющих равна нулю, либо путем фазочувствительного выпрямления выходного сигнала АП относительно напряжений тест-сигналов, описываемых системой базисных функций $\{U_1(t), U_2(t)\}$.

Таким образом, предложены способы фазового разделения каналов ИЦ датчиков, позволяющие исключить погрешность преобразования пассивных параметров ПП в ак-

тивную величину, обусловленную конечным значением коэффициента усиления ОУ, и обеспечивающие инвариантное к параметрам кабеля преобразование информативного параметра ПП в выходной сигнал датчика.

Л и т е р а т у р а

1. **Арбузов В. П.** Методы временного разделения каналов измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков // Измерительная техника. 2007. № 7. С. 41—43; **Arbuzov V. P.** The use of time division of the channels in capacitive and inductive sensor measuring circuits // Measurement Techniques. 2007. V. 52. N 7. P. 752—757.

2. **Арбузов В. П., Мишина М. А.** Фазовое разделение каналов в измерительных цепях емкостных датчиков // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 29—33; **Arbuzov V. P., Mishina M. A.** Phase division of the channels in capacitive sensor measuring circuits // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 9. P. 965—970.

3. **Трахтман А. М.** Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. М.: Сов. Радио, 1972.

4. **Арбузов В. П.** Модели температурной погрешности емкостного датчика давления // Датчики и системы. 2007. № 7. С. 15—17.

Дата принятия 20.04.2012 г.

658.652 018

Оценка достоверности результатов контроля ограниченных партий изделий

С. Б. ДАНИЛЕВИЧ

Сибирский университет потребительской кооперации, Новосибирск, Россия, e-mail: sergo_dan@mail.ru

Предложен способ оценки достоверности результатов многопараметрического измерительного контроля ограниченных партий изделий, основанный на применении метода имитационного моделирования с учетом рисков заказчика и производителя.

Ключевые слова: многопараметрический измерительный контроль, имитационное моделирование, риски заказчика и производителя.

The method of estimation of the reliability of multiparametric measuring control results for limited production lots is suggested.

Key words: multiparametric measuring control, imitation modeling, customer and producer risks.

Достоверность результатов контроля серийно выпускаемых изделий принято характеризовать рисками заказчика и производителя [1]. Риск заказчика R_z — вероятность того, что изделие является фактически негодным при условии, что оно в результате контроля признано годным. Эта вероятность характеризует среднюю долю негодных изделий в партии изделий, признанных годными. Риск производителя R_n — вероятность ошибочно забраковать при контроле годное изделие, характеризующая среднюю долю ошибочно забракованных годных изделий среди всех поступивших на контроль.

При многопараметрическом измерительном контроле партии изделий оценки этих рисков можно получить методом имитационного моделирования (ИМ) [1—6]. Однако при небольших партиях изделий оценки рисков могут существенно отличаться от оценок их математических ожиданий, получаемых методом ИМ для больших партий. Необходимо оценивать это отличие с достаточно высокой достоверностью.

В данной статье предложен простой способ определения достоверных оценок рисков, при котором не устанавливается точное значение достоверной вероятности. Способ основан на применении метода ИМ и заключается в следующем.

В случайной выборке, состоящей из достаточно большого количества (от 20 до 100) оценок искомого риска, полученных методом ИМ, выявляли максимальное и минимальное значения. Их использовали соответственно в качестве верхней и нижней достоверных границ оценок рисков. Точное значение вероятности попадания искомого риска в найденный таким способом интервал (далее — достоверная вероятность) при этом не определяли.

Естественно предположить, что при условии односторонности, непрерывности и существования оценок искомого риска на конечном интервале распределения достоверная вероятность при использовании данного подхода будет близка к единице. При решении практических задач такой подход представляется допустимым, поскольку знание точного значения достоверной вероятности (при известных достоверных границах рисков) для потребителя продукции во многих случаях совсем не обязательно. Достаточно быть уверенным, что эта вероятность весьма высока (например, не ниже 0,9 или 0,95).

Для обоснования предложенного способа определим достоверную вероятность, с которой реализация случайной величины (в данном случае оценка риска заказчика или производителя) попадет в некоторый заданный интервал. Для этого необходимо идентифицировать закон распреде-