

## Трансформаторный аналого-цифровой преобразователь угловых перемещений временного типа

С. Ю. ПОТОМСКИЙ, А. В. КОСИНСКИЙ

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия, e-mail: spotomskiy@hse.ru

Разработан трансформаторный аналого-цифровой преобразователь угловых перемещений временного типа, в котором отсутствует этап преобразования перемещение—фаза. Перемещение непосредственно преобразуется во временной интервал и затем в цифровой код. Рассмотрены функциональная схема устройства, ее математическое описание, оценена максимальная относительная погрешность.

**Ключевые слова:** угловые перемещения, аналого-цифровой преобразователь.

The transformer analog-digital converter of temporal type angular displacements without the stage of displacement phase conversion and with the direct transformation of displacement to temporal interval and then to digital code is developed. The device functional scheme and mathematical description are considered, the maximal relative error is estimated.

**Key words:** angular displacements, analog-digital converter.

Разработка новых типов аналого-цифровых преобразователей (АЦП) перемещений, отвечающих современным требованиям, предъявляемым к цифровым измерительным устройствам, является актуальной задачей при проведении научных и технических исследований. Из современных АЦП угловых перемещений наилучшими характеристиками обладают трансформаторные преобразователи с промежуточным преобразованием измеряемой величины в фазовый сдвиг [1—3]. Однако существующие трансформаторные фазовые преобразователи не в полной мере отвечают требованиям по точности преобразования, быстродействию, простоте устройства, надежности. Основная погрешность возникает на этапе преобразования перемещение—фаза, ее основным источником является фазовращатель. В [4] описан способ построения АЦП перемещений, где отсутствует указанный этап и перемещение непосредственно преобразуется во временной интервал. Главный элемент таких АЦП — преобразователь перемещения во временной интервал (ППВИ). Одномодуляторные оптоэлектронные АЦП перемещений временного типа с различными вариантами построения ППВИ, в основном, предназначены для измерения и преобразования линейных перемещений в цифровой эквивалент [5].

В данной работе при разработке ППВИ для преобразования угловых перемещений во временной интервал в качестве модулятора использовали вращающийся трансформатор, питающийся от функционального генератора (источника синусоидального напряжения) и преобразовывающий угловое перемещение ротора в выходное напряжение [6].

Функциональная схема трансформаторного АЦП угловых перемещений временного типа представлена на рисунке. Источник питания ИП, фильтр Ф, вращающийся трансформатор ВТ, фазовый детектор ФД, усилитель У, нуль-органы НО1 и НО2, RS-триггер Т входят в состав трансформаторного ППВИ, а генератор счетных импульсов ГИ, логический элемент И, двоичный счетчик ДС отвечают за дальнейшее преобразование временного интервала в цифровой код. Источник питания ИП и фильтр Ф образуют генератор несущей

частоты ГНЧ. Тип счетчика определяет вид кода. В схеме использовали двоичный счетчик. Способ считывания разрядных сигналов может быть последовательным и параллельным. В этой схеме применен последовательный интерфейс как наиболее распространенный в современных системах промышленной автоматики. Например, в качестве шин для соединения устройств (одновременно до 32 позиций) используется интерфейс RS-485, который обеспечивает скорость от 62,5 кбит/с при дальности 1,2 м до 10000 кбит/с — при 10 м.

Генератор несущей частоты вырабатывает синусоидальное напряжение  $U = U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$ ,  $\omega$  — его амплитуда и частота. Напряжение  $U$  питает вращающийся трансформатор и служит в качестве сигнала развертки. С выхода вращающегося трансформатора снимается напряжение

$$U_{BT} = k_{BT} U_{HЧ} \sin \varphi \quad \text{или} \quad U_{BT} = k_{BT} U_m \sin \omega t \sin \varphi,$$

где  $k_{BT}$  — передаточный коэффициент вращающегося трансформатора;  $\varphi$  — угол преобразования.

Напряжение  $U_{BT}$  выпрямляется фазовым детектором и усиливается:

$$U_y = k_y k_{BT} k_{ФД} U_m \sin \varphi,$$

где  $k_{ФД}$ ,  $k_y$  — передаточные коэффициенты фазового детектора и усилителя.

Нуль-орган НО1 срабатывает в момент перехода через нуль напряжения, поступающего от генератора несущей частоты:

$$t_{Н1} = t'_{Н1} + t''_{Н1},$$

где  $t'_{Н1}$  — момент времени, соответствующий равенству напряжения с генератора несущей частоты порогу срабатывания НО1;  $t''_{Н1}$  — собственное время срабатывания НО1.

Нуль-орган *HO2* срабатывает в момент  $t_{H2}$  равенства напряжения от генератора несущей частоты напряжению с выхода усилителя и тоже состоит из двух слагаемых:  $t'_{H2}$  — момента времени, соответствующего равенству напряжения с генератора несущей частоты напряжению с усилителя и  $t''_{H2}$  — собственного времени срабатывания *HO2*, т. е.  $t_{H2} = t'_{H2} + t''_{H2}$ .

Момент времени  $t'_{H1}$  находим из равенства  $U = U_{H1}$  или  $U_m \sin \omega t'_{H1} = U_{H1}$ , откуда

$$t'_{H1} = \omega^{-1} \arcsin (U_{H1}/U_m). \quad (1)$$

Аналогично  $t'_{H2}$  вычисляем из равенства  $U = U_y$  или  $U_m \sin \omega t'_{H2} = k_y k_{BT} k_{ФД} U_m \sin \varphi$ :

$$t'_{H2} = \omega^{-1} \arcsin (k_y k_{BT} k_{ФД} \sin \varphi). \quad (2)$$

Триггер срабатывает от сигнала с *HO1*, а сигналом с *HO2* возвращается в исходное состояние. Временной интервал, в течение которого триггер находится в открытом состоянии, определяется из выражения

$$t_T = t_{H2} - t_{H1} + t_o - t_c, \quad (3)$$

где  $t_c$ ,  $t_o$  — время срабатывания и отпускания триггера.

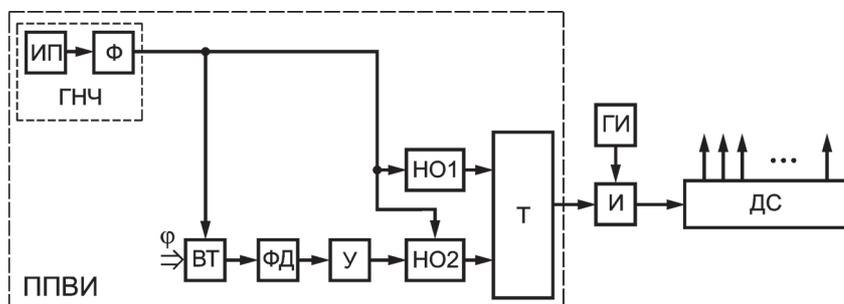
Логический элемент выполняет роль ключа, и пропускает импульсы с частотой  $\omega_{ГИ}$  от генератора импульсов в течение времени  $t_T$ . Число импульсов, поступающих на двоичный счетчик, выражается формулой

$$N_\varphi = t_T / T_{ГИ} = t_T \omega_{ГИ} / (2\pi), \quad (4)$$

где  $T_{ГИ}$ ,  $\omega_{ГИ}$  — период и частота следования импульсов заполнения.

Согласно (1) — (3) представим (4) в виде

$$N_\varphi = \frac{\omega_{ГИ}}{2\pi\omega} \left( \arcsin (k_y k_{BT} k_{ФД} \sin \varphi) - \arcsin \frac{U_{H1}}{U_m} \right) + \frac{\omega_{ГИ}(t''_{H2} - t''_{H1} + t_o - t_c)}{2\pi}. \quad (5)$$



Функциональная схема трансформаторного АЦП перемещений временного типа:

ИП — источник питания; Ф — фильтр; ГНЧ — генератор несущей частоты; ВТ — вращающийся трансформатор; ФД — фазовый детектор; У — усилитель; HO1, HO2 — нуль-органы; Т — RS-триггер; ППВИ — преобразователь перемещений во временной интервал; ГИ — генератор счетных импульсов; И — логический элемент; ДС — двоичный счетчик;  $\varphi$  — угол преобразования

Учтем в (5), что порог срабатывания *HO1*  $U_{H1} = 0$ , а собственные времена срабатывания нуль-органов и триггера пренебрежимо малы. Тогда

$$N_\varphi = \omega_{ГИ} (2\pi\omega)^{-1} \arcsin (k_y k_{BT} k_{ФД} \sin \varphi).$$

Для правильной работы АЦП необходимо выполнить следующие условия:  $k_y k_{BT} k_{ФД} = 1$  и  $\omega_{ГИ} / \omega = 2^N$ . Таким образом,

$$N_\varphi = 2^N (2\pi)^{-1} \varphi.$$

Полная относительная погрешность преобразования выражается формулой

$$\delta N_\varphi = (\delta t''_{H2} - \delta t''_{H1} - \delta t_c + \delta t_o) - \frac{2^N}{2\pi} (\delta\omega - \delta\omega_{ГИ}) + \frac{2^N}{2\pi} (\delta U_{H1}) + k_y k_{BT} k_{ФД} (\delta k_y + \delta k_{BT} + \delta k_{ФД}) \operatorname{tg} \varphi. \quad (6)$$

Заметим, что погрешность  $\delta N_\varphi$  не зависит от отклонения амплитуды  $U_m$  напряжения генератора несущей частоты, что является существенным достоинством таких преобразователей. Из (6) можно определить максимальное значение погрешности, заменив знаки «минус» на «плюс», и вычислить наибольший возможный результат совместного действия ее составляющих.

Подставим в (6) относительные отклонения параметров работы устройства от номинальных значений:  $\delta t_c = \delta t_o = 0,001\%$ ;  $\delta\omega = \delta\omega_{ГИ} = 0,001\%$ ;  $\delta t''_{H1} = \delta t''_{H2} = 0,001\%$ ;  $\delta U_{H1} = 0,002\%$ ;  $\delta k_y = 0,0015\%$ ;  $\delta k_{BT} = 0,002\%$ ;  $\delta k_{ФД} = 0,003\%$ . Эти цифры взяты из базы данных программного обеспечения Multisim компании National Instruments, предназначенного для схемотехнического моделирования. При  $\varphi = 45^\circ$  и  $k_y = k_{BT} = k_{ФД} = 1$  получим  $\delta N_{\varphi \max} = 5,8 \cdot 10^{-3}\%$ .

Предложенное техническое решение построения АЦП угловых перемещений временного типа позволяет создавать трансформаторные АЦП, которые обладают лучшими метрологическими характеристиками, удовлетворяющими современным и перспективным требованиям к АЦП перемещений.

#### Литература

1. Косинский А. В. и др. Аналого-цифровые преобразователи перемещений. М.: Машиностроение, 1991.

2. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла. М.: Энергоатомиздат, 1984.

3. Домрачев В. Г., Смирнов Ю. С., Матвеевский В. Р. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справ. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1987.

4. Косинский А. В., Потомский С. Ю. Аналого-цифровые преобразователи перемещений временного типа // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 20—21; Kosinskii A. V., Potomskii S. Yu. Time-type analog-to-digital displacement transducer // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 5. P. 502—504.

5. Косинский А. В., Потомский С. Ю. Аналого-цифровой преобразователь перемещений временного типа на базе одноканального растрового модулятора // Метрология. 2012. № 5. С. 27—33.

6. Арменский Е. В., Фалк Г. Б. Электрические микромашины. М.: Высшая школа, 1985.

Дата принятия 08.07.2013 г.