

2. Astone P. e. a. Search for coincident excitation of the widely spaced resonant gravitational wave detectors EXPLORER, NAUTILUS and NIOBE// Astropart Phys. 1999. V. 10. N 1.
3. Акимов А.С и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984.
4. Rudenko V. N., Gusev A.V. Nonlinear algorithm of searching for astro-gravity correlations // Intern. J. Modern Physics D. 2000. V. 9. N 3. P. 353—359.
5. Гусев А. В., Руденко В. Н. Оптимальное распознавание гравитационных сигналов // Измерительная техника.

2010. № 5. С. 8—11; Gusev A. V., Rudenko V. N. Optimal recognition of gravitational signals// Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 5. P. 471—475.

6. Гусев А. В., Руденко В. Н. Распознавание гравитационных импульсов на фоне коррелированных негауссовых помех // Вестник МГУ. Физика. Астрономия. 2009. № 1. С. 70—73.

7. Тихонов В. И. Оптимальный прием. М.: Радио и связь, 1983.

Дата принятия 26.10.2010 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

621.317.72

Интеллектуальный четырехканальный преобразователь частота — код

В. В. МАКАРОВ

Московский государственный институт электроники и математики, Москва, Россия,
e-mail: makarov.vv@yandex.ru

Рассмотрена структурная схема интеллектуального четырехканального преобразователя частота — код, его функции и технические характеристики. Предложен алгоритм самодиагностики.

Ключевые слова: интеллектуальный преобразователь, адаптация, самодиагностика, автокалибровка.

The intellectual four-channel frequency — code converter, its functions and technical characteristics are considered.

The selfdiagnostics algorithm is proposed.

Key words: intellectual converter, adaptation, selfdiagnostics, autocalibration.

Преобразователи частота — код широко применяют в системах автоматического управления, информационно-измерительных системах для преобразования частоты импульсных выходных напряжений частотных датчиков физических величин в двоичные коды. Одноканальный интеллектуальный преобразователь частота — код (ИПЧК) представлен в [1].

В статье рассмотрена структурная схема четырехканального ИПЧК с адаптацией к частотным сигналам, самодиагностикой, автокалибровкой, питанием от шины USB. Определена продолжительность начальной и текущей адаптации. Разработан алгоритм самодиагностики и рассчитано ее быстродействие. Предложена процедура автокалибровки, оценены длительность ее проведения и эффект повышения точности преобразований. Отметим, что публикации об исследованиях подобных преобразователей в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют.

В рассматриваемом ИПЧК выполняются параллельные 14-разрядные преобразования четырех частотных импульсных сигналов с амплитудой импульсов 0,5—10 В в диапазоне

не частот $D_f = (\hat{f}_x, \hat{f}_x) = 10 \text{ Гц} \dots 32 \text{ МГц}$, с частотой преобразования 250 Гц в большей части диапазона (при $f_x \geq 500 \text{ Гц}$).

Структурная схема ИПЧК приведена на рис. 1. Основными ее блоками являются: микроконтроллер (МК) 8; четыре идентичных канала преобразования (два из них — 3, 9 — показаны на схеме); коммутатор 2 выбора режимов работы; источник 1 диагностического сигнала $g(t)$; цепь передачи калибровочного сигнала $k(t)$ с шины USB через кабельный повторитель 19 и устройство гальванической развязки (УГР) 20. Каналы контроля температуры окружающей ИПЧК среды и его напряжения питания включают датчик температуры (ДТ) 16, УГР 15 и входящий в состав МК восьмиканальный аналогово-цифровой преобразователь АЦП.

Граница между аналоговой и цифровой частями преобразователя проходит по УГР 7, 13—15 и вторичному источнику питания (ВИП) 17, подключенном к шине USB и вырабатывающему постоянные напряжения $U_{\text{ПА}}$, $U_{\text{ПЦ}}$ для питания аналоговой и цифровой частей, соответственно. Микроконтроллер обеспечивает связь через интерфейсный блок 18 по шине USB с центральной ЭВМ (ЛЭВМ), посыпающей в ИПЧК запросы о результатах преобразований.

На входы «1» — «4» коммутатора 2 поступают импульсные частотные сигналы $s_1(t) - s_4(t)$. Положительные или знакопеременные импульсы имеют форму меандра с длитель-

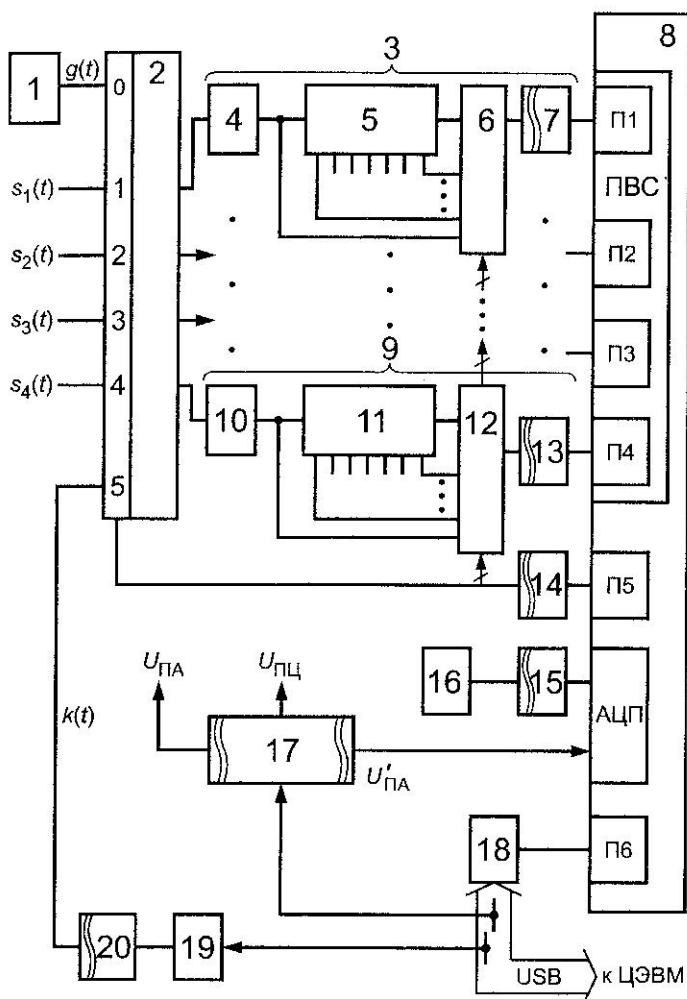


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального преобразователя частоты — код:

1 — источник диагностического сигнала; 2 — коммутатор выбора режима работы; 3, 9 — каналы преобразования; 4, 10 — триггеры Шмидта; 5, 11 — восьмисекционные делители частоты; 6, 12 — коммутаторы; 7, 13—15, 20 — устройства гальванической развязки; 8 — микроконтроллер; 16 — датчик температуры; 17 — вторичный источник питания; 18 — блок интерфейса с шиной USB; 19 — кабельный повторитель; ПВС — процессор внешних событий; П1 ... П14 — порты захвата; П5 — порт управления; П6 — двунаправленный последовательный порт; АЦП — аналогово-цифровой преобразователь; ЦЭВМ — центральная ЭВМ; $s_1(t)$ — $s_4(t)$ — входные сигналы; $g(t)$, $K(t)$ — диагностический и калибровочный сигналы; $U_{\text{ПА}}$, $U_{\text{ПЦ}}$ — напряжения питания аналоговой и цифровой частей; $U'_{\text{ПА}}$ — контрольное напряжение

нностью фронтов $\tau_\phi = \alpha T_x$, где $\alpha \ll 1$; $T_x = 1/f_x$ — период следования импульсов.

В качестве примера рассмотрим работу канала преобразования 3. В него входят триггер Шмидта 4, восьмисекционный делитель частоты 5, коммутатор импульсных сигналов 6, УГР 7 и порт П1 захвата сигналов процессора внешних событий ПВС микроконтроллера. В канале 3 выполняются косвенные преобразования частоты в код. Триггер Шмидта снижает действие помех нормального вида. Для достижения высокой точности преобразований во всем диапазоне частот в блоке 5 частота сигнала $s_1(t)$ уменьшается в m раз.

Значение коэффициента m определяется на этапе начальной адаптации к сигналу $s_1(t)$ и подстраивается в процессе текущей адаптации ИПЧК к изменяющейся частоте f_x [2]. Делитель частоты 5 включает восемь секций, в каждой из которых частота делится на четыре. Вход делителя и выходы секций соединены с девятью входами коммутатора 6, управляемого МК через порт П5 и УГР 14. С помощью делителя 5 и коммутатора 6 в соответствии с алгоритмом адаптации устанавливается значение коэффициента m .

Источником 1 диагностического сигнала $g(t)$ служит кварцевый генератор, с выхода которого на вход «0» коммутатора 2 поступает меандр номинальной частотой f_d . В режиме диагностики с выхода коммутатора 2 сигнал $g(t)$ подается параллельно на входы четырех каналов преобразования ИПЧК.

С помощью датчика температуры 16 измеряется температура окружающей среды. Выходное постоянное напряжение ДТ поступает через линейный УГР 15 на один вход АЦП. Для контроля напряжений питания ИПЧК гальванически развязанное с напряжениями $U_{\text{ПА}}$ и $U_{\text{ПЦ}}$ напряжение $U'_{\text{ПА}}$ подается на другой вход АЦП.

Калибратором служит расположенный в ЦЭВМ термостатированный кварцевый генератор. С выхода калибратора по кабелю, введенному в состав шины USB, на вход ИПЧК поступает калибровочный сигнал $k(t)$ частотой f_k . С выхода кабельного повторителя 19 через УГР 20 этот сигнал приходит на вход 5 коммутатора 2 и в режиме автокалибровки подается параллельно на входы четырех каналов преобразования.

Коэффициенты подавления помех общего вида зависят от характеристик УГР и составляют 80—120 дБ. Коэффициент подавления помех нормального вида выражается формулой $K_{\text{ППНВ}} = 20 \lg \{SN_2/SN_1\}$, где SN_1 , SN_2 — отношения сигнал — шум соответственно до и после преобразования. С помощью выражений для погрешностей преобразований, приведенных в [2], получена оценка снизу коэффициента подавления: $K_{\text{ППНВ}} = -40 \lg \{\sqrt{2} \alpha\}$ дБ, где α — доля фронта относительно периода импульсов. Например, $K_{\text{ППНВ}} = 74$ дБ при $\alpha = 1\%$.

Адаптивные преобразования в широком диапазоне частот. Адаптивные параллельные преобразования частотных сигналов рассмотрены в [2]. Косвенное преобразование частоты осуществляется за m периодов частотного сигнала $s(t)$ с адаптивной подстройкой числа m к частоте сигнала f_x . Возникающие конфликты разрешаются с помощью системы приоритетов МК [3]. В отсутствие погрешностей преобразования произвольной частоты число импульсов, подсчитанное таймером-счетчиком МК, составляет

$$N = [mf_c / f_x], \quad (1)$$

где $[.]$ — операция взятия целой части; f_c — номинальная частота счета таймера-счетчика.

В табл. 1 для поддиапазонов диапазона D_f приведены значения коэффициентов деления частоты m , числа подсчитанных импульсов N в МК, работающем с тактовой частотой 40 МГц и частотой счета импульсов $f_c = 10$ МГц, и числа импульсов N_h , подсчитанные в режиме начальной адаптации.

Время преобразования $T_{\text{пр}} \approx 2m/f_x$. При $f_x \geq 500$ Гц выполняется от 62,5 до 250 преобразований в секунду. Для выравнивания числа преобразований на всех частотах до

250 с⁻¹ используется линейная экстраполяция; дальнейшее его повышение может быть достигнуто увеличением тактовой частоты работы МК.

Таблица 1

Условия выполнения адаптации ИПЧК

f_x , кГц	m	N	N_h
0,01 — 0,5	1	$10^6 — 2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^6 — 8 \cdot 10^4$
0,5 — 2	4	$(8 — 2) \cdot 10^4$	$(8 — 2) \cdot 10^4$
2 — 8	16	$(8 — 2) \cdot 10^4$	$(2 — 0,5) \cdot 10^4$
8 — 32	64	$(8 — 2) \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3 — 1250$
32 — 128	256	$(8 — 2) \cdot 10^4$	1250 — 312
128 — 512	2^{10}	$(8 — 2) \cdot 10^4$	312 — 78
512 — 2,05 · 10 ³	2^{12}	$(8 — 2) \cdot 10^4$	78 — 19
(2,05 — 8,2) · 10 ³	2^{14}	$(8 — 2) \cdot 10^4$	19 — 4
(8,2 — 32) · 10 ³	2^{16}	$(8 — 2) \cdot 10^4$	4 — 1

Рассмотрим алгоритм начальной адаптации. Коэффициент деления частоты устанавливается $m_h = 4$, и начинаются параллельные преобразования во всех каналах. При отсутствии погрешностей преобразований число подсчитанных на этом этапе импульсов (см. табл. 1)

$$N_h = [m_h f_c / f_x].$$

После завершения преобразования в одном из каналов по значению числа импульсов N_h определяются диапазон и коэффициент m , устанавливаемый в последующих преобразованиях в этом канале. Благодаря этому обеспечивается заданная разрешающая способность преобразований ИПЧК [1]:

$$2 \cdot 10^4 \leq N \leq 8 \cdot 10^4. \quad (2)$$

При изменениях частоты f_x выполняется текущая адаптация. С ростом f_x число импульсов $N < 2 \cdot 10^4$, и коэффициент m увеличивается в четыре раза для сохранения неравенства (2). С уменьшением f_x число импульсов $N > 8 \cdot 10^4$, и коэффициент m уменьшается в четыре раза для сохранения неравенства (2).

Время одного преобразования $T_{\text{пр}}$ складывается из длительностей двух этапов — преобразования и ожидания начала нового преобразования. Время второго этапа для всех частот составляет не менее 2 мс, что вполне достаточно для проведения текущей цифровой обработки результатов преобразований в МК.

Оценим длительность начальной адаптации $T_{\text{н.а.}}$. Так как в ИПЧК выполняются параллельные преобразования, $T_{\text{н.а.}}$ определяется временем адаптации к наиболее низкочастотному сигналу. С учетом того, что $m_h = 4$, максимальное время начальной адаптации

$$\hat{T}_{\text{н.а.}} = 2m_h / \tilde{f} = 8 / \tilde{f}, \quad (3)$$

где \tilde{f} — нижний предел диапазона частот сигнала.

Выбор частоты \tilde{f} зависит от наличия данных о преобразуемых сигналах. Если диапазоны частот сигналов

$\{\tilde{f}_j; \tilde{f}'_j\}, j = 1, 4\}$ известны, то выбор $\tilde{f} = \min \{\tilde{f}_j, j = 1, 4\}$ гарантирует начальную адаптацию ко всем сигналам за время (3). В отсутствие этой информации частота \tilde{f} выбирается равной нижнему пределу рабочего диапазона ИПЧК: $\tilde{f} = \tilde{f}_x$.

Рассмотрим пример: $\tilde{f}_x = 10$ Гц, $\tilde{f}_1 = \tilde{f}_2 = 100$ Гц, $\tilde{f}_3 = \tilde{f}_4 = 1$ кГц. При этом время начальной адаптации соответственно равно 8 мс и 0,8 с при известных и неизвестных диапазонах частот сигналов.

Самодиагностика ИПЧК инициируется и обязательно выполняется в начале работы ИПЧК (начальная диагностика). В дальнейшем возможны следующие варианты проведения текущей самодиагностики: периодическая с периодом T_0 и непериодическая при выходе ИПЧК из «спящего» режима или по команде от ЦЭВМ.

Схема алгоритма самодиагностики приведена на рис. 2. Правая ветвь схемы отражает периодическое поступление запросов от ЦЭВМ о результатах преобразований. Если диагностика не закончена, то в ответ посыпается сообщение о продолжении. После ее окончания следует выход из правой ветви схемы, формирование сообщения для ЦЭВМ о ее результатах, принятие решения о продолжении или конце преобразований. В случае невозможности или окончания преобразований ИПЧК переходит в «спящий» режим.

Движение по левой ветви схемы начинается с диагностики напряжения $U'_{\text{ПА}}$ (см. рис. 1), номинальное значение которого равно 5 В, допустимые отклонения составляют $\pm 10\%$. Напряжение $U'_{\text{ПА}}$ вторичного источника питания 17 подается на вход АЦП. Обозначим z_A двоичный код этого напряжения; коды нижнего и верхнего пределов диапазона допустимых значений соответственno \bar{z}_A, \hat{z}_A . Проверяется условие

$$\bar{z}_A \leq z_A \leq \hat{z}_A,$$

а при его нарушении следует выход из левой ветви схемы алгоритма и диагностика прекращается. Длительность диагностики напряжения $U'_{\text{ПА}}$ обозначим $T'_{\text{ПА}}$.

После этого АЦП преобразует выходное напряжение датчика температуры ДТ 16 в двоичный код z_T . С учетом рабочего диапазона температур характеристики преобразования ДТ, коэффициента передачи линейного УГР 15 определяются коды \bar{z}_T, \hat{z}_T нижнего и верхнего пределов рабочего диапазона температур. Проверяется условие

$$\bar{z}_T \leq z_T \leq \hat{z}_T,$$

а при его нарушении делается вывод о неработоспособности ДТ; в противном случае ДТ полагается работоспособным, что обеспечивает возможность спорадической автокалибровки ИПЧК. В обоих случаях диагностика продолжается. Время диагностики ДТ обозначим $T_{\text{ДТ}}$.

Далее выполняется диагностика четырех каналов преобразования КП_k, $k = 1, 4$. В случае исправного функциони-

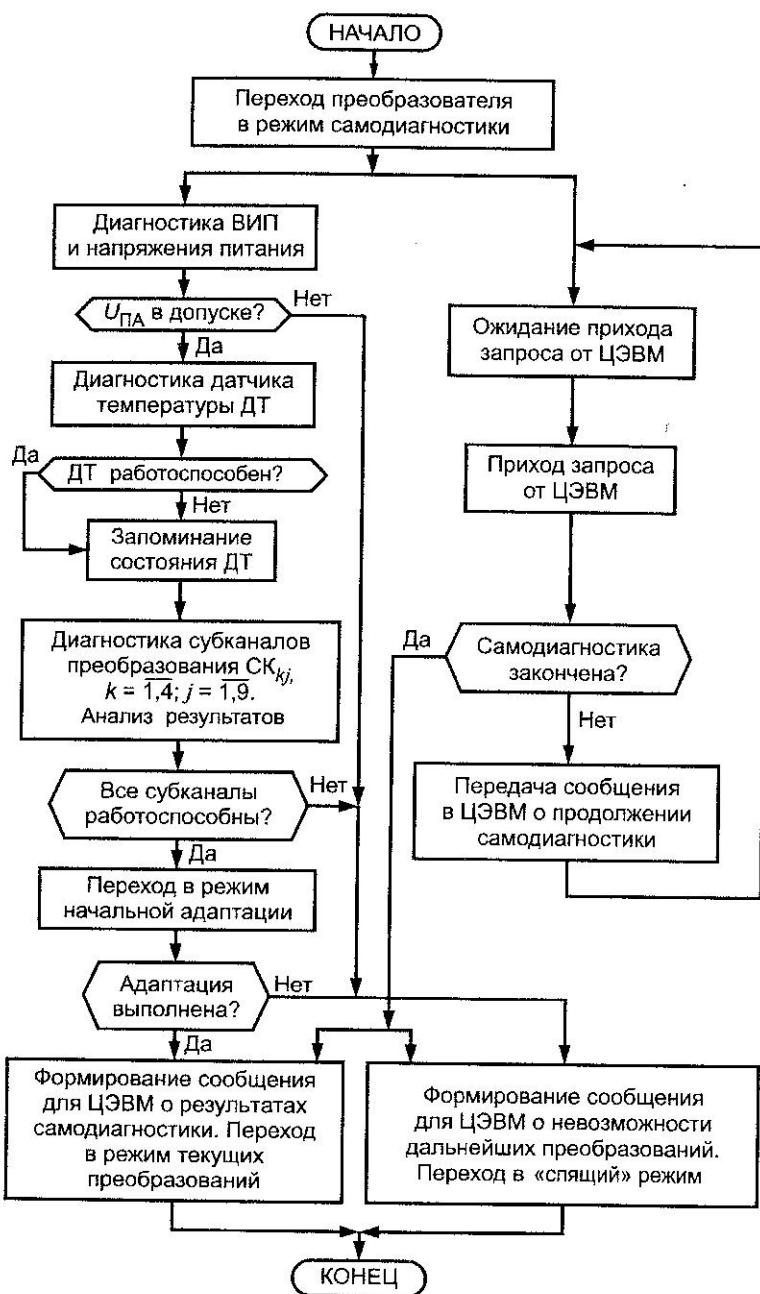


Рис. 2. Схема алгоритма самодиагностики:

ВИП — вторичный источник питания; $U_{\text{ПА}}$ — напряжение питания аналоговой части; ДТ — датчик температуры; $СК_{kj}$ — j -й субканал k -го канала преобразования частота — код, $k = \overline{1, 4}; j = \overline{1, 9}$

рования всех каналов преобразования ИПЧК предполагается работоспособным. Цепь преобразований, образуемую коммутацией j -го входа коммутатора k -го канала, назовем

j -м субканалом k -го канала преобразования $СК_{kj}$, где $j = \overline{1, 9}$. Условием работоспособности произвольного канала преобразования $КП_k$ является правильная работа всех его субканалов.

В табл. 2 для субканалов k -го канала преобразования приведены значения коэффициентов m_j , причем расчетное число подсчитанных таймером-счетчиком МК импульсов $N_{cj} = 10 m_j$

за время диагностики в отсутствие погрешностей преобразования; диапазоны $D_{Nj} = [\bar{N}_j; \hat{N}_j]$ допустимых отклонений чисел N_{cj} вызванных погрешностями преобразований.

Значения N_{cj} найдены аналогично (1): $N_{cj} = [m_j f_c / f_d]$.

Значения нижнего \bar{N}_j и верхнего \hat{N}_j пределов диапазона D_{Nj} получены в отсутствие помех с помощью выражений максимальной относительной погрешности преобразований δf по методике, изложенной в [2]:

$$\bar{N}_j = N_{cj} - [N_{cj} \delta f], \quad \hat{N}_j = N_{cj} + [N_{cj} \delta f].$$

С помощью коммутатора 2 (см. рис. 1) с его входа «0» на входы всех каналов преобразований $КП_1 — КП_4$ одновременно подается диагностический сигнал $g(t)$, являющийся последовательностью положительных импульсов типа меандра амплитудой 2 В, следующих с частотой $f = 1 \text{ МГц}$.

В каналах преобразования выполняются поочередные параллельные коммутации субканалов $СК_{k1} — СК_{k9}$ с установкой соответствующих коэффициентов $m_j = 1; 4; \dots; 2^{16}$. Например, после коммутации j -х субканалов выполняются параллельные преобразования и анализ результатов диагностики. В случае положительных результатов проводится параллельная коммутация $(j+1)$ -х субканалов преобразований и т. д.

Обозначим T_{dj} время параллельной диагностики j -х субканалов. За это время частота сигнала $g(t)$, поделенная на m_j , преобразуется в число импульсов N_j , которое сравнивается с диапазоном D_{Nj} допускаемых значений. Условие работоспособности j -го субканала произвольного канала преобразования имеет вид

$$\bar{N}_j \leq N_j \leq \hat{N}_j. \quad (4)$$

Работоспособность k -го канала преобразования обеспечивается при выполнении условий (4) для всех его субканалов. В случае неработоспособности отдельных субканалов делается вывод о неработоспособности всего ИПЧК, следует выход из левой ветви схемы и формируется сообщение для ЦЭВМ о невозможности дальнейших преобразований.

После окончания диагностики всех субканалов преобразования формируется вывод о ее результатах. Суммарное время диагностики T_{dk} каждого канала ($k = \overline{1, 4}$) преобразования складывается из времени диагностики девяти субканалов:

$$T_{dk} = \sum_{j=1}^9 T_{dj} = \sum_{j=1}^9 (2m_j / f_d).$$

Если выполняется начальная диагностика, то целью следующего этапа является проверка наличия частотных сигналов на всех входах преобразователя и принадлежности их частот рабочему диапазону ИПЧК. Для этого ИПЧК переходит

Таблица 2

дит в режим начальной адаптации, максимальное время выполнения которой найдено ранее:

$$\bar{T}_{\text{н.а}} = 0,8 \text{ с.}$$

В случае текущей диагностики адаптация также выполняется, но за меньшее время: $\bar{T}_{\text{н.а}} =$

$$= 2m_{\text{н}} / \bar{f}. \text{ Ее необходимость вызвана тем, что за время диагностики частоты сигналов могли измениться и перейти в другие поддиапазоны, некоторые частотные сигналы могли пропасть из-за отказа линий связи или коммутатора 2 (см. рис. 1).}$$

На этом диагностика заканчивается: формируется сообщение для ЦЭВМ о ее результатах, и ИПЧК переходит в режим текущих преобразований. С приходом очередного запроса сформированное сообщение передается в ЦЭВМ.

В случае успешной самодиагностики ее длительность $T_{\text{д.с}}$ складывается из времени диагностики отдельных блоков и времени адаптации:

$$T_{\text{д.с}} = T_{\text{ПА}} + T_{\text{ДТ}} + T_{\text{ДК}} + T_{\text{н.а}}. \quad (5)$$

В рассмотренной ранее измерительной задаче с помощью выражения (5) получены приближенные оценки продолжительности диагностик: 0,98 с — начальной; 0,18 с — текущей, что приблизительно равно длительности 45 преобразований.

Если время текущей диагностики не должно превышать 0,01 % времени текущих преобразований, то период ее повторения приближенно составит 30 мин.

Автокалибровка ИПЧК предназначена для снижения систематических погрешностей преобразований. Ее достоинство заключается в небольшой длительности, отсутствии прерываний работы ИПЧК, возможности адаптации к изменяющимся условиям работы. Систематическая погрешность δf_c ИПЧК определяется в основном временным и температурным дрейфом частоты счета таймера-счетчика МК [2], т. е. $\delta f_c \approx \delta f_{\text{с4}}$.

Автокалибровка инициируется ИПЧК. После его включения выполняется начальная калибровка. Последующие текущие калибровки могут быть периодическими с периодом T_1 и непериодическими, связанными, например, с существенным изменением температуры окружающей среды. В первом случае используется программный таймер, а во втором — ДТ и АЦП микроконтроллера. Температура среды измеряется за несколько микросекунд (что меньше времени одного преобразования) с периодом T_2 ($T_2 < T_1$).

В памяти МК хранится двоичный код температуры z_1 , полученный в начале предыдущей калибровки. С приходом нового кода температуры z_2 определяется разность кодов $z_2 - z_1$, которая сравнивается с пороговым значением z_n . В случае $z_2 - z_1 > z_n$ проводится новая калибровка, после которой код z_1 замещается кодом z_2 .

Калибровочный сигнал $k(t)$ представляет собой последовательность положительных прямоугольных импульсов типа меандра амплитудой 2 В и номинальной частотой $f_k = 0,52$ МГц. Выражение для погрешности поддержания значения частоты f_k имеет вид

Условия выполнения диагностики ИПЧК по девяти субканалам

Параметр	СК _{k1}	СК _{k2}	СК _{k3}	СК _{k4}	СК _{k5}	СК _{k6}	СК _{k7}	СК _{k8}	СК _{k9}
m_j	2^0	2^2	2^4	2^6	2^8	2^{10}	2^{12}	2^{14}	2^{16}
D_{Nj}				$10m_j \pm 3$			$10m_j \pm 4$	$10m_j \pm 10$	$10m_j \pm 32$

$$\delta f_k = \delta f_{k, \text{н}} + \delta f_{k, \text{в}} (T_b) + \delta f_{k, \text{т}},$$

где $\delta f_{k, \text{н}}$, $\delta f_{k, \text{в}} (T_b)$, $\delta f_{k, \text{т}}$ — соответственно погрешности настройки частоты, ее временного дрейфа за интервал T_b между калибровками, температурного дрейфа калибратора.

Составляющие погрешности δf_k оцениваем по техническим характеристикам образцовых частотометров и термостабилизованных кварцевых генераторов [5]: $\delta f_{k, \text{н}} = \pm 3 \cdot 10^{-6}$; $\delta f_{k, \text{в}} = \pm (2 \dots 5) \cdot 10^{-6}$ за 1 год; $\delta f_{k, \text{т}} = (2 \dots 5) \cdot 10^{-7}$ в интервале температур от -10 до $+60$ °C.

В результате калибровки находим коэффициент k_n , используемый для коррекции последующих результатов преобразований, пренебрегая случайными погрешностями калибратора и калибровочных преобразований сигнала $k(t)$ в ИПЧК.

В идеальном случае подсчитанное за время калибровочного преобразования число импульсов будет

$$N^d = [m_k f_c / f_k], \quad (6)$$

где m_k — коэффициент деления частоты, используемый в процессе калибровки.

Действительное число импульсов, подсчитанное за время калибровки:

$$N^a = [m_k f_c (1 + \delta f_{c4}) / f_k]. \quad (7)$$

С помощью выражений (6), (7) приближенно получим

$$\delta f_{c4} \approx N^d / N^a - 1. \quad (8)$$

Для коррекции систематической погрешности δf_{c4} скорректированное действительное число N^k подсчитанных импульсов должно быть равно N^a , т. е.

$$N^k = N^a. \quad (9)$$

Будем выполнять операцию коррекции в виде

$$N^k = N^a (1 - k_n). \quad (10)$$

Согласно (6) — (9) с учетом $k_n \ll 1$ получим приближенное выражение для корректирующего коэффициента

$$k_n \approx \delta f_{c4}.$$

Из (1), (6), (7) следует, что выражение (10) справедливо для всего рабочего диапазона ИПЧК. После выполнения калибровки и определения коэффициента k_n ИПЧК переходит в режим преобразований. Каждый полученный результат преобразования заменяется в памяти МК его скорректи-

рованным значением. Корректирующий коэффициент k_n обновляется после проведения очередной калибровки.

Длительность автокалибровки T_{ak} найдем из условия малости средних квадратических отклонений (СКО) случайных погрешностей калибровочного преобразования $\sigma(\delta f_k)$ по сравнению с максимальной методической погрешностью преобразований $\hat{\delta}_m$:

$$\sigma(\delta f_k) \leq \varepsilon \hat{\delta}_m, \quad \varepsilon \ll 1. \quad (11)$$

Значения действующих в канале передачи калибровочного сигнала $k(t)$ помех полагаем следующими: СКО помехи нормального вида $\sigma_n \leq 10 \text{ мВ}$, амплитуда помехи общего вида $U_{max} \leq 100 \text{ В}$. Обе части выражения (11) определяем с помощью расчетных соотношений, приведенных в [2]. Можно показать, что при уровне значимости $\varepsilon = 0,03$ неравенство (11) выполняется, если в процессе калибровки коэффициент деления частоты $m_k = 2^{14}$.

Автокалибровка всех четырех каналов преобразования происходит параллельно. Пренебрегая малым временем расчета корректировочных коэффициентов в МК для всех каналов преобразования, получаем приближенное значение максимального времени автокалибровки $\hat{T}_{ak} \approx 2m_k/f_k = 2 \cdot 2^{14} / 520 \cdot 10^3 = 0,06 \text{ с}$. Таким образом, время автокалибровки равно длительности 15 текущих преобразований.

Рассмотрим периодическую автокалибровку. Полагаем известной максимальную абсолютную скорость изменения температуры окружающей среды $\dot{\theta}_{max}$. Температурный $\delta f_{c,t}$ и временной $\delta f_{c,v}$ дрейфы частоты счета таймера-счетчика МК за относительно малые интервалы времени между соседними калибровками считаем приближенно линейными:

$$\delta f_{c,t} = \pm \mu (\theta - \theta_0) = \pm \mu \dot{\theta}_{max} (t - t_0); \quad \delta f_{c,v} = \pm \eta (t - t_0), \quad (12)$$

где θ_0 — температура окружающей среды в момент t_0 окончания предыдущей автокалибровки; μ, η — постоянные коэффициенты.

Период повторения калибровки T_1 найдем из следующего условия. Максимальная накопленная за время T_1 погрешность частоты счета

$$\delta f_c(T_1) = \left[(\delta f_{c,n})^2 + (\mu \dot{\theta}_{max} T_1)^2 + (\eta T_1)^2 \right]^{1/2} \leq k \delta f_{c,n}, \quad k > 1, \quad (13)$$

где $\delta f_{c,n}$ — погрешность настройки частоты счета. После ряда преобразований получим выражение

$$T_1 \leq |\delta f_{c,n}| \left[(k^2 - 1) / \left((\mu \dot{\theta}_{max})^2 + \eta^2 \right) \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Составляющие $\delta f_{c,n}$, $\delta f_{c,t}$, $\delta f_{c,v}$ полагаем случайными центрированными взаимно независимыми величинами, распределенными по усеченным нормальным законам с размахами, равными шести СКО. Выберем исходные данные [5]: $\delta f_{c,n} = \pm 3 \cdot 10^{-6}$; $\delta f_{c,v} = \pm 5 \cdot 10^{-6}$ за 1 год; $\delta f_{c,t} = \pm 3 \cdot 10^{-5}$ в интервале температур от -10 до $+60^\circ\text{C}$; $\dot{\theta}_{max} = 10^\circ\text{C}$ за 1 ч. Из (12), (14) при $k = 1,2$ найдем $T_1 \leq 14 \text{ мин}$. Таким образом, длительность автокалибровки составляет менее 0,01 % периода ее повторения.

Оценим выигрыш в точности преобразований, достигаемый благодаря автокалибровке.

Пусть амплитуда импульсов частотного сигнала равна 10 В и $\alpha \leq 0,5 \%$; СКО помехи нормального вида и амплитуда помехи общего вида не превышают соответственно 10 мВ и 1000 В; коэффициент подавления помехи общего вида составляет 100 дБ; пороги срабатывания триггера Шмидта равны 0,01 и 0,1 В. В отсутствие калибровки выберем межповороточный интервал T_n , равный 1 году. Примем номинальную частоту счета $f_c = 10 \text{ МГц}$, СКО ее случайных вариаций $\sigma(f_c) = 3 \cdot 10^{-7}$; время срабатывания УГР и ПВС микроконтроллера 0,1 мкс, остальных блоков канала преобразования — 10 нс. Средние квадратические отклонения случайных вариаций амплитуд и длительностей фронтов импульсов, времени и порогов срабатывания, уровней выходных сигналов блоков каналов преобразования не превышают 1 %.

Максимальная накопленная за время T_n погрешность частоты счета определяется из выражения, аналогичного (13),

$$\delta f_c(T_n) = \left[(\delta f_{c,n})^2 + (\delta f_{c,v})^2 + (\delta f_{c,t})^2 \right]^{1/2}$$

и составляет $3,06 \cdot 10^{-5}$.

С помощью выражений, приведенных в [2], получены максимальные значения относительных погрешностей преобразований, которые принадлежат диапазону 0,005—0,009 %.

В случае автокалибровки с периодом $T_1 = 12 \text{ мин}$ погрешность частоты счета в основном определяется погрешностью частоты калибровочного сигнала. По аналогии с (13):

$$\delta f_c(T_1) \approx \delta f_k(T_1) = \left[(\delta f_{k,n})^2 + (\delta f_{k,t} \dot{\theta}_{max} T_1)^2 + (\delta f_{k,v} T_1)^2 \right]^{1/2}$$

и составляет $1,05 \cdot 10^{-6}$.

В соответствии с выражениями, приведенными в [2], максимальные значения погрешностей преобразования находятся в диапазоне 0,002—0,006 %. Автокалибровка позволяет в 1,5—2 раза повысить точность преобразований, увеличить метрологическую надежность, избежать проведения периодических калибровок ИПЧК.

Таким образом, интеллектуальный четырехканальный преобразователь частота — код обладает высокими метрологическими характеристиками и предназначен для применения в системах автоматического управления и информационно-измерительных системах.

Л и т е р а т у р а

- Макаров В. В., Алексашкин А. А.** Интеллектуальный преобразователь «частота — код» // Метрология. 2009. № 2. С. 21—34.
- Макаров В. В., Володин С. М.** Адаптивный широкодиапазонный многоканальный модуль ввода частотных импульсных сигналов в ЭВМ // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 6—11; **Makarov V. V., Volodin S. M.** Adaptive wide-range multichannel module for the input of pulsed frequency // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 4. P. 326—333.
- Козаченко В. Ф.** Микроконтроллеры: руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления. М.: ЭКОМ, 1997.
- Альтшуллер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г.** Кварцевые генераторы: Справ. пособие. М.: Радио и связь, 1984.

Дата принятия 26.10.2010 г.