О ПОСТРОЕНИИ, АНАЛИЗЕ И РАСЧЕТЕ ЧАСТОТНО-ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ БЫСТРОИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВЕЛИЧИН

Н. Н. Атаманенко
Киев

При построении частотно-цифровых устройств для контроля и измерения (ЧЦУКИ) быстроменяющихся величин A_x на основе методов непосредственного усреднения частоты сигнала f_x [1] необходимо учитывать возможную динамическую ошибку $\delta N_{дин}$, которая может значительно превысить значение принятой в расчетах погрешности дискретности $\delta N_{диск}$. Уменьшение $\delta N_{дин}$ только за счет повышения частоты сигнала f_x или увеличения времени усреднения не всегда целесообразно. Можно существенно уменьшить $\delta N_{дин}$, если выполнить ЧЦУКИ на основе частотного датчика с линейной по частоте характеристикой при измерении интервала времени, кратного периоду частоты сигнала [2]. Такое решение имеет один недостаток — нелинейность преобразования, которую приходится устранять дополнительно [3]. Это усложняет схему ЧЦУКИ и не всегда приемлемо. При анализе характеристик частотных датчиков можно выявить значительную группу датчиков с линейной по периоду характеристикой преобразования двух типов: $\frac{dfx}{dAx} > 0$ и $\frac{dfx}{dAx} < 0$. В последние годы наблюдается появление разработок частотных датчиков с подобными характеристиками, что свидетельствует о расширении возможностей этой группы датчиков. Если при построении ЧЦУКИ с измерением интервала времени, кратного периоду частоты сигнала

$$t_x = \frac{n_{дел}}{f_x};\ n_{дел} = \text{const}, \tag{1}$$

использовать датчик с линейной по периоду характеристикой

$$f_x = \frac{f_0}{1 \pm k_0 (A_x - A_0)};\ f_0 = \begin{vmatrix} f_{max} \\ f_{min} \end{vmatrix};\quad k_0 = \begin{vmatrix} k_1 \\ k_2 \end{vmatrix};\ A_0 \geqslant 0, \tag{2}$$

то можно устранить нелинейность преобразования и предельно снизить динамическую ошибку $\delta N_{дин}$.

В работе рассматривается построение такого ЧЦУКИ, а также исследуются основные задачи преобразования, влияние динамики контролируемой величины и реализация некоторых задач контроля.

Структурная схема ЧЦУКИ и основные задачи и характеристики преобразования

Структурная схема ЧЦУКИ приведена на рис. 1. Приняты обозначения: ЧД-T — частотный датчик; ВУ — входное устройство (усилитель-ограничитель и формирователь); БУ — блок управления (вырабатывает интервал t_x, сигнал установки исходного состояния $N_{нач}$ и сигнал считывания); ДСН — двоичный счетчик-накопитель; УВ — $N_{нач}$ — узел ввода числа $N_{нач}$; И, $И_1 \div И_n$ — схемы совпадения; Г — генератор счетных импульсов $f_0 = \text{const}$.

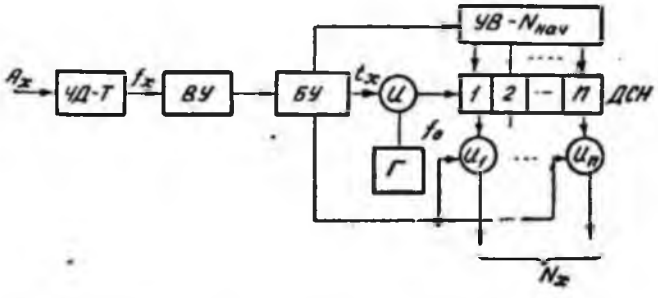


Рис. 1. Структурная схема частотно-цифрового устройства контроля и измерения ЧЦУКИ.

В исходном состоянии схемы И, $И_1 \div И_n$ закрыты, генератор Г работает, в схему ДСН введено число $N_{нач}$. В общем случае число $N_{нач}$ определяется из условия переполнения схемы ДСН емкостью N_{max} при измерении заданного интервала t_x

$$N_{нач} = N_{max} - \frac{n_{дел}}{t_x} f_0 + 1, \tag{3}$$

где $n_{дел}$ — коэффициент деления входного делителя, являющегося и формирователем интервала (1).

Прежде чем перейти к рассмотрению основных характеристик ЧЦУКИ, отметим следующее. Общим для измерений и контроля является получение и фиксация абсолютных значений контролируемой величины A_x и ее отклонений $\Delta A_x = A_x - A_{настр}$; $\Delta A_{x1} = A_{настр} - A_x$ от некоторого предельного значения (настройку), причем величины $A_x, \Delta A_x, \Delta A_{x1}$ могут быть выражены в абсолютных и относительных (%) единицах измерения.

В зависимости от назначения ЧЦУКИ результат преобразования величины A_x в цифровой эквивалент N_x может быть представлен в определенной системе счисления непосредственно в основном блоке — ДСН, либо с помощью дополнительных кодирующих узлов — трансляторов. Условимся основную погрешность преобразования — погрешность дискретности $\delta N_{диск}$ — оценивать из условия переполнения схемы ДСН

$$\delta N_{диск} \leqslant \frac{f_{max}}{n_{дел}(\lambda - 1) f_0}; \quad \lambda = \frac{f_{max}}{f_{min}}. \tag{4}$$

Для упрощения преобразований полагаем, что величина A_x за время t_x не изменяется, т. е. что $a_x = \frac{d}{dt}[A_x(t)] = 0$. Влияние $a_x \neq 0$ будет учтено и поэтому принятое допущение не повлияет на окончательные результаты.

1. Пусть датчик ЧД-T имеет характеристику (2) с $\frac{df_x}{dA_x} < 0$ ($f_0 = f_{max}$; $k_0 = k_1$)

$$f_x = \frac{f_{max}}{1 + k_1 (A_x - A_0)}; \quad k_1 = \frac{\lambda - 1}{A_н - A_0}. \tag{5}$$

Для получения цифровой шкалы отклонений ($A_x - A_{настр}$), где $A_{настр} \geqslant A_0$, установим на ДСН число $N_{нач}$ (3), определяемое для $f_x = f_{настр}$. Значение f_0 находим из (4) для заданного $\delta N_{диск}$, а величину $n_{дел}$ из условия организации схемы БУ (требование точности получения интервала t_x и другие факторы). При прохождении сигнала (5) через ВУ и БУ последним будет сформирован интервал счета (1). Передним его фронтом открывается схема И и частота f_0 поступает на схему ДСН. В процессе счета импульсов повторения произойдет одно переполнение ДСН, так как $f_x^{-1} > f_{настр}^{-1}$ и результат счета в конце интервала t_x будет представлен на ДСН в прямом коде

$$N_x = k_2 (A_x - A_{настр}); \quad k_2 = \frac{k_1}{(\lambda - 1)\delta N_{диск}}. \tag{6}$$

Вслед за интервалом t_x схема БУ формирует кратковременный сигнал, открывающий схемы $И_1 \div И_n$, при этом происходит считывание значения цифровой шкалы (6). После считывания схема БУ формирует кратковременный сигнал, которым через схему УВ — $N_{нач}$ в ДСН записывается исходное число $N_{нач}$. Далее происходит самоустановка схемы БУ в исходное состояние и цикл работы ЧЦУКИ повторяется. Чтобы получить характеристику (6) в абсолютных единицах величины A_x, необходимо выбирать параметры устройства из условия $k_2 = 1$. Если же выбирать параметры из условия $k_2 = (A_н - A_0)^{-1}$, то цифровая шкала (6) будет представлять величину в относительных единицах. Интересной особенностью ЧЦУКИ с переполнением счетчика-накопителя является возможность построения схемы счетчика по любой системе счисления.

2. Пусть датчик ЧД-T имеет характеристику (2) с $\frac{df_x}{dA_x} > 0$ ($f_0 = f_{min}$; $k_0 = k_2$)

$$f_x = \frac{f_{min}}{1 - k_2 (A_x - A_0)}; \quad k_2 = \frac{\lambda - 1}{\lambda (A_н - A_0)}. \tag{7}$$

Для получения цифровой шкалы отклонений $A_x - A_{настр}$, где $A_{настр} \geqslant A_0$, установим на ДСН число $N_{нач}$ (3), определяемое для $f_x = f_{настр}$. Значение f_0 и $n_{дел}$ находим так же, как в п. 1. Прохождение сигнала (7) через ВУ и БУ, формирование интервала t_x, считывание результата счета и установка ДСН в исходное состояние происходят аналогично п.1. Отличие заключается в следующем. Так как в данном случае $f_x^{-1} < f_{настр}^{-1}$, в процессе счета частоты f_0 схема ДСН не переполняется и результат счета в конце интервала t_x будет представлен на ДСН обратным кодом

$$\bar{N}_x = k_4 (A_x - A_{настр}); \quad k_4 = \frac{\lambda k_2}{(\lambda - 1)\delta N_{диск}}. \tag{8}$$

Условия получения цифровой шкалы в абсолютных и относительных единицах величины A_x рассмотрены в п. 1.

Особенностью ЧЦУКИ без переполнения счетчика-накопителя является необходимость построения счетчика по системе счисления, обладающей дополняемостью кодов.

3. Для получения цифровой шкалы отклонений ($A_{\text{настр}} - A_x$), где $A_{\text{настр}} \leqslant A_{\text{н}}$, с датчиком (5) необходимо установить на ДСН число $N_{\text{нач}}$ (3), определяемое для $f_x = f_{\text{настр}}$. Так как $f_x^{-1} < f_{\text{настр}}^{-1}$, то аналогично п. 2 результат счета будет представлен обратным кодом

$$N_x = k_5 (A_{\text{настр}} - A_x);\ k_5 = k_3 \quad (6). \tag{9}$$

Если использовать датчик (7), то цифровая шкала $A_{\text{настр}} - A_x$, где $A_{\text{настр}} \leqslant A_{\text{н}}$, будет аналогично п. 1 представлена прямым кодом

$$N_x = k_6 (A_{\text{настр}} - A_x);\ k_6 = k_4 \quad (8), \tag{10}$$

так как у нас $f_x^{-1} > f_{\text{настр}}^{-1}$ и схема ДСН в процессе счета переполняется. Нетрудно заметить, что полученные выражения (6) и (9), (8) и (10) аналогичны: обе группы уравнений отражают одинаковый характер отклонений. В каждой паре уравнения отличаются лишь формой представляющего отклонение кода (прямой N_x или обратный $\overline{N_x}$). Эти положения существенны при решении задач контроля (фиксация $A_x \geqslant A_{\text{настр}}$; $A_x \leqslant A_{\text{настр}}$) при помощи ЧЦУКИ.

4. Полученные результаты можно распространить и на случай дифференциальных частотных датчиков (ДЧД-Т) с линейной по периоду характеристикой (5) или (7). Если схема ДЧД-Т составлена из ЧД-$Т_1$ (5) и ЧД-$Т_2$ (7), то при $f_{\max_2} < f_{\min_1}$ для анализа и расчета необходимо использовать методику п. 1 и 3, так как характеристика ДЧД-Т имеет $\frac{d}{dA_x}[\Delta f_x] < 0$. При $f_{\min_1} > f_{\max_2}$ имеем $\frac{d}{dA_x}[\Delta f_x] > 0$ и для анализа и расчета используем методику п. 2 и 3.

Если схема ДЧД-Т составлена из одного датчика ЧД-$Т$ (5) или ЧД-$Т$ (6) и источника опорного сигнала $f_{\text{оп}} = \text{const}$, то при $f_{\text{оп}} > f_{\max}$ (5) (или $f_{\text{оп}} < f_{\min}$ (5)) получим $\frac{d}{dA_x}[\Delta f_x] > 0$ (или $\frac{d}{dA_x}[\Delta f_x] < 0$) и для расчета будем пользоваться методикой п. 2 и 3 (или п. 1 и 3). При $f_{\text{оп}} > f_{\max}$ (6) (или $f_{\text{оп}} > f_{\min}$ (6)) получим $\frac{d}{dA_x}[\Delta f_x] < 0$ (или $\frac{d}{dA_x}[\Delta f_x] > 0$). Для расчета можно использовать методику п. 1 и 3 (или п. 2 и 3).

Влияние динамики контролируемой величины на выбор основных параметров ЧЦУКИ

Как уже отмечалось, в интервале преобразования t_x величина A_x может изменяться с некоторой скоростью $a_x = 0 \div a_{\max}$. Допустим, что на интервале $t_{x\max}$ величина скорости a_x постоянна и равна $a_x = a_{\max}$, а знак ее изменяется. Оценим динамическую погрешность преобразования $\delta N_{\text{дин}}$ устройства, вызванную изменением $A_x(t)$. Это поможет более правильно выбрать параметр f_0. Рассматриваем ЧЦУКИ с переполнением ДСН, для чего выбираем датчик с характеристикой (5) и рассматриваем получение цифровой шкалы (6) с настройкой на $A_{\text{настр}} = A_0 \geqslant 0$. Методика получения результатов распространяется и на остальные изученные в работе характеристики датчика и ЧЦУКИ. Характеристика датчика с учетом скорости $\pm a_{\max}$ представляется выражением

$$f_x^{-1}(t) = \frac{f_{\max}}{1 + k_1 (A_x \pm a_{\max} t - A_0)}. \tag{11}$$

Настройке ДСН на A_0 соответствует интервал переполнения $t_{\min}$. При наличии скорости изменения контролируемой величины $\pm a_{\max}$ интервал переполнения $t_{\min}$ изменится на величину $\pm \Delta t_{\min}$. Величина относитель-

ной приведенной ошибки формирования интервала переполнения ДСН определяется выражением

$$\delta f^1_{\text{пер}_{\max}} = \frac{t^1_{\min}}{t_{\min}} - 1. \qquad (12)$$

Значение $t_{\min}$ находим из (1) для $f_x = f_{\max}$, а значение $t^1_{\min}$ — из (1), подставляя f^1_x из (11) для $A_x = A_0$ и $t = t^1_{\min}$.

Окончательно получаем

$$\delta f^1_{\text{пер}_{\max}} = \pm \frac{k_1 a_{\max} t_{\min}}{\pm k_1 a_{\max} t_{\min} - 1}. \qquad (13)$$

Так как $t_{\min} = \frac{n_{\text{дел}}}{f_{\max}}$, то ошибка формирования (13) зависит от $n_{\text{дел}}$, поэтому при заданных $a_{\max}$ и $f_{\max}$ значение $n_{\text{дел}}$ необходимо выбирать минимальным.

Динамическая ошибка преобразования устройства $\delta N_{\text{дин}}$ однозначно определяется ошибкой (13)

$$\delta N_{\text{дин}_{\max}} = \delta f^1_{\text{пер}_{\max}}. \qquad (14)$$

Запишем условие связи ошибок динамической (14) и дискретности (4)

$$\delta N_{\text{дин}_{\max}} b = \delta N_{\text{диск}};\ b \leqslant 1, \qquad (15)$$

из которого для заданных b, $n_{\text{дел}}$ можно вычислить значение частоты f_0

$$f_0 = \frac{\pm k_1 a_{\max} t_{\min} - 1}{\pm k_1 a_{\max} b (\lambda - 1)} \left(\frac{1}{t_{\min}}\right)^2. \qquad (16)$$

Приведенную методику можно распространить на датчики с характеристикой (7), а также на другие типы настроек ДСН.

Решение некоторых задач контроля при помощи ЧЦУКИ

Схема рис. 1 может самостоятельно обнаруживать отклонения $A_x \geqslant A_{\text{настр}}$; $A_x \leqslant A_{\text{настр}}$ либо быть составной частью (индивидуальный или групповой узел) более сложной системы централизованного контроля и управления. Укажем на некоторые особенности построения ЧЦУКИ для обнаружения отклонений и получения цифровых характеристик преобразования.

1. Для всех режимов (настроек) ЧЦУКИ с переполнением ДСН в схему необходимо ввести ячейку T_{n+1} фиксации переполнения. Состояние ячейки в конце интервала счета будет свидетельствовать о наличии (отсутствии) отклонения.

2. Для всех режимов (настроек) ЧЦУКИ без переполнения ДСН в схему необходимо ввести дополнительный узел задания предельных значений $N_{\text{настр}}$ и цифровую схему сравнения ЦСС, выходной сигнал которой в конце интервала счета, фиксируемый ячейкой T_{n+}, будет указывать на наличие (отсутствие) отклонения. Узел задания $N_{\text{настр}}$ включается через схему ЦСС на шины обратного кода ДСН.

Если ЧЦУКИ используется для всех рассмотренных режимов, то в схему необходимо ввести дополнительные узлы (п. 1 и 2), объединив их общим выходным узлом индикации наличия (отсутствия) отклонений

На рис. 2 приведена схема многоканального ЧЦУКИ с общим узлом индикации отклонений и однотипными датчиками (5) и (7). Приняты дополнительные обозначения: КВС — коммутатор входных сигналов; T_{n+1} — триггер фиксации переполнения ДСН; ИЛИ — собирательная схе-

ма; ЦСС — цифровая схема сравнения; УВ — $N_{\text{настр}}$ — устройство ввода чисел $N_{\text{настр}_j}$; T_{n+2} — триггер фиксации $\overline{N}_{x_j} \geqslant N_{\text{настр}_j}$; УИО — устройство индикации отклонений; УПКР — устройство переключения каналов и режимов; ПБВ — программный блок времени. Для повышения надежности работы УИО в канале обратных кодов $\overline{N}_{x_j}$ значения чисел $N_{\text{настр}_j}$ выбираются из условия $N_{\text{настр}_j} = \overline{N}_{x_j} - 2$. В отличие от схемы рис. 1 в рассматриваемой схеме коммутация j-го канала сопровождается установкой схемы БУ в исходное состояние и введением в узлы УВ — $N_{\text{нач}}$ и

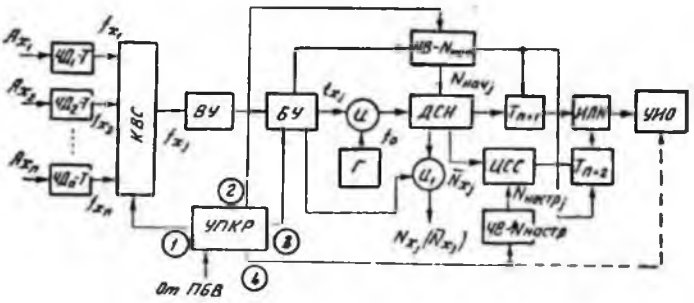


Рис. 2. Структурная схема многоканального ЧЦУКИ с автономным узлом индикации отклонений.

УВ — $N_{\text{настр}}$ команд в отношении канала и режима (шины 1, 3, 2 и 4 УПКР соответственно). Введение дополнительных узлов для обнаружения и фиксации отклонений позволяет проводить оперативный контроль исправности всего устройства. Если увязать выходной сигнал УИО с выходными сигналами УПКР и некоторым опорным сигналом, то можно осуществить сигнализацию неисправности всего устройства и его основных узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Атаманенко. Некоторые вопросы цифрового воспроизведения измеряемой величины в системах с частотными датчиками. Вестник КПИ, № 1, серия автоматики и электроприборостроения и радиоэлектроники. Изд-во КГУ, Киев, 1964.

2. Н. Н. Атаманенко. О цифровом воспроизведении величин, выраженных линейным частотным сигналом. «Изв. вузов, Приборостроение», № 5, 1965.

3. М. М. Атаманенко. Побудова та аналіз цифрових приймачів частотних сигналів з лінеаризацією шкали відтворення. Вісник КПІ, серія автоматики та приладобудування. Вид-во КПІ, Київ, 1966.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (ЧЦП) С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Н. Н. Атаманенко

Киев

При построении линейных и нелинейных ЧЦП с переполнением основного счетчика на основе измерения частоты f_x, выражающей контролируемую величину A_x ($A_x = A_0 \div A_н$; $A_0 \geqslant 0$), значение интервала счета $t_{сч} = \text{const}$ в установившемся режиме ($A_x(t) = A_x$) определяется обычно заданной погрешностью дискретности преобразования.