ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Мельников. Использование двоичных делителей для выполнения арифметических операций.— Автоматика и вычислительная техника, 1972, № 6.
2. А. А. Воронов и др. Цифровые аналоги для систем автоматического управления. М., Изд-во АН СССР, 1960.
3. В. Б. Смолов, В. В. Барашенков. Функциональный преобразователь «временной интервал — число».— Измерительная техника, 1964, № 6.
4. Е. Н. Браго, Л. К. Мамиконова. Аналого-цифровой преобразователь с кусочно-линейной аппроксимацией.— Приборы и системы управления. 1971, № 2.

Поступила в редакцию 21 мая 1973 г.

УДК 621.374.32

Б. П. КАСИЧ

(Уфа)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ, ЗАДАННЫЕ НЕПРАВИЛЬНОЙ ДРОБЬЮ ВИДА P/Q

При решении задач синтеза и масштабирования частот, функционального преобразования, в частности при линеаризации частотных характеристик датчиков, при выполнении математических операций над сигналами, заданными в частотно-импульсной форме часто возникает необходимость реализовать зависимость вида

$$F_y = kF_x,$$

или

$$N_y = KN_x, \qquad K = Q/P < 1,$$

где F_x и F_y или N_x и N_y — частоты повторения импульсов или число импульсов соответственно на входе и выходе звена, имеющего коэффициент передачи K; P и Q — целые числа.

Для реализации этих зависимостей используются делители частоты [1—7], средняя частота повторения импульсов на выходе которых обратно пропорциональна числу, заданному в виде неправильной дроби $P/Q = 1/K$.

Методы синтеза делителей с дробными коэффициентами деления в основном определяются заданной точностью преобразования частот и тем, в каком виде представлены числитель и знаменатель требуемого коэффициента передачи делителя. Большинство известных делителей [3, 4, 6, 7] имеют коэффициенты передачи, заданные правильной дробью, числитель или знаменатель которой представлены в виде степени чисел 2 или 10. К таким делителям, в частности, относятся хорошо известные двоичные умножители, имеющие коэффициенты передачи вида

$$K = \frac{Q}{2^n} \text{ или } K = \frac{Q}{10^n}.$$

Числитель заданного коэффициента передачи умножителя представляется на кодовых входах умножителя в виде двоичного кода для коэффициентов, знаменатель которых равен степени числа 2, или в виде двоично-десятичного кода для коэффициентов, знаменатель которых равен степени числа 10.

Задача деления частоты на коэффициенты, заданные неправильной дробью вида P/Q, числитель и знаменатель которой могут быть любым числом натурального ряда, решается [1] путем представления коэффициента деления в виде конечной непрерывной дроби

$$\frac{P}{Q} = a_0 \pm \cfrac{1}{a_1 \pm \cfrac{1}{a_2 \pm \ddots \pm \cfrac{1}{a_n}}},$$

целочисленные неполные частные знаменатели a_i которой реализуются (рис. 1) двоичными делителями частоты, охваченными положительными или отрицательными импульсными обратными связями в зависимости от знака частного знаменателя a_i. Средняя частота повторения импульсов на выходе делителя равна

$$F_{\text{вых}} = \frac{Q}{P} F_{\text{вх}}.$$

Широкому применению таких делителей препятствуют трудности, связанные с тем, что для осуществления деления частоты на переменные коэффициенты необходимо каждый раз при смене коэффициента деления производить весьма громоздкие вычисления неполных частных знаменателей и в соответствии с полученными результатами вычислений вносить изменения в структуру делителя (изменения в цепях обратных связей и двоичных делителей a_i).

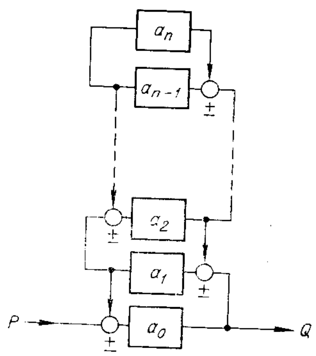

Рис. 1.

Чаще всего требуемый коэффициент передачи K делителя приводится к виду правильной дроби, представленной двоичным кодом, что позволяет для реализации коэффициентов деления вида P/Q применять двоичные умножители. Очевидно, что для реализации двоичным умножителем коэффициента деления, заданного несократимой неправильной дробью вида P/Q, необходимо эту дробь представить правильной двоичной дробью

$$\frac{Q}{P} = \frac{Q'}{2^k} = \sum_{i=0}^{k-1} q_i' 2^{i-k}.$$

Следовательно, при реализации двоичным умножителем коэффициентов деления, заданных неправильной дробью вида P/Q, предполагается предварительное выполнение арифметической операции деления числа Q на число P. Это обстоятельство не вызывает затруднений при реализации коэффициентов, значения которых заранее известны (например, определены на стадии проектирования делителя), а число ограничено. Расчетные значения коэффициентов передачи двоичного умножителя [3] хранят в пассивном запоминающем устройстве. Очевидно, что такой путь реализации дробных коэффициентов деления вида P/Q неприемлем, когда коэффициенты деления изменяются в широких пределах, так как в этом случае значительно увеличивается емкость запоминающего устройства и затрудняется управление выборкой требуемых коэффициентов передачи двоичного умножителя.

В предлагаемой статье рассматривается один из методов преодоления указанных трудностей при реализации коэффициентов деления, заданных неправильной дробью, числитель и знаменатель которой представлены двоичными кодами с естественными весами двоичных разрядов. В основу метода положен принцип [8, 9] управления частотой повторения импульсов, поступающих с выхода схемы запрета на входы двоичных умножителей, один из которых формирует сигналы запрета, а второй — выходной частотный сигнал. На рис. 2 приведена структурная схема делителя, позволяющего реализовать коэффициенты деления, заданные неправильной дробью вида $P/Q \geqslant 1$. Делитель содержит два звена. Первое звено образовано двоичным умножителем *1* и схемой запрета *3*. Второе звено содержит двоичный умножитель *2* и удвоитель *4* числа импульсов.

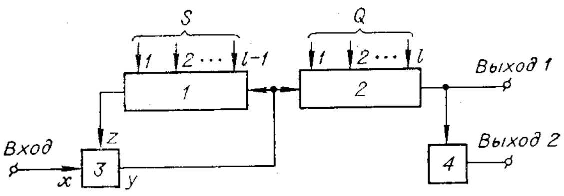

Рис. 2.

Рассмотрим принцип действия такого делителя и определим его коэффициент передачи, для чего числитель заданного дробного коэффициента деления представим в виде суммы

$$P = 2^{p-1} + S, \quad S = \sum_{i=0}^{m-1} s_i 2^i$$

и установим на входе ввода кодов первого двоичного умножителя двоичный код числа

$$\frac{S}{2^{p-1}} = \sum_{i=0}^{p-2} s_i 2^{i-(p-1)},$$

где p — число двоичных разрядов числа P; m — число двоичных разрядов числа S.

Согласно [6], число импульсов, поступающих на выход двоичного умножителя, равно

$$Z = \sum_{i=0}^{p-2} \left[y 2^{i-(p-1)} + \frac{1}{2} \right] s_i, \tag{1}$$

где y — число импульсов, поступивших на вход первого двоичного умножителя. Здесь и далее в тексте квадратные скобки означают выделение целочисленной части числа.

Предположим, что $y > 2^{p-1}$. Тогда число y можно представить как

$$y = \left[\frac{y}{2^{p-1}} \right] 2^{p-1} + R, \tag{2}$$

причем

$$\left[\frac{y}{2^{p-1}} \right] = f(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leqslant y \leqslant 2^{p-1} - 1; \\ k & \text{при } k 2^{p-1} \leqslant y \leqslant (k+1) 2^{p-1} - 1, \end{cases} \tag{3}$$

где $k = 1, 2, \ldots$, а R — остаточный член, получаемый при выделении целочисленной части числа $y/2^{p-1}$. Из (2) и (3) следует, что R зависит от числа импульсов, поступающих на вход двоичного умножителя и является периодической функцией

$$R = \varphi(y) = \begin{cases} y & \text{при } 0 \leqslant y \leqslant 2^{p-1} - 1, \\ y - k 2^{p-1} & \text{при } k 2^{p-1} < y < k 2^{p-1} + 2^{p-1} - 1, \end{cases}$$

период которой равен 2^{p-1}.

С учетом (2) выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$Z = \sum_{i=0}^{p-2} \left[\left[\frac{y}{2^{p-1}} \right] 2^i + R 2^{i-(p-1)} + \frac{1}{2} \right] s_i = S \left[\frac{y}{2^{p-1}} \right] +$$

$$+\sum_{i=0}^{p-2}\left[R2^{i-(p-1)}+\frac{1}{2}\right]s_i. \tag{4}$$

Определим коэффициент передачи первого двоичного умножителя

$$K_{y1}=\frac{Z}{y}=\frac{S}{y}\left[\frac{y}{2^{p-1}}\right]+\frac{1}{y}\sum_{i=0}^{p-2}\left[R2^{i-(p-1)}+\frac{1}{2}\right]s_i.$$

После несложных преобразований получим

$$K_{y1}=\frac{S}{2^{p-1}}-\frac{1}{y}\left\{\frac{SR}{2^{p-1}}-\sum_{i=0}^{p-2}\left[R2^{i-(p-1)}+\frac{1}{2}\right]s_i\right\}. \tag{5}$$

Обозначим выражение, заключенное в фигурные скобки, символом δ_1 и запишем уравнение (5) в следующем виде:

$$K_{y1}=\frac{S}{2^{p-1}}-\frac{\delta_1}{y}. \tag{6}$$

Коэффициент δ_1 определяет абсолютную погрешность преобразования двоичного умножителя, зависит от численного значения остаточного члена R и, следовательно, является периодической функцией

$$\delta_1=\psi(R)=\begin{cases}0 & \text{при } R=0;\\ \dfrac{SR}{2^{p-1}}-\sum\limits_{i=0}^{p-2}\left[R2^{i-(p-1)}+\dfrac{1}{2}\right]s_i & \text{при } R>0,\end{cases} \tag{7}$$

период которой равен 2^{p-1}.

Воспользовавшись полученным выше выражением для коэффициента передачи двоичного умножителя, определим число импульсов, поступающих с выхода первого двоичного умножителя на вход запрещения схемы запрета

$$Z=K_{y1}y=\frac{S}{2^{p-1}}y-\delta_1. \tag{8}$$

Каждый импульс, поступающий с выхода двоичного умножителя, воздействует на схему запрета таким образом, что очередной импульс входной последовательности x на выход схемы запрета не проходит, т. е. схема запрета реализует зависимость

$$y=x-Z,$$

или с учетом (8)

$$y=x-\frac{S}{2^{p-1}}y+\delta_1,$$

откуда определяем коэффициент передачи звена, содержащего двоичный умножитель и схему запрета:

$$K_{y2}=\frac{y}{x}=\frac{2^{p-1}}{P}+\frac{2^{p-1}}{P}\frac{\delta_1}{x}. \tag{9}$$

Нетрудно убедиться в том, что при поступлении на вход схемы запрета P импульсов на выход этой схемы пройдет 2^{p-1} импульсов, а на вход запрещения S импульсов, т. е. для числа x входных импульсов, кратного числу P, делитель реализует деление с погрешностью $\delta_1=0$.

При подаче на вход делителя импульсов с частотой повторения F_x на выход схемы запрета в течение временного интервала $\tau_и$ (интервал измерения выходной частоты) пройдет

$$y=\frac{2^{p-1}}{P}F_x\tau_и+\frac{2^{p-1}}{P}\delta_1$$

импульсов, т. е. среднее значение частоты, измеренной в течение интервала времени $\tau_и$, будет равно

$$F_{ср} = \frac{y}{\tau_и} = \frac{2^{p-1}}{P} F_x + \frac{2^{p-1}\delta_1}{P\tau_и},$$

или при $\tau_и = 1$

$$F_{ср} = \frac{2^{p-1}}{P} F_x + \frac{2^{p-1}}{P} \delta_1 = \frac{2^{p-1}}{P} F_x + \delta_f, \tag{10}$$

где δ_f — коэффициент, определяющий флюктуации частоты на выходе схемы запрета.

В случае равномерного распределения во времени импульсов, поступающих на вход схемы запрета, импульсы, поступающие с выхода схемы запрета, будут распределены во времени неравномерно, причем если оценивать неравномерность как разность между наибольшими и наименьшими периодами выходной частоты, то эта разность не будет превышать одного периода входной частоты.

Из (10) следует, что делитель, содержащий двоичный умножитель и схему запрета, реализует коэффициент деления $K_д$, заданный неправильной дробью $2 > \frac{P}{2^{p-1}} \geqslant 1$, представленной двоичным кодом. Очевидно, что целая часть коэффициента $K_д$ равна 1, т. е.

$$K_д = \frac{P}{2^{p-1}} = 1 + \frac{S}{2^{p-1}}, \quad 2^{p-1} - 1 \geqslant S \geqslant 1.$$

Следовательно, для реализации дробного коэффициента деления $2 > \frac{P}{2^n} \geqslant 1$, заданного с точностью до n-го двоичного знака после запятой, необходимо отбросить единицу целой части числа $P/2^n$, а коэффициент умножения двоичного умножителя установить равным дробной части заданного коэффициента деления.

Рассмотрим совместную работу обоих звеньев делителя, причем представим знаменатель заданного дробного коэффициента деления P/Q в виде суммы

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} q_i 2^i$$

и установим на входе ввода кодов второго двоичного умножителя двоичный код числа

$$\frac{Q}{2^{p-1}} = \sum_{i=0}^{p-2} q_i 2^{i-(p-1)}, \quad n < p,$$

где n — число двоичных разрядов числа Q.

Так как выход схемы запрета подключен также к входу второго двоичного умножителя, то импульсы с выхода схемы запрета одновременно поступают и на вход этого двоичного умножителя, коэффициент передачи которого, согласно (6), равен

$$K_{y3} = \frac{Q}{2^{p-1}} - \frac{\delta_2}{y},$$

где

$$\delta_2 = \frac{QR}{2^{p-1}} - \sum_{i=0}^{p-2} \left[R 2^{i-(p-1)} + \frac{1}{2}\right] q_i. \tag{11}$$

Определим коэффициент передачи делителя, образованного схемой запрета и двоичными умножителями *1* и *2*:

$$K_{у4} = K_{у2}K_{у3} = \left(\frac{2^{p-1}}{P} + \frac{2^{p-1}\delta_1}{P_x} \right)\left(\frac{Q}{2^{p-1}} - \frac{\delta_2}{y} \right),$$

или, учитывая, что

$$y = \frac{2^{p-1}}{P}(x - \delta_1),$$

представим коэффициент передачи $K_{у4}$ в следующем виде:

$$K_{у4} = \frac{Q}{P} + \frac{Q\delta_1}{Px} - \frac{\delta_2}{x}. \tag{12}$$

Из (7) и (11) следует, что коэффициент передачи $K_{у4}$ является периодической функцией, период которой равен числу P:

$$K_{у4} = \varphi(x) = \begin{cases} \frac{Q}{P} & \text{при } x = (k+1)P; \\ \frac{Q}{P} + \frac{\delta_3}{x} & \text{при } 0 < x - kP < P, \end{cases}$$

где
$$\delta_3 = \frac{Q}{P}\delta_1 - \delta_2 \qquad k = 0, 1, 2, \ldots$$

Очевидно, что для коэффициентов деления, числитель и знаменатель которых имеют конечное число двоичных разрядов, функция $K_{у4} = \varphi(x)$ при $x \to \infty$ имеет конечный предел

$$\lim_{x\to\infty} K_{у4} = \frac{Q}{P}.$$

Средняя частота повторения импульсов, поступающих с выхода второго двоичного умножителя в течение интервала измерения $\tau_и = 1$, будет равна

$$F_{вых\,1} = \frac{Q}{P}F_x + \delta_3,$$

или

$$F_{вых\,1} \approx \frac{Q}{P}F_x \quad \text{при} \quad \tau_и F_x \gg P.$$

Когда число двоичных разрядов числителя равно числу двоичных разрядов знаменателя заданного дробного коэффициента деления, т. е. $p = n$, на входах ввода кодов второго двоичного умножителя устанавливается двоичный код числа

$$\frac{Q}{2^p} = \sum_{i=0}^{p-1} q_i 2^{i-p}.$$

Очевидно, что в этом случае среднее значение частоты на выходе второго двоичного умножителя — на первом выходе делителя —будет равно

$$F_{вых\,1} = \frac{Q}{2P}F_x + \frac{Q}{2P}\delta_1 - \delta_2,$$

а на втором выходе, т. е. на выходе удвоителя *4* числа импульсов,—

$$F_{вых\,2} = \frac{Q}{P}F_x + \frac{Q}{P}\delta_1 - \delta_2, \quad P \geqslant Q \geqslant 2^{p-1},$$

и, следовательно, в целом делитель позволяет реализовать коэффициенты деления, числитель и знаменатель которых могут изменяться в широких пределах, т. е.

$$K_д = \frac{P}{Q} \geqslant 1, \qquad 2^{l-1} - 1 \geqslant P \geqslant Q \geqslant 1,$$

где l — число разрядов второго двоичного умножителя.

Выводы

Рассмотренный метод деления частоты повторения импульсов может быть использован при разработке делителей частоты с коэффициентами деления, заданными неправильной дробью вида $P/Q \geqslant 1$, числитель и знаменатель которой представлены на кодовых входах делителя двоичными кодами с естественными весами двоичных разрядов. Кодовая форма представления коэффициентов деления упрощает разработку цифровых устройств, содержащих узлы, реализующие деление частоты на дробные коэффициенты, а также облегчает сопряжение делителей с различными устройствами автоматики с цифровым управлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Witzschel. Digitaler Frequenzteiler mit rational gebrochenem Teilungsfaktor zur Trägerfrequenzerzeugung.— Nachrichtentechnik, 1969, 19, H. 9.
2. A. Lackner. Stetigarbeiteude Informations — umsetzer.— Siemens — Zeitschrift, 1965, H. 5.
3. Регистрирующая аппаратура для вибрационно-частотных датчиков.— Сб. статей, ч. 2. Под ред. Ю. С. Плискина. М., ОНТИПрибор, 1969.
4. Р. Г. Карпов. Техника частотно-импульсного моделирования. М., «Машиностроение», 1969.
5. Е. Д. Зайденберг. Регулируемое пересчетное устройство для деления частоты следования импульсов на неправильную дробь.— Авторское свидетельство № 264458.— ИПОТЗ, 1970, № 8.
6. Ян Си Зен. Определение максимальной погрешности двоичного умножителя.— Автоматика и телемеханика, 1960, т. 21, № 7.
7. Э. К. Шахов. Метод измерения низких частот.— Автометрия, 1966, № 2.
8. Б. П. Касич. Способ деления частоты повторения импульсов. — Авторское свидетельство № 346799.— ИПОТЗ, 1972, № 23.
9. Б. П. Касич. Делитель частоты. Авторское свидетельство № 316198.— ИПОТЗ, 1971, № 29.

Поступила в редакцию 10 октября 1972 г.

УДК 621.374.2

Б. М. ЮРЧИКОВ

(Москва)

КАСКОДНЫЕ КЛЮЧИ В ФОРМИРОВАТЕЛЯХ ИМПУЛЬСОВ НА ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКЕ

Импульсная модуляция и отклонение лазерного луча с помощью электрооптического эффекта в кристаллах требуют формирования на обкладках этих кристаллов высоковольтных управляющих импульсов. Электрооптические кристаллы представляют собой емкостную нагрузку [1]. Электронные ключи, применяемые в схемах формирования импуль-