

А. А. КАСЬЯНЕНКО

(Москва)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ СЛЕДЯЩЕГО ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В КОД

Цифровой следящий преобразователь частоты (ПЧ), представляющий собой частотно-импульсную модель, построенную на основе реверсивного счетчика (РС) и делителя частоты (ДЧ), привлекает внимание инженеров и исследователей на протяжении более двух десятков лет. Первые схемные реализации ПЧ и основные соотношения описаны в [1, 2].

Функциональная схема ПЧ приведена на рис. 1. Преобразователь частоты состоит из РС, на суммирующий вход которого поступают импульсы измеряемой частоты $F_{изм}$, а на вычитающий — импульсы частоты обратной связи $F_{ос}$, снимаемые с ДЧ через схемы совпадения И, управляемые по вторым входам потенциалами, снимаемыми с триггеров РС, и схемы сборки ИЛИ. Опорная частота $F_{оп}$ вырабатывается генератором Г. На входе РС показан также дискретный фильтр (ДФ), о назначении которого речь будет идти дальше. Число $N_{изм}$, пропорциональное измеряемой частоте, снимается с РС.

Анализ основных соотношений, описывающих работу и различные варианты схемной реализации ПЧ, дан в [3], где отмечено, что «существенным недостатком рассмотренных следящих устройств является неравномерное распределение выходных импульсов в установившемся режиме». В [4] предложен один из вариантов реализации ПЧ и приведено выражение для его передаточной функции

$$W(p) = k / (Tp + 1), \quad (4)$$

где $T = 2^n / F_{оп}$ — постоянная времени; n — число разрядов реверсивного счетчика; $F_{оп}$ — опорная частота. В [5] дано выражение для амплитудно-частотной характеристики ПЧ

$$W(j\Omega) \approx 1 - 0,5\Omega^2 T^2$$

и величины динамической погрешности

$$\gamma_d = -0,5\Omega^2 T^2.$$

Там же утверждается, что метод непрерывного действия обладает наибольшим быстродействием, но не получил практического применения вследствие сложности осуществления требуемой задержки и возможности накопления ошибки из-за сбоев РС.

На основе частотно-импульсных моделей реализован ряд универсальных устройств, например, таких, как арифметические устройства [6], функциональные преобразователи [7], преобразователи частоты в код [1—4, 8].

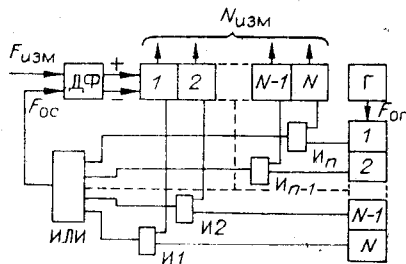


Рис. 1.

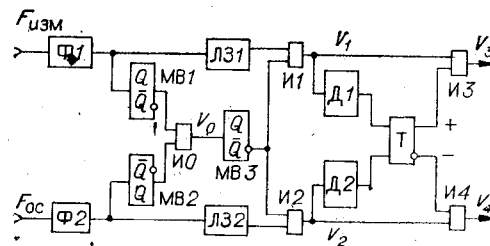


Рис. 2.

Из описания свойств ПЧ, приведенных в [1—5], следует, что он является дискретным аналогом интегрирующего емкостного преобразователя частоты в напряжение и представляет собой аperiodическое звено первого порядка. Это справедливо при пренебрежении дискретным характером преобразователя и при идеальной его работе.

Выше [3, 5] уже упоминалось о недостатках ПЧ, которые обусловлены неравномерностью импульсов частотной последовательности $F_{ос}$. Кроме того, при совпадении импульсов на суммирующем и вычитающем входах РС возникает состояние неопределенности и возможен сбой [5].

Неравномерность частотной последовательности, образуемой двоичным умножителем (ДУ), описана впервые в [9], а затем на основе предложенной в этой работе методики выделения ближайшей целой части числа импульсов, получаемых с ДУ на произвольном интервале, в [10] получено выражение для погрешности умножителя

$$D = \frac{1}{2} \sum_{p=0}^n \frac{a_p}{2^p} \left[1 + \sum_{s=1}^p (1 - a_{s-1}) 2^{s-1} \right], \quad (2)$$

где n — число разрядов ДЧ; $a_p = 0$ или 1 — коэффициент, обозначающий состояние p -го триггера РС. В последующих работах ряд авторов [11, 12] ссылается на это выражение, хотя в [10] указано, что оно определяет лишь положительную погрешность, а для отрицательной и максимальных ее значений получены другие выражения. В установившемся состоянии за счет неравномерности частоты импульсов ДУ [13] точное равенство $F_{ном}$ и $F_{ос}$ не достигается, поэтому возникает непрерывное изменение состояний младших разрядов РС. Кроме того, на работу ПЧ оказывают влияние переходные процессы в РС [14], которые не учитываются выражениями, полученными в [1—5, 15].

Погрешность ПЧ, возникающую за счет неравномерности импульсов, целесообразнее оценивать не в соответствии с (2), а по величине отклонения периода в комбинациях частоты $F_{ос}$ относительно среднего значения частоты, которое могло бы быть получено в идеальном синтезаторе частот с равномерным распределением импульсов. Средний период выходных импульсов ДУ

$$T_{ср} = \frac{1}{F_{ср}} = \frac{1}{F_{оп} \sum_{i=1}^n 2^{-i} a_i}, \quad (3)$$

где $F_{оп}$ — опорная частота на входе ДЧ; n — число разрядов; $a_i = 0$ или 1 — коэффициент, определяемый состоянием i -го разряда РС.

Импульсы на выходе ДУ следуют группами, которые периодически повторяются. Например, если средняя частота образована импульсами, снимаемыми с 1-го и 2-го разрядов ДЧ, то интервалы между импульсами чередуются следующим образом:

$$T_0 T_1 T_0 T_1 T_0 T_1 T_0 T_1 T_0 T_1 \text{ и т. д.},$$

где $T_0 = 1/F_{оп}$ — минимальное расстояние; $T_1 = 1/(F_{оп} 2^{-1})$ — максимальное расстояние между импульсами в данной комбинации. При равномерном распределении импульсов среднее значение периода $T_{ср1,2}$ находится в соответствии с (3):

$$T_{ср1,2} = 1/F_{оп} (2^{-1} + 2^{-2}) = 4/3F_{оп}. \quad (4)$$

Минимальное расстояние между импульсом рассматриваемой комбинации и импульсом последовательности с равномерным распределением составит $\Delta\tau_{мин} = T_{ср1,2} - T_0 = 1/3F_{оп} = \tau_0/3$, а максимальное — $\Delta\tau_{max} = T_{ср1,2} - T_1 = 2\tau_0/3$. Если частотная комбинация образована четырьмя разрядами, то

$$\Delta\tau_{мин} = 1/16F_{оп}, \quad \text{а} \quad \Delta\tau_{max} = 14/16F_{оп}.$$

Анализ всех возможных комбинаций при любом числе разрядов показы-

ваает, что при любых сочетаниях частот сдвиг импульсов комбинационной последовательности относительно импульсов равномерной последовательности всегда меньше величины минимального расстояния между импульсами в комбинационной последовательности.

Для устранения погрешности, вносимой неравномерностью частоты ДУ, используют различные способы: синхронизацию импульсов измеряемой частоты с импульсами частоты обратной связи [16], включение буферных делителей [17], стабилизацию положения импульсов при помощи блока переменной задержки [18]. Однако при любой синхронизации в младшем разряде возможно изменение состояний при подборе преобразователем частоты, т. е. погрешность может составлять ± 1 младшего разряда, как и в случае счетно-импульсных методов измерения частоты [19].

При использовании рассматриваемого ПЧ в качестве решающего устройства в системе с частотно-импульсными датчиками со случайным распределением импульсов во времени, например в системах с радиоактивными датчиками, процессы усложняются. Синхронизация импульсов обратной связи и импульсов входной последовательности практически становится невозможной. В данном случае требуется применение специальных мер для обеспечения устойчивости работы и требуемой точности. С этой целью на входе РС включается ДФ, как показано на рис. 1, схема которого [20] приведена на рис. 2. Дискретный фильтр состоит из формирователей импульсов Ф1 и Ф2; одновибраторов МВ1 — МВ3; дифференцирующих цепочек Д1 и Д2; линий задержки ЛЗ1 и ЛЗ2, которые могут быть реализованы в виде одновибраторов, триггера Т и схем совпадения И0 — И4. Работа ДФ поясняется временными диаграммами, показанными на рис. 3, 4.

Из рис. 3 видно, что при чередовании импульсов $F_{изм}$ и $F_{ос}$ на выходах ДФ импульсы не появляются. Если за счет неравномерности распределения импульсов в любой из последовательностей возникают два или более импульсов, тогда на соответствующем выходе ДФ появится один или более импульсов. Импульсы на выходе ДФ наблюдаются также при превышении значения одной из частот по отношению к другому.

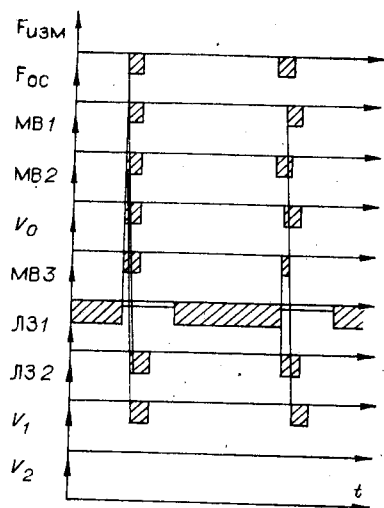


Рис. 4.

При временном совпадении импульсов частоты обратной связи и измеряемой частоты (см. рис. 4) независимо от времени перекрытия импульсов срабатывает МВ3, так что ни один из них не поступает на выход. Таким образом, с помощью данного ДФ устраняется возможность появления состояния неопределенности на входе РС и, следовательно, установка его в «ложное» состояние; исключено переключение младших разрядов РС при равенстве частот $F_{изм}$ и $F_{ос}$ при любом временном расположении импульсов, совпадении их и чередовании. Это одновременно повышает как точность, так и устойчивость работы ПЧ; необходимость дополнительной синхронизации импульсов отпадает.

Для оценки точности преобразования частоты можно использовать среднеквад-

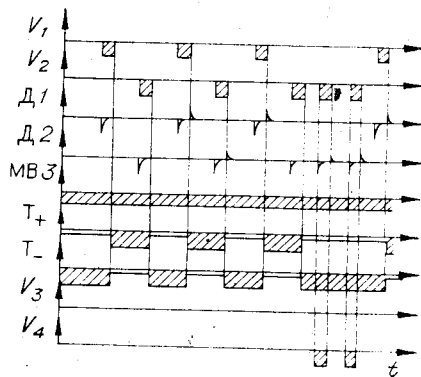


Рис. 3.

ратичную погрешность [21]. В [22] показано, что она представима в виде

$$\sigma_{\text{ПЧ}} = \sqrt{\sigma_{\text{М}}^2 + \sigma_{\text{д}}^2 + \sigma_{\text{ОП}}^2 + \sigma_{\text{др}}^2 + \sigma_{\text{р}}^2},$$

где $\sigma_{\text{М}}$ — методическая погрешность; $\sigma_{\text{д}}$ — динамическая погрешность; $\sigma_{\text{ОП}}$ — погрешность, обусловленная нестабильностью частоты образцового генератора; $\sigma_{\text{др}}$ — погрешность дискретности; $\sigma_{\text{р}}$ — погрешность, обусловленная конечным разрешающим временем счетной схемы. Там же дана оценка величин перечисленных составляющих и подчеркнуто, что величины $\sigma_{\text{ОП}}$, $\sigma_{\text{др}}$ и $\sigma_{\text{р}}$ могут иметь пренебрежимо малые значения, вследствие чего приближенно погрешность преобразователя оценивается в соответствии с выражением

$$\sigma_{\text{ПЧ}} = \sqrt{\sigma_{\text{М}}^2 + \sigma_{\text{д}}^2}.$$

Величина $\sigma_{\text{М}}$ зависит от характера входного сигнала и постоянной времени преобразователя, величина $\sigma_{\text{д}}$ — от закона изменения входного сигнала и постоянной времени. В [23] исследована зависимость $\sigma_{\text{ПЧ}}$ при использовании ПЧ в системах автоматического контроля и управления с ионизационными датчиками. Показано, что зависимость $\sigma_{\text{ПЧ}}$ имеет вид параболы с минимумом, соответствующим оптимальному значению постоянной времени преобразователя, которое определяется законом изменения входной частоты, скоростью ее изменения, статистическим законом распределения импульсов во времени и средним значением частоты. При соответствующем выборе параметров ПЧ для малых скоростей изменения частоты погрешность ПЧ может быть меньше 1%.

Таким образом, включение описанного выше дискретного фильтра на входе РС значительно повышает точность и устойчивость работы непрерывного следящего преобразователя частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Е. А. Цифровые аналоги. Приборостроение.— М.: Минприборпром, 1957, № 5, с. 4—6.
2. Wood P. A frequency meter with continuous digital presentation.— Radio and Electron. Eng., 1963, v. 26, N 2, p. 109—113.
3. Тахванов Г. И., Шхалахов Ю. Ш. К вопросу о построении импульсных моделей с обратной связью.— В кн.: Вычислительная техника. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1964, № 4, с. 170—188.
4. Касьяненко А. А., Куприянов В. Е., Юревич Е. И. Цифровой измеритель средней скорости следования импульсов.— В кн.: Автоматический контроль и методы электрических измерений: Труды VI конф. Новосибирск: Наука, 1967, т. II, с. 93—98.
5. Новицкий П. В. и др. Цифровые приборы с частотными датчиками.— Л.: Энергия, 1970, с. 422.
6. Паламарюк Г. О., Костяшкин Л. Н. Универсальное частотно-импульсное арифметическое устройство.— В кн.: Вычислительная техника. Рязань: РРТИ, 1970, вып. 18, с. 9—14.
7. Паламарюк Г. О., Иона Н. И. К вопросу о построении частотно-импульсной функциональной модели.— Там же, с. 40—44.
8. Паламарюк Г. О. Быстродействующий преобразователь частоты в код с непрерывным отсчетом.— Там же, с. 44—54.
9. Карбский В. В. О погрешности линейного интерполятора для цифровой системы программного управления.— Автоматика и телемеханика, 1959, № 6, с. 748—755.
10. Ян Си-Зен. Определение максимальной погрешности двоичного умножителя.— Автоматика и телемеханика, 1960, № 7, с. 1007—1014.
11. Паламарюк Г. О., Никифоров М. Б., Новичков В. С. Анализ влияния погрешности двоичного умножителя на точность замкнутого частотомера.— Измер. техника, 1974, № 2, с. 52—53.
12. Ободник Д. Т., Панич Н. М., Петух А. М., Ужвак Ю. Н. Неравномерные характеристики частотно-импульсных последовательностей.— Автометрия, 1980, № 5, с. 92—94.
13. Ольшевский В. И., Фурман Б. А. Низкочастотные возмущения в дискретных датчиках частоты синтезирующего типа.— Автометрия, 1981, № 2, с. 71—76.
14. Муттер В. М. Влияние переходных процессов в реверсивном счетчике на периодические режимы аналого-цифровой следящей системы.— Изв. вузов. Приборостроение, 1975, № 3, с. 42—45.

15. Паламарюк Г. О., Костяшкин Л. Н. О методе анализа динамических характеристик частотно-импульсных моделей замкнутого типа.— В кн.: Вычислительная техника. Рязань: РРТИ, 1970, вып. 18, с. 15—19.
16. Иона Н. И., Паламарюк Г. О., Новичков В. С., Беляков В. Б. К вопросу о вычитании неравномерных частотно-импульсных последовательностей.— Там же, с. 54—62.
17. Рохман М. И. Анализ влияния буферных делителей на неравномерные двоичные импульсные последовательности.— Автометрия, 1981, № 2, с. 96—100.
18. Иванов В. А. Стабилизация частоты импульсов в цифровом преобразователе частоты, построенном на основе сумматора.— Изв. вузов. Приборостроение, 1983, № 5, с. 16—19.
19. Касаткин А. С. Счетно-импульсные методы измерения частоты преобразованных неэлектрических сигналов.— Изв. вузов. Приборостроение, 1964, № 8, с. 3—6.
20. А. с. 411451 (СССР). Устройство для определения разностной частоты/А. А. Касьяненко, Г. А. Штейников, Ю. П. Журавлев.— Оpubл. в Б. И., 1974, № 2.
21. Швецкий Б. И. К определению погрешности серийных цифровых измерительных приборов.— Автометрия, 1967, № 3, с. 99—103.
22. Касьяненко А. А., Штейников Г. А. Погрешности счетных методов измерения частоты случайных импульсов.— В кн.: Проблемы преобразования информации и синтеза стохастических процессов. Таганрог: ТРТИ, 1971, с. 66—73.
23. Касьяненко А. А. Вопросы построения автоматических систем контроля и управления с ионизационными датчиками.— В кн.: Синтез алгоритмов сложных систем. Таганрог: ТРТИ, 1977, вып. 3, с. 72—78.

Поступила в редакцию 28 апреля 1984 г.