А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 2 1976

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.374.44

Б. А. ФУРМАН
(Харьков)

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

В технике часто встречаются импульсные последовательности с нарушаемой периодичностью. При этом сама неравномерность носит, как правило, циклический характер и приводит к появлению низших гармоник с частотами ниже основной частоты следования импульсов в последовательности. При сочетании дискретных систем с элементами аналогового типа возникают низкочастотные биения выходного параметра, что приводит к необходимости количественного определения низкочастотных составляющих для расчетов динамической точности подобных систем.

Возникновение указанных неравномерностей во многих случаях оказывается связанным с применением так называемых двоичных умножителей (или управляемых делителей) частоты [1, 2], представляющих собой делители частоты (рис. 1), динамические выходы которых поразрядно могут коммутироваться ключами $K1 \div Kn$ на общую выходную шину, так что выходная частота определяется как

$$f_{\text{вых}} = \frac{f_{\text{вх}}}{2^n} \sum_{k=1}^{n} 2^{k-1}, \tag{1}$$

где $f_{\text{вых}}$ — частота на выходе делителя; n — число разрядов делителя; k — номер разряда.

Выходная частота при этом понимается как среднее число импульсов за цикл переполнения делителя импульсами входной частоты. Таким образом, выходная частота может рассматриваться как результат умножения низшей двоичной гармоники входной частоты на число, определяемое суммой в выражении (1).

Уровень выходной частоты зависит от полноты членов суммы и может быть изменен в диапазоне $0 \div f_{\text{вх}}(1-2^{-n})$ с дискретностью установки $\Delta f = f_{\text{вх}} 2^{-n}$.

Формирователь F определяет амплитуду и длительность импульсов выходной частоты.

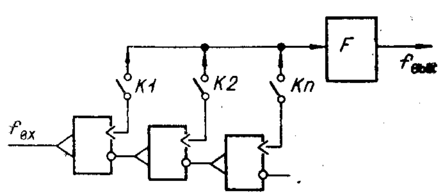

Рис. 1. Двоичный умножитель частоты.

Каждой комбинации сочетания гармоник при суммировании (на рис. 2 изображена диаграмма для случая, когда присутствуют все члены) соответствует определенная периодически повторяющаяся неравномерность следования импульсов. Задача состоит в определении составляющих низкочастотных биений, вызываемых указанной неравномерностью. При этом представляет интерес рассмотрение суммарной последовательности как последовательности импульсных сигналов (например, напряжения) определенной амплитуды и длительности. В этом случае низкочастотные биения определяются содержанием двоичных гармоник в последовательности и гармоническими составляющими разложения в ряд самой функции импульсного сигнала.

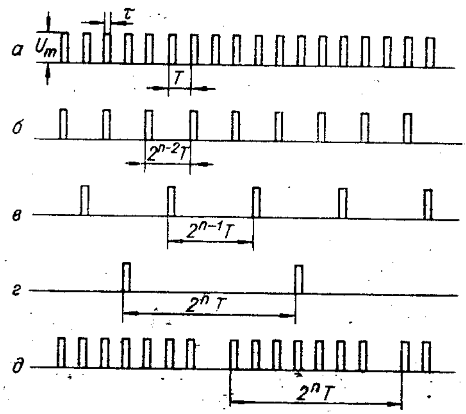

Рис. 2. Диаграмма образования выходной частоты двоичного умножителя.

Проведем анализ последовательности для импульсов напряжения прямоугольной формы с амплитудой U_m и длительностью τ. Рассмотрим разложение в ряд Фурье для суммарной функции (см. рис. 2, *д*) как сумму разложений составляющих ее двоичных гармоник (см. рис. 2, *б—г*) с учетом определенных фазовых сдвигов [3]. Запись производится для относительных значений

$$U'(t) = U(t)/U_m. \qquad (2)$$

В общем виде разложение суммарной функции можно представить как сумму разложений отдельных функций

$$U'(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{2^{k-1}\tau}{2^nT} + \frac{2}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\sum_{k=n-i}^{n}(-1)^{\overline{\frac{m}{2^{n-k}}}}\,\frac{2}{m}^{n-k}\right]\sin\frac{m\pi\tau}{2^nT}\cos\frac{m\omega}{2^n}t, \qquad (3)$$

где $m = S\,2^i$ и $S = 1, 3, 5, \ldots$

В частном случае, когда в комбинации гармоник участвует лишь одна старшая гармоника, выражение (3) преобразуется в

$$U'(t) = \frac{\tau}{2^nT} + \frac{2}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{m}\sin\frac{m\pi\tau}{2^nT}\cos\frac{m\omega}{2^n}t. \qquad (4)$$

При полном наборе всех двоичных составляющих суммы выражение (3) преобразуется в

$$U'(t) = \sum_{k=1}^{n}\frac{2^{k-1}\tau}{2^nT} + \frac{2}{\pi}\sum_{m=1}^{n}(-1)^{m+1}\frac{1}{m}\sin\frac{m\pi\tau}{2^nT}\cos\frac{m\omega}{2^n}t. \qquad (5)$$

Из сравнения (3)—(5) можно сделать следующие выводы:

1. Все нечетные гармоники суммарного разложения $U'(t)$ определяются только разложением $U'_n(t)$ составляющей старшего разряда.

2. Максимальная амплитуда (с отрицательным знаком) четных гармоник частоты $2\omega/2^n$, $4\omega/2^n$, ... имеет место в тех случаях, когда в образовании выходной частоты участвует составляющая только одного из двоичных разрядов с номерами $(n-1)$, $(n-2)$, ... соответственно. [На рис. 2 максимум гармоники $2\omega/2^n$ определяется составляющей $U_{n-1}(t)$ (см. рис. 2, *в*)].

3. Гармоническое содержание разложения для полной суммы (см. рис. 2, *д*) отличается от разложения для составляющей только одного старшего разряда (см. рис. 2, *г*) лишь знаком при коэффициентах четных гармоник.

4. Возможные амплитуды наиболее низкочастотных биений (1, 2 и 3-й гармоник частоты повторения неравномерности $\omega/2^n$) могут быть определены уже по разложениям для отдельно взятых составляющих двух старших разрядов $U'_n(t)$ и $U'_{n-1}(t)$ независимо от комбинации других составляющих в наборе.

В качестве примера использования результатов проведенного анализа можно указать преобразователь «частота — напряжение постоянного тока», основанный на принципе интегрирования выходным фильтром прямоугольных импульсов с постоянной вольт-секундной площадью $S=U_m\tau$. Соотношение (3) позволяет в этом случае определить как среднее значение выходного напряжения преобразователя, так и его низкочастотные пульсации для любой комбинации участия составляющих $U'_k(t)$ в образовании сигнала выходной частоты, т. е. для любого набора значений k при суммировании по выражению (3).

Предлагаемая методика анализа фазовых неравномерностей может быть распространена и на импульсные последовательности с другим кодообразованием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Фурман. Двоичный управляемый делитель частоты для набора соотношения скоростей в цифровых регуляторах скорости.— «Приб. и сист. упр.», 1968, № 6.
2. W. Leonhard. Zälende Rechenschaltungen für Regelaufgaben.—"Archiv für Elektrotechnik", 1964, Bd 49, № 4, H. 215—234.
3. И. И. Верзин, Б. А. Фурман. Анализ динамической точности преобразователя «частота — напряжение постоянного тока».— «Автометрия», 1968, № 4.

Поступила в редакцию
21 ноября 1972 г.

УДК 621.374.32

В. В. КУРОЧКИН
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОДНОГО ИЗ ВИДОВ КОЛЬЦЕВЫХ СЧЕТЧИКОВ

Счетчики являются весьма распространенными элементами систем и устройств автоматизации научных исследований. Структурно наиболее высоким быстродействием обладают счетчики кольцевого типа [1—9], так как они имеют на каждый перепад входного напряжения одну задержку распространения сигнала в каждом звене счетчика. Однако в литературе отсутствует анализ предельных динамических возможностей этих счетчиков, что затрудняет правильный выбор режимов работы схемы и типа применяемых элементов для получения требуемой частоты счета.

Высокочастотные счетчики строятся обычно на транзисторных переключателях тока. Отличие схем звеньев кольцевых счетчиков, пригодных для исполнения по микроэлектронной технологии [1—6], состоит в способе осуществления обратной связи в каждом звене. В качестве элемента обратной связи (ЭОС) используются стабилитроны [4—6], транзисторы [1, 3], а также резистивные делители напряжения [2].

Схема звена счетчика, в котором обратная связь осуществляется с помощью стабилитрона D, представлена на рис. 1, *а*. Счетчики с такими звеньями работают до частоты 500 МГц [4]. При таком быстродей-