

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Р. Вознюк, Б. М. Глинский. Особенности измерений при зондировании становлением поля в ближней зоне.— В кн.: Измерительная аппаратура для разведочной геофизики. Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1973.
2. С. А. Майоров, Г. И. Новиков. Структура цифровых вычислительных машин. Л., «Машиностроение», 1970.
3. М. А. Карцев. Арифметика цифровых машин. М., «Наука», 1969.

Поступило в редакцию 30 декабря 1974 г.

УДК 681.142.3

В. С. НОВИЧКОВ, И. И. ХОЛКИН

(Рязань)

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОД — ЧАСТОТА

При измерении сигналов частотных датчиков, в частности лазерных интерферометров, нередко используют преобразователи частоты в код замкнутого типа [1], основной частью которых является преобразователь код — частота (рис. 1), известный под названиями последовательного цифрового интегратора [2] или двоичного умножителя [3]. Точность работы данного элемента оказывает существенное влияние на точность всего измерительного устройства.

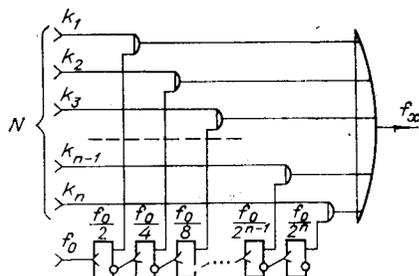


Рис. 1. Схема двоичного умножителя.

$F_x(t)$ имеет значение $F_x[t_j]$. При постоянном коде N , не кратном 2^n , где n — число разрядов двоичного умножителя, сигнал $F_x(t)$ колеблется относительно средней величины \bar{F}_x и может принимать два значения:

$$\begin{cases} F_{x1} = f_0 2^{-q+1}; \\ F_{x2} = f_0 2^{-q}, \end{cases} \quad (1)$$

где $q = \text{ent} \left[\log_2 \left(\frac{2^n}{N} \right) \right] + 1$ — номер старшего разряда преобразуемого кода N , значение которого отлично от нуля; f_0 — опорная частота двоичного умножителя.

При этом интервал дискретности τ_j также принимает два значения τ' и τ'' (см. рис. 2, б). Колебания сигнала $F_x(t)$ вызывают внутреннюю погрешность рассматриваемого преобразователя, обусловленную его структурой. Ниже определяется среднеквадратическое значение этой погрешности.

Из [3] известно, что число выходных импульсов двоичного умножителя за его полный цикл работы

$$T = 2^n / f_0 \quad (2)$$

равно

$$N = 2^n \sum_{i=1}^n k_i 2^{-i}, \quad (3)$$

где k_i — значения двоичных разря-

В статье определяется значение среднеквадратической погрешности двоичного умножителя, вызванной отклонением его выходной частоты от среднего значения.

Поток импульсов выходной частоты f_x преобразователя (рис. 2, а) можно рассматривать как решетчатую функцию $F_x[t_j]$ с переменным интервалом дискретности $\tau_j = t_j - t_{j-1}$ и амплитудой $F_x[t_j] = 1/\tau_j$, где t_j — момент появления j -го импульса.

В процессе преобразования решетчатой функции $F_x[t_j]$ в непрерывный сигнал $F_x(t)$ будем считать, что на интервале τ_j функция

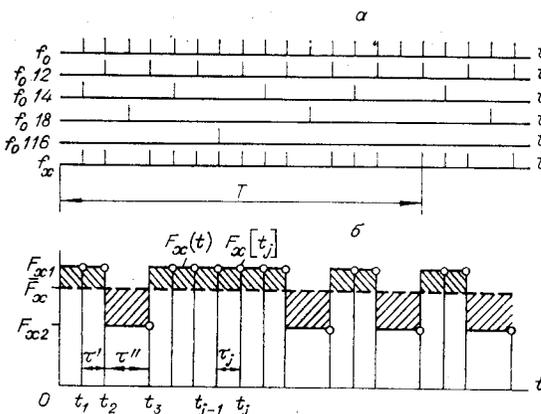


Рис. 2. Временные диаграммы.

дов кода N , равные 0 или 1. Тогда среднее значение выходной частоты преобразователя можно определить из выражения

$$\bar{F}_x = f_0 \sum_{i=1}^n k_i 2^{-i}. \quad (4)$$

Кроме того, из рис. 2, б видно, что площадь, ограниченная функцией $F_x(t)$ и осями координат на интервале T , равна N . Следовательно, среднее значение функции $F_x(t)$ совпадает со средним значением выходной частоты \bar{F}_x . Тогда дисперсию погрешности, вызванную колебанием $F_x(t)$ относительно \bar{F}_x , определим так:

$$D[\hat{F}_x(t)] = \frac{f_0}{2^n} [(F_{x1} - \bar{F}_x)^2 T_1 + (F_{x2} - \bar{F}_x)^2 T_2], \quad (5)$$

где $\hat{F}_x(t) = F_x(t) - \bar{F}_x$ — отклонение $F_x(t)$ от \bar{F}_x ; T_1, T_2 — суммарные значения интервалов τ' и τ'' за время T .

Учитывая, что число выходных импульсов двоичного умножителя за время T равно N (3), можно записать

$$F_{x1}T_1 + F_{x2}T_2 = N. \quad (6)$$

При этом

$$T_1 + T_2 = T. \quad (7)$$

Подставляя (1) и (3) в (6), а (2) в (7) и решая совместно уравнения (6) и (7), найдем

$$T_1 = \frac{2^{n+q}}{f_0} \left(\sum_{i=1}^n k_i 2^{-i} - 2^{-q} \right); \quad T_2 = \frac{2^{n+q}}{f_0} \left(2^{-q+1} - \sum_{i=1}^n k_i 2^{-i} \right). \quad (8)$$

Обозначив $\sum_{i=1}^n k_i 2^{-i}$ через N^* и подставляя (1), (4), (8) в (5), получим

$$D[\hat{F}_x(t)] = 2^{-q+1} f_0^2 (-N^{*2} + 3 \cdot 2^{-q} N^* - 2^{-2q+1}). \quad (9)$$

Значение среднего квадрата отклонения выходной частоты двоичного умножителя, отнесенное к максимальному значению его выходной частоты f_0 , равно

$$\sigma_q^* [\hat{F}_x(t)] = \sqrt{2^{-q+1} (-N^{*2} + 3 \cdot 2^{-q} N^* - 2^{-2q+1})}. \quad (10)$$

График этой функции изображен на рис. 3.

Считая N^* непрерывной величиной при достаточно большом n , продифференцируем функцию (10) по N^* и приравняем полученные производные нулю. Откуда найдем, что максимумы функции (10)

$$\sigma_q^* [\hat{F}_x(t)] = \sqrt{2^{-3q-1}} \quad (11)$$

находятся в точках $N_q^* = 3 \cdot 2^{-q-1}$, которые соответствуют значениям преобразуемого кода N , содержащим единицы в двух соседних разрядах.

Полагая, что N^* с равной вероятностью принимает значения в интервале $[0,1]$, запишем выражение для определения среднего значения дисперсии отклонения сигнала $F_x(t)$ от \bar{F}_x

$$\bar{D}[\hat{F}_x(t)] = \sum_{q=1}^n \int_{2^{-q}}^{2^{-q+1}} D[\hat{F}_x(t)] dN^*. \quad (12)$$

Подставляя (9) в (12), получим

$$\bar{\sigma}^* [\hat{F}_x(t)] = \frac{\sqrt{\bar{D}[\hat{F}_x(t)]}}{f_0} = \frac{1}{3\sqrt{5}} \sqrt{1 - 2^{-4n}}. \quad (13)$$

В таблице приведена зависимость $\bar{\sigma}^* [\hat{F}_x(t)]$ от n .

Из таблицы видно, что функция (13) достигает своего установившегося значения с точностью до 0,00001% уже при $n=6$.

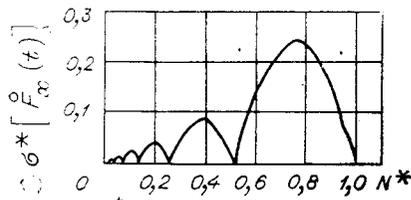


Рис. 3. Зависимость $\sigma^* [\hat{F}_x(t)]$ от N^* .

n	$\bar{\sigma}^* [\hat{F}_x(t)]$
2	0,1487792
3	0,1490531
4	0,1490700
5	0,1490711
6	0,1490712
7	0,1490712

ВЫВОДЫ

1. Среднеквадратическая погрешность, вызванная отклонением выходной частоты двоичного множителя от среднего значения, отнесенная к максимальному значению его выходной частоты, зависит от величины преобразуемого кода.
2. Максимумы функции (10) имеют место при значениях входного кода, содержащих две единицы в соседних разрядах.
3. Максимальное значение среднеквадратической погрешности не превышает величины 0,25 при $q=1$ [см. (11)].
4. Среднее по множеству значений входного кода N значение среднеквадратической погрешности не превышает величины $1/3\sqrt{5}$.
5. Полученные результаты могут быть полезны при анализе точности работы замкнутых преобразователей частоты в код.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воронов, Н. Г. Соколов. Устройство для программирования кривых второго порядка, основанное на цифровых интеграторах.— «Автоматика и телемеханика», 1959, т. 20, № 2.
2. Ян Си—Зен. Определение максимальной погрешности двоичного множителя.— «Автоматика и телемеханика», 1960, т. 21, № 7.
3. В. В. Карибский. О погрешности линейного интерполятора для цифровой системы программного управления.— «Автоматика и телемеханика», 1959, т. 20, № 6.

*Поступило в редакцию 4 апреля 1973 г.;
окончательный вариант — 19 июня 1974 г.*

УДК 621.384.326.21

В. Г. ГУСЕЛЬНИКОВ, Л. М. ПАХОМОВ, Т. А. ФИЛИМОНОВА

(Новосибирск)

НАНОСЕКУНДНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ТОКА

Получение импульсов тока с амплитудой больше одного ампера и временем нарастания в десятки наносекунд, необходимых для накачки полупроводниковых инжекционных лазеров или для работы на низкоомную отклоняющую систему типа «бегущая волна» с помощью транзисторов и тиристоров с различными типами обострителей, в настоящее время затруднительно*.

Генераторы, использующие лавинный режим работы транзисторов, способны обеспечить необходимые токи за короткие времена, но имеют колоколообразную форму выходного сигнала, и для получения ступеньки тока требуется объединение нескольких генераторов с отдельным задержанным запуском.

Между тем имеются электронные усилительные лампы с диодными системами умножения, способные в форсированном режиме обеспечить необходимую мощность.

На рисунке приведена схема усилителя с токовым выходом, собранного на такой лампе и примененного для накачки полупроводникового инжекционного лазера с входным сопротивлением первичной обмотки согласующего трансформатора 12 Ом. При длительностях импульсов запуска до 100 нс и частоте повторения до 1,5 кГц повышение амплитуды запускающего импульса до 50 В позволяет получить в нагрузке ток 10 А с временем нарастания меньше 10 нс. Определенную трудность составляет передача тока накачки с высоким выходным сопротивлением лампы на первичную обмотку трансформатора. В данном случае использован ленточный кабель с волновым сопротивлением 10 Ом, подключаемый непосредственно к аноду лампы. Неизбежные потери мощности при таком соединении компенсируются отсутствием отражений от нагрузки. Генератор собран в стандартном блоке размером 180×280×360 мм³. В качестве задающего используется генератор типа Г5-11.

При работе на 75-омную нагрузку амплитуда выходного напряжения достигает 350 В, чего вполне достаточно для отклонения луча на весь экран в скоростном осцил-

* Б. М. Ковальчук. Генератор наносекундных импульсов тока для питания полупроводниковых квантовых генераторов.— «ПТЭ», 1968, № 4.