

УДК 621.373.1:621.396.6

**ФОРМИРОВАНИЕ НЕСКОЛЬКИХ КОЛЕБАНИЙ
НЕКРАТНЫХ ЧАСТОТ ОДНОПЕТЛЕВОЙ СИСТЕМОЙ ФАПЧ**

В.А. ИЛЬИНКОВ, В.Е. РОМАНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 3 апреля 2004*

Предлагается метод и оптимальные по его реализации структуры устройств формирования нескольких колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ.

Ключевые слова: колебание, метод, формирование, синтезатор, частота, фаза, автоподстройка.

Важной для радиоэлектроники является проблема генерирования стабильных электрических колебаний. Она решается двумя основными способами [1–3]: прямым частотным синтезом; с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Недостатками прямого частотного синтеза являются: сложность аппаратурной реализации, вытекающая в основном из сложности реализации умножителей и смесителей частоты; принципиальная невозможность получения колебания с изменяемым в процессе работы значением частоты, т.е. прямой частотный синтез применяется для получения стабильных колебаний с фиксированными частотами. Поэтому на практике в основном используется метод формирования колебаний на основе системы ФАПЧ. Он наиболее часто реализуется устройством, структурная схема которого содержит в себе перестраиваемый генератор 1, делители 2 и 6 частоты, фазовый детектор 3, ФНЧ 4, усилитель 5 постоянного тока и генератор 7 опорного колебания (рис. 1).

Как известно [1–3], генератор 7 представляет собой кварцевый генератор стабильного опорного колебания с частотой f_0 . Генератор 1 — источник колебания с перестраиваемой частотой f_T . Делитель 2 делит частоту входного колебания в M_1 раз, образуя вспомогательное колебание с частотой f_T/M_1 . В фазовом детекторе 3 осуществляется сравнение по фазе вспомогательного и опорного колебаний. Результат сравнения подвергается низкочастотной фильтрации и усилению (блоки 4, 5). Тем самым образуется сигнал ошибки. Под его влиянием частота f_T колебаний на выходе генератора 1 изменяется (подстраивается), стремясь к значению $f_T=f_0 \cdot M_1$, при котором разность фаз вспомогательного и опорного колебаний стремится к нулю. Блоки 1–5 и 7 образуют в совокупности систему ФАПЧ генератора 1, управляющую частотой последнего с точностью до фазы. Делитель 6 делит частоту входного колебания в N_1 раз, формируя выходное стабильное колебание с любым требуемым значением (включая иррациональное) частоты

$$f_1 = f_0 \frac{M_1}{N_1}, \quad (1)$$

изменяемым в процессе работы, создавая требуемую сетку частот с некоторым шагом Δf . Причем в случае синтезаторов с большим коэффициентом перекрытия по частоте рабочий диапазон разбивают на отдельные поддиапазоны, чаще по декадному или октавному принципам. При

этом для упрощения синтезатора его целесообразно строить так, чтобы во всех поддиапазонах формируемых частот генератор 1 работал (перестраивался) в одном и том же рабочем диапазоне, соответствующем верхнему поддиапазону синтезатора [4]. При таком построении переход синтезатора с одного поддиапазона в другой осуществляется ступенчатым изменением коэффициента N_1 деления делителя 6, который в пределах поддиапазона остается неизменным. Так, при декадном (октавном) разбиении на поддиапазоны переход в соседний, более низкочастотный поддиапазон соответствует увеличению N_1 в 10 (2) раз, а переход в соседний, более высокочастотный — уменьшению N_1 в 10 (2) раз (в верхнем поддиапазоне $N_1=1$). Делитель 2 частоты имеет переменный коэффициент M_1 деления, часто изменяющийся с шагом 1 от минимального M_{1min} до максимального M_{1max} значений независимо от поддиапазона. Такое построение обеспечивает неизменный внутри поддиапазона шаг Δf сетки частот, который имеет максимальное значение $\Delta f_{max}=f_0$ в верхнем поддиапазоне и уменьшается (пропорционально увеличению N_1) при переходе в более низкочастотный поддиапазон [4].

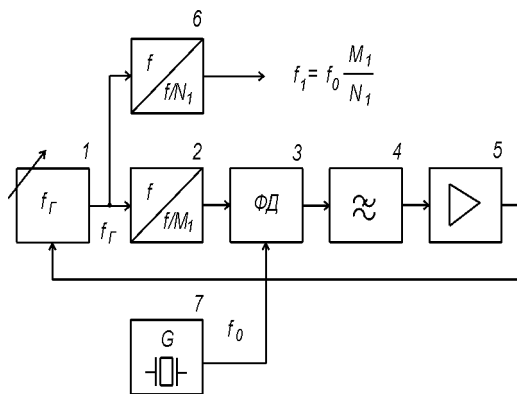


Рис. 1. Устройство синтеза колебаний с помощью системы ФАПЧ

Очевидно, известный метод формирования с помощью однопетлевой системы ФАПЧ (см. рис. 1) позволяет получить одно стабильное колебание с практически любым требуемым шагом сетки частот, что достаточно в большинстве случаев. Однако в ряде технических приложений, например, в системах телекоммуникаций, измерительных системах и устройствах, возникает необходимость наличия одновременно K (чаще двух) стабильных колебаний с произвольными некратными частотами. По известному методу при формировании колебания с частотой f_i (1) перестраиваемая частота f_r имеет значение $f_0 M_1$, соответственно при формировании K произвольных колебаний $f_i = f_0 \frac{M_i}{N_i}$ ($i = \overline{1, K}$) необходимо исполь-

зовать K колебаний с перестраиваемыми частотами $f_0 M_i$, т.е. K синтезаторов по схеме рис. 1, что существенно усложняет аппаратную реализацию.

Существует принципиальная возможность формирования нескольких колебаний некратных частот с помощью однопетлевой системы ФАПЧ. Суть предлагаемого метода [5] состоит в использовании при их генерировании одного колебания с перестраиваемой частотой.

Обратим внимание, что применительно к любому i -му колебанию с частотой $f_i = f_0 \frac{M_i}{N_i}$ зна-

чение частоты f_r колебания с перестраиваемой частотой определяется числителем последнего выражения. Поэтому для применения одного колебания с перестраиваемой частотой необходимо, чтобы числители выражений, определяющие частоты f_i генерируемых K стабильных колебаний, были одинаковы. Это приводит к формальному соотношению

$$f_i = \frac{f_0 M_i}{N_i} = \frac{f_0 \prod_{j=1}^K M_j}{\left(N_i \prod_{j=1}^K M_j \right) / M_i} \quad (2)$$

Знаменатель выражения (2) задает необходимый коэффициент деления колебания перестраиваемой частоты для образования стабильного колебания с частотой f_i . Он должен быть целым, что при различных сочетаниях коэффициентов M_i K некратных стабильных колебаний можно обеспечить только в виде (2).

Анализируя выражения (1), (2) и рис. 1, заключаем, что предлагаемый метод синтеза стабильных колебаний отличается от известного введением следующих дополнительных опе-

раций: операции дополнительного деления в $\prod_{j=2}^K M_j$ раз частоты f_r колебания с перестраиваемой частотой для формирования вспомогательного колебания; операции дополнительного деления в $\prod_{j=2}^K M_j$ раз частоты f_r колебания с перестраиваемой частотой для образования выходного стабильного колебания с частотой f_1 (1); $(K-1)$ независимых операций деления в $\left(N_i \prod_{j=1}^K M_j\right) / M_i$ раз частоты f_r колебания с перестраиваемой частотой для образования остальных $(K-1)$ выходных стабильных колебаний. Сформулированные отличия обеспечивают возможность формирования одновременно K выходных колебаний с частотами f_i , определяемыми выражением (2), где M_i, N_i — произвольные целые положительные числа.

Из приведенного описания предлагаемого метода синтеза прямо вытекает структурная схема реализующего его устройства (рис. 2), которая содержит перестраиваемый генератор 1, делители 2, 7–12 частоты, фазовый детектор 3, ФНЧ 4 и усилитель 5 постоянного тока, генератор 6 опорного колебания. Назначение блоков 1, 3–6 соответствует блокам 1, 3–5, 7 схемы рис. 1. Делитель 2 делит частоту входного колебания в $M_b = \prod_{j=1}^K M_j$ раз, делители 7, 9, 11 —

соответственно в N_1, N_2 и N_K , делители 8, 10 и 12 — соответственно в $M_{1g} = \left(\prod_{j=1}^K M_j\right) / M_1$,

$M_{2g} = \left(\prod_{j=1}^K M_j\right) / M_2$ и $M_{Kg} = \left(\prod_{j=1}^K M_j\right) / M_K$ раз. Элементы 1–6 образуют в совокупности систему ФАПЧ генератора 1, управляющую частотой последнего с точностью до фазы.

Последующий анализ показывает, что устройство (рис. 2) неоптимально по сложности аппаратной реализации. Коэффициенты M_i (см. (2)), определяющие частоты K синтезируемых колебаний, изменяются независимо друг от друга. Поэтому делитель 2 реализуется как последовательное соединение K делителей с коэффициентами деления M_i ($i = \overline{1, K}$), а делители 8, 10 и 12 — как последовательное соединение $(K-1)$ делителей, при этом в делителе 8 отсутствует делитель частоты (секция) с коэффициентом деления M_1 , в делителе 10 — с коэффициентом деления M_2 , в делителе 12 — с коэффициентом деления M_K . Последнее означает, что для реализации делителей 8, 10 и 12 целесообразно использовать соответствующие части (секции) делителя 2. Причем, как показывает анализ, при синтезе K колебаний существует $P=K!$ равноправных вариантов, оптимальных по аппаратной реализации. Число вариантов равно числу перестановок P из K чисел, изменяющихся от 1 до K : $K=1, P=1$; $K=2, P=2$; $K=3, P=6$; $K=4, P=24$ и т.д. Для нахождения этих вариантов необходимо вначале выписать все $P=K!$ перестановок коэффициентов M_j , затем для каждой перестановки в соответствии с уравнением (2) записать выражения для всех синтезируемых стабильных колебаний f_i ($i = \overline{1, K}$) и дополнительно

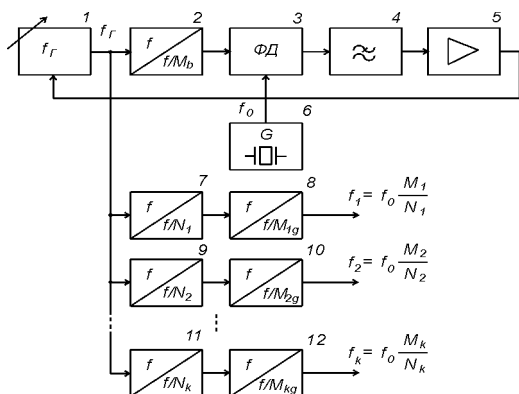


Рис. 2. Устройство синтеза K колебаний некратных частот

учесть, что последовательность включения соответствующих секций делителя, формирующего вспомогательное колебание, принципиально и определяет вариант реализации устройства. Перестановки коэффициентов M_j и выражения для синтезируемых частот f_i для значений K , равных 2 и 3, приведены в таб-

лице.

На основании полученных сведений приходим к следующим вариантам построения устройства, реализующего предлагаемый метод синтеза для $K=2$ [5] (рис. 3). Аналогично можно получить 6 (24) вариантов устройства для $K=3$ ($K=4$).

Перестановки коэффициентов M_j и выражения синтезируемых частот f_i

Количество синтезируемых колебаний	Перестановки коэффициента M_j	Выражения для синтезируемых частот f_i			
		f_1	f_2	f_3	f_4
K=2	M_1, M_2	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_2}{N_2 M_1}$	—	—
	M_2, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_1}{N_1 M_2}$	$f_0 \frac{M_2 M_1}{N_2 M_1}$	—	—
K=3	M_2, M_3, M_1	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_1}{N_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_1}{N_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_2 M_3 M_1}{N_3 M_2 M_1}$	—
	M_3, M_2, M_1	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_1}{N_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_1}{N_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_2 M_1}{N_3 M_2 M_1}$	—
	M_1, M_3, M_2	$f_0 \frac{M_1 M_3 M_2}{N_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_1 M_3 M_2}{N_2 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_1 M_3 M_2}{N_3 M_1 M_2}$	—
	M_3, M_1, M_2	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_2}{N_1 M_3 M_2}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_2}{N_2 M_3 M_1}$	$f_0 \frac{M_3 M_1 M_2}{N_3 M_1 M_2}$	—
	M_1, M_2, M_3	$f_0 \frac{M_1 M_2 M_3}{N_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_1 M_2 M_3}{N_2 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_1 M_2 M_3}{N_3 M_1 M_2}$	—
	M_2, M_1, M_3	$f_0 \frac{M_2 M_1 M_3}{N_1 M_2 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_1 M_3}{N_2 M_1 M_3}$	$f_0 \frac{M_2 M_1 M_3}{N_3 M_2 M_1}$	—

На примере рис. 3 видно, что конкретный вариант реализации устройства определяется выбранной перестановкой коэффициентов M_j : последовательность расположения коэффициентов M_j соответствует последовательности размещения делителей частоты, включаемых слева направо между перестраиваемым генератором и фазовым детектором в цепи формирования вспомогательного колебания. Последовательность включения блоков 8, 9 (9, 10) в устройстве рис. 3,а (3,б) непринципиальна и не определяет новый вариант. Поэтому непринципиальна и последовательность записи коэффициентов в знаменателе (2). Важно только, чтобы при образовании выходного стабильного колебания с частотой f_i суммарный коэффициент деления частоты f_i , реализуемый с максимальным использованием делителей в цепи формирования вспомогательного колебания, численно точно соответствовал знаменателю выражения (2).

Каждый из $K!$ вариантов реализации предлагаемого метода является равноправным. Тем не менее, в одних случаях предпочтительнее выбрать один вариант, в других — другой, что определяется конкретными условиями решаемой задачи. Поясним сказанное на примере синтеза двух некрратных частот $f_1 = f_0(M_1/N_1)$ из ряда значений 1, 2, 3, ..., 9, 10 кГц и $f_2 = f_0 M_2 / N_2$ из ряда значений $1000 \cdot 10^3, 1001 \cdot 10^3, 1002 \cdot 10^3, \dots, 9999 \cdot 10^3$ Гц. Примем также, что $f_0=1$ кГц, а перестраиваемый генератор I работает в диапазоне частот 10–100 МГц. Очевидно, для формирования указанных колебаний коэффициенты деления должны изменяться через единицу в пределах: $N_1 = \overline{1, 10}$; $N_2 = \overline{1, 10}$, $M_1 = \overline{1, 10}$, $M_2 = \overline{1000, 10000}$. Конечно, реализовать делитель с коэффициентом деления $M_2 = \overline{1000, 10000}$ значительно сложнее, чем делитель с коэффициентом деления $M_1 = \overline{1, 10}$. Поэтому для решения задачи целесообразно использовать устройство по схеме рис. 3,б, содержащее два делителя частоты с коэффициентом деления M_1 и один делитель с коэффициентом M_2 . Естественно, что в другой задаче синтеза двух колебаний предпочтительнее могут оказаться аргументы в пользу выбора синтезатора по схеме рис. 3,а.

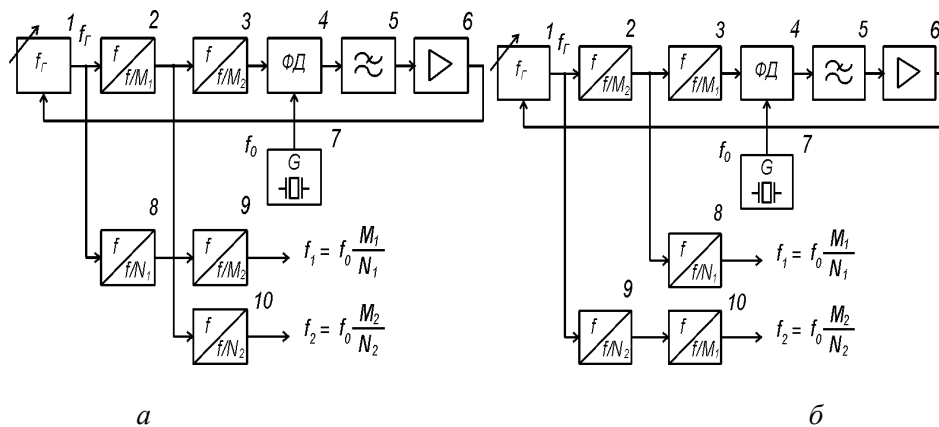


Рис. 3. Варианты построения устройства синтеза двух колебаний некратных частот: а — перестановка M_1, M_2 ; б — перестановка M_2, M_1

Важным положительным свойством предлагаемого метода синтеза нескольких колебаний однопетлевой системой ФАПЧ является следующее. Поскольку все колебания образуются из колебания одного перестраиваемого генератора, то при последующем их нелинейном взаимодействии образуется продукт (ы) с той же относительной нестабильностью частоты, что и в колебании перестраиваемого генератора. Это исключительно важно для многих приложений и принципиально невозможно при формировании колебаний несколькими синтезаторами.

Очевидно, синтезатор частот по схеме рис. 1 является частным случаем устройства, реализующего предлагаемый метод синтеза. Например, устройство рис. 3,б преобразуется в известное при условии $M_2=1$ ("перемыканий" делителя 2) и исключении делителей 9 и 10.

Заключение

Предлагается метод и оптимальные по его реализации структуры устройств формирования нескольких колебаний некратных частот однопетлевой системой ФАПЧ.

FORMATION OF SEVERAL OSCILLATIONS OF NOT MULTIPLE FREQUENCIES BY AN ONE-LOOPBACK SYSTEM PLL

V.A. ILYINKOV, V.E. ROMANOV

Abstract

The method and optimum on his realization of structure of devices of formation oscillations of not multiple frequencies by a one-loopback system ФАПЧ is offered.

Литература

1. Проектирование радиопередатчиков: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.В. Шахгильдяна. М., 2000.
2. Козлов В.Н., Пестряков А.В. Компоненты для беспроводной связи фирмы MOTOROLA. СПб., 1997.
3. Устройства генерирования и формирования радиосигналов: Учеб. для вузов / Под ред. Г.М. Уткина. М., 1994.
4. Ильинков В.А., Романов В.Е. // Изв. Белорус. инж. акад. 2003. № 1(15)/3. С. 72–74.
5. Заявка а20000048 ВУ, МПК⁷ H03 L. Способ синтеза стабильных электрических колебаний некратных частот / В.А. Ильинков, В.Е. Романов // Официальный бюллетень. 2001. № 3. С. 62.