

УДК 621.373.1:621.396.6

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ СИНТЕЗАТОР СТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

В.А. ИЛЬИНКОВ, В.Е. РОМАНОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 29 января 2008

Разработан широкодиапазонный синтезатор стабильных электрических колебаний, кратных и некратных частот с коэффициентом $K_{\Pi}=10^{10}$ перекрытия по частоте; коэффициент перекрытия по частоте перестраиваемого генератора не превышает значения $K_{\Gamma}=2$ при любых вариантах разбиения (на поддиапазоны) рабочего диапазона частот синтезатора.

Ключевые слова: колебание, синтезатор, построение, частота, фаза, автоподстройка.

Введение

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

При прямом частотном синтезе колебание с требуемой частотой f_1 образуется посредством операций деления и (или) умножения частот нескольких (одного) базовых стабильных колебаний с последующим выделением соответствующего комбинационного продукта. Недостатками устройств прямого частотного синтеза являются сложность аппаратной реализации (в основном из-за сложности реализации умножителей и смесителей частоты) и невозможность получения колебания с изменяемым в процессе работы значением частоты [1, 4]. Поэтому на практике в основном применяются синтезаторы стабильных электрических колебаний на основе системы ФАПЧ. Структурная схема такого синтезатора содержит [2, 5] (рис. 1) перестраиваемый генератор 1 — источник колебаний с перестраиваемой частотой f_{Γ} , делители 2 и 8 частоты с коэффициентами деления соответственно M и N , генератор 7 стабильного опорного колебания с частотой f_0 , фазовый детектор 3 (сравнивающий по фазе вспомогательное с частотой f_{Γ}/M и опорное колебания), фильтр 4 нижних частот (ФНЧ), усилитель 5 постоянного тока и блок 6 управления. Блоки 1–5 и 7 образуют в совокупности систему ФАПЧ генератора 1, управляющую его частотой с точностью до фазы. Делители 2 и 8 имеют переменные коэффициенты деления, необходимые значения которых устанавливаются с помощью блока 6, связанного с управляющими входами делителей. Благодаря этому рассматриваемый синтезатор вырабатывает стабильное колебание с частотой $f_1 = f_0 M / N$. Она может изменяться в процессе работы, создавая тем самым сетку частот с некоторым шагом Δf .

Свойства широкодиапазонных синтезаторов частот

Важное место среди синтезаторов стабильных колебаний занимают широкодиапазонные синтезаторы. В случае широкого диапазона $f_p \dots f_L$ рабочих частот его разбивают на L поддиапазонов [5, 6]:

$$L = \lg \frac{f_L}{f_p} / \lg A, \quad (1)$$

где $A=f_k/f_{k-1}$; f_{k-1} (f_k) — нижняя (верхняя) граничная частота k -го поддиапазона; $k=\overline{1, L}$. При этом с учетом преимущественного распространения десятичной и двоичной систем исчисления в основном используют декадное ($A=10$) и октавное ($A=2$) разбиения.

Для упрощения реализации широкодиапазонного синтезатора целесообразно, чтобы на всех L поддиапазонах генератор I работал (перестраивался) в одном и том же диапазоне, соответствующем верхнему (L -му) поддиапазону. При таком построении переход синтезатора с одного поддиапазона в другой осуществляется ступенчатым изменением коэффициента N делителя 8, который в пределах поддиапазона остается неизменным. Так, переход в соседний, более низкочастотный (высокочастотный) поддиапазон соответствует увеличению (уменьшению) N в A раз. В верхнем поддиапазоне $N=1$. Коэффициент M деления обычно изменяется с шагом 1 от минимального B до максимального AB значений независимо от поддиапазона, что обеспечивает внутри k -го поддиапазона неизменный шаг $\Delta f_k=f_{k-1}/B$ сетки частот. Шаг Δf_k имеет максимальное значение $\Delta f_{\max}=f_0$ (f_0 — частота опорного колебания) в верхнем поддиапазоне и уменьшается (пропорционально увеличению N) при переходе в более низкочастотный поддиапазон. Например, в случае $f_p=0,01$ Гц, $f_L=10^8$ Гц, $A=10$ и $B=10^4$ коэффициент M изменяется в пределах 10^4-10^5 , и $\Delta f_{\max}=1$ кГц.

Рассматриваемый широкодиапазонный синтезатор (рис. 1) обладает следующими существенными недостатками: сложность реализации перестраиваемого генератора; ограниченные функциональные возможности.

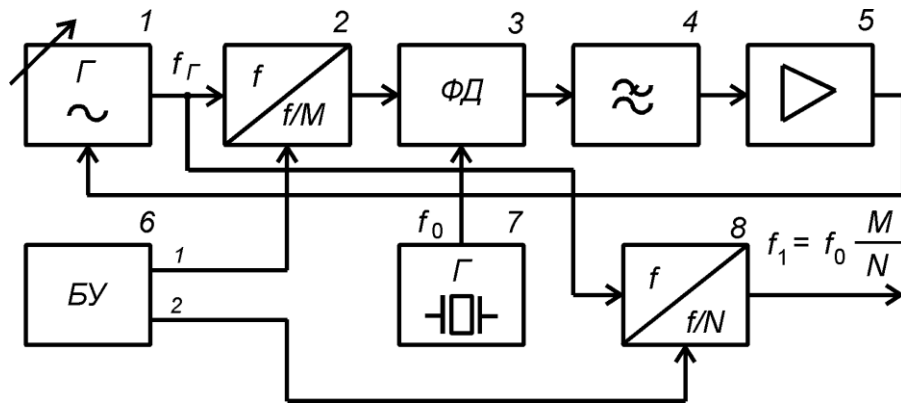


Рис. 1. Синтезатор стабильных электрических колебаний на основе системы ФАПЧ

Действительно, в случае широкого диапазона частот последний с учетом удобств использования десятичной системы исчисления и целесообразности уменьшения числа L поддиапазонов наиболее часто разбивают по декадному принципу. Тогда генератор I должен перестраиваться в десятикратном диапазоне частот, соответствующем верхнему поддиапазону синтезатора, например, в диапазоне 10–100 МГц при $f_L=100$ МГц и $A=10$. Реализация перестраиваемого генератора с коэффициентом перекрытия по частоте $K_f=f_L/f_{L-1}=10$ представляет самостоятельную достаточно сложную проблему. Ее решают либо способом построения перестраиваемого генератора (со значительно меньшим коэффициентом K_f), работающего в более высоком диапазоне частот, и последующего переноса колебаний в требуемый диапазон $f_{L-1} \dots f_L$, либо с помощью нескольких генераторов, каждый из которых перекрывает свою часть поддиапазона [6]. Сравнительно просто реализуется перестраиваемый генератор с коэффициентом перекрытия по частоте, не превышающим значений 1,5–2,5. Учитывая это, в рассматриваемом примере

диапазон 10–100 МГц необходимо разбить на три поддиапазона $f_{L-1}-f_{S1}$, $f_{S1}-f_{S2}$ и $f_{S2}-f_L$, каждый из которых перекрывается своим перестраиваемым генератором с коэффициентом перекрытия $K_f = \sqrt[3]{A} = \sqrt[3]{10} \approx 2,15$. Очевидно, оба способа построения генератора, перестраиваемого в широком поддиапазоне частот $f_L / f_{L-1} = A > 2,5$, характеризуются сложностью аппаратурной реализации, что существенно усложняет построение синтезатора в целом.

Суть второго недостатка рассматриваемого синтезатора (рис. 1) состоит в следующем.

Синтезатор позволяет получить с требуемым шагом сетки частот одно стабильное колебание. Однако в технических приложениях, например, в системах телекоммуникаций, измерительных системах и устройствах, возникает необходимость наличия одновременно нескольких, наиболее часто двух, стабильных колебаний произвольных (некратных) частот. Этого нельзя достичь с помощью рассматриваемого синтезатора. Поэтому для решения проблемы в состав системы (устройства) вводят несколько (по числу формируемых колебаний) синтезаторов, что усложняет реализацию.

Широкодиапазонный синтезатор частот с расширенными функциональными возможностями

Для устранения отмеченных недостатков предлагается следующая структура широкодиапазонного синтезатора (рис. 2) [7, 8]. Она включает перестраиваемый генератор (частоты f_T) 1, делители 2–4, 10–13 частоты с коэффициентами деления соответственно A_g , P , M , N , N_k , MQ и Q_k (A_g , P , M , N , N_k , Q , Q_k — целые числа), генератор 9 стабильного опорного колебания с частотой f_0 , фазовый детектор 5 (сравнивающий по фазе вспомогательное с частотой $f_T/(A_gPM)$ и опорное колебания), ФНЧ 6, усилитель постоянного тока 7 и блок 8 управления. Блоки 1–7 и 9 образуют систему ФАПЧ генератора 1. Делители частоты имеют переменные коэффициенты деления, значения которых устанавливаются блоком 8, связанным с управляющими входами делителей. Благодаря этому синтезатор вырабатывает четыре стабильных колебания с перестраиваемыми частотами $f_1=f_0PM/(PN)=f_0M/N$, $f_2=f_0M/(NN_k)$, $f_3=f_0PM/(MQ)=f_0P/Q$ и $f_4=f_0P/(QQ_k)$. Делитель 12 наиболее удобно реализовать последовательным соединением делителей частоты с коэффициентами деления M и Q . Выбирая необходимые значения параметров M , N , P и Q делителей 4, 10, 3 и 12, можно устанавливать требуемые в общем случае некратные значения частот f_1 и f_3 . Частоты f_1 и f_2 , а также f_3 и f_4 являются попарно кратными. Частоты f_2 и f_4 в общем случае некратны. При $A_g=1$ произведение f_0MP не должно превосходить значения f_L верхней граничной частоты генератора 1. Поэтому максимальные значения $f_{1max}=f_0M$ и $f_{3max}=f_0P$ частот колебаний, которые можно одновременно сформировать, соответствуют условию $f_0MP \leq f_L$.

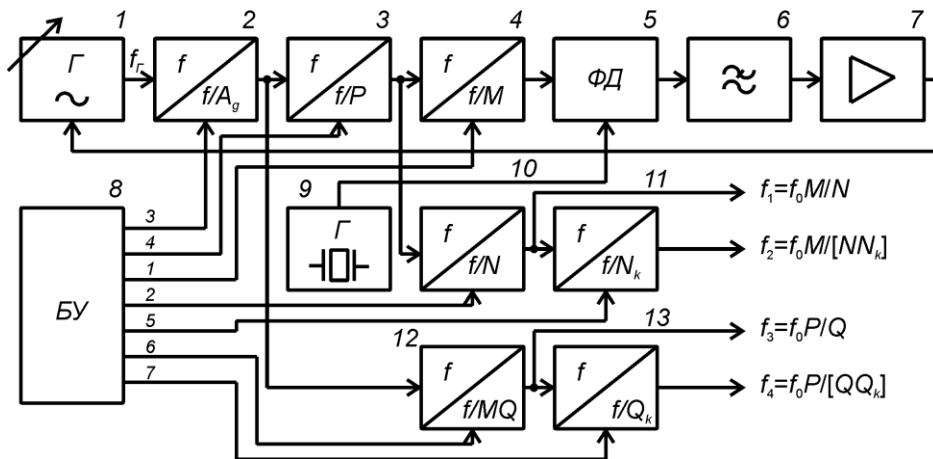


Рис. 2. Широкодиапазонный синтезатор стабильных электрических колебаний с расширенными функциональными возможностями

Для уменьшения диапазона перестройки генератора I в синтезатор дополнительно введен делитель 2. Его коэффициент деления изменяется от минимального $A_{g\min}=1$ до максимального значений, где $A=f_L/f_{L-1}$. С помощью делителя 2 необходимые колебания в интервалах частот $f_{C1}-f_{C2}$, относящихся к нижней части $f_{L-1}-0,5f_L$ исходного диапазона $f_{L-1}-f_L$, образуются делением в A_g раз частоты колебаний генератора I , перестраиваемого в соответствующих интервалах $f_{r1}-f_{r2}$ верхней части $0,5f_L-f_L$ диапазона $f_{L-1}-f_L$. За счет этого уменьшается коэффициент K_f перекрытия по частоте. В таблице приведены значения коэффициента A_g для различных вариантов разбиения на поддиапазоны (для различных A) рабочего диапазона f_r-f_L синтезатора.

$$A_{g.\max} = \begin{cases} \frac{A}{2}, & \text{если } \frac{A}{2} \text{ — целое,} \\ \left[\frac{A}{2} \right] + 1, & \text{если } \frac{A}{2} \text{ — дробное.} \end{cases} \quad (2)$$

Анализ работы синтезатора с учетом соотношения (2) и данных таблицы показывает, что введение в устройство делителя 2 уменьшило коэффициент K_f перестраиваемого генератора, который при любых вариантах разбиения рабочего диапазона f_r-f_L на поддиапазоны (при различных A) не превышает значения $K_f=2$, что существенно упрощает реализацию генератора и синтезатора в целом. Применительно к рассмотренному выше примеру построения синтезатора с $f_L=100$ МГц и $A=10$ генератор I теперь работает в диапазоне 50–100 МГц. При этом необходимые колебания в интервалах частот 25–50, 12,5–25 и 10–12,5 образуются делением (делителем 2) соответственно в 2, 4 и 5 раз частоты колебаний генератора, который применительно к этим интервалам частот работает в интервалах соответственно 50–100, 50–100 и 50–62,5 МГц (таблица).

Значения коэффициента A_g деления для различных вариантов построения

$f_{L-1}-f_L$	A	A_g	$f_{C1}-f_{C2}$	$f_{r1}-f_{r2}$
$(0,1-1,0)f_L$	10	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		4	$(0,125-0,25)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		5	$(0,1-0,125)f_L$	$(0,5-0,625)f_L$
$(0,11(1)-1,0)f_L$	9	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		4	$(0,125-0,25)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		5	$(0,11(1)-0,125)f_L$	$(0,55(5)-0,625)f_L$
$(0,125-1,0)f_L$	8	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		4	$(0,125-0,25)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
$(0,143-1,0)f_L$	7	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		4	$(0,143-0,25)f_L$	$(0,572-1,0)f_L$
$(0,16(6)-1,0)f_L$	6	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		3	$(0,16(6)-0,25)f_L$	$(0,5-0,75)f_L$
$(0,20-1,0)f_L$	5	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		3	$(0,20-0,25)f_L$	$(0,6-0,75)f_L$
$(0,25-1,0)f_L$	4	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,25-0,5)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
$(0,33(3)-1,0)f_L$	3	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$
		2	$(0,33(3)-0,5)f_L$	$(0,66(6)-1,0)f_L$
$(0,50-1,0)f_L$	2	1	$(0,5-1,0)f_L$	$(0,5-1,0)f_L$

Выводы

Таким образом, при установке значения параметра $P=1$ предлагаемый синтезатор позволяет сформировать на своем первом выходе стабильное колебание (с частотой f_1) в том же диапазоне и с тем же шагом сетки частот, что и синтезатор по схеме рис. 1. Введение в устройство делителей 3, 11, 12 и 13 обеспечивает дополнительную возможность одновременно создать, помимо колебания с частотой f_1 , также колебания на частотах f_2, f_3 и f_4 , причем, в общем случае частоты f_1 и f_3, f_2 и f_4 — попарно не кратны, а частоты f_1 и f_2, f_3 и f_4 — попарно кратны. Введение делителя 2 с переменным коэффициентом деления $A_g = \overline{1, A_{g.\max}}$ уменьшило коэффициент перекрытия по частоте перестраиваемого генератора до значения $K_f=2$ при любых вариантах разбиения на поддиапазоны рабочего диапазона диапазона f_P-f_L синтезатора.

В заключение отметим еще одно положительное свойство рассматриваемого синтезатора. Все стабильные колебания, формируемые им, образованы делением частоты f_T колебания одного перестраиваемого генератора. Поэтому при их последующем нелинейном преобразовании образуются продукты на частотах, относительная нестабильность которых остается такой же, что и в колебании перестраиваемого генератора. Это исключительно важно для многих технических приложений и принципиально недостижимо в случае формирования колебаний несколькими синтезаторами по схеме рис. 1.

THE WIDE-RANGE SYNTHESIZER OF STABLE ELECTRIC OSCILLATIONS WITH THE EXPANDED FUNCTIONALITIES

V.A. ILINKOV, V.E. ROMANOV

Abstract

The wide-range synthesizer of stable electric oscillations, multiple and not multiple frequencies with factor $K_f=10^{10}$ of overlap on frequency is developed; the factor of overlap on frequency of a variable-frequency oscillator does not exceed value $K_f=2$ at any variants of splitting (on sub-bands) an operating range of frequencies of a synthesizer.

Литература

1. Проектирование радиопередатчиков: Учеб. пособ. 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. // Докл. БГУИР. 2004. Т 2, № 4.
5. Ильинков В.А., Романов В.Е. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 4.
6. Ильинков В.А., Романов В.Е. // Изв. Белор. инж. акад. 2003. № 1(15)/3.
7. Пат. 6863 С1 ВУ, МКИ7 Н 03L 7/00, 7/18. Способ синтеза стабильных электрических колебаний некратных частот / Ильинков В.А., Романов В.Е.
8. Пат. 8265 С1 ВУ, МКИ7 Н 03L 7/00. Синтезатор стабильных электрических колебаний в широком диапазоне частот / Ильинков В.А., Романов В.Е.