

А. В. З а й ц е в, А. А. Б ы к о в,
Н. М. Т р и ф о н о в

СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ КОСВЕННОГО СИНТЕЗА

Рассмотрен синтезатор частоты с системой фазовой автоподстройки. Приведены теоретические расчеты и экспериментальные результаты. Основное внимание уделено использованию отечественной микросхемы КН1015ПЛ5, выпущенной экспериментальной серией.

В предлагаемом синтезаторе, за исключением управляемого генератора, используется цифровой сигнал. Время стабилизации частоты предложенного синтезатора проанализировано теоретически и экспериментально. Выявлено, что данный синтезатор обеспечивает время переключения частот менее 20 мс, при подавлении боковых составляющих спектра более чем на 50 дБ.

Появление современных синтезаторов частот (СЧ) связано с возросшими требованиями стабильности и точности установки частоты при перестройке по диапазону. Синтезаторы частот широко применяются во всех областях радиотехники: передатчиках, приемниках, измерительных устройствах. Требования, предъявляемые к СЧ, зависят от назначения и области применения аппаратуры, в которой они используются.

В настоящее время существуют два основных метода построения СЧ: методы прямого и косвенного синтеза.

Метод прямого синтеза основан на линейном преобразовании ряда опорных частот и выделении требуемой частоты при помощи фильтров (отсюда название — “пассивный синтез”). *Метод косвенного синтеза* основан на сравнении выходной частоты управляемого генератора (УГ) с некоторой стабильной частотой и на последующей подстройке выходной частоты по сигналу ошибки при помощи контура управления. В качестве частоты сравнения используется частота высокостабильного (обычно кварцевого) генератора.

Предлагаемый СЧ является частью (блоком) аппаратуры связи. Поэтому рассмотрим характеристики, которые могут и должны быть реализованы в самом синтезаторе. Такими характеристиками являются диапазон частот, стабильность рабочих частот, шаг сетки частот, стабильность частоты (среднеквадратическое значение паразитного отклонения частоты), время перестройки рабочей частоты.

Для реализации заданных требований по основным электрическим параметрам, габаритным размерам и потреблению выбрана наиболее простая система синтеза частот на основе однокольцевой системы фазовой автоподстройки с переменным коэффициентом деления.

Диапазон частот, МГц.....	129... 131
Ток потребления при напряжении питания 12 В, мА.....	Не более 50
Выходное напряжение на нагрузке 1 кОм, мВ.....	400... 600
Напряжение питания, В.....	12 ± 2; 5 ± 2
Шаг сетки частот, кГц.....	1
Относительный уровень гармоник выходного напряжения СЧ, дБ.....	Не более 12
Относительный уровень негармонических побочных составляющих (регулярных/шумовых) при отстройках от рабочей частоты от ±10 кГц до ±10%, дБ.....	Не более 50/70
Время перестройки рабочей частоты (с точностью не ниже ±1 кГц), мс.....	20
Частота внешнего опорного генератора, МГц.....	3,5
Программирование частоты.....	Последовательным кодом
Виброустойчивость (при частоте вибраций от 1 до 300 Гц с перегрузками 5g).....	Девиация частоты до 20 Гц;
Рабочая температура, °С.....	-20... + 60
Относительная влажность (при 35 °С), %.....	98

В результате исследования существующих в настоящее время методов синтеза частот и СЧ, реализующих эти методы, а также анализа предельных значений основных параметров СЧ выявлено, что реализовать синтезатор частот, отвечающий заданным радиотехническим и конструктивным параметрам можно, используя построение СЧ по методу косвенного синтеза частот с однокольцевой системой фазовой автоподстройки (ФАП) с ДПКД.

Предлагаемый СЧ по техническим характеристикам, отличительными чертами которых являются ток потребления 17 мА, время перестройки частоты не более 20 мс и небольшие габаритные размеры 70 × 75 мм, близок к СЧ пятого поколения.

Основные компоненты синтезатора, за исключением управляемого генератора и системы управления, реализованы на микросхеме серии КН1015ПЛ5В, в состав которой входят два делителя с программируемым коэффициентом деления, частотно-фазовый детектор и усилитель-формирователь сигнала УГ.

По паспортным данным микросхема КН1015ПЛ5В имеет нижнюю граничную частоту по входу сигнала УГ 5 МГц, что позволяет разрабатывать СЧ в диапазоне от 5 до 900 МГц. Области применения таких СЧ могут быть разными: КВ и УКВ аппаратура связи, измерения, охрана различных объектов (радиосигнализация), радиомодемы и др. Основные радиотехнические параметры СЧ, построенных на различных микросхемах, приведены в табл. 1.

Характеристики СЧ в интегральном исполнении

Микро-схема	Возможные значения коэффициентов деления		Максимальные значения входных частот, МГц		$V_{п}, В$	$I_{п}, мА$	Тип детектора	Входной сигнал (минимальный)		Интерфейс управления	Тип корпуса (количество выводов)	Особенности
	:R	:N(A)	f_{in}	f_r				f_{in}	f_r			
МС145149	3–16383	:N(A) 3–1023 (0–127)	15,0	15,0	3,0–9,0	3,0–30,0	Линейный ЧФД (1 выход)	0,5	0,5	Последовательное (3 входа)	P(20) DW(20)	Два идентичных СЧ
МС145155-2	2^m , где $m = 4, 9, 13, 3668, 6144$	3–16383	25	25	3,0–9,0	3,0–30,0	Линейный ЧФД (3 выхода)	0,5	0,5	Параллельное (3-разрядный по R), 3 входа для измерения N)	P(18) DW(20)	Выход SW1, SW2
МС145162	16–4095	16–65535	85	16,0	2,5–5,5	3,0(2,5 В) 10(5,5 В)	Два ЧФД (в каждом по 1 выходу)	0,2	0,2	Последовательное (4 входа)	P(16) DW(16)	Два независимых СЧ, функция понижения потребляемой мощности
КН1015ПЛ5	3–8191	225–131071	900	50	3,0–6,0	17	ЧФД (1 выход с 3 состояниями)	0,2	0,1	Параллельное (13-разрядный по R, 17-разрядный по N)	Н14,42-1В (42)	Высокая экономичность и простота включения

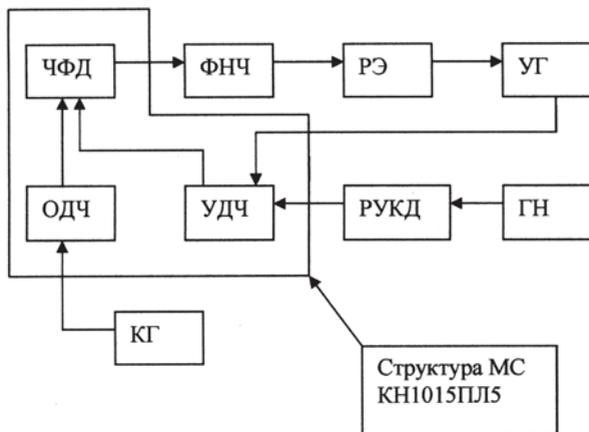


Рис. 1. Структурная схема проектируемого синтезатора частот

Синтезатор частот с системой фазовой автоподстройки. Структура предлагаемого СЧ косвенного синтеза показана на рис. 1. В синтезаторе имеется УГ, с выхода которого напряжение заданной частоты подается на управляемый делитель частоты (УДЧ).

Перестройка частоты УГ производится путем подачи постоянного напряжения различной величины на реактивный элемент (РЭ) (обычно варикап).

Напряжение с УГ поступает на УДЧ, коэффициент деления которого устанавливается с помощью регистра установки коэффициента деления (РУКД). Состояние РУКД (код) изменяется с помощью генератора настройки (ГН). Сигнал УГ после деления его в УДЧ подается на частотно-фазовый детектор (ЧФД), где он сравнивается с частотой опорного генератора, которая образуется путем деления частоты кварцевого генератора (КГ) в соответствующем опорном делителе частоты (ОДЧ). С выхода ЧФД сигнал ошибки установки частоты подается через фильтр нижних частот (ФНЧ) на РЭ. Таким образом осуществляется частотно-фазовая подстройка частоты УГ.

Стабильность частоты на выходе УГ поддерживается кварцевым генератором. Управляемый делитель, ОДЧ и ЧФД выполнены на микросхеме КН1015ПЛ5 (см. рис. 1). Установка коэффициента деления (КД) производится подачей “0” или “1” на входы микросхемы КН1015ПЛ5 с РУКД.

Каждому разряду кода соответствует число, на которое делится частота входного сигнала. Числа эти кратны 2^n (n — целое положительное число). Каждому выводу УДЧ присвоено свое значение КД. Сумма всех КД для управляемого делителя равна 131071, для опорного — 8191 при логической “1” на всех выводах управления делителями. Эти значения, а также значения выводов КД приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Значения КД для ОДЧ

№ вывода	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Значение КД	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096
Сумма всех значений КД	8191												

Таблица 3

Значения КД для УДЧ

№ вывода	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Значение КД	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768	65536
Сумма всех значений КД	131071																

При подаче на какие-либо выводы логического “0” из общей суммы вычитаются те значения, которые соответствуют этим выводам.

Установка КД опорного делителя. Частота кварцевого генератора $F_{\text{КГ}} = 3,5 \text{ МГц}$, значение частоты сравнения $F_r = 1 \text{ кГц}$ устанавливается из требуемого диапазона выходных частот УГ. Коэффициент деления ОДЧ определяется по формуле

$$\text{КД}_{\text{ОДЧ}} = \frac{F_{\text{КГ}}}{F_r} = \frac{3,5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^3} = 3500.$$

Предположим, что задача оперативного изменения шага перестройки УГ не ставится, тогда КД можно сделать неизменным. По табл. 3 для ОДЧ находим перечень выводов, включение которых даст нужный КД. Требуемый КД получается как сумма чисел: $2048 + 1024 + 256 + 128 + 32 + 8 + 4 = 3500$.

Установка КД управляемого делителя. Если синтезатор должен вырабатывать одну фиксированную частоту, то процедура будет такой же, как и для ОДЧ. Если же требуется оперативная смена рабочих частот, то понадобится схема управления. Удобнее всего использовать для этого декаду двоичных реверсивных счетчиков.

Рассмотрим этот вариант схемы управления. У РУКД есть два входа: UP и DOWN, которые отвечают за изменение значения КД. Если подать на входы UP или DOWN одиночный положительный импульс, то частота УГ изменится вверх или вниз на значение опорной частоты. Если на эти входы подавать импульсы по N штук в пачке, то выходная частота синтезатора будет изменяться с шагом, равным $N F_r$.

Пачка импульсов на входы UP или DOWN подается генератором настройки (ГН) (см. рис. 1).

Генератор настройки представляет собой шесть инверторов, три из которых отвечают за увеличение КД, а три — за уменьшение КД УДЧ. При поступлении импульсов на вход РУКД с генератора настройки начинается пошаговое переключение регистра с увеличением хранящегося в нем числа, а значит, начинается увеличение КД УДЧ. Частота импульсов ГН может меняться от 0,5 Гц (медленная пошаговая перестройка) до 1000 Гц (быстрая перестройка).

Максимальная длительность импульса генератора настройки $T_U = 0,284$ с; время паузы между импульсами $T_P = 0,2$ с; полный период колебаний $T_P = 0,5$ с.

Основные технические характеристики синтезатора частот приведены далее.

Диапазон частот выходного сигнала $\Delta f_{\text{сх}}$ — это область частот между минимальными и максимальным номинальными значениями частоты выходного колебания.

Шаг сетки частот $F_{\text{ш}}$ — минимальный частотный интервал между соседними значениями частоты выходного сигнала. В нашем случае шаг сетки частот составляет 1 кГц.

Величина выходного напряжения — эффективное значение на заданном сопротивлении нагрузки (1 кОм) — $U_{\text{вых.СЧ}}$.

Среднеквадратическое значение паразитного отклонения частоты (фазы) измеряется в полосе частот от $F_{\text{н}}$ до $F_{\text{в}}$, определяется как

$$\Delta f_{\text{СКВ}} = \sqrt{\int_{F_{\text{н}}}^{F_{\text{в}}} S_f(F) dF}; \quad \Delta \theta_{\text{СКВ}} = \frac{180}{\pi} \sqrt{\int_{F_{\text{н}}}^{F_{\text{в}}} S_\varphi(F) dF},$$

где $S_f(F)$ и $S_\varphi(F)$ — соответственно спектральные плотности мощности флуктуаций частоты и фазы выходного сигнала.

Уровень дискретной побочной спектральной составляющей с частотой $f_{\text{д}}$ примет вид

$$D_{\text{д}} = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{вых.СЧ}}} \right),$$

где $U_{\text{д}}$ — эффективное значение анализируемой спектральной составляющей.

Уровень побочных спектральных составляющих, лежащих в полосе частот ΔF , при отстройке на Δf относительно номинального значения частоты $f_{\text{н}}$ определяется по формуле

$$D_{\text{п}} = 20 \lg \left(\frac{U_3(\Delta f, \Delta F)}{U_{\text{вых.СЧ}}} \right),$$

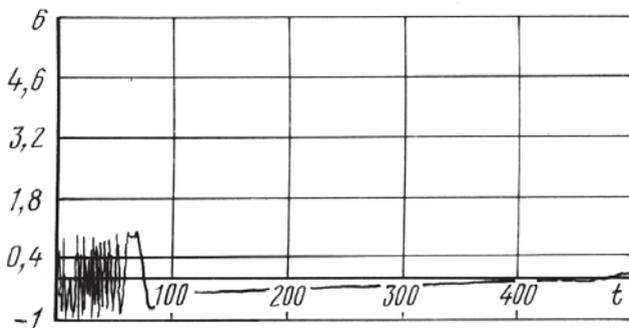


Рис. 2. Результат моделирования системы синхронизации

где $U_s(\Delta f, \Delta F)$ – эффективное значение суммарного напряжения побочных составляющих в спектре выходного колебания в полосе частот ΔF .

На рис. 2 показан результат моделирования системы синхронизации по параметрам рассматриваемого СЧ, представлена зависимость частоты от времени.

Как видно из рисунка, начальный момент представлен асинхронным режимом работы системы синхронизации. Момент перехода от асинхронного режима к режиму слежения за частотой виден от 75 до 100 мс, где прекращаются колебательные движения частоты. Это означает, что система ФАП отслеживает работу УГ.

Этот же процесс отражается в полученных значениях с работающего СЧ. График этого процесса изображен на рис. 3.

Зависимости изменения времени перестройки системы от полосы пропускания ФАП приведены на рис. 4. В данном случае полоса пропускания ФАП составляет $1 \cdot 10^3$ Гц. Заметно, что при увеличении полосы пропускания кольца ФАП уменьшается время перестройки частоты.

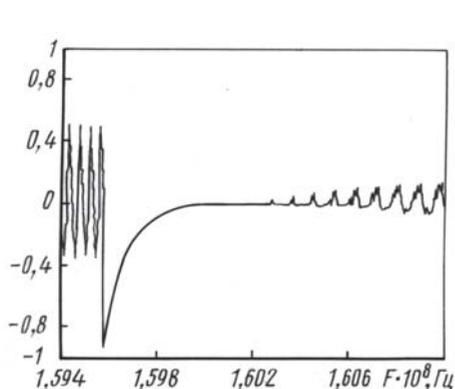


Рис. 3. Процесс захвата частоты

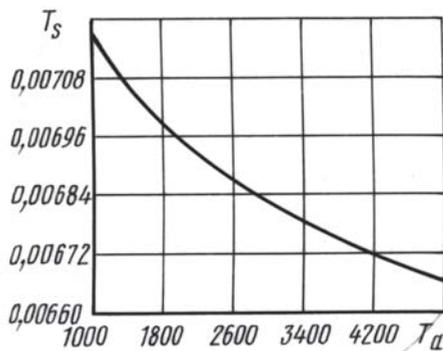


Рис. 4. Зависимость изменения времени перестройки от полосы пропускания

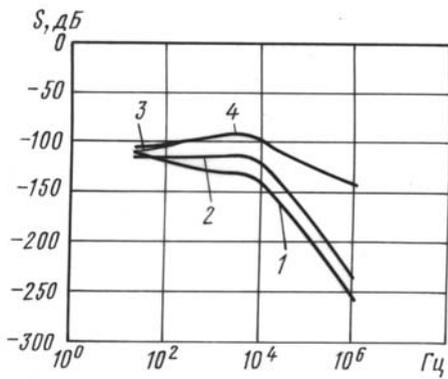


Рис. 5. Графики изменения шумов элементов СЧ на всем частотном диапазоне:

1 — шумы опорного генератора, 2 — шумы микросхемы синтезатора частот, 3 — шумы генератора в кольце, 4 — суммарная спектральная плотность шумов синтезатора частот

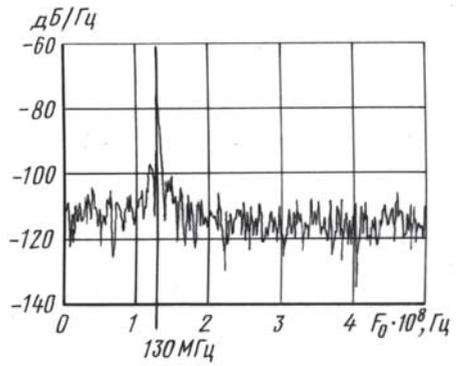


Рис. 6. Изменение уровня выходного сигнала на рабочих частотах

Время перестройки системы при переходе на один шаг по частотной сетке определяется соотношением $T_S = (-1) \ln \left(\frac{F_a}{F_{\text{ш}}} \right) [4\pi\xi F_N]^{-1}$, где $F_{\text{ш}}$ — максимальный шаг перестройки сетки; F_a — частота, равная частоте пропускания петли ФАП, составляет $1 \cdot 10^3$ кГц; F_N — центральная частота УГ; ξ — коэффициент демпфирования, равный 0,707. В результате расчета получим $T_S = 7$ мс.

На рис. 5 приведены графики изменения шумов элементов СЧ на всем частотном диапазоне работы.

Экспериментальные результаты. На рис. 6 изображена зависимость, полученная при экспериментальном исследовании СЧ. Эта зависимость отражает уровень выходного сигнала на всем рабочем диапазоне частот.

Как видно, центральный лепесток значительно превосходит уровень побочных шумов, создаваемых синтезатором. Значение выходной частоты СЧ соответствует 131 МГц. На рис. 7 представлен график того же процесса на частоте 131 МГц.

Можно оценить наглядно, что значение выходного сигнала по

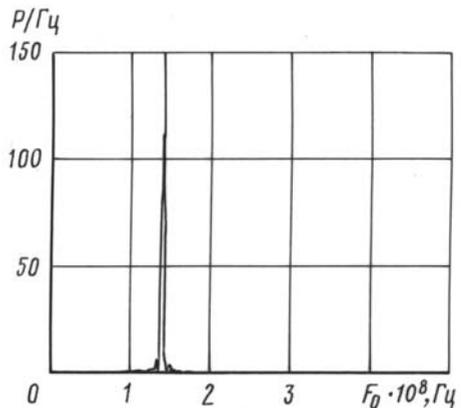


Рис. 7. Выходной спектр синтезатора

уровню намного превосходит значение паразитных шумов. Таким образом, можно утверждать, что шумы пренебрежимо малы.

Выводы. В результате экспериментов выяснили, что ОСШ на выходе составляет 50 дБ и полностью совпадает с данными теоретического анализа. В этой схеме получен сигнал с высокочастотной стабильностью и малым временем перестройки частоты, которое составляет 7 мс. Таким образом, предъявляемые к быстродействующим СЧ требования удовлетворены.

Другое качество предложенного СЧ — это низкий уровень побочных составляющих, которые ослаблены в 800 раз. Даже, если УГ содержит некоторую неустойчивость из-за механического воздействия и изменения температуры, то эффект частотного дрейфа может быть компенсирован ФАП. Таким образом, предложенный СЧ значительно расширяет практическое применение таких синтезаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжков А. В., Попов В. Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
2. Левин В. А., Малиновский В. Н., Романов С. К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. – М.: Радио и связь, 1989. – 232 с.
3. Манасевич В. Синтезаторы частот: Теория и проектирование. – М.: Радио и связь, 1979. – 373 с.
4. Vest R. E. Phase-locked loops. Design, simulation and applications 5th ed McGraw-Hill. – N.Y., 2003. – 420 p.
5. Романов С. К. Анализ системы автоподстройки частоты с широтно-импульсным частотно-фазовым детектором и фильтром второго порядка // Техника средств связи. – 1980. – Вып. 7(25).

Статья поступила в редакцию 22.06.2005

Алексей Владимирович Зайцев родился в 1981 г., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области цифровых синтезаторов частот прямого и косвенного когерентного синтеза.

A.V. Zaitsev (b. 1981) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of digital synthesizers of frequencies for the direct synthesis and the indirect and coherent synthesis.

Андрей Александрович Быков родился в 1981 г. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области помехоустойчивости систем передачи информации и систем синхронизации.

A.A. Bykov (b.1981) — post-graduated of the BMSTU. Specializes in the field of noise immunity of data transfer systems including synchronization systems.

Николай Михайлович Трифонов родился в 1979 г., окончил Московский инженерно-физический институт в 2000 г. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области оптимальных систем управления шагающими роботами.

N.M. Trifonov (b. 1979) graduated from the Moscow Institute for Engineering and Physics in 2000. Post-graduate of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of optimal systems to control walking robots.