

М. П. Савченко, О. В. Старовойтова, О. Н. Тукаленко

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ

Рассмотрены способы разрешения противоречий между основными характеристиками синтезаторов частот на основе фазовой автоподстройки частоты. Для уменьшения фазовых шумов необходимо снизить неизохронность генератора, управляемого напряжением, должным образом выбирать крутизну характеристики перестройки генератора, коэффициент передачи цепи управления варикапами.

The article studies methods for solving contradictions between the main characteristics of synthesizers based on phase-locked. To reduce the phase noise of frequency synthesizers, it is necessary to reduce the non-isochronousness of the voltage-controlled oscillator, properly select the steepness of the generator tuning characteristic, the transfer ratio of the voltage variable capacitor control circuit.

Ключевые слова: фазовая автоподстройка частоты, синтезатор частот, генератор, управляемый напряжением, варикап, фазовые шумы.

Keywords: phase-locked loop, frequency synthesizer, voltage controlled oscillator, voltage variable capacitor, phase noise.

В настоящее время в качестве источников высокостабильных сигналов в телекоммуникационной аппаратуре широко используются цифровые синтезаторы частоты косвенного типа, или активные синтезаторы. Типовая схема такого синтезатора [1] приведена на рисунке 1.

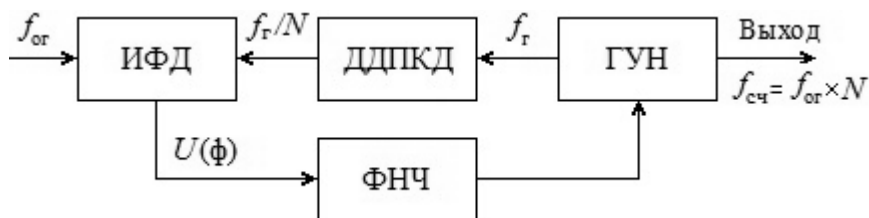


Рис. 1. Типовая схема цифрового синтезатора частот косвенного типа: ИФД – импульсно-фазовый детектор; ДДПКД – делитель с дробнопеременным коэффициентом деления; ГУН – генератор, управляемый напряжением; ФНЧ – фильтр нижних частот

Сигнал от ГУН частотой f_g проходит через ДДПКД, делится в N раз и поступает на ИФД, на второй вход которого поступает высокостабильный опорный сигнал частотой $f_{ог}$. С выхода ИФД напряжение $U(\phi)$, соответствующее разности фаз, через ФНЧ поступает на управитель частоты ГУН, и частота f_g меняется. В момент, когда частоты обоих сигналов на входах ИФД совпадают, процесс изменения частоты ГУН прекращается. Частота колебаний синтезатора равна $f_{сч} = f_{ог} \cdot N$.



Основными параметрами активных синтезаторов являются следующие [2].

1. Диапазон рабочих частот — область частот между минимальным и максимальным значениями номинальной частоты выходного колебания. Полоса перестройки $\Delta f = f_{max} - f_{min}$.

2. Шаг сетки частот $\frac{\Delta f}{N+1}$ — минимальный интервал между двумя соседними значениями частоты выходного сигнала.

3. Быстродействие — наибольшее время установления частоты выходных колебаний, определяемое как промежуток времени между моментом окончания команды на смену частоты (фазы) и моментом, когда разность значений реальной частоты выходных колебаний синтезатора и требуемой номинальной частоты не превышает заданного малого значения.

4. Уровень дискретных побочных спектральных составляющих (ПСС) сигнала при заданной отстройке частоты.

5. Отношение сигнал / шум (С/Ш) — отношение мощности сигнала к мощности шумов в определенной полосе частот при заданной отстройке частоты от несущей.

При построении СЧ стремятся сделать как можно более широкий диапазон рабочих частот, минимально возможный шаг сетки, чтобы точнее выбрать заданную частоту, высокое быстродействие, малый уровень ПСС и максимально возможное отношение С/Ш.

Практически все эти параметры находятся между собой в противоречии. Например: при увеличении диапазона рабочих частот увеличивается шаг сетки, ухудшается быстродействие, становится больше побочных спектральных составляющих и растут флуктуации фазы, что приводит к снижению С/Ш.

Целью настоящей работы является поиск способов разрешения этих противоречия.

В работе [3] для повышения быстродействия и улучшения чистоты спектра предлагается использовать частотно-фазовый детектор (ЧФД) с блоком зарядовой накачки (ЗН) и ФНЧ с переключаемой полосой пропускания. На рисунке 2 представлена функциональная схема системы ИФАПЧ с переменными структурой и параметрами [3].

Система ФАПЧ с накачкой заряда отличается от остальных систем наличием особого функционального узла — самой системы накачки заряда и особенным функционированием фазового детектора. Фазовый детектор для такой системы имеет два цифровых выхода — Up и Down, сигналы на которых изменяются в соответствии с фазами входных сигналов. Если фаза опорного сигнала опережает фазу ГУН, то на выходе Up формируется единичный импульс длительностью, соответствующей разности фаз сигналов. Если фаза опорного сигнала отстает от фазы ГУН, то импульс формируется на выходе Down. За фазовым детектором находится система накачки заряда, предназначенная для управления зарядом (а значит и напряжением) на конденсаторе фильтра.

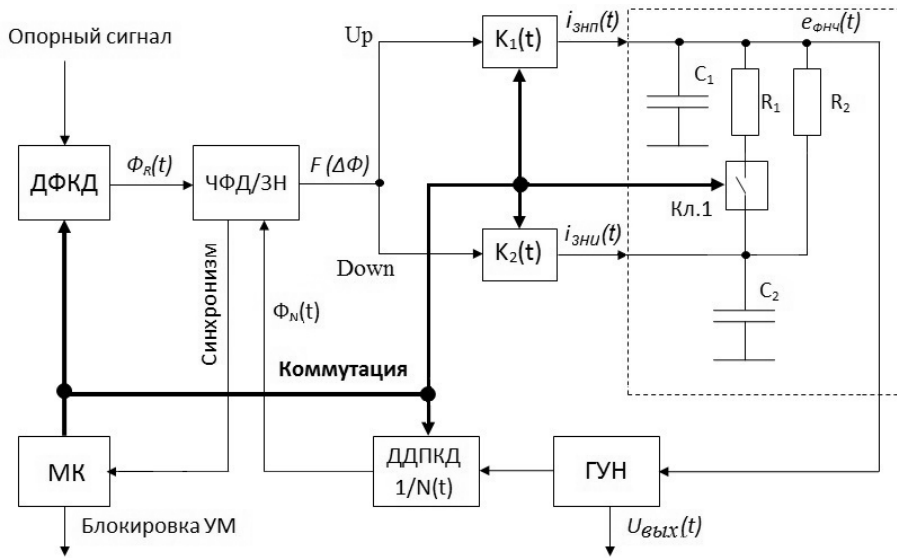


Рис. 2. Функциональная схема системы ИФАПЧ с переменными структурой и параметрами

Систему накачки заряда можно представить в виде двух источников тока $K_1(t)$ и $K_2(t)$, включаемых в разное время по приходу соответствующих управляющих импульсов U_p и $Down$. Применение источников тока с повышенной энергией позволяет ускорить процесс заряда / разряда конденсатора фильтра. Далее напряжение на конденсаторе ФНЧ управляет частотой ГУН.

Следующим шагом на пути сокращения времени установления частоты является переключение постоянной времени, то есть полосы пропускания ФНЧ. При захвате частоты (во время переходного процесса) ключ КЛ1 замкнут, резисторы R_1 и R_2 соединены параллельно, постоянная времени фильтра мала и процесс установления частоты проходит быстро. После захвата частоты КЛ1 размыкается, постоянная времени фильтра становится большой и начинается процесс удержания частоты. На этом этапе полоса пропускания фильтра узкая и паразитные модулирующие частоты в цепи управления отсекаются, что улучшает чистоту выходного спектра.

Применение ЧФД совместно с блоком ЗН и переключаемым ФНЧ повышает быстродействие и чистоту выходного спектра. Длительность переходных процессов сокращается за счет изменения в определенные моменты структуры ФНЧ и параметров блока управляемой ЗН в течение переходных процессов.

Однако схема, изображенная на рисунке 2, не решает проблему флуктуаций фазы, обусловленную собственными шумами генератора и шумами цепи управления. Нужно искать компромисс в самом генераторе.



На рисунке 3 приведена упрощенная схема высокочастотного ГУН на биполярном транзисторе [4].

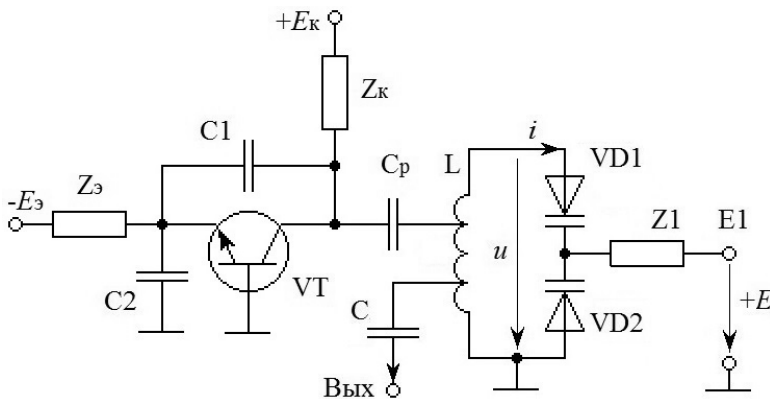


Рис. 3. Упрощенная схема автогенератора со встречно-последовательно соединенными варикапами

C_1, C_2 – конденсаторы обратной связи; C_p – разделительная емкость; Z_1 – цепь подачи напряжения смещения E на встречно-последовательно соединенные (ВПС) варикапы VD_1, VD_2 ; Z_k, Z_3 – цепи подачи напряжений питания E_k коллектора и E_3 эмиттера транзистора VT . Цепь Z_1 имеет бесконечно большое сопротивление для токов с частотой колебания в контуре ω и конечное сопротивление для токов модуляции. Цепь Z_k имеет бесконечно большое сопротивление для токов с частотой ω и весьма малое постоянному току, Z_3 – большое сопротивление для переменного тока и большое по сравнению с входным сопротивлением транзистора по постоянному току. Изменением вещественной составляющей Z_3 устанавливается ток эмиттера транзистора и амплитуда U_k напряжения на контуре

$$u = U_k \cos \omega t, \tag{1}$$

где $\omega = 1/\sqrt{LC_{полн}}$, $C_{полн}$ – полная емкость контура, $\omega = 2\pi f$.

Спектральная плотность флуктуаций фазы $S_\psi(\Omega)$ в ГУН достаточно точно описывается выражением [5]

$$S_\psi(\Omega) = S_\psi^{A3}(\Omega) + \frac{1}{\Omega^2} \left(\frac{\partial \omega}{\partial U_k} \right)^2 U_k^2 \cdot S_m(\Omega) + \frac{1}{\Omega^2} \left(\frac{\partial \omega}{\partial E} \right)^2 E^2 \cdot K_E^2(\Omega) \cdot S_{\mu E}(\Omega). \tag{2}$$

Здесь $S_\psi^{A3}(\Omega)$ – спектральная плотность флуктуаций фазы, обусловленная активным элементом (транзистором); $\Omega = 2\pi F$ – частота анализа шумов; ω – частота колебаний автогенератора; U_k – амплитуда колебаний на контуре; $S_m(\Omega)$ – относительная спектральная плотность амплитудных флуктуаций, обусловленная активным элементом; $S_{\mu E}(\Omega)$ – относительная спектральная плотность флуктуаций напря-



жения смещения; $K_E(\Omega)$ – коэффициент передачи цепи Z1; E – напряжение смещения на входе цепи управления Z1. Величина $\left(\frac{\partial\omega}{\partial U_K}\right)$ является крутизной характеристики неизохронности ГУН в точке значения амплитуды колебаний U_K , $\left(\frac{\partial\omega}{\partial E}\right)$ – крутизной характеристики перестройки частоты ГУН в точке значения напряжения смещения E .

Выражение (2) включает три компоненты:

– первая, $S_{\psi}^{A3}(\Omega)$ – спектральная плотность флуктуаций фазы в АГ с линейным контуром, то есть без варикапов, когда $\left(\frac{\partial\omega}{\partial U_K}\right) = 0$ и

$$\left(\frac{\partial\omega}{\partial E}\right) = 0;$$

– вторая, $\frac{1}{\Omega^2}\left(\frac{\partial\omega}{\partial U_K}\right)^2 U_K^2 \cdot S_m(\Omega)$, обусловлена преобразованием флуктуаций амплитуды $S_m(\Omega)$ в фазовые через неизохронность $\left(\frac{\partial\omega}{\partial U_K}\right)$ ГУН;

– третья, $\frac{1}{\Omega^2}\left(\frac{\partial\omega}{\partial E}\right)^2 E^2 \cdot K_E^2(\Omega) \cdot S_{\mu E}(\Omega)$, обусловлена преобразованием флуктуаций напряжения смещения $S_{\mu E}(\Omega)$ в фазовые через крутизну перестройки $\left(\frac{\partial\omega}{\partial E}\right)$ ГУН.

На рисунке 4 сплошными линиями приведены: экспериментальные зависимости [6] спектральной плотности флуктуаций фазы в АГ без варикапов – линия 1, с варикапами без шумов в цепи управления – линия 2, с варикапами и шумами в цепи управления, создаваемыми резистором 100 кОм, – линия 3. Там же пунктирной линией с треугольниками и крестиками представлены зависимости, рассчитанные по выражению (2). По сути, линия 1 характеризует первое слагаемое в (2), линия 2 – сумму первых двух слагаемых, линия 3 – сумму всех трех слагаемых.

Из рисунка 4 видно, что в ГУН с варикапами значительный вклад в флуктуации фазы колебания вносит неизохронность автогенератора – линия 2. Следовательно, снижая зависимость частоты колебаний от амплитуды, можно существенно улучшить отношение шум / сигнал, которое, как известно [7], связано с $S_{\psi}(\Omega)$ соотношением

$$\frac{Ш}{С} = \frac{1}{2} S_{\psi}(\Omega). \quad (3)$$

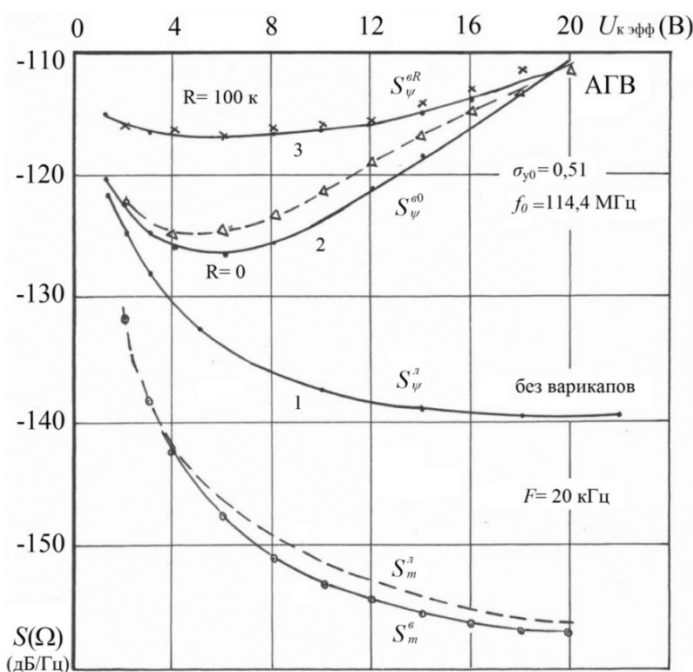


Рис. 4. Графики зависимости спектральной плотности флуктуаций фазы в АГ:
 1 – без варикапов; 2 – с варикапами без шумов в цепи управления;
 3 – с варикапами и шумами в цепи управления, создаваемыми резистором 100 кОм

Эффективный способ снижения неизохронности автогенератора с варикапами предложен в [8]. Он основан на применении автоматической коррекции напряжения смещения на варикапах. В работе получено выражение, связывающее амплитуду колебаний генератора с напряжением компенсации, экспериментально подтверждена высокая эффективность способа. Там же приведена блок-схема устройства автоматической коррекции напряжения смещения.

В работе [9] для снижения фазовых шумов автогенератора, управляемого по частоте варикапами, предлагается ввести цепь отрицательной обратной связи по шумам, которая компенсирует влияние флуктуаций амплитуды на значение емкости варикапов и снижает, тем самым, фазовые шумы ГУН.

Вывод. Выбирая должным образом крутизну неизохронности $\left(\frac{\partial \omega}{\partial U_K}\right)$, характеристику перестройки $\left(\frac{\partial \omega}{\partial E}\right)$, коэффициент передачи цепи управления варикапами $K_E(\Omega)$ и используя предложенные в [8; 9] способы снижения неизохронности и фазовых шумов в автогенераторе с варикапами, можно минимизировать флуктуации фазы ГУН. Вкупе с применением ЧФД с блоком ЗН и переключаемым ФНЧ это позволит повысить быстродействие, чистоту выходного спектра и отношение сигнал / шум цифровых активных синтезаторов частоты.



Список литературы

1. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот. М., 2007.
2. Романюк А.А. Синтезаторы частот на основе автогенераторов с ФАПЧ : учеб. пособие. М., 2005.
3. Романов С.К., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот. М., 2010.
4. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов : учеб. пособие / под ред. В.Н. Кулешова, Н.Н. Удалова. М., 2008.
5. Савченко М.П. Влияние нестабильности амплитуды колебаний и напряжения смещения на частоту автогенератора при встречно-последовательном соединении варикапов // Радиотехника. 1987. №12. С. 16–18.
6. Савченко М.П., Кулешов В.Н. Экспериментальное исследование флуктуаций в транзисторном автогенераторе с варикапами // Электросвязь. 1984. №2. С. 55–58.
7. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. М., 1977.
8. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Способ и устройство снижения неизохронности автогенератора с варикапами // Электросвязь. 2016. №4. С. 57–61.
9. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Способ снижения фазовых шумов в автогенераторе с варикапами // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2016. №1. С. 71–75.

Об авторах

Михаил Петрович Савченко — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: savchenkomp@mail.ru

Ольга Владимировна Старовойтова — ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: ostar39@mail.ru

Ольга Николаевна Тукаленко — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: ontukalenko@yandex.ru

The authors

Dr Mikhail P. Savchenko, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: savchenkomp@mail.ru

Olga V. Starovoitova, Assistant Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: ostar39@mail.ru

Olga N. Tukalenko, PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: ontukalenko@yandex.ru