

А. Д. МЕНЯЙЛО, канд. техн. наук, П. И. ЧЕРЕДНИКОВ,
канд. техн. наук, Г. Г. КАСАП

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА СИНХРОНИЗИРУЕМЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

При разработке синтезаторов частоты, задающих генераторов, преобразователей и других устройств аналогичного назначения часто используются делители частоты цифровые и на синхронизируемых генераторах [1—3]. Для частот выше 100 мГц использование делителей частоты на базе цифровых микросхем затруднено, а в диапазоне СВЧ их применение невозможно из-за сравнительно низкого быстродействия существующих микросхем. Поэтому в этих диапазонах частот особое значение приобретают делители частоты, использующие эффект синхронизации на субгармониках. В связи с этим актуальна проблема помехозащищенности. Нами проведено экспериментальное исследование делителей частоты на синхронизируемых генераторах (ДСГ) в условиях действия шумов.

При воздействии на вход делителя частоты полезного сигнала с частотой F_0 и помехи, спектр выходного колебания ДСГ представляет собой определенным образом трансформированную смесь входных составляющих. Причем основная частота выходного сигнала $F_{\text{вых}}$ определяется соотношением $F_{\text{вых}} = F_0/n$ (1), где n — коэффициент деления ДСГ.

Условие (1) должно выполняться в определенной полосе частот — полосе синхронизации, которую в первом приближении можно определить исходя из добротности колебательной системы ДСГ Q по формуле

$$\frac{\Delta F}{F_{\text{вых. о}}} \approx \frac{E}{E_{\text{о. с}}} Q, \quad (2)$$

где ΔF — полоса синхронизации; $F_{\text{вых. о}}$ — выходная частота ДСГ; E — напряжение выходного сигнала; $E_{\text{о. с}}$ — напряжение обратной связи ДСГ.

Очевидно, что основное влияние на выходной сигнал ДСГ оказывает помеха, спектр которой находится в полосе частот, совпадающей с полосой синхронизации ДСГ.

Для определения выходного шумового спектра колебания воспользуемся обобщенной моделью в виде соединения комплексного сопротивления $Z_0 = R_0 + jX_0$ активного элемента и комплексного сопротивления $Z_n = R_n + jX_n$ нагрузки посредством согласующего устройства, которое представляет собой, например, сложную резонансную цепь. Входное напряжение ДСГ, а также напряжение помехи может быть представлено эквивалентным источником $e_{\text{вх}}(t)$.

Предполагая анализируемый генератор гармоническим, выражение для тока в цепи запишем в виде

$$i(t) = \text{Re} [I(t)] = \text{Re} [A \exp j(\omega_0 t + \varphi)] = A \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (3)$$

Тогда по закону Кирхгофа для цепи последовательно соединенных z_0 , z_n , $e_{вх}(t)$ имеем $\operatorname{Re}\{I/z_0\} + \operatorname{Re}\{I/z_n\} = e_{вх}(t)$ (4), где $e_{вх}(t)$ — входное напряжение ДСГ, которое в общем случае включает в себя как напряжение синхронизации, так и напряжение помехи $e_{вх}(t) = e_c(t) + e_{ш}(t)$.

Для дальнейшего анализа воспользуемся методом, предложенным в работе [4]. Считаем, что комплексное сопротивление нагрузки Z_n в основном зависит от частоты колебаний ω генератора и не зависит от его амплитуды A : $Z_n = Z(\omega)$ (5), а комплексное сопротивление активного элемента — от амплитуды колебаний $Z_0 = Z(A)$ (6).

Несмотря на то что эти ограничения в реальных условиях не всегда справедливы, почти всегда реальную колебательную систему можно условно разделить на соответствующие части, зависящие только от амплитуды или частоты колебаний.

Из анализа производной тока в цепи ДСГ $di(t)/dt$ следует, что частота связана с изменением фазы и амплитуды колебаний следующим соотношением:

$$W = W_0 + \frac{d\varphi}{dt} - j \frac{1}{A} \frac{dA}{dt}. \quad (7)$$

Выражая трансформированное сопротивление нагрузки как функцию частоты, определяемой (7), и разлагая $Z_n(\omega)$ в ряд Тейлора, получаем

$$\begin{aligned} Z_n \left(W + \frac{d\varphi}{dt} - j \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right) &\cong Z_n(W) + \frac{dz_n(\omega)}{d\omega} \left[\frac{d\varphi}{dt} - j \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right] = \\ &= R_n(\omega) + jx_n(\omega) + \left[\frac{dR_n(\omega)}{d\omega} + j \frac{dx_n(\omega)}{d\omega} \right] \left[\frac{d\varphi}{dt} - j \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом этого уравнение (4) примет вид

$$\begin{aligned} \left[R_n - R_0 + \frac{\partial R_n}{\partial \omega} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\partial x_n}{\partial \omega} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right] A \cos(\omega_0 t - \varphi) \left[x_n + x_0 + \right. \\ \left. + \frac{\partial x_n}{\partial \omega} \frac{d\varphi}{dt} - \frac{\partial R_n}{\partial \omega} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right] A \sin(\omega_0 t + \varphi) = e_{вх}(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Полученное выражение связывает между собой изменение фазы $d\varphi/dt$ и амплитуды dA/dt колебаний в зависимости от напряжения входного сигнала ДСГ $e_{вх}(t)$. Для дальнейшего анализа целесообразно использовать графоаналитический метод, предложенный ранее как обладающий большей наглядностью при анализе синхронизируемых генераторов [4]. Для применения этого метода сначала будем считать генератор идеальным с точки зрения флюктуационных свойств, а источником всех флюктуаций и перестройки входное напряжение ДСГ, т. е. $e_{вх}(t)$.

Согласно условиям баланса фаз и амплитуд и зависимостей $Z_0(A)$, $Z_n(\omega)$ условие работы генератора будет соответствовать точке пересечения этих кривых (рис. 1).

Очевидно, что в результате воздействия аддитивной смеси входного сигнала и других дестабилизирующих факторов в цепи генератора произойдут изменения δA , $\delta \omega$ амплитуды и частоты колебания. Тогда $A = A_0 + \delta A(t)$ (10); $\omega = \omega_0 + \delta \omega(t)$ (11).

Отметим, что ход кривых $Z_0(A)$, $Z_H(\omega)$ может быть весьма разнообразен. Он зависит от типа активного элемента и типа колебательной системы ДСГ. Как показывает моделирование на ЭВМ, кривая $Z_H(\omega)$ в некоторых случаях описывает петлю. Это наблюдается, например, в случае, когда колебательная система состоит из двух или более контуров, а добротность первого контура Q_1 меньше добротности последующих. В общем случае условия генерации для идеального генератора могут выполняться в одной или нескольких точках. Некоторые из этих рабочих точек могут быть устойчивыми, а некоторые нет.

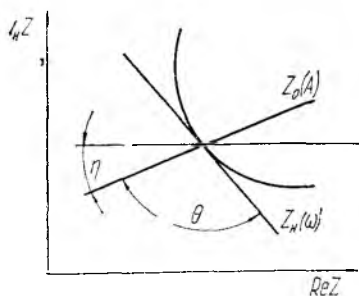


Рис. 1

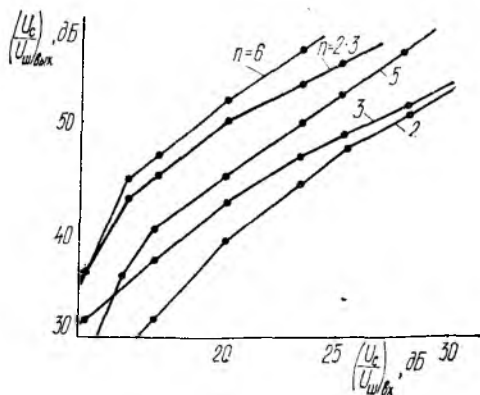


Рис. 2

В случае перестройки или синхронизации генератора рабочая точка перемещается по комплексной плоскости в соответствии с законом изменения соответствующего параметра эквивалентной схемы ДСГ. Очевидно, что эффективность перестройки генератора существенным образом зависит от угла пересечения кривых $Z_0(A)$, $Z_H(\omega)$.

Если предположить, что смещение рабочей точки от своего устойчивого положения в определенных пределах обусловлено входным сигналом ДСГ, то это и приведет к возникновению соответствующих составляющих в выходном спектре колебаний. Решая уравнение (9) с учетом условий установившегося режима $R_H - R_0 = 0$; $X_H - X_0 = 0$, обозначений рис. 1., а также используя теорему Хинчина—Винера, получаем выражения для спектра флуктуаций амплитуды $S_A(\omega)$ и частоты $S_\omega(\omega)$ выходного колебания в следующем виде:

$$S_A(\omega) = S_e(\omega) k_{ам}^{02} \quad (12); \quad S_\omega(\omega) = S_e(\omega) k_{чм}^{02} + S_A(\omega) k_{чм}^{12} \quad (13),$$

где

$$k_{ам}^{02} = \frac{1}{\omega^2 \left| \frac{dZ_H}{d\omega} \right|^2 + \left| \frac{\partial Z_0}{\partial A} \right|^2 A_0 \sin^2(\theta - \eta)}; \quad k_{чм}^{02} = \frac{1}{A_0^2 \left| \frac{dZ_H}{d\omega} \right|^2};$$

$$k_{чм}^{12} = \frac{\left| \frac{\partial Z_0}{\partial A} \right|^2 \cos^2(\eta - \theta)}{\left| \frac{dZ_H}{d\omega} \right|^2}.$$

Здесь $S_e(\omega)$ — спектр исходных флюктуаций источника неустойчивости; $k_{ам}^{02}$, $k_{чм}^{02}$, $k_{чм}^{12}$ — передаточные коэффициенты исходного флюктуационного воздействия в соответствующие компоненты выходного спектра ДСГ. Их значение и характер зависимости в значительной степени определяются параметрами θ , η , оптимизируя которые можно в значительной степени снизить уровень шума на выходе ДСГ.

В результате проведенного моделирования флюктуационных процессов, протекающих в генераторе, на ЭВМ получили ряд флюктуационных спектров $S_{\Delta\omega}$, S_{ω} в зависимости от параметров цепи нагрузки и параметров активного элемента. Результаты исследований показывают, что чем ближе угол пересечения ($\theta - \eta$) кривых $Z_n(\omega)$, $Z_0(A)$ к $\pi/2$, тем в большей степени выходной спектр колебаний определяется параметрами цепи нагрузки. Минимум практически достигается при углах пересечения порядка 85° , что соответствует минимуму корреляции между амплитудно- и частотно-модулированными компонентами. При этом существенно, что колебательную систему ДСГ необходимо проектировать так, чтобы значение $dZ_n/d\omega$ было максимально возможным.[†] Это условие практически совпадает с условием максимальной добротности колебательной системы. Отметим, что при этом сужается полоса синхронизации.

Уравнения (12), (13) упрощаем для практического использования. Например, если в качестве нагрузки $Z_n(\omega) = R_n + jX_n(\omega)$ использовать последовательный колебательный контур с нагруженной добротностью Q_n , а угол пересечения $\theta - \eta$ считать равным $\pi/2$, то получим следующие соотношения для определения уровня частотных и амплитудных флюктуаций ДСГ:

$$\frac{P_{ам}}{P_0} = \frac{e_{ш}(t)^2}{2[s^2 + 4\theta_n \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 P_0 R_n]}; \quad (14)$$

$$\delta\omega_{эфф} = \sqrt{\delta\omega(t)^2} = \frac{\omega_0}{Q_n} \sqrt{\frac{e_{ш}(t)^2}{2P_0 R_n}}, \quad (15)$$

где $P_{ам}$ — мощность шума помехи, обусловленная амплитудно-модулированными компонентами

$$s = \frac{dZ_0(A)}{dA} \frac{1}{R_n} A_0.$$

Для экспериментальных исследований изготовили несколько ДСГ, работающих в диапазоне частот порядка 100 мГц. Выбор диапазона частот обусловлен возможностями измерительной аппаратуры. Источником исходных флюктуаций служил генератор шума, выполненный на стабилитроне. Этот генератор совмещен с предварительным трехкаскадным широкополосным усилителем. Полученная аддитивная смесь входного сигнала синхронизации и помехи подавалась на вход делителя частоты. Соотношение сигнал-шум на входе и выходе ДСГ измерялось при помощи анализаторов спектра.

Экспериментально исследовали ДСГ с коэффициентами деления $n = 2$, $n = 3$, $n = 5$, $n = 6$, а также последовательно соединенные

ДСГ с $n = 2$ и $n = 3$, так что результирующий коэффициент деления $n = 2 \times 3 = 6$. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что при прохождении аддитивной смеси гармонического сигнала и шума через ДСГ на его выходе имеем существенный выигрыш в соотношении сигнал-шум. С увеличением коэффициента деления этот выигрыш увеличивается. Например, при $n = 6$ и соотношении сигнал-шум на входе ДСГ 20 дБ на его выходе получили соотношение сигнал-шум порядка 49 дБ.

Эксперимент также показал, что амплитуда входного сигнала, начиная со значения, необходимого для захватывания частоты, не оказывает существенного влияния на выходной сигнал, что обусловлено особенностями принципиальной схемы ДСГ. Однако от выходного сигнала существенно зависит полоса синхронизации. Кроме того, как отмечалось ранее, на полосу синхронизации существенное влияние оказывает нагруженная добротность колебательной системы. При экспериментальном исследовании добротность колебательной системы поддерживалась постоянной.

Результаты измерений полосы синхронизации в зависимости от амплитуды входного сигнала для фиксированного соотношения сигнал-шум на входе ДСГ, равного 25 дБ, и коэффициента деления $n = 3$ следующие:

$E, В$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\Delta f/f_0, \%$	0,8	1,2	1,5	1,8	1,0	1,1	2,2

Исследовали также прохождение смеси сигнала с шумом через два последовательно соединенных ДСГ с коэффициентами деления $n = 2$, $n = 3$. Полученные результаты сравнивались с характеристиками, полученными с помощью одного ДСГ с $n = 6$. Результаты измерений в первом приближении оказались одинаковыми. Однако при последовательном соединении наблюдается взаимное влияние ДСГ друг на друга, что приводит к образованию дополнительных регулярных составляющих в выходном спектре.

Список литературы: 1. Ризкин И. Х. Умножители и делители частоты.— М. : Связь, 1966.— 94 с. 2. Малахов А. Н. Флюктуации в автоколебательных системах.— М. : Наука, 1968.— 200 с. 3. Демьянченко А. Т. Синхронизация генераторов гармонических колебаний.— М. : Энергия, 1976.— 214 с. 4. Kurkawa K. Same basic characteristics of Broadband Negative Resistance Oscillator Circuits // Bell. Syst. Techn. J.— 1969.— 48.— P. 1937—1955.

Поступила в редколлегию 06.08.86