

*М. П. Савченко, О. В. Старовойтова*

## СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ФАЗОВЫХ ШУМОВ В АВТОГЕНЕРАТОРЕ С ВАРИКАПАМИ

*Предложен способ снижения фазовых шумов в генераторе, управляемом напряжением путем введения цепи отрицательной обратной связи по шумам, компенсирующей влияние флуктуаций амплитуды на значение средней за период колебания емкости варикапов и, следовательно, на фазу колебаний генератора. Установлена связь между уровнем флуктуаций амплитуды и величиной компенсации напряжения смещения.*

*A method for reducing phase noise in voltage-controlled oscillator by introducing negative feedback noise circuit, offsetting the effect of fluctuations in the amplitude on the variable-capacitance diode capacity is proposed. The relationship between the level of the amplitude fluctuations and the amount of compensation of the bias is defined.*

**Ключевые слова:** генератор, управляемый напряжением, варикап, фазовые шумы.

**Key words:** voltage controlled oscillator, variable-capacitance diode, phase noise.

В генераторах, управляемых напряжением с помощью варикапов (ГУН), при амплитудах колебания на варикапах, сравнимых по величине с напряжением управления частотой, существенный вклад в уровень фазовых шумов вносит преобразование амплитудных флуктуаций через воздействие на емкость варикапа в фазовые шумы [1]. Ослабление этого компонента позволяет значительно снизить фазовые шумы ГУН.

Наиболее распространенным способом борьбы с амплитудно-фазовым преобразованием в автогенераторах с варикапами является стабилизация амплитуды колебаний [2]. При этом уменьшение флуктуаций амплитуды колебаний приводит к снижению флуктуаций емкости ва-

рикапов и, как следствие, частоты колебаний. К недостаткам такого способа можно отнести невозможность регулирования амплитуды генератора в процессе эксплуатации. Известен способ [3] снижения фазовых шумов с помощью цепи отрицательной обратной связи по шумам (ООСШ), представляющей собой дискриминатор шума, состоящий из фазового детектора (ФД), элемента задержки (ЭЗ) и регулируемого фазовращателя. Цепь ООСШ выделяет из выходного сигнала генератора сигнал, пропорциональный фазовому шуму, и подает последний в соответствующей фазе, предварительно просуммировав его с управляющим напряжением, устанавливающим частоту генератора, на управляющий вход генератора. Недостатком этого способа является слабое снижение фазовых шумов при возмущениях фазы, длящихся более времени задержки, осуществляемого ЭЗ, т.е. низкая эффективность при медленных флуктуациях.

В данной работе предлагается способ снижения фазовых шумов ГУН путем введения цепи отрицательной обратной связи по шумам, вырабатывающей в соответствии с вольт-фарадной характеристикой варикапов напряжение, компенсирующее влияние флуктуаций амплитуды на значение средней за период колебания емкости варикапов и, следовательно, на частоту и фазу колебаний ГУН.

Суть способа можно пояснить с помощью схемы, представленной на рисунке. Схема ГУН включает в себя транзистор VT, конденсаторы обратной связи C1 и C2, разделительный конденсатор C<sub>p</sub>, через который транзистор соединен с параллельным колебательным контуром, включающим в себя катушку индуктивности L, встречно-последовательно соединенные варикапы VD1 и VD2, к общим электродам которых через цепь Z1( $\omega$ ) подается управляющее напряжение E.

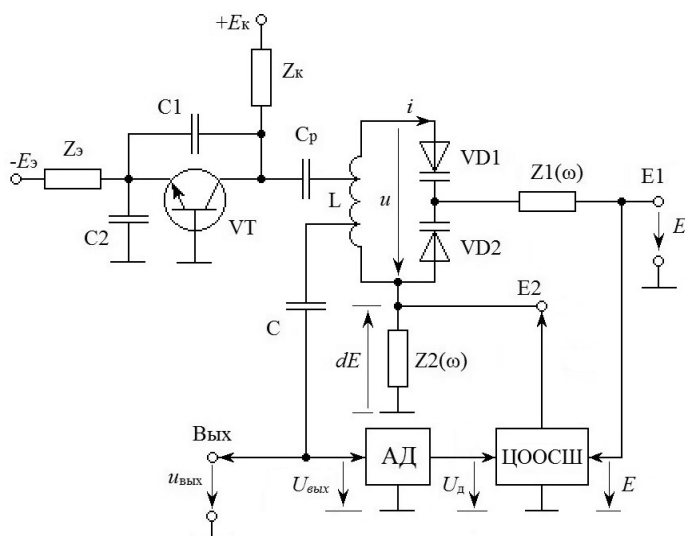


Рис. Управляемый напряжением автогенератор с малым уровнем фазовых шумов



Цепь  $Z1(\omega)$  обладает большим сопротивлением для тока с частотой колебаний в контуре, предотвращающим утечку контурного тока во внешнюю цепь, и конечным сопротивлением для постоянного тока и модулирующих частот. Выходной сигнал снимается непосредственно из контура. Автогенератор снабжен второй цепью управления варикапами  $Z2(\omega)$ , амплитудным детектором (АД) и цепью отрицательной обратной связи по шумам (ЦООСШ). Цепь  $Z2(\omega)$  является коротким замыканием для тока с частотой колебаний в контуре и конечным сопротивлением для постоянного тока и модулирующих частот. Она включена в разрыв между общей шиной («землей») и точкой E2 соединения варикапа с катушкой L. Точка E2 является входной точкой цепи  $Z2(\omega)$ .

Снижение уровня фазовых шумов ГУН достигается тем, что выходной сигнал с контура после детектирования АД поступает на первый вход ЦООСШ, где из него выделяются сигналы, пропорциональные абсолютному значению и флуктуациям амплитуды колебаний, которые соотносятся с величиной напряжения смещения  $E$  на втором входе и в соответствии с вольт-фарадной характеристикой варикапов вырабатывается компенсирующее напряжение  $dE$ , которое через цепь управления  $Z2(\omega)$  подается на варикапы так, чтобы при увеличении амплитуды сигнала ( $dU > 0$ ) модуль суммы напряжений внешнего смещения и компенсации ( $|E + dE|$ ) рос, а при уменьшении ( $dU < 0$ ) — падал. Вследствие этого влияние флуктуаций амплитуды колебания на значение средней за период колебания емкости ВПС, а значит и на фазу ГУН, уменьшается.

Установим связь между уровнем флуктуаций амплитуды  $dU$  и величиной напряжения компенсации  $dE$ . В стационарном режиме автогенератора напряжение  $u$  на контуре является гармоническим, частота колебаний  $\omega$  близка к резонансной частоте контура  $\omega_p$ , амплитуда колебаний —  $U$ . Варикап в контуре ГУН находится под воздействием постоянного напряжения смещения  $E$  и гармонического напряжения с амплитудой  $U_m$ :

$$u_b = E - U_m \cos(\omega t).$$

Для ВПС идентичных варикапов  $U_m = 0,5U$ . В случае варикапов с резким  $p$ - $n$  переходом эквивалентная емкость ВПС по первой гармонике может быть представлена выражением

$$C_{\Sigma}(E, U_m) = C_{0\Sigma}(E) \left( 1 - \frac{1}{8} \chi_m^2 \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $C_{0\Sigma}(E)$  — эквивалентная емкость ВПС при  $U_m = 0$ ;  $\chi_m = U_m / (E + \varphi_k)$  — относительная амплитуда колебания на одном варикапе;  $\varphi_k$  — контактная разность потенциалов  $p$ - $n$  перехода варикапа [4].

Флуктуации амплитуды при  $E = \text{const}$  приводят к изменению  $\chi_m$ , которое вызывает изменение эквивалентной емкости (1), что приводит к флуктуациям резонансной частоты контура

$$\omega_p = 1 / \sqrt{LC_{\Sigma}}$$



и, соответственно, фазы колебаний ГУН. Продифференцировав выражение (1), получим

$$dC_{\text{э}}(E, U_{\text{м}}) = \frac{\partial C_{\text{э}}}{\partial E} dE + \frac{\partial C_{\text{э}}}{\partial U_{\text{м}}} dU.$$

Чтобы  $\omega_p$  была неизменной, необходимо выполнение условия

$$dC_{\text{э}}(E, U_{\text{м}}) = 0,$$

т. е.

$$dE = - \frac{\partial C_{\text{э}} / \partial U_{\text{м}}}{\partial C_{\text{э}} / \partial E} dU. \quad (2)$$

Вольт-фарадная характеристика варикапов с резким  $p$ - $n$  переходом в отсутствие переменного напряжения хорошо аппроксимируется выражением

$$C_0(E) = C_{\varepsilon} \left( \frac{\varepsilon + \phi_{\kappa}}{E + \phi_{\kappa}} \right)^{1/2},$$

где  $C_{\varepsilon}$  — емкость  $p$ - $n$  перехода, измеренная при значении напряжения  $E = \varepsilon$  (указывается в паспорте варикапа) [5]. В выражении (1)  $C_{0\text{э}}(E) = 0,5C_0(E)$ . При этих условиях выражение (2) принимает вид

$$dE = \frac{\chi_{\text{м}}/8}{1 + \chi_{\text{м}}^2/8} dU. \quad (3)$$

Поскольку  $\chi_{\text{м}} \leq 1$ , то выражение (3) можно упростить:

$$dE \approx \frac{1}{8} \chi_{\text{м}} dU. \quad (4)$$

В соотношении (4) присутствует амплитуда колебаний на контуре  $U$ . В устройстве на рисунке сигнал поступает на выход с амплитудой  $U_{\text{вых}} = kU$  (где  $k < 1$ ), затем детектируется с коэффициентом детектирования  $k_{\text{д}}$ :  $U_{\text{д}} = k_{\text{д}}U_{\text{вых}}$  (где  $k_{\text{д}} < 1$ ). Выразим амплитуду  $U$  через  $k$ ,  $k_{\text{д}}$ ,  $U_{\text{д}}$  и подставим в (4). Получим функцию, которую должна реализовать цепь ООСШ:

$$dE = \frac{U_{\text{д}}^0/16}{(kk_{\text{д}})^2 (E + \phi_{\kappa})} dU_{\text{д}}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{д}}^0$  — среднее, стационарное значение амплитуды ( $U_{\text{д}} = U_{\text{д}}^0 + dU_{\text{д}}$ ).

Отметим, что в выражении (5) коэффициент пропорциональности между  $dE$  и  $dU$  не постоянен. Он зависит от амплитуды колебаний  $U$  и величины управляющего напряжения  $E$ , которые при перестройке частоты АГ меняются. Сама цепь ООСШ может быть реализована как на основе аналоговых, так и цифровых технологий.

#### Список литературы

1. Савченко М.П. Влияние нестабильности амплитуды колебаний и напряжения смещения на частоту автогенератора при встречно-последовательном соединении варикапов // Радиотехника. 1987. № 12. С. 16–18.



2. Генератор на транзисторе со стабилизацией амплитуды колебаний при помощи диода в цепи положительной обратной связи : пат. US 3855550(A), кл. 331-109, H03b 3/02, H03b 5/12 ; заявл. 24.08.73, опубл. 17.12.74.

3. Управляемый по частоте источник сигналов, имеющий цепь обратной связи, служащую для снижения фазовых шумов (Controlled frequency signal source apparatus including a feedback path for the reduction of phase noise) : пат. 4336505, США № 168065 ; МКИ H03L 7/00, H03L 7/18, НКИ 331/R ; заявл. 14.07.80, опубл. 22.06.82.

4. Кулешов В. Н., Савченко М. П. Эквивалентная емкость ВПС варикапов // Радиоэлектроника. 1988. № 2. С. 71 – 74.

5. Савченко М. П., Карпинская Т. А. Эквивалентная схема и параметры УКВ варикапов // Радиотехника. 1985. № 11.

#### Об авторах

75

Михаил Петрович Савченко – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: savchenkomp@mail.ru

Ольга Владимировна Старовойтова – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: ostar39@mail.ru

#### About the authors

Mikhail Savchenko, PhD, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: savchenkomp@mail.ru

Olga Starovoitova, lecturer, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: ostar39@mail.ru