

УДК 621.373.12

RC-генераторы, управляемые по частоте напряжением

Е. М. Дроздова*

Исследованы две схемы RC-генераторов почти гармонических колебаний, управляемых по частоте напряжением (RC-ГУН ПГК), основанных на двух классах RC-автогенераторов: однокольцевом RC-автогенераторе с мостом Вина, дополненном системой автоматической регулировки амплитуды (АРА), и RC-автогенераторе с режекторным фильтром (РФ) в виде двойного T-моста. Управление частотой в рассматриваемых генераторах осуществляется с помощью варикапов, включенных в цепи обратных связей. Получены выражения для расчета модуляционных характеристик исследуемых схем RC-ГУН. Предложена методика расчета флуктуационных характеристик RC-ГУН ПГК. Приведены аналитические формулы для расчета спектральной плотности мощности фазовых шумов RC-ГУН с учетом тепловых шумов резисторов цепей обратных связей (ОС) и цепей управления. Показано, что уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов RC-ГУН ПГК определяется в основном тепловыми шумами резисторов цепей обратных связей, а цепи управления частотой вносят пренебрежимо малый вклад в общий фазовый шум. Для всех схем аналитически полученные результаты проверены и подтверждены компьютерным моделированием в схемотехническом пакете Advanced Design System. Проведено сравнение рассмотренных в статье RC-ГУН характеристик. Показано, что уровень СПМ фазового шума в RC-ГУН с РФ при одинаковых уровнях нелинейных искажений примерно на 5 дБн/Гц ниже, чем в RC-ГУН с мостом Вина в цепи ОС. Для обоих сравниваемых RC-ГУН рассчитаны зависимости частот и амплитуд автоколебаний от напряжений на варикапах при перестройке по частоте в 4 раза и изучено влияние изменения температуры на эти характеристики в интервале от -20 до $+50$ °С. Оказалось, что в ГУН с мостом Вина и АРА как амплитуда, так и частота автоколебаний, изменяются не более, чем на 1%. В RC-ГУН с РФ при тех же условиях амплитуда меняется почти на 15%, а частота — на 2%.

Ключевые слова: RC-генераторы, управляемые напряжением, фазовый шум, автоматическая регулировка амплитуды.

Введение

Генераторы гармонических колебаний, управляемых по частоте напряжением, широко используются в качестве опорных в измерительной технике, телекоммуникационных системах в составе источников переменного сигнала, системах управления и др. В устройствах мегагерцового диапазона частот RC-генераторы, управляемые по частоте напряжением (RC-ГУН), при одинаковых изменениях управляющего напряжения имеют значительно больший диапазон перестройки по

частоте по сравнению с LC-генераторами, обладают малыми габаритами и просты в изготовлении. Требования, предъявляемые современными приложениями к кратковременной стабильности частоты RC-ГУН, делают задачу разработки методов расчета и прогноза флуктуационных характеристик таких автогенераторов актуальной.

В [1, 2] были рассмотрены два класса RC-автогенераторов (RC-АГ) почти гармонических колебаний (ПГК), проведено их сравнение и показано, что основным недостатком однокольцевых генераторов является необходимость их работы на границе самовозбуждения. Одним из способов увеличить запас по самовозбуждению при генерации больших амплитуд

* drozdovaem1989@mail.ru

напряжения и малых уровнях нелинейных искажений является использование системы автоматической регулировки амплитуды (АРА). В [3] представлены результаты исследования однокольцевого RC -АГ ПГК с мостом Вина и системой АРА, которые показывают, что такая система позволяет не только увеличить запас по самовозбуждению, но и повысить стабильность амплитуды колебаний при изменении температуры и параметров схемы.

Настоящая работа посвящена исследованию двух схем RC -ГУН ПГК с системой АРА. Предложена методика расчета флуктуационных характеристик RC -ГУН ПГК с учетом источников шумов цепей управления. Проведено сравнение по режимным и флуктуационным характеристикам.

Флуктуационные характеристики RC -ГУН

На основе схем, рассмотренных в [1, 3] были построены две схемы RC -ГУН: RC -ГУН с мостом Вина в цепи положительной обратной связи (ПОС) и системой АРА (рис. 1) и RC -ГУН с режекторным фильтром (РФ) в цепи отрицательной обратной связи (ООС) (рис. 2). Управление частотой осуществлялось с помощью варикапов. Модуляционную характеристику в этих схемах можно определить выражением:

$$f_{\text{ГУН}}(E_y) = \frac{1}{2\pi RC_B(E_y)}, \quad (1)$$

где E_y — управляющее напряжение варикапов;

$$C_B(E_y) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{E_y}{U_k}}} \text{ — вольт-фарадная характеристика}$$

варикапа; C_0 — номинальная емкость при нулевом смещении; U_k — контактная разность потенциалов.

Одним из важнейших показателей качества ГУН является уровень его фазовых шумов. В [2] для однокольцевых RC -автогенераторов на основе развития метода укороченных уравнений С. И. Евтянова было получено вещественное укороченное символическое уравнение для флуктуаций фазы при воздействии тепловых шумов цепи обратной связи АГ:

$$T_{\varphi a} p \Phi_{\varphi} = \left[\frac{T_{\varphi a} p + (1 + r_{a\varphi}^2) \Pi_{\text{ПЦ}}}{T_{\varphi a} p + \Pi_{\text{ПЦ}}} \right] \frac{U_{\text{ш.С}}}{U_{\text{ст}}} + r_{a\varphi} \Phi h_{1\text{ст}} \left[\frac{T_{\varphi a} p}{T_{\varphi a} p + \Pi_{\text{ПЦ}}} \right] \frac{U_{\text{ш.С}}}{U_{\text{ст}}}, \quad (2)$$

где $p = d/dt$ — оператор дифференцирования; $\Pi_{\text{ПЦ}} = 1 - \Phi h_{1\text{ст}}$ — прочность предельного цикла; $h_1(U) = (dV_1(U)/dU)$ — коэффициент преобразования малых изменений амплитуды колебательной характеристикой усилителя; $V_1(U)$ — амплитуда первой гармоники разложения в ряд Фурье нечетной функции $V(U)$, характеризующей нелинейность усилителя; $T_{\varphi a} = T_{\varphi} (1 + r_{a\varphi}^2)$ — обобщенная постоянная времени автогенератора;

$$r_{a\varphi} = T_a / T_{\varphi}, \quad T_a = - \left(\frac{d[\ln |K_{\text{цос}}(j\omega)|]}{d\omega} \right)_{\omega = \omega_{\text{ар}}},$$

$$T_{\varphi} = - \left(\frac{d\varphi_{\text{цос}}(j\omega)}{d\omega} \right)_{\omega = \omega_{\text{ар}}}; \quad K_{\text{цос}}(j\omega), \varphi_{\text{цос}}(j\omega) \text{ — АЧХ и}$$

ФЧХ цепи обратной связи RC -АГ; Φ — запас по самовозбуждению АГ; $\omega_{\text{ар}} = 2\pi f_{\text{ар}}$ — частота автоколебаний;

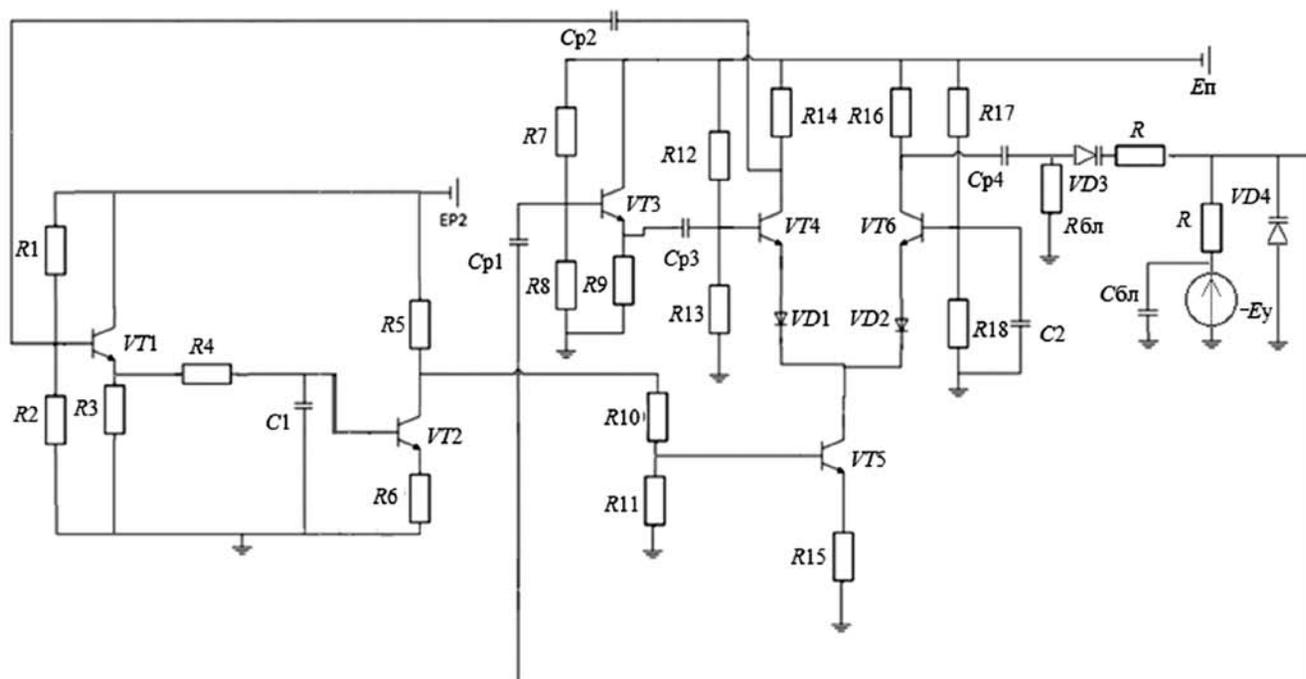


Рис. 1. Электрическая схема RC -ГУН с мостом Вина с системой АРА

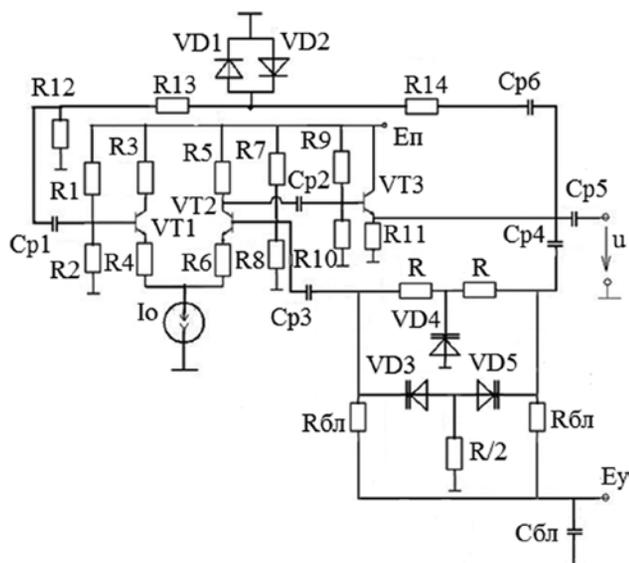


Рис. 2. Электрическая схема RC-ГУН с РФ

φ_ϕ — относительные флуктуации фазы; $U_{ст}$ — амплитуда стационарного режима напряжения на входе активного прибора АГ; $U_{ш,с}$, $U_{ш,с}$ — косинусная и синусная составляющие шумового напряжения.

Заметим, что для автогенератора с мостом Вина коэффициент $r_{эф} = 0$, т.е. для этого АГ отсутствует влияние на флуктуации фазы амплитудно-частотного преобразования, что делает RC-АГ с мостом Вина лучшим по шумовым характеристикам среди класса однокольцевых RC-АГ.

Используя теорию линейных преобразований стационарных случайных процессов, из символического уравнения (2), для RC-АГ с мостом Вина было получено следующее выражение для расчета спектральной плотности мощности (СПМ) относительных флуктуаций фазы автоколебаний [2]:

$$S_{\varphi\phi}(F) = \frac{f_{ар}^2}{\tau_\phi^2 F^2} \frac{8k_B T^\circ [R/3]}{(U_0 / K_U)^2}, \quad (3)$$

где K_U — коэффициент усиления активного прибора; $\tau_\phi = \omega_{ар} T_\phi$; F — частота отстройки от несущей; k_B — постоянная Больцмана; T° — абсолютная температура; U_0 — амплитуда выходного напряжения АГ на выходе активного прибора.

Аналогично в [1] для двухкольцевого RC-АГ с РФ было получено вещественное укороченное символическое уравнение для флуктуаций фазы при воздействии тепловых шумов цепи обратной связи АГ:

$$Tр_{\varphi\phi} = \Phi k_{ос}^{-1} (U_{ш,с} / U_0), \quad (4)$$

где $T = \frac{1}{2} (K_U + 1) T_M$; $T_M = RC$ — постоянная времени, характеризующая частотные свойства ТТ-моста; $k_{ос} = R_{12} / (R_{12} + R_{13} + R_{14})$ — коэффициент передачи цепи

ПОС для малых колебаний, при которых диоды VD1 и VD2 в амплитудном ограничителе не открываются.

С помощью уравнения (4) получено следующее выражение для расчета СПМ относительных флуктуаций фазы автоколебаний [1]:

$$S_{\varphi\phi}(F) = \frac{f_{ар}^2}{[(1 + K_U^{-1})/2]^2 F^2} \frac{8k_B T^\circ [(R/2) + R_{12}]}{U_0^2}. \quad (5)$$

Уравнения (3), (5) позволяют рассчитать СПМ флуктуаций фазы колебаний в рассматриваемых RC-АГ, а, следовательно, и уровень их фазовых (ФМ) шумов при относительно небольших (в пределах $\pm 10\%$) отстройках от центральной частоты. Относительные уровни СПМ ФМ шумов RC-АГ при отстройках от центральной частоты автоколебаний, равных ($\pm F$), выражаются в децибелах относительно мощности несущего колебания и рассчитываются по формулам:

$$L_{\varphi,В}(F) = 10 \lg(S_{\varphi,В}(F)) - 3 \text{ дБн/Гц}; \quad (6)$$

$$L_{\varphi,РФ}(F) = 10 \lg(S_{\varphi,РФ}(F)) - 3 \text{ дБн/Гц}$$

Пользуясь теми же алгоритмами можно получить параметрическую зависимость уровня СПМ ФМ шума от управляющего напряжения. В общем случае частота ω_y установившихся колебаний, отличается от рассчитанной $\omega_{ГУН} = 2f_{ГУН}$ на величину поправки, т.е. формула для расчета частоты установившихся колебаний имеет вид:

$$\omega_y = \omega_{ГУН} + \frac{d\Phi_\Gamma}{dt},$$

где $d\Phi_\Gamma/dt$ — флуктуации угловой частоты, состоящие, в общем случае, из трех слагаемых [4]:

$$\frac{d\Phi_\Gamma}{dt} = \frac{d\Phi_{\Gamma,а}}{dt} + \frac{d\Phi_{\Gamma,ГУН}}{dt} + \frac{d\Phi_{\Gamma,Ф}}{dt}. \quad (7)$$

В соотношении (7) $d\Phi_{\Gamma,а}/dt$ — флуктуации опорной частоты, вызванные изменением амплитуды автоколебаний:

$$\frac{d\Phi_{\Gamma,а}}{dt} = \frac{\partial \omega_{ГУН}}{\partial U_0} U_0 a_\Gamma(t),$$

где $a_\Gamma(t)$ — относительные флуктуации амплитуды; $d\Phi_{\Gamma,ГУН}/dt$ — флуктуации опорной частоты, вызванные шумами цепи управления:

$$\frac{d\Phi_{\Gamma,ГУН}}{dt} = \frac{\partial \omega_{ГУН}}{\partial E_y} E_{ш,уч},$$

где $E_{ш,уч}$ — модулирующее напряжение с учетом естественных шумов цепей управления; $d\Phi_{\Gamma,Ф}/dt$ — флуктуации поправки на частоту, вызванные флуктуациями фазового сдвига по кольцу обратной связи, вносимыми шумами цепи обратной связи и усилителя:

$$\frac{d\Phi_{\Gamma\Phi}}{dt} = \frac{d\phi_{\Phi}}{dt}.$$

В рассмотренных схемах RC-ГУН вклад первого слагаемого в выражении (7) очень мал по сравнению с остальными.

Рассмотрим влияние шумов цепи управления на общий уровень фазового шума ГУН.

Составляющие ФМ шумов ГУН из-за наличия цепей управления можно рассчитать следующим образом:

$$\Phi_{\Gamma, \text{ГУН}} = \frac{2\pi}{p} \sigma_{\text{МХ}}(E_y, U_0) \Delta E_{\text{Ш}}(t), \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{МХ}} = \frac{\partial \omega_{\text{ГУН}}}{\partial E_y} = 2\pi \frac{\partial f_{\text{ГУН}}}{\partial E_y}$ — крутизна статической модуляционной характеристики ГУН; $\Delta E_{\text{Ш}}(t)$ — шумовое напряжение цепей управления.

Из (8) вытекает следующее выражение для расчета СПМ флуктуаций фазы автоколебаний, вносимых вариациями:

$$S_{\Phi, \text{ГУН}}(F) = \frac{1}{F^2} \sigma_{\text{МХ}}^2 S_{U_{\text{Ш,УЧ}}}(F). \quad (9)$$

Здесь $S_{U_{\text{Ш,УЧ}}} = 4kT \text{Re}(Z_{\text{вх,М}})$ — СПМ собственных естественных шумов цепи подачи модулирующего напряжения; $Z_{\text{вх,М}}$ — входное сопротивление модулятора. Полная СПМ фазового шума ГУН является суммой СПМ шумов. Соответствующий уровень СПМ ФМ шума, вносимого цепями управления, определяется как:

$$L_{\Phi, \text{ГУН}}(F) = 10 \lg [S_{\Phi, \text{ГУН}}(F)] - 3, \text{ дБн/Гц} \quad (10)$$

Для рассматриваемых ГУН на частоте отстройки от несущей $F = 1$ кГц, для $E_y = -5$ В при изменении $\text{Re}(Z_{\text{вх,М}})$ от 50 Ом до 1 кОм $L_{\Phi, \text{ГУН}}(F)$ меняется от -182,0 до -169 дБн/Гц; для $E_y = -30$ В — от -187,8 до -174,8 дБн/Гц. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что вклад этих шумов очень мал и для оценки СПМ ФМ шумов RC-ГУН им можно пренебречь.

Рассмотрим влияние перестройки частоты на уровень шума АГ. Сначала возьмем однокольцевой генератор с мостом Вина. В [3] было показано, что система АРА вносит пренебрежимо малую добавку в общий уровень ФМ шума АГ. Пользуясь выражением (3), учитывая зависимость частоты от управляющего напряжения (1), получим следующее выражение для СПМ ФМ шума:

$$S_{\Phi\text{В}}(F, E_y) = \frac{1}{\left((2\pi RC_{\text{В}}(E_y))^2 T_{\Phi} F \right)^2} \times \frac{8k_{\text{Б}} T^{\circ} [R/3]}{\left(\frac{U_0}{K_U} \right)^2} + S_{\Phi, \text{ГУН}}(F, E_y). \quad (11)$$

Аналогично, пользуясь выражением (5), получим зависимость уровня СПМ ФМ шума от управляющего напряжения для двухкольцевого генератора с режекторным фильтром в цепи ООС:

$$S_{\Phi\text{РФ}}(F, E_y) = \frac{1}{\left(\frac{1+K_U^{-1}}{2} \right)^2 (2\pi RC_{\text{В}}(E_y) F)^2} \times \frac{8k_{\text{Б}} T^{\circ} [(R/2) + R_{12}]}{U_0^2} + S_{\Phi, \text{ГУН}}(F, E_y). \quad (12)$$

Исследование и сравнение RC-ГУН

Для исследования ГУН было проведено компьютерное моделирование в среде Advanced Design System (ADS). Сравнение ГУН проводилось при условии равенства управляющих напряжений, параметров мостов и амплитуд выходных сигналов. Прежде всего, проверялась правильность полученных теоретически результатов — сравнивалась модуляционная характеристика и зависимость уровня СПМ ФМ шума от величины управляющего напряжения. На рис. 3, 4 сплошными линиями показаны результаты теоретического расчета, точками — результаты моделирования полигармоническим методом в среде ADS. СПМ ФМ шума рассчитывалась на отстройке от несущей частоты в 100 кГц. В таблице представлены количественные результаты

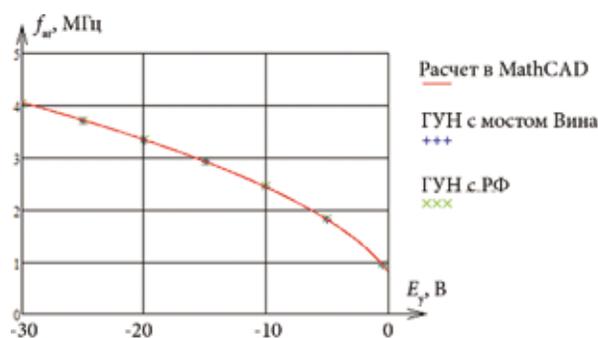


Рис. 3. Модуляционная характеристика ГУН, полученная теоретически и с помощью компьютерного моделирования

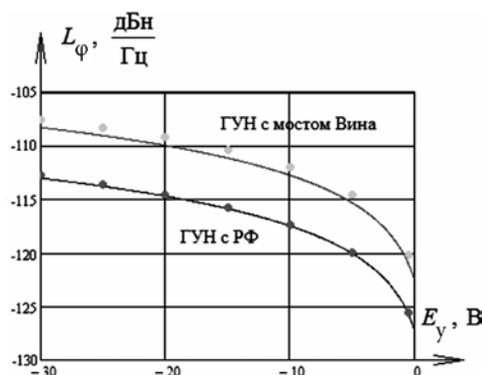


Рис. 4. Зависимость уровня СПМ ФМ шума от управляющего напряжения на частоте отстройки 100 кГц, полученная теоретически и с помощью компьютерного моделирования

Количественные результаты теоретического расчета и моделирования

$E_y, В$	Параметр						
	$f, МГц$			$L_\phi, дБн/Гц$			
	Тип ГУН						
	с мостом Вина		с РФ	с мостом Вина		с РФ	
	метод расчета						
Теор.	ADS	ADS	Теор.	ADS	Теор.	ADS	
-0,5	0,95	0,95	0,97	-120,9	-120,2	-125,7	-125,5
-5	1,81	1,80	1,83	-115,3	-114,1	-120,1	-119,9
-10	2,43	2,42	2,45	-112,8	-112,0	-117,5	-117,4
-15	2,92	2,92	2,93	-111,2	-110,4	-115,9	-115,8
-20	3,35	3,34	3,34	-109,9	-109,3	-114,7	-114,6
-25	3,72	3,71	3,70	-109,1	-108,4	-113,8	-113,6
-30	4,06	4,04	4,03	-108,3	-107,6	-113,1	-112,8

теоретического расчета и моделирования. Видно, что зависимости частоты и СПМ ФМ шума ГУН от управляющего напряжения, полученные с помощью компьютерного моделирования полигармоническим методом, с достаточной точностью сходятся с зависимостями, рассчитанными по формулам (1), (6) (11), (12) в пакете MathCAD, что доказывает справедливость представленного метода.

Другими важными показателями качества ГУН являются температурная стабильность частоты и изменение амплитуды первой гармоники выходного напряжения при изменении управляющего напряжения. Их графики представлены на рис. 5, 6.

Заключение

Таким образом, в работе предложены и исследованы две схемы RC-ГУН ПГК с перестройкой частоты в 4 раза, основанные на схемах двух классов RC-АГ. Показано, что уровень СПМ ФМ шумов RC-ГУН ПГК определяется, в основном, тепловыми шумами цепи обратной связи, а цепи управления частотой вносят пренебрежимо малый вклад в общий фазовый шум RC-ГУН. Проведено сравнение RC-ГУН по их основным показателям качества. Показано, что RC-ГУН с РФ имеет более низкий уровень СПМ фазового шума, чем RC-ГУН с мостом Вина. Но при использовании системы АРА, RC-ГУН с мостом Вина имеет лучшую стабильность амплитуды и частоты. В зависимости от решаемой прикладной задачи и требований, предъявляемых к показателям качества, использование преимуществ каждой схемы позволит получить оптимальные решения важных для практики задач.

Литература

1. Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М. Спектральные и шумовые характеристики RC-автоге-

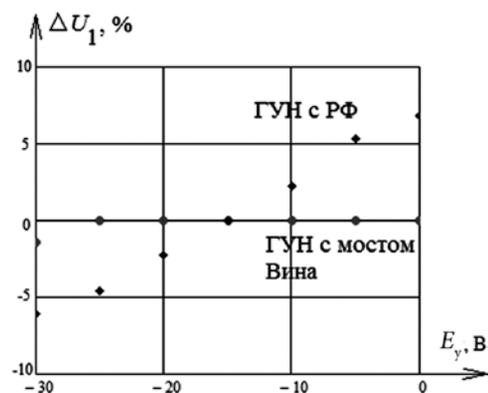


Рис. 5. Изменение амплитуды первой гармоники выходного напряжения при изменении управляющего напряжения

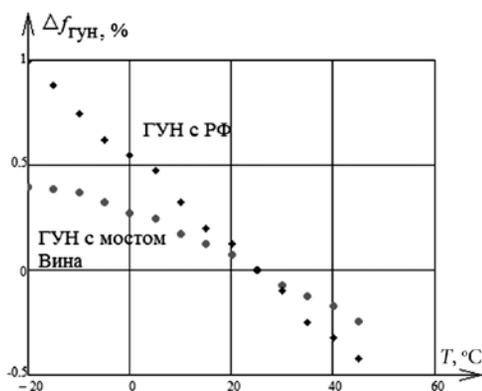


Рис. 6. Изменение частоты автоколебаний при изменении температуры

нераторов гармонических колебаний // Электросвязь. 2015. № 5. С. 35 — 38

2. Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Дроздова Е.М. Исследование режимных и шумовых характеристик RC-автогенераторов гармонических колебаний методом укороченных символических уравнений С. И. Евтянова // Вестник МЭИ. 2013. № 5. С. 76 — 82

3. **Болдырева Т.И., Дроздова Е.М.** RC-автогенератор с мостом Вина в цепи ОС и системой АРА // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО-2015: Междунар. науч.-техн. семинар. М.: ООО «Брис-М», 2015.

4. **Кулешов В.Н., Кувшинов В.В., Болдырева Т.И.** Об использовании квазилинейного метода при проектировании малозумящих ГУН СВЧ на коаксиальных керамических резонаторах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 13 — 20.

Статья поступила в редакцию 12.01.2016