

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В АВТОГЕНЕРАТОРАХ НА РАЗНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Проведено исследование характеристик высокочастотных автогенераторов на разных транзисторах. Рассмотрено влияние шумов транзистора на флуктуации автогенераторов. Отмечено, что в генераторах с меньшей неизохронностью и меньшими углами отсечки тока транзистора флуктуации автоколебаний существенно ниже. Сформулированы рекомендации по выбору транзисторов и режима их работы для построения маломушмящих автогенераторов.

A study of the characteristics of high-frequency oscillators on different transistors. The influence of transistor noise on fluctuations is considered. It is noted that in generators with a smaller nonisochronicity and with smaller cut-off angles of the current of the transistor, the fluctuations of self-oscillations are significantly lower. Formulated recommendations on the choice of transistors and their mode of operation for the construction of low-noise oscillators.

Ключевые слова: транзисторный автогенератор, эквивалентная шумовая схема транзистора, шумовое напряжение, отношение шум / сигнал, флуктуации фазы автоколебаний.

Keywords: transistor oscillator, equivalent noise circuit of transistor, noise voltage, noise-signal ratio, phase fluctuations of self-oscillations.

Высокочастотные транзисторные автогенераторы (АГ) находят широкое применение в телекоммуникационных системах и высококачественной измерительной аппаратуре. Важным показателем качества таких генераторов является уровень флуктуаций фазы автоколебаний.

Постановка задачи. Для оптимизации по флуктуациям АГ и инженерного проектирования маломушмящих АГ представляют интерес выявление доминирующей причины увеличения фазовых флуктуаций и анализ возможностей снижения их уровня. Задача исследования состояла в том, чтобы определить условия, при которых возможно снижение флуктуаций фазы в АГ, и выработать рекомендации по выбору транзисторов и режима их работы для построения маломушмящих АГ.

Схема автогенератора и способ измерения флуктуаций. Исследование проводилось на макете АГ (рис. 1). В качестве транзистора VT1 использовались СВЧ-транзисторы 2Т371А, 2Т637А-2, 2Т640А-2. Первый из них является маломощным, два других – средней мощности. Ток эмиттера транзистора $I_{Э0}$ устанавливался резистором R_1 , амплитуда колебаний на коллекторе U_C измерялась высокочастотным вольтметром, подключенным через делитель 1:10 на конденсаторах C_{C1} и C_{C2} .

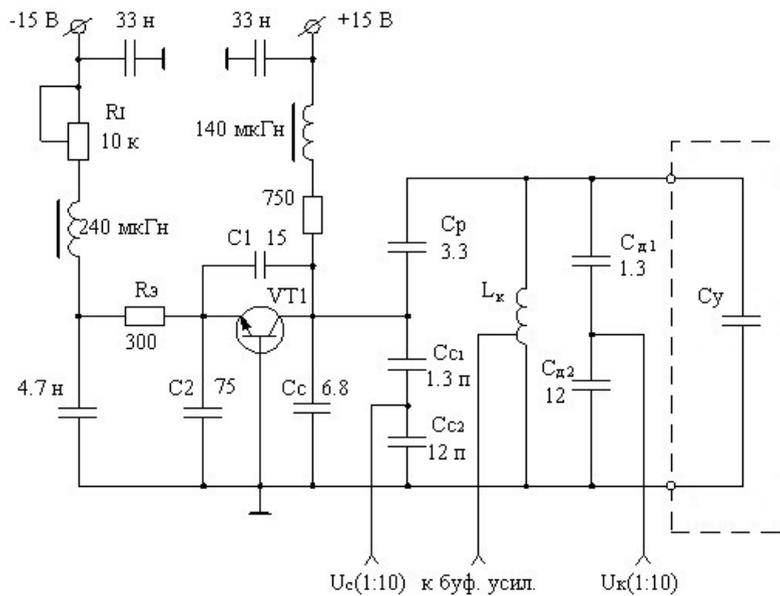


Рис. 1. Принципиальная схема макета автогенератора

Перестройка по частоте осуществлялась с помощью набора керамических конденсаторов C_y разной емкости. В экспериментах за меру флуктуаций принято отношение шум / сигнал ($\text{Ш}/\text{С}$) в полосе 1 Гц, которое, как известно [1], при отстройках Δf ($2\pi\Delta f = \Omega$) от несущей частоты, значительно меньших полуширины полосы контура АГ, равно

$$\frac{\text{Ш}}{\text{С}} = \frac{1}{2} S_{\phi}^{\text{АГ}}(\Omega), \quad (1)$$

где $S_{\phi}^{\text{АГ}}(\Omega)$ – спектральная плотность флуктуаций фазы автоколебаний.

Исследуемый сигнал снимался с контура АГ и подавался на вход малозумящего буферного усилителя с единичным коэффициентом передачи. Измерение $\text{Ш}/\text{С}$ проводилось гетеродинным методом [2] в полосе 3000 Гц, результаты затем пересчитывались в отношение $\text{Ш}/\text{С}$ в полосе 1 Гц. Шумы анализировались при $\Delta f = 20\text{кГц}$.

Результаты исследований. На рисунке 2 показаны зависимости эффективного значения амплитуды колебаний на коллекторе $U_{\text{сэфф}}$ транзистора и отношения $\text{Ш}/\text{С}$ от величины постоянной составляющей тока эмиттера транзистора $I_{\text{э0}}$. На рисунке 3 построены зависимости относительного изменения частоты АГ $\Delta f/f_0$ в процентах от амплитуды колебаний $U_{\text{сэфф}}$. На рисунках пунктирными линиями 1 построены экспериментальные зависимости, полученные в АГ с транзистором 2ТЗ71А. Рядом сплошными линиями 1 нанесены рассчитанные характеристики. Другие линии описаны ниже.

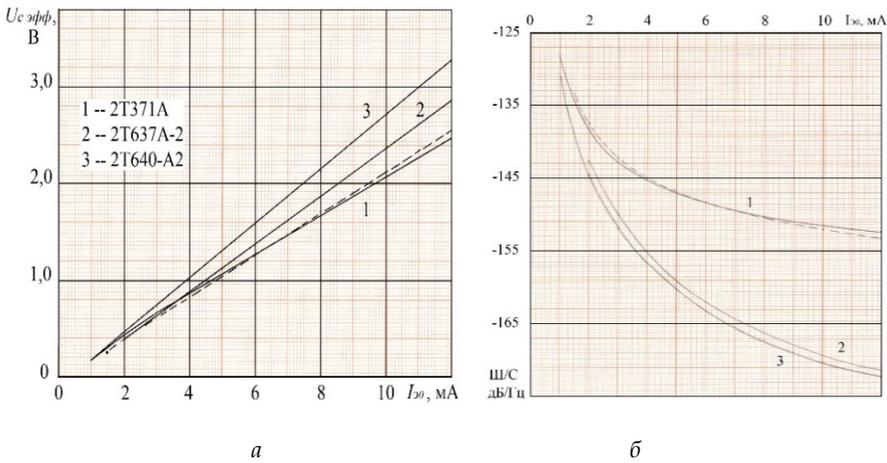


Рис. 2. Зависимость от тока транзистора $I_{э0}$ на частоте 118,3 МГц: а – амплитуды колебаний; б – отношения Ш/С

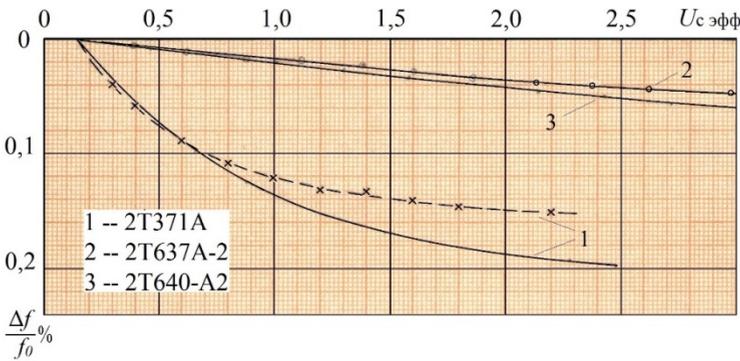


Рис. 3. Зависимость относительного изменения частоты АГ от амплитуды колебаний

Расчет характеристик автогенератора проводился на ЭВМ по программе, составленной на основе модели АГ, которая была изложена в работах [3–9].

Из рисунка 2 видно, что экспериментальные и рассчитанные зависимости для транзистора 2Т371А практически совпали. На рисунке 3 эксперимент и расчет различаются на сотые доли процента. Это говорит о том, что построенная модель АГ верно описывает процессы в автогенераторе и результатам расчета можно доверять.

На основании этого исследование автогенератора с транзисторами 2Т637А-2 и 2Т640А-2 проводилось уже методом численного эксперимента. Смена транзистора заключалась в замене в программе расчета параметров одного транзистора на параметры другого, прочие элементы схемы АГ оставались без изменения. Частота колебаний автогенератора f_0 с разными транзисторами отличалась не более чем на 0,1%, то есть была одинаковой, как и добротность контура $Q_K = 115,5$. Линии 2



и 3 на рисунках 2 и 3 построены для АГ с транзисторами 2Т637А-2 и 2Т640А-2 соответственно. Справочные данные транзисторов [10; 11], использованные в расчетах, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры транзисторов

Параметры	2Т371А	2Т637А-2	2Т640А-2
Статичный коэффициент усиления по току β_o , ед.	80	90	90
Граничная частота транзистора f_T , Гц	$4,2 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$
Емкость коллектора C_k , пФ	0,72	2,7	0,9
Постоянная времени коллектора τ_{ck} , пс	7,6	1,0	0,6
$K_C = (C_{кп}/C_{ка})$, ед	1	2	2
Напряжение отсечки E' , В	0,675	0,675	0,675
Индуктивность эмиттера $L_э$, нГн	6,0	0,3	0,5
Ток коллектора максимальный $I_{К МАХ}$, мА	20	200	60
Напряжение коллектора – база максимальная $E_{КБ МАХ}$, В	15	30	25

Примечание. В первом параметре приведены типовые значения.

Рисунок 2, а показывает, что для всех транзисторов связь между током эмиттера и амплитудой колебаний практически линейная. При этом замена маломощного 2Т371А на транзисторы средней мощности 2Т637А-2 и 2Т640А-2 приводит к заметному увеличению амплитуды сигнала при равных значениях тока. Наибольшая амплитуда получается в АГ с 2Т640А-2. Отношение Ш/С на рисунке 2, б для всех транзисторов с ростом тока монотонно убывает. Переход от маломощного 2Т371А к транзисторам средней мощности позволяет снизить отношение Ш/С, причем с ростом тока выигрыш также растет и достигает 19–20 дБ. Наименьшее отношение Ш/С в АГ с 2Т640А-2.

Обсуждение результатов исследования. Выясним, какова причина столь значительного снижения шумов автогенератора. На рисунке 4 построены зависимости отношения Ш/С рисунка 2, б от амплитуды колебаний рисунка 2, а. Этот рисунок позволяет сравнить шумовые характеристики автогенераторов при равных амплитудах, то есть равной мощности сигнала.

Различие характеристик означает различие в мощности шумов АГ. Из рисунка 4 видно, что в момент самовозбуждения шумы во всех генераторах близки, а с ростом амплитуды колебаний (тока эмиттера) отношение Ш/С в АГ с 2Т371А убывает в среднем на 5–6 дБ при удвоении амплитуды, в АГ с 2Т637А и 2Т640А – на 9–10 дБ. Такое поведение линии 1 означает, что в АГ с 2Т371А снижение Ш/С происходит за счет роста мощности сигнала (6 дБ при удвоении амплитуды), а мощность шума почти постоянна. Линии 2, 3 свидетельствуют о том, что в



автогенераторах помимо роста мощности сигнала происходит снижение мощности шума на 3–4 дБ при удвоении амплитуды. Шумы в АГ с транзисторами 2Т637А-2 и 2Т640А-2 (линии 2, 3) во всем диапазоне изменения амплитуды разнятся незначительно. Наименьшие шумы в АГ с 2Т637А-2.

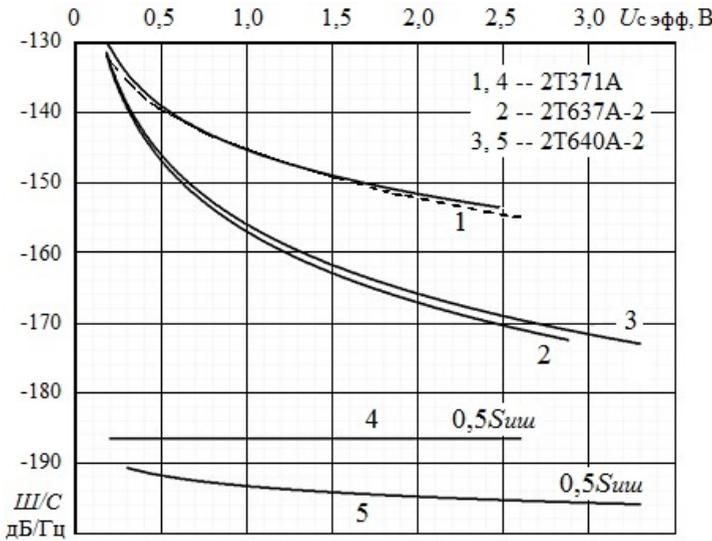


Рис. 4. Зависимость отношения шум / сигнал от амплитуды колебаний

Тот факт, что на рисунках 2, 3 и 4 зависимости для транзисторов 2Т637А-2 и 2Т640А-2 почти совпали, позволяет сделать вывод о схожести характеристик автогенераторов на этих транзисторах и в дальнейшем рассматривать только один из них. При этом отметим, что при одинаковых токах транзистор 2Т640А-2 за счет более высокой амплитуды колебаний обеспечивает Ш/С на 1–1,5 дБ меньше, чем 2Т637А-2 (рис. 2, б), зато при равных амплитудах последний имеет такое же преимущество перед первым (рис. 4). Далее будем исследовать автогенераторы на транзисторах 2Т371А и 2Т640А-2.

Оценим собственные шумы этих транзисторов.

В модели АГ [3–9] для описания шумов биполярного транзистора использована зарядовая модель [1] с приведенным к входу источником шумового напряжения \dot{U}_u^{δ} (рис. 5). Спектральная характеристика $S_{шш}$ полного шумового напряжения \dot{U}_u^{δ} транзистора [1] описывается выражением

$$S_{шш} = S_u^T + S_u^P + S_u^D + S_u^H, \tag{2}$$

где $S_u^T, S_u^P, S_u^D, S_u^H$ – спектральные характеристики теплового шума сопротивления базы, рекомбинационной составляющей, дробового и наведенного шумов соответственно.

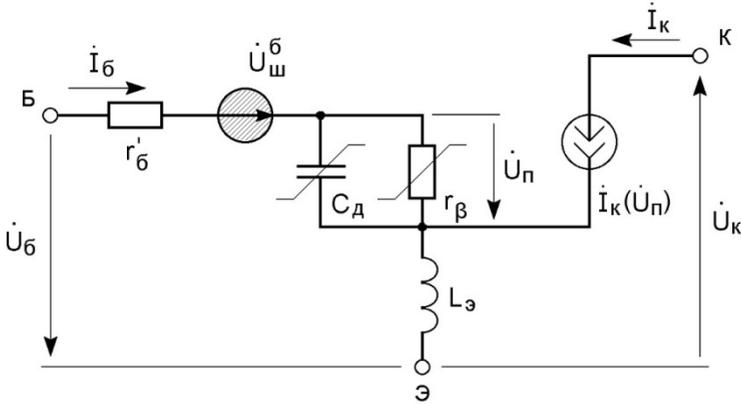


Рис. 5. Эквивалентная шумовая схема биполярного транзистора

Расчет этих характеристик выполняется по известным соотношениям [1]:

$$S_u^T = 4kTr'_B, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; r'_B – сопротивление базы биполярного транзистора.

Зная величины $C_K, C_{ка}, \tau_{CK}, K_C$ (см. табл. 1), найдем

$$r'_B = \frac{\tau_{CK}}{C_{ка}} = \frac{\tau_{CK}(1+K_C)}{C_K}. \quad (4)$$

Второе слагаемое в (2) с учетом $I_{B0} = I_{Э0} / \beta_0$ определяется выражением [1]

$$S_u^P = [(r'_B)^2 + (\omega L_{Э})^2] 2eI_{B0}. \quad (5)$$

Сумма спектральных характеристик дробового и наведенного шумов описывается соотношением [1]

$$(S_u^D + S_u^H) = 2eI_{K0} / S^2, \quad (6)$$

где $I_{K0} = I_{Э0} \beta_0 / (\beta_0 + 1)$ – постоянная составляющая тока коллектора; S – крутизна характеристики тока коллектора на частоте генерации ω :

$$S = S_0 / \sqrt{1 + (\omega / \omega_s)^2}, \quad (7)$$

причем $S_0 = I_{K0} / \varphi_T \cdot r_\beta / (r_\beta + r'_B)$ – крутизна статической характеристики тока коллектора; $r_\beta = \beta_0 \varphi_T / I_{K0}$, $\varphi_T = kT / e$ – тепловой потенциал; ω_s – граничная частота БТ по крутизне [1; 3]:

$$\omega_s = \omega_\beta \frac{r_\beta + r'_B}{\omega_T L_{Э} + r'_B}. \quad (8)$$



Здесь $\omega_B = \omega_T / \beta_0$ – граничная частота БТ в схеме включения с ОЭ.

Результаты расчета характеристик (2) – (8) для транзисторов 2Т371А и 2Т640А-2 при нескольких значениях тока $I_{Э0}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Шумовые характеристики транзисторов 2Т371А и 2Т640А-2

Характеристика	2Т371А			2Т640А-2		
	2 мА	7 мА	12 мА	2мА	7мА	12мА
$S_u^T, \text{В}^2/\text{Гц}$	$33 \cdot 10^{-20}$	$33 \cdot 10^{-20}$	$33 \cdot 10^{-20}$	$3,31 \cdot 10^{-20}$	$3,31 \cdot 10^{-20}$	$3,31 \cdot 10^{-20}$
$S_u^P, \text{В}^2/\text{Гц}$	$0,43 \cdot 10^{-20}$	$1,49 \cdot 10^{-20}$	$2,55 \cdot 10^{-20}$	$0,003 \cdot 10^{-20}$	$0,01 \cdot 10^{-20}$	$0,018 \cdot 10^{-20}$
$\omega_S, \text{рад/с}$	$1,97 \cdot 10^9$	$0,59 \cdot 10^9$	$0,36 \cdot 10^9$	$21,48 \cdot 10^9$	$6,23 \cdot 10^9$	$3,65 \cdot 10^9$
$S, \text{А/В}$	0,070	0,155	0,180	0,077	0,266	0,448
$(S_u^A + S_u^H), \text{В}^2/\text{Гц}$	$13,2 \cdot 10^{-20}$	$9,32 \cdot 10^{-20}$	$12,1 \cdot 10^{-20}$	$10,82 \cdot 10^{-20}$	$3,17 \cdot 10^{-20}$	$1,91 \cdot 10^{-20}$
$S_{шш}, \text{В}^2/\text{Гц}$	$46,6 \cdot 10^{-20}$	$43,8 \cdot 10^{-20}$	$47,7 \cdot 10^{-20}$	$14,13 \cdot 10^{-20}$	$6,49 \cdot 10^{-20}$	$5,24 \cdot 10^{-20}$
$0,5S_{шш}, \text{дБ/Гц}$	-186,3	-186,6	-186,2	-191,5	-194,9	-195,8
$f_{\text{кол}} = 118,3 \text{ МГц}$ $T = 300 \text{ }^\circ\text{К}$	$r'_B = 21,1 \text{ Ом } \beta_0 = 80$ $L_\Delta = 6,0 \text{ нГн}$			$r'_B = 2,1 \text{ Ом } \beta_0 = 90$ $L_\Delta = 0,5 \text{ нГн}$		

Из таблицы 2 видно, что сопротивление базы r'_B транзистора 2Т640А-2 в 10 раз меньше сопротивления базы 2Т371А, соответственно, меньше и тепловые шумы S_u^T . Рекомбинационные шумы S_u^P для обоих транзисторов при выбранных токах ничтожно малы в сравнении с тепловыми, и ими можно пренебречь. Граничная частота по крутизне ω_S в 2Т640А-2 за счет малости r'_B и L_Δ почти в 10 раз выше, чем в 2Т371А. Крутизна S тока коллектора на частоте генерации при малых токах в обоих транзисторах почти одинаковая, но с увеличением тока в 2Т640А-2 растет быстрее и при 12 мА почти в 3 раза больше, чем в маломощном 2Т371А. По этой причине суммы спектральных характеристик дробового и наведенного шумов ведут себя по-разному. В транзисторе 2Т371А сумма $(S_u^A + S_u^H)$ с изменением тока от 2 до 12 мА меняется незначительно, а в 2Т640А-2 – в 5 раз. В итоге спектральная характеристика $S_{шш}$ полного шума транзистора (2) в интервале от 2 до 12 мА для 2Т371А практически не меняется, а для 2Т640А падает почти в 3 раза. Зависимости $0,5S_{шш}$ построены на рисунке 4 линией 4 для 2Т371А и линией 5 для 2Т640А-2. Привязка значений $S_{шш}$ к U_c эфф осуществлялась с учетом зависимостей (рис. 2, а).

Положение линий 1, 3–5 на рисунке 4 свидетельствует о том, что меньшие собственные шумы транзистора позволяют получить в АГ меньшее отношение Ш/С. При малых амплитудах преобразование шума транзистора во флуктуации автоколебаний в обоих АГ происходит примерно одинаково. Так, при амплитуде 0,5 В отношение Ш/С в генераторе с 2Т371А (линия 1) на 5–6 дБ больше отношения Ш/С АГ с 2Т640А-2 (линия 3). На это же значение шумы первого транзистора превосходят шумы второго (линии 4 и 5). В области же больших амплитуд расстояние между линиями 1 и 3 значительно больше расстояния между линиями 4 и 5.



Из рисунка 3 видно, что неизохронность в АГ с 2Т371А значительно выше, чем с 2Т640А-2, и, следовательно, влияние флуктуаций амплитуды на фазу колебаний будет значительно больше. Известно [12], что зависимость частоты генерируемых колебаний в АГ от сдвига фаз $\varphi_{\text{кк}}$ в колебательном контуре определяется соотношением

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{2Q_{\text{к}}} \text{tg} \varphi_{\text{кк}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{к}}$ — добротность контура.

Из уравнения баланса фаз в АГ получим

$$\varphi_{\text{кк}} = -\varphi_s - \varphi_{\Gamma}(\theta) - \varphi_{\text{ос}}, \quad (10)$$

где $\varphi_s = -\arctg(\omega/\omega_s)$ — фаза крутизны коллекторного тока на частоте колебаний; $\varphi_{\Gamma}(\theta)$ — фаза коэффициента разложения несимметричных косинусоидальных импульсов [13] по первой гармонике на частоте колебаний; $\varphi_{\text{ос}}$ — сдвиг фазы в цепи обратной связи. В описываемых исследованиях $\varphi_{\text{ос}}$ не изменялось.

Изменение тока транзистора приводит к изменению r_{β} и через соотношение (8) к изменению ω_s и, следовательно, φ_s . Кроме того, меняется амплитуда колебаний U_{β} , а значит, и угол отсечки θ [1]. С уменьшением θ фаза коэффициента разложения φ_{Γ} увеличивается [13] (рис. 6).

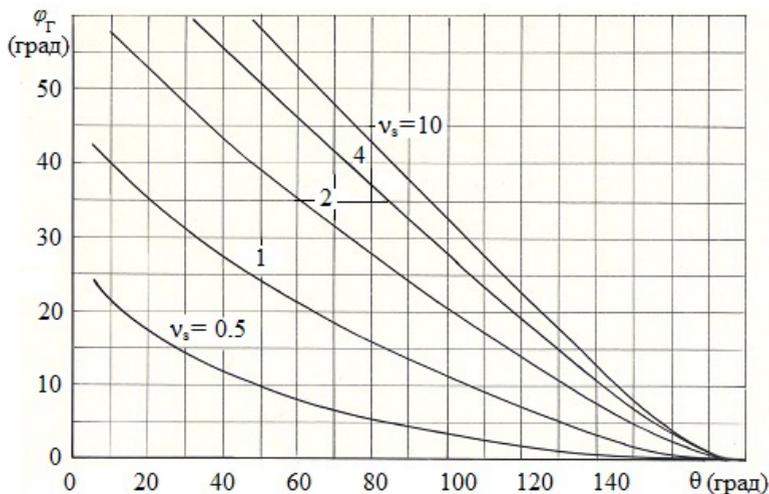


Рис. 6. Зависимость $\varphi_{\Gamma}(\theta)$ при различных значениях $v_s = \omega/\omega_s$

Зависимость φ_s и φ_{Γ} от амплитуды колебаний (тока транзистора) тем сильнее, чем больше ω/ω_s . Выбор транзистора с высокой граничной частотой по крутизне ω_s позволяет уменьшить неизохронность АГ. Из таблицы 2 видно, что транзистор 2Т640А-2 обладает почти в 10 раз более высокой ω_s , чем 2Т371А.

На рисунке 7 построены зависимости угла отсечки θ в градусах от амплитуды колебаний.

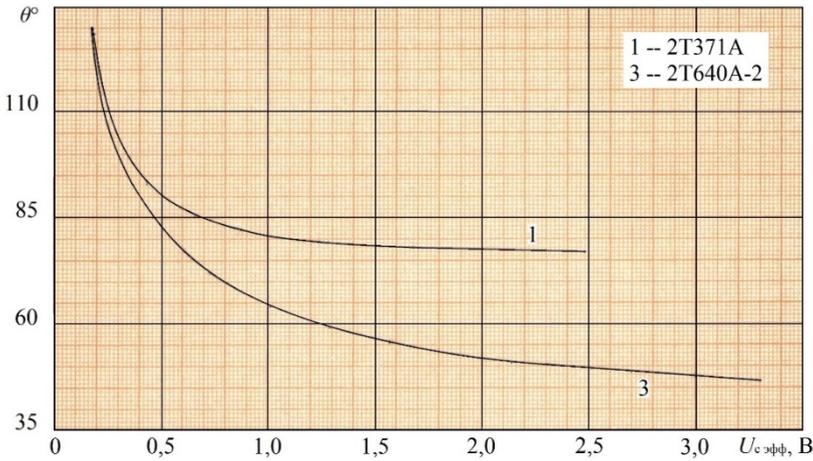


Рис. 7. Зависимость угла отсечки θ от амплитуды колебаний при изменении тока ИЭ

Видно, что в момент самовозбуждения углы отсечки тока у обоих транзисторов одинаковые. Отношения Ш/С в генераторах (см. рис. 4) здесь очень близки. С ростом амплитуды угол θ резко убывает и начиная с 1,0 В для 2Т371А практически перестает меняться, приняв значение $80^\circ - 76^\circ$. У транзистора 2Т640А-2 зависимость $\theta(U)$ более крутая и при максимальной амплитуде снижается до 46° . Если учесть, что с уменьшением угла отсечки сокращается интервал времени, в течение которого источник шума $\dot{U}_{ш}^6$ (рис. 5) воздействует на автоколебательную систему, то следует ожидать снижения отношения Ш/С в генераторе, что и наблюдается на рисунке 4.

Таким образом, в автогенераторе с меньшими флуктуациями автоколебаний наблюдается:

- 1) меньший уровень собственных шумов транзистора $S_{шш}(\Omega)$;
- 2) меньшая неизохронность АГ $\Delta f(U)/f_0$;
- 3) меньший угол отсечки тока транзистора θ .

При построении малошумящих АГ рекомендуется следующее:

- 1) выбирать транзистор с запасом по мощности $P_{вых} \gg P_{АГ}$;
- 2) среди транзисторов равной мощности выбирать такие, у которых меньше сопротивление базы r'_B и индуктивность эмиттера $L_{Э}$, но больше граничная частота по крутизне f_s (пропорциональна $f_\beta = f_T/\beta_0$). Это обеспечит меньшие собственные шумы транзистора и неизохронность автогенератора;

- 3) режим работы транзистора выбирать так, чтобы угол отсечки тока был как можно меньше.

Список литературы

1. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. М., 1977.



2. ГОСТ 20271.2-75. Приборы СВЧ. Метод измерения флуктуаций амплитуды, частоты и фазы. М., 1975.
3. Савченко М.П. Активный нелинейный двухполосник с отрицательным сопротивлением на основе биполярного транзистора // Радиотехника. 2008. №2. С. 74–84.
4. Савченко М.П. Шумовые характеристики двухполосника с отрицательным сопротивлением на основе биполярного транзистора // Радиотехника. 2009. №4. С. 34–40.
5. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Укороченные символические уравнения диапазонного автогенератора с источниками шума и произвольной одночастотной колебательной системой // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2010. №4. С. 64–70.
6. Савченко М.П. Стационарный режим и флуктуации в автогенераторе на транзисторно-емкостном двухполоснике с отрицательным сопротивлением // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 5. С. 21–31.
7. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Метод анализа высокочастотного транзисторного автогенератора // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2012. №4. 2012. С. 100–107.
8. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Оценка свойств перестраиваемого автогенератора при частичном включении транзистора в контур // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2013. Т. 4, №1. С. 41–44.
9. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Свойства перестраиваемого по частоте автогенератора при частичном включении транзистора в контур // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2014. №4. С. 82–87.
10. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности : справочник / под ред. А.В. Голомедова. М., 1994.
11. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности : справочник / под ред. А.В. Голомедова. М., 1994.
12. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. М., 1972.
13. Богачёв В.М., Никифоров В.В. Транзисторные усилители мощности. М., 1978.
14. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Влияние параметров биполярного транзистора на характеристики перестраиваемого автогенератора // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 1. С. 83–91.
15. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Анализ влияния паразитной индуктивности эмиттера биполярного транзистора на характеристики перестраиваемого автогенератора // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2011. №5. С. 37–44.

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