

УДК 621.373.52

М. П. Савченко, О. В. Старовойтова

### СВОЙСТВА ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПО ЧАСТОТЕ АВТОГЕНЕРАТОРА ПРИ ЧАСТИЧНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ТРАНЗИСТОРА В КОНТУР

82

С помощью метода, основанного на представлении биполярного транзистора эквивалентным активным двухполюсником с отрицательной проводимостью, рассмотрены свойства перестраиваемого по частоте автогенератора с контуром между коллектором и базой при частичном включении транзистора в контур.

The properties of a tunable frequency oscillator with a circuit between the collector and the base of the partial inclusion of the transistor in the circuit were studied using a method based on the presentation of bipolar transistor equivalent active two port circuit with negative conductivity.

**Ключевые слова:** перестраиваемый по частоте автогенератор, двухполюсник с отрицательной проводимостью.

**Key words:** tunable frequency oscillator, two port circuit with negative conductivity.

В инфокоммуникационных системах широко применяются перестраиваемые автогенераторы (АГ) на биполярных транзисторах. На рисунке 1 приведена обобщенная высокочастотная схема АГ с колебательной системой КС между коллектором и базой и конденсаторами обратной связи  $C_1$ ,  $C_2$ . В работах [1–3] предложена модель такого АГ в виде пассивного и активного двухполюсников, соединенных параллельно. Эквивалентная схема автогенератора по высокой частоте в случае частичного включения транзистора в контур приведена на рисунке 2. На рисунке приняты обозначения:  $\dot{Y}_a(\omega_0, U)$  - комплексная проводимость транзисторно-емкостного нелинейного активного (ТЕА) двухполюсника [2], включающего в себя транзистор VT и конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ . Остальные элементы схемы описаны в таблице.

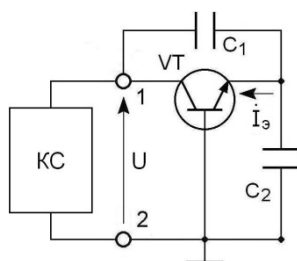


Рис. 1. Обобщенная высокочастотная схема АГ

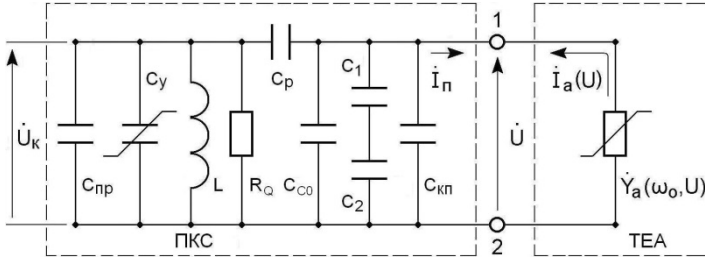


Рис. 2. Эквивалентная высокочастотная схема АГ при частичном включении транзистора в контур

Обозначения на эквивалентной схеме автогенератора

Обозначение	Характеристики пассивного двухполюсника
$L, C_y$	Индуктивность и перестраиваемая емкость
$R_Q$	Эквивалентное сопротивление потерь в контуре
$C_{пр}$	Паразитная емкость монтажа
$C_p$	Разделительная емкость
$C_{с0}$	Емкость в контуре
$C_{кп}$	Пассивная составляющая емкости коллектора $C_K$
$\dot{Y}_п(j\Delta\omega)$	Проводимость полной колебательной системы (ПКС) между точками 1–2 подключения к транзистору при малых отстройках $\Delta\omega$ от частоты $\omega_0$

В работах [1; 3] комплексные проводимости  $\dot{Y}_a(\omega_0, \theta)$  и  $\dot{Y}_п(j\Delta\omega)$  представлены выражениями

$$\dot{Y}_п(j\Delta\omega) = G_п(\Delta\omega) + jB_п(\Delta\omega), \tag{1}$$

$$\dot{Y}_a(\omega_0, \theta) = G_a(\omega_0, \theta) + jB_a(\omega_0, \theta). \tag{2}$$

Стационарный режим колебаний в АГ существует при соблюдении условий

$$G_п(\Delta\omega) + G_a = 0; B_п(\Delta\omega) + B_a = 0. \tag{3}$$

Стационарный режим будет устойчивым, если выполняются следующие условия [3]:

$$\partial(-G_a)/\partial U < 0, \partial(-B_п)/\partial\omega < 0. \tag{4}$$

Уравнения (3) удобно решать методом годографов. Точка пересечения годографов и есть решение для этих уравнений. Воспользовавшись выражениями для расчета комплексных проводимостей  $\dot{Y}_a(\omega_0, \theta)$ ,  $\dot{Y}_п(j\Delta\omega)$  [1], получим проводимость ПКС на собственной частоте  $\omega_0$   $Y_{вк} = 1 / p_{ср}^2 R_Q$ , где  $p_{ср} = C_p / (C_p + C_c)$ . Постоянная времени ПКС  $T_Q = 2Q_k / \omega_0$ . В модели АГ [3] для оценки степени включения ТЕА-двухполюсника в контур введен обобщенный параметр  $a \approx p_{ср} p_{кр} Q_k$ , где  $p_{кр} = C_p / (C_p + C_y + C_{пр})$ . Макси-



мальное значение  $a \approx Q_k$  достигается при полном включении ТЕА в контур. В этом случае, как видно из рисунка 2, ПКС трансформируется в одиночный параллельный контур. При  $C_p = 0$  параметр  $a$  обращается в 0, и ПКС со стороны выводов 1–2 вырождается в емкость  $C_c$ . Автоколебания в такой системе невозможны. Практика показывает, что минимальное значение параметра можно принять  $a = 1$ . При полном включении ТЕА в контур  $1/a = Q_k^{-1} \approx 0$  при ослаблении включения  $1/a \rightarrow 1$ .

На рисунке 3 построены нормированные к  $Y_{ex}$  годографы ПКС (1) для значений параметра  $1/a = 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5$  и  $1,0$ . В расчетах  $\omega_0$  и  $Q_k$  не менялись. Векторы  $\bar{\omega}$  на годографах указывают направление роста частоты. Направление обхода на линиях задано вектором  $\bar{\eta}$  по часовой стрелке. Угол  $\alpha$  пересечения векторов  $\bar{\eta}$  и  $\bar{\omega}$  отсчитывается от  $\bar{\eta}$  по часовой стрелке до  $\bar{\omega}$ .

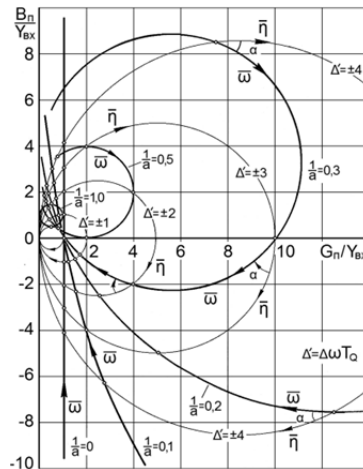


Рис. 3. Нормированные к  $Y_{ex}$  годографы ПКС

Если  $\alpha < \pi$ , то  $\Delta\omega T_Q < 0$ , если  $\alpha > \pi$ , то  $\Delta\omega T_Q > 0$ , при  $\alpha = \pi$   $\Delta\omega T_Q = 0$ . Из рисунка видно, что, варьируя коэффициент включения транзистора в контур, можно существенно изменять годографы ПКС, а следовательно, характеристики автогенератора.

На рисунках 4–6 приведены примеры графического решения уравнений (3) автогенератора на транзисторе 2Т371 [4]. Значения вещественной и мнимой составляющих представлены на комплексной плоскости в миллисименсах. Линия активного двухполосника промаркирована значениями угла отсечки. Годографы ПКС построены с отрицательным знаком. Вектора частоты и напряжения направлены в сторону роста частоты и амплитуды колебаний. На рисунке 4 видно, что при малых и больших значениях  $1/a$  возможно двойное пересечение годографов. Условия устойчивости стационарного режима (4) превращаются на



комплексной плоскости в условие  $0^\circ < \gamma < 180^\circ$ , где  $\gamma$  – угол пересечения годографов, отсчитываемый от вектора  $\bar{U}$  по часовой стрелке до вектора  $\bar{\omega}$ . Стационарный режим устойчив в точках  $A, B, C, D$ . В точках  $A', B', D'$  нарушены условия (4), здесь режим самовозбуждения жесткий. Для точки  $A$   $\Delta\omega T_Q(A) = -0,43$ , для точки  $B$   $\Delta\omega T_Q(B) = -0,63$ , для точки  $C$   $\Delta\omega T_Q(C) = -0,84$ , то есть частота колебаний автогенератора  $\omega^0 = \omega_0 + \Delta\omega^0$  уменьшается.

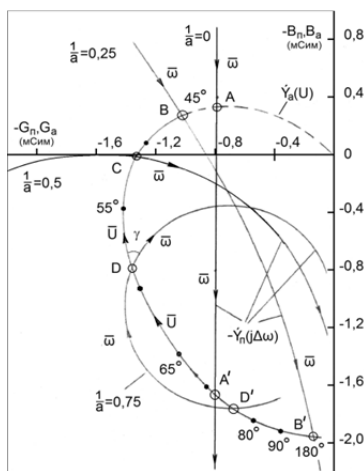


Рис. 4. Графическое решение уравнений (3) автогенератора на транзисторе 2Т371

Угол отсечки в стационарном режиме  $\theta^0$  при переходе от точки  $A$  к точке  $D$  монотонно растет, значит, амплитуда колебаний падает [2]. Следовательно, с увеличением  $1/a$  частота и амплитуда колебаний АГ уменьшаются. В неустойчивых точках  $\Delta\omega T_Q(A') = +2,10$ ,  $\Delta\omega T_Q(B') = +6,17$ .

На рисунке 5 приведены графические решения уравнений АГ при перестройке по частоте путем изменения емкости  $C_y$  (рис. 2). Ток транзистора фиксирован. Значения емкости  $C_y$  меняются от 0 пФ (линии 1) до 28 пФ (линии 5) с шагом 7 пФ. Годографы ПКС (сплошные линии) рассматривались на интервале  $\Delta\omega T_Q$  от  $-1,2$  до 4, годографы ТЕА (пунктир) – на интервале изменения  $\theta$  от  $180^\circ$  до  $50^\circ$ . Из рисунку 5 видно, что с ростом  $C_y$  (уменьшением  $\omega^0$ ) годографы активного двухполюсника смещаются вправо и сильнее закручиваются. Годографы ПКС при этом искривляются и наклоняются влево, а параметр  $1/a$  растет от 0,194 для линии 1 до 0,857 для линии 5. На интервале значений от 21 до 28 пФ годографы пересекаются дважды. Здесь самовозбуждение жесткое, так как в точках с большими значениями  $\theta^0$  угол  $\gamma > 180^\circ$ . Для емкости 28 пФ годографы ТЕА и ПКС только соприкасаются. При дальнейшем увеличении емкости  $C_y$  годографы расходятся, пересечения нет, колебания в АГ невозможны. Для устранения жесткого режима самовозбуждения и расширения пределов перестройки в область нижних частот необходимо сместить годографы ПКС вправо, то есть уве-



личить параметр  $1/a$ . Это можно сделать, например, путем уменьшения  $C_{C0}$ . Проверим данное предположение.

На рисунке 6 приведены графические решения уравнений АГ для нескольких значений  $C_{C0}$  при  $C_Y = 5,6$  пФ. Условия расчета аналогичны принятым при создании рисунка 5. Из этого следует вывод, что годографы ПКС при уменьшении  $C_{C0}$  сдвигаются вправо, при этом годографы ТЕА остаются практически в неизменном виде. Таким образом, при уменьшении  $C_{C0}$ , то есть при возрастании параметра  $1/a$  пределы перестройки АГ расширяются, а при увеличении  $C_{C0}$  — сужаются.

86

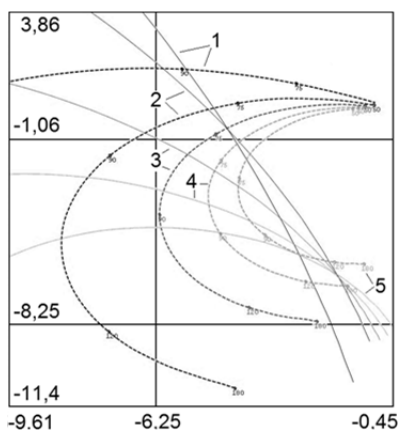


Рис. 5. Графические решения уравнений АГ при перестройке по частоте путем изменения управляющей емкости  $C_Y$

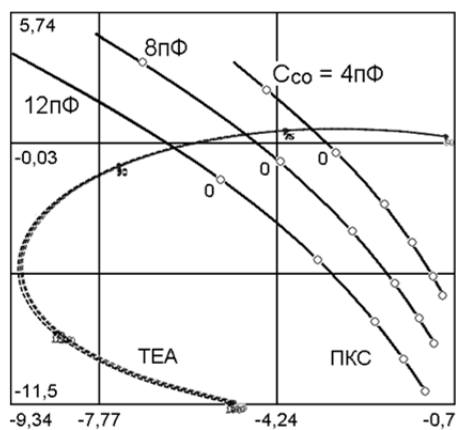


Рис. 6. Графические решения уравнений АГ для значений  $C_{C0}$  4,3 пФ, 8,2 пФ и 12 пФ при  $C_Y = 5,6$  пФ

Итак, при частичном включении транзистора в контур увеличение параметра  $1/a$  вызывает снижение частоты и амплитуды колебаний АГ, при этом пределы перестройки частоты расширяются в сторону нижних частот. В широкодиапазонных автогенераторах для малых и больших значений параметра  $1/a$  возможны жесткие режимы самовозбуждения. Таким образом, показано, что выбранный метод анализа автогенератора позволяет наглядно оценивать свойства автогенератора и облегчает выбор элементов схемы для получения заданных характеристик АГ.

### Список литературы

1. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Метод анализа высокочастотного транзисторного автогенератора // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канга. 2012. Вып. 4. С. 100–107.
2. Савченко М.П. Активный нелинейный двухполосник с отрицательным сопротивлением на основе биполярного транзистора // Радиотехника. 2008. №2. С. 74–84.



3. Савченко М.П. Стационарный режим и флуктуации в автогенераторе на транзисторно-емкостном двухполюснике с отрицательным сопротивлением // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 5. С. 21 – 31.

4. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности : справочник / под ред. А. В. Голомедова. М., 1994.

### **Об авторах**

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: savchenkomp@mail.ru

### **About the authors**

Mikhail Savchenko – PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: savchenkomp@mail.ru

Olga Starovoitova – Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: savchenkomp@mail.ru