

М. П. Савченко, О. В. Старовойтова

УКОРОЧЕННЫЕ СИМВОЛИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ ДИАПАЗОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА С ИСТОЧНИКАМИ ШУМА И ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОДНОЧАСТОТНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Получены укороченные символические уравнения автогенератора (АГ) с произвольной одночастотной колебательной системой, позволяющие с использованием характеристик транзисторно-емкостного активного двухполюсника найти стационарный режим и переходные процессы в автогенераторе при наличии источников шума.

The truncated symbolic equations with any unifrequent oscillatory system allowing with use of characteristics of transistor-capacitor active one-port circuit are received to find a stationary mode and transients in the generator at presence of sources of noise.

Ключевые слова: диапазонный генератор, укороченные уравнения, стационарный режим, транзисторно-емкостной активный двухполюсник.

Key words: band generator, truncated equations, stationary mode, transistor-capacitor active one-port circuit.

Создание автогенераторов (АГ) с низким уровнем шумов и широкими пределами перестройки частоты — актуальная задача. В диапазонах метровых и дециметровых волн часто применяется схема АГ на биполярном транзисторе с контуром между коллектором и базой. Свойства диапазонных АГ во многом определяются свойствами колебательных систем. Поэтому при анализе такого генератора его удобно представить, как это показано на высокочастотной эквивалентной схеме рисунка 1, в виде двух параллельно соединенных в точках 1 и 2 двухполюсников [1; 2], один из которых является колебательной системой (КС), а другой — отрицательным активным двухполюсником (АД), содержащим транзистор и необходимые для его работы элементы $R_э$, $C_э$ эмиттерного автосмещения и конденсаторы C_1 , C_2 обратной связи. На рисунке u , u_1 , u_2 — переменные напряжения; i , $i_э$, $i_к$ — переменные составляющие токов КС, эмиттера и коллектора соответственно.

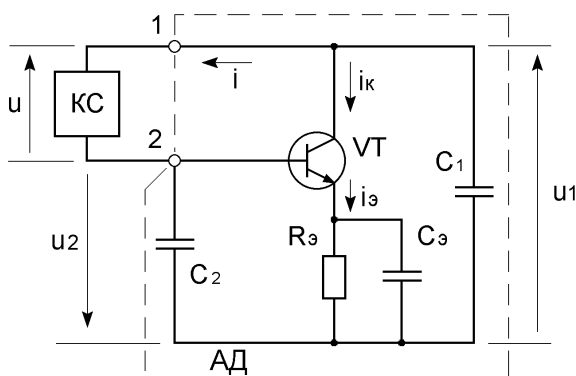


Рис. 1. Высокочастотная эквивалентная схема АГ

В [2; 3] показано, что АД, обведенный на рисунке 1 пунктиром, в случае воздействия гармонического напряжения u с комплексной амплитудой \dot{U} и частотой ω_0 может быть замещен схемой на рисунке 2. На рисунке $C_{кп}$ — пассивная составляющая емкости коллекторного перехода; $\dot{Y}_a(\omega_0, U)$ — комплексная проводимость нелинейного транзисторно-емкостного активного (ТЕА) двухполюсника; $\dot{I}_{ш}^a$ — приведенный к зажимам двухполюсника источник шумового тока; \dot{I}_a , \dot{I}_c , $\dot{I}_{скп}$, \dot{I} — комплексные амплитуды первых гармоник тока ТЕА-двухполюсника, последовательно соединенных емкостей C_1 , C_2 , емкости $C_{кп}$ и полного тока АД соответственно.

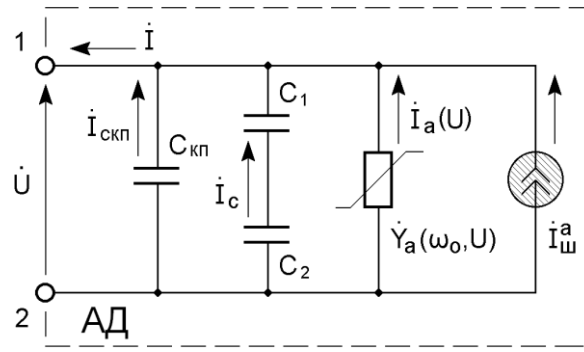


Рис. 2. Схема замещения активного двухполосника АД, представленного на рисунке 1

Такой подход позволяет методом годографов не только анализировать АГ, но и по известным характеристикам двухполосников синтезировать генератор с заданными свойствами. Годографы различных КС рассмотрены в [4; 5]. Метод расчета ТЕА-двухполосника и результаты исследования зависимости его иммитансных характеристик от рабочей частоты, режима работы транзистора и параметров элементов схемы содержатся в [2]. Метод расчета спектральных составляющих $i_{ш}^a$ и результаты выполненного на его основе исследования шумовых свойств ТЕА-двухполосника изложены в [3].

Цель настоящей работы — получить укороченные символические уравнения диапазонного АГ на ТЕА-двухполоснике с источниками шума и произвольной линейной одночастотной колебательной системой между коллектором и базой.

При рассмотрении АГ будем полагать, как и в [2; 3], что добротность КС достаточно высока, падение напряжения на емкости C_2 от высших гармоник тока мало по сравнению с падением напряжения от первой гармоники, и напряжения u_C , u_1 , u_2 на рисунке 1 близки к гармоническим. Эти допущения позволяют воспользоваться для анализа АГ результатами работ [2; 3] и применить метод символических укороченных уравнений С. И. Евтянова.

Рассмотрим обобщенную схему АГ, показанную на рисунке 3.

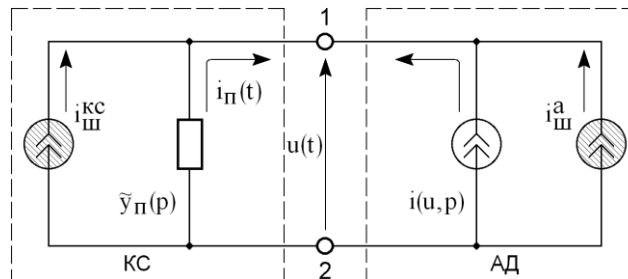


Рис. 3. Обобщенная схема автогенератора

На рисунке $\tilde{y}_{\pi}(p)$ — символическая проводимость узкополосной линейной колебательной системы, $p = d/dt$ — дифференциальный оператор [6], u — мгновенное напряжение на колебательной системе, $i_{\pi}(t)$ — мгновенный ток, протекающий через колебательную систему, $i(u, p)$ — мгновенный ток активного двухполосника, зависящий как от u , так и от линейных преобразований u определяемых некоторыми функциями от p , $i_{ш}^{kC}$ и $i_{ш}^a$ — независимые источники приведенных шумовых токов, колебательной системы и активного двухполосника соответственно.

На основе закона Кирхгофа для узла 1 на рисунке 3 составим уравнение

$$\tilde{y}_{\pi}(p) \cdot u(t) + i(u, p) + i_{ш}^{kC} + i_{ш}^a = 0. \quad (1)$$

Положим, что генератор является одночастотным и колебания u близки к гармоническим. Приближенное решение уравнения (1) будем искать в виде

$$u(t) = \text{Re}[\dot{U}e^{j\omega t}], \quad (2)$$

где $\dot{U} = Ue^{j\varphi_U}$ – комплексная амплитуда напряжения, а U и φ_U – медленно меняющиеся в переходных режимах амплитуда и фаза колебаний; $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ – частота автоколебаний, ω_0 – собственная частота колебательной системы, $\Delta\omega$ – поправка на частоту в стационарном режиме, причем $\Delta\omega/\omega_0$ малая величина порядка затухания контура $\delta = 1/Q_K$ (Q_K – добротность КС). Перепишем (2) следующим образом:

$$u(t) = \text{Re}[\dot{U}e^{j\Delta\omega t} \cdot e^{j\omega_0 t}]. \quad (3)$$

Колебательная система АГ является более узкополосной, чем активный двухполосник. Поэтому в токе $i(u, p)$ можно учитывать только первую гармонику и считать, что вблизи ω_0 ее комплексная амплитуда $\dot{I}(\omega_0, U)$ не меняется с изменением $\Delta\omega$, а зависит лишь от ω_0 и U [2]. Это позволяет при решении уравнения (1) с точностью до поправок порядка δ [7] представить ток АД в виде

$$i(u, p) = i(\omega_0, u) = \text{Re}[\dot{I}(\omega_0, U)e^{j\Delta\omega t} \cdot e^{j\omega_0 t}]. \quad (4)$$

Учитывая узкополосность КС, будем полагать, что на АГ воздействуют только те составляющие шумовых токов $i_{ш}^{KC}$, $i_{ш}^a$, спектры которых расположены в окрестности ω . Представим приведенные шумовые токи в виде

$$i_{ш}^{KC} = \text{Re}[(\dot{I}_{ш}^{KC} e^{j\Delta\omega t})e^{j\omega_0 t}], \quad (5)$$

$$i_{ш}^a = \text{Re}[(\dot{I}_{ш}^a e^{j\Delta\omega t})e^{j\omega_0 t}], \quad (6)$$

где $\dot{I}_{ш}^{KC}$, $\dot{I}_{ш}^a$ – случайные комплексные амплитуды. Подставив выражения (3) – (6) в (1) и применив теорему смещения, получим

$$\tilde{Y}_\Pi(p + j\omega_0)\dot{U}e^{j\Delta\omega t} + \dot{I}(\omega_0, U)e^{j\Delta\omega t} + (\dot{I}_{ш}^a + \dot{I}_{ш}^{KC})e^{j\Delta\omega t} = 0. \quad (7)$$

С точностью до малых величин порядка δ , в (7) можно заменить полную проводимость $\tilde{Y}_\Pi(p + j\omega_0)$ укороченной $\tilde{Y}(p)$ [7–9]. Преобразуя (7) с повторным применением теоремы смещения, получим укороченное уравнение

$$\tilde{Y}(p + j\Delta\omega_0)\dot{U} + \dot{I}(\omega_0, U) + \dot{I}_{ш} = 0, \quad (8)$$

где $\dot{I}_{ш} = \dot{I}_{ш}^a + \dot{I}_{ш}^{KC}$.

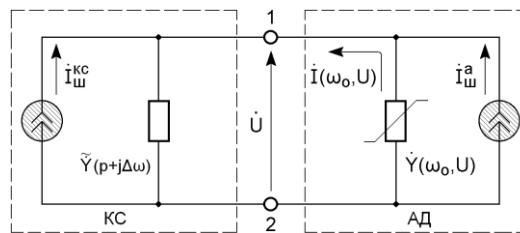
Введем комплексную проводимость активного нелинейного двухполосника по первой гармонике [4]

$$\dot{Y}(\omega_0, U) = \dot{I}(\omega_0, U)/\dot{U}. \quad (9)$$

Теперь уравнение (8) можно представить следующим образом:

$$[\tilde{Y}(p + j\Delta\omega_0) + \dot{Y}(\omega_0, U)]\dot{U} + \dot{I}_{ш} = 0. \quad (10)$$

Данному уравнению соответствует эквивалентная схема АГ рисунка 4, а.



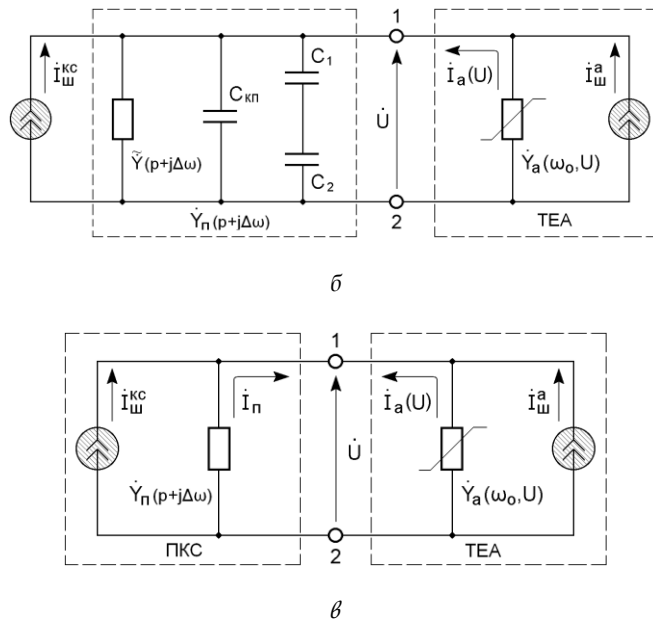


Рис. 4. Эквивалентная схема АГ по первой гармонике на основе активного и пассивного двухполюсников АД и КС (а), ТЕА и ПКС (б, в)

Применительно к рассматриваемому АГ (рис. 1) под проводимостью (9) следует подразумевать [2; 3] проводимость АД (рис. 2). Уравнение (10) теперь примет вид:

$$[\tilde{Y}(p + j\Delta\omega_0) + j\omega_0(C_{кп} + C_{12}) + \dot{Y}_a(\omega_0, U)]\dot{U} + \dot{I}_{ш} = 0, \quad (11)$$

где $C_{12} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$.

Отнесем емкости $C_{кп}$ и C_{12} к внешней колебательной системе. Полученный таким образом пассивный двухполюсник назовем полной колебательной системой (ПКС). Ее проводимость будет равна

$$\dot{Y}_{П}(p + j\Delta\omega_0) = j\omega_0(C_{кп} + C_{12}) + \tilde{Y}(p + j\Delta\omega). \quad (12)$$

В (12) и далее под ω_0 и Q_k следует понимать собственную частоту и добротность ПКС. Поскольку к внешней высокодобротной КС добавлены только реактивные элементы, не вносящие затухания, то ПКС будет высокодобротной и узкополосной.

Выражение (12) позволяет записать уравнение (11) следующим образом:

$$[\dot{Y}_{П}(p + j\Delta\omega_0) + \dot{Y}_a(\omega_0, U)]\dot{U} + \dot{I}_{ш} = 0. \quad (13)$$

Обобщенные эквивалентные схемы, соответствующие уравнениям (11) и (13), приведены на рисунке 4, б, в. Ток $\dot{I}_{ш}^а$ на рисунке 4 представляет приведенный шумовой ток ТЕА-двухполюсника [3], учитывающий источники естественных шумов транзистора и реакцию безинерционных цепей автосмещения.

Как отмечено в [2], практические расчеты функций $\dot{Y}_a(\omega_0, U)$ и $\dot{I}_a(\omega_0, U)$ удобно проводить в параметрической форме, используя в качестве независимой переменной высокочастотный угол отсечки θ . При применении в уравнении (13) вместо $\dot{Y}_a(\omega_0, U)$ выражений $\dot{Y}_a(\omega_0, \theta)$, будем подразумевать, что (13) дополнено уравнением, связывающим амплитуду колебания U с θ , т.е. соотношением для $U(\theta)$ (см. [2] выражения (40), (50), (51)).

Таким образом, получены укороченные символические уравнения АГ с произвольной линейной одночастотной колебательной системой (13), позволяющие с использованием характеристик ТЕА-двухполюсника [2; 3] найти стационарный режим и переходные процессы в АГ при наличии источников шума.

Список литературы

1. Радиопередающие устройства / М. В. Балакирев [и др.]; под ред. О. А. Челнокова. М., 1982.

2. Савченко М.П. Активный нелинейный двухполосник с отрицательным сопротивлением на основе биполярного транзистора // Радиотехника. 2008. №2. С. 74–84.
3. Савченко М.П. Шумовые характеристики двухполосника с отрицательным сопротивлением на основе биполярного транзистора // Там же. 2009. №4. С. 34–40.
4. Некоторые характеристики широкополосных цепей с отрицательным сопротивлением // Курокава К. ГПНТБ-М.Ф. пер.77/14401; Kurokawa K. Some Basic Characteristics of Broadband Negative Resistance Oscillator Circuits // The Bell System Technical Journal. 1969. V. 48, №6. P. 1937–1957.
5. Семенов К.А. Анализ линейных электрических цепей методом круговых диаграмм. Л., 1979.
6. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах /под ред. А.К. Нарышкина. М., 1977.
7. Евтянов С.И. О связи укороченных уравнений с символическими // Радиотехника. 1946. Т. 1, №1. С. 68–79.
8. Евтянов С.И. Ламповые генераторы. М., 1967.
9. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике: учебное пособие для вузов. М., 1984.

Об авторах

М.П. Савченко – канд. техн. наук, доц., РГУ им. И. Канга, savchenkomp@mail.ru
О.В. Старовойтова – ст. преп., РГУ им. И. Канга.

Authors

M. Savchenko – Dr., IKSUR, savchenkomp@mail.ru
O. Starovoitova – IKSUR.