

УДК 621.396

ОБОБЩЕННАЯ РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНЗИСТОРНОГО СВЧ-АВТОГЕНЕРАТОРА

Иванов В.Э., Кудинов С.И.

УГТУ-УПИ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина

Приведены результаты компьютерного моделирования обобщенной регенеративной характеристики автогенератора на биполярном транзисторе для СВЧ диапазона, позволяющие прогнозировать регенеративные свойства транзисторов и выбирать параметры оптимального режима работы автогенератора

Режимы запуска и параметры переходного процесса установления автоколебаний в импульсных СВЧ-автогенераторах в значительной степени определяют их выходные параметры в различных применениях таких, как классические и фазированные генераторы радиоимпульсов, сверхрегенеративные приемопередатчики и т.д. На рис.1. изображена зависимость затухания контура СВЧ-автогенератора для наиболее характерных режимов установления амплитуды автоколебаний: мягкий характер установления колебаний при котором обеспечиваются самовозбуждение автогенератора и возможность непрерывного управления амплитудой автоколебаний реализуется зависимостью с пусковым отрицательным затуханием $\delta_{п1}$; режим возбуждения автоколебаний с положительным пусковым затуханием $\delta_{п2}$ и жестким характером установления автоколебаний возможен за счет внешнего сигнала, либо за счет ударных колебаний с амплитудой, превышающей $A_{вн}$; зависимость с пусковым отрицательным затуханием $\delta_{п3}$ обеспечивает самовозбуждение и жесткий характер установления автоколебаний.

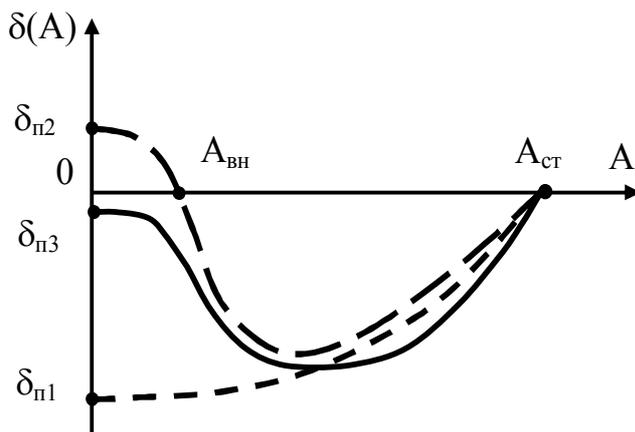


Рис. 1. Зависимость затухания контура СВЧ-автогенератора от амплитуды колебаний для разных режимов запуска

основные нелинейные элементы. Модель СВЧ-автогенератора представлена в виде двухполюсника,

Для анализа различных режимов работы СВЧ-автогенератора может быть использованы малосигнальная (МРХ) и динамическая (ДРХ) регенеративные характеристики [1]. В статье обсуждается построение обобщенной регенеративной характеристики (ОРХ), позволяющей более точно и эффективно определить важнейшие свойства автогенератора, поскольку МРХ и ДРХ являются частными случаями ОРХ [2].

Разработка ОРХ осуществляется на основе известной упрощенной модели транзисторного СВЧ-автогенератора, эквивалентная схема которого содержит только основные

состоящего из комплексных проводимостей транзистора \dot{Y}_T и нагрузки \dot{Y}_L , включающей элементы колебательного контура. Уравнение автогенератора записывается в виде системы уравнений

$$\operatorname{Re} \dot{Y}_T + \operatorname{Re} \dot{Y}_L = 0, \quad \operatorname{Im} \dot{Y}_T + \operatorname{Im} \dot{Y}_L = 0. \quad (1)$$

Первое уравнение определяет баланс амплитуд, второе баланс фаз в контуре автогенератора. Для решения системы уравнений выбрана модель транзистора, основанная на использовании в расчетах его комплексной проводимости коэффициента передачи тока эмиттера $\dot{\alpha}$ в схеме с общей базой. За основу расчета режимных параметров транзистора принята усовершенствованная зарядная модель с использованием аппроксимации зависимости граничной частоты ω_b от мгновенных значений тока и напряжения коллектора для определения коэффициента передачи тока $\dot{\alpha}$ [3].

В общем случае влияние основных факторов нелинейности на мгновенное значение коэффициента $\dot{\alpha}$ представлено в виде выражения

$$\dot{\alpha} = \alpha_0 \left[(1 + j\omega C_e r_e) (1 + jn_0 \omega \omega_b^{-1}) \right]^{-1} \exp(-jm_0 \omega \omega_b^{-1}), \quad (2)$$

где α_0 – коэффициент передачи постоянного тока эмиттера в схеме с общей базой; ω_b – граничная частота транзистора; C_e – барьерная емкость; r_e – сопротивление эмиттера; m_0, n_0 – коэффициенты.

Основной целью расчета регенеративных характеристик является определение параметров СВЧ-автогенератора в течение всего процесса установления колебаний от момента запуска до установления стационарного режима. Для этого необходимо располагать методикой расчета текущих значений мнимой и действительной частей $\operatorname{Im} \dot{\alpha}$ и $\operatorname{Re} \dot{\alpha}$, а также и проводимости транзистора $\operatorname{Im} \dot{Y}_T$ и $\operatorname{Re} \dot{Y}_T$ для заданной амплитуды постоянной и переменной составляющих входного тока эмиттера I_{em} . На рис. 2 приведены результаты расчетов $\operatorname{Re} \dot{\alpha}$ и $\operatorname{Im} \dot{\alpha}$ в зависимости от величины постоянного тока транзистора. Значение постоянного тока эмиттера, при котором выполняются условия самовозбуждения, называется граничным током СВЧ-автогенератора – I_b . Ток запуска, задаваемый внешними условиями, при котором осуществляется режим самовозбуждения, определяется как пусковой ток – I_s . Регенеративные свойства СВЧ-автогенератора принято описывать с помощью безразмерного параметра – фактора регенерации Ψ_{int} [4], который характеризует степень компенсации активного сопротивления потерь контура вносимым отрицательным сопротивлением СВЧ-транзистора

$$\Psi_{\text{int}} = \frac{\omega C_k}{G_\Sigma} |\operatorname{Im} \dot{\alpha}_{\text{int}}| - 1, \quad (3)$$

где $G_{\Sigma} = G_L + \omega^2 C_k^2 r_k$ – суммарная проводимость потерь контура и нагрузки, C_{ke} – емкость коллектор – эмиттер, C_k – емкость коллектора, r_k – сопротивление коллектора.

По сути, зависимость фактора регенерации от постоянного тока эмиттера при малом значении гармонической составляющей эмиттерного тока является малосигнальной регенеративной характеристикой транзисторного автогенератора. Поведение этой характеристики показывает степень регенерации контура СВЧ-автогенератора во всем диапазоне рабочих токов транзистора, позволяет определить минимальные и максимальные значения тока запуска автогенератора при различных значениях проводимости обратной связи и нагрузки.

При переходе в динамический режим работы связанный с увеличением амплитуды автоколебаний необходимо учитывать нелинейные свойства параметров транзистора, их существенное изменение в течение одного периода колебаний. Реальная и мнимая составляющие интегральной проводимости транзистора могут быть соответственно записаны в виде

$$\operatorname{Re} \dot{Y}_{T \text{int}} = \omega^2 C_{k \text{int}}^2 r_k + \omega C_{ke} \operatorname{Im} \dot{\alpha}_{\text{int}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{Im} \dot{Y}_{T \text{int}} = \omega C_{k \text{int}} + \omega C_{ke} (1 - \operatorname{Re} \dot{\alpha}_{\text{int}}). \quad (5)$$

В этом случае учитывается зависимость граничной частоты транзистора ω_b , емкости коллектора транзистора $C_{k \text{int}}$ от мгновенного напряжения на коллекторе, напряжения питания коллектора, интервал открывания базового перехода в течение одного периоде колебаний. Значения этих усредненных параметров определяются путем интегрирования рассчитанных значений $\operatorname{Im} \dot{\alpha}$ и $\operatorname{Re} \dot{\alpha}$ в пределах одного периода (при одной заданной амплитуде гармонического тока I_{em}), учитывающие их мгновенную зависимость от входного тока i_{inp} , напряжения U_{ke} и сдвига фаз φ_{α} :

$$\operatorname{Re} \dot{\alpha}_{\text{int}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \operatorname{Re} \dot{\alpha}(i_{inp}, U_{ke}, \varphi_{\alpha}) d\varphi, \quad (6)$$

$$\operatorname{Im} \dot{\alpha}_{\text{int}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \operatorname{Im} \dot{\alpha}(i_{inp}, U_{ke}, \varphi_{\alpha}) d\varphi. \quad (7)$$

Результаты расчета комплексного коэффициента передачи тока транзистора в динамическом режиме, выведены в виде зависимостей мнимой и действительной частей $\operatorname{Im} \dot{\alpha}_{\text{int}}$, $\operatorname{Re} \dot{\alpha}_{\text{int}}$, модуля коэффициента $|\dot{\alpha}_{\text{int}}|$ и фактора регенерации Ψ_{int} от амплитуды переменной составляющей входного тока эмиттера I_{em} , рис.2.

Динамическая регенеративная характеристика автогенератора позволяет определить характер поведения и величину фактора регенерации от амплитуды автоколебаний для заданного значения пускового тока, но не дает целостной картины для совокупности всех допустимых значений пусковых токов.

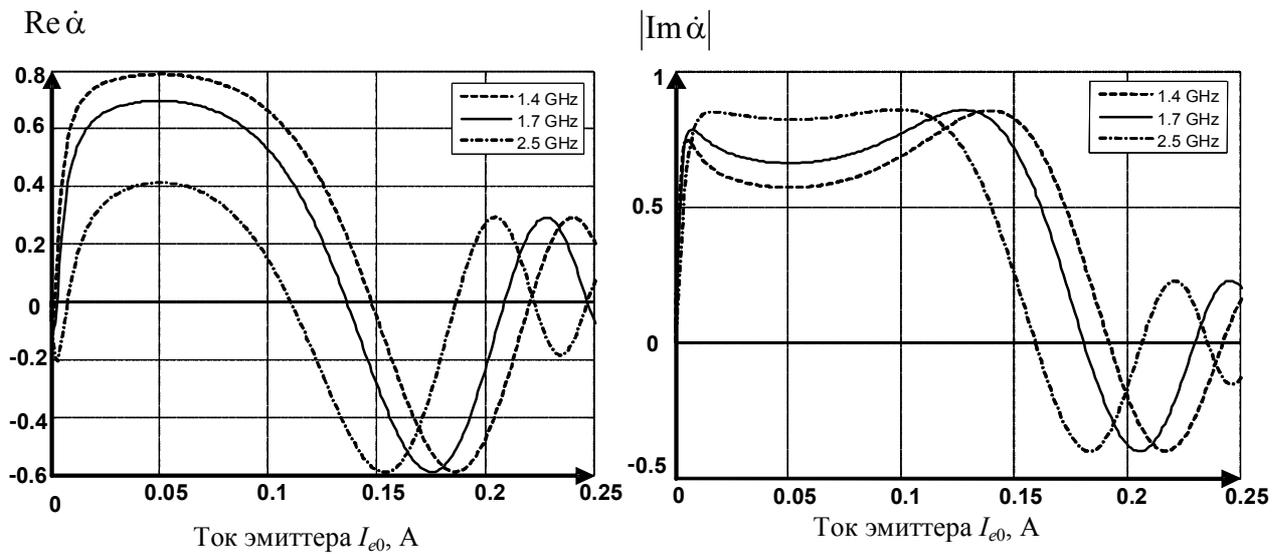


Рис. 2. Зависимость действительной $\text{Re} \dot{\alpha}$ и мнимой $|\text{Im} \dot{\alpha}|$ частей комплексного коэффициента передачи тока транзистора от тока эмиттера транзистора КТ637А-2

Возможность прогнозировать регенеративные свойства транзисторов и выбирать параметры оптимального режима работы автогенератора с помощью обобщенной характеристики колебательной системы, позволяет получить дополнительный инструмент для подбора коэффициента обратной связи, проводимости нагрузки, пусковых рабочих токов автогенератора с целью достижения заданных технических характеристик в режимах приема и передачи. Поэтому требуется решить задачу построения связанного множества графиков зависимостей фактора регенерации для вектора заданных значений пускового тока, то есть сформировать графическую зависимость, где вдоль осей OX и OY отложены значения пускового тока I_s и амплитуды входного гармонического тока I_{em} автогенератора, а по оси OZ – значение рассчитанного фактора регенерации. С этой целью был разработан алгоритм расчета множества единичных ДРХ автогенератора. Результаты расчета ОРХ для автогенератора на транзисторе КТ637А-2 представлены на рис. 3. Графическое изображение ОРХ представляет собой некоторую поверхность, позволяющую наглядно проследить поведение регенеративной характеристики автогенератора в процессе развития колебаний в зависимости от пускового тока. Запуск автогенератора осуществляется при условии $\Psi_{int} \geq 0$, а установление стационарных колебаний происходит при амплитудах, где выполняется условие $\Psi_{int} = 0$. Форма поверхности зависит от проводимости обратной связи и нагрузки автогенератора. Анализ поверхности дает возможность определить зоны устойчивой работы автогенератора. В области, где поверхность Ψ_{int} оказывается ниже плоскости нулевого уровня существование автоколебаний невозможно.

Введение ОРХ позволяет усовершенствовать процедуру расчета СВЧ-автогенератора и оптимизировать режим его работы:

1. Характеристика отображает зависимость фактора регенерации автогенератора при всех допустимых сочетаниях пусковых и гармонических токов при заданных параметрах обратной связи и проводимости нагрузки для конкретного типа активного элемента.

2. Для выбранного типа транзистора и различных значений проводимости обратной связи и проводимости нагрузки автогенератора путем соответствующих расчетов ОРХ можно оценить характер установления автоколебаний для заданного режима работы СВЧ-автогенератора.

3. В частности, для классического импульсного автогенератора необходимо режим запуска выбирать с максимальным значением пускового затухания и пускового тока (рис.1, $\delta_{п1}$). Наоборот, в фазиремых импульсных автогенераторах и сверхрегенеративных приемопередатчиках режим запуска следует реализовать с минимальным пусковым затуханием и минимальным пусковым током (рис.1, $\delta_{п3}$).

В заключение необходимо отметить, что рассмотренный подход к исследованию СВЧ-АГ позволяет проследить процесс возникновения и установления автоколебаний в целом. Однако он не учитывает в момент запуска СВЧ-АГ более сложный механизм возникновения дополнительных колебаний (ударных и др.), которые определяют начальные условия и существенно влияют на характеристики переходного процесса установления автоколебаний. Исследование этих движений в колебательной системе возможно путем расчетов на основе дифференциального уравнения СВЧ-АГ. В этом случае использование регенеративной характеристики автогенератора позволяет быстрее и экономнее осуществить численные расчеты и получить зависимости изменения амплитуды и фазы колебаний от уровня начальных условий до стационарного режима во временной области для различных режимов запуска автогенератора. В совокупности эти сведения позволяют, например, оптимизировать режимы запуска СВЧ-АГ с целью минимизации переднего фронта радиоимпульсов импульсных автогенераторов, повысить амплитудную и фазовую чувствительность к внешнему сигналу сверхрегенеративных усилителей и сверхрегенеративных приемопередающих устройств. Некоторые из этих вопросов рассмотрены в докладе: Иванов В.Э., Кудинов С.И. Иссле-

Обобщенная регенеративная характеристика АГ на транзисторе КТ637А

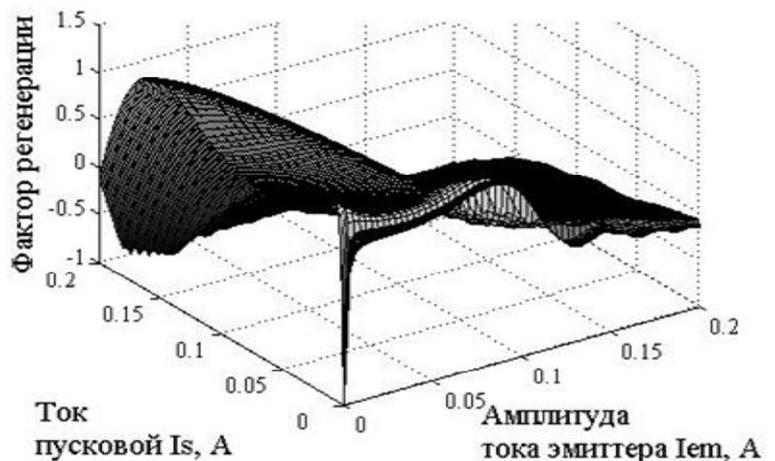


Рис. 3. Обобщенная регенеративная характеристика СВЧ-автогенератора на биполярном транзисторе

дование ударных и флуктуационных колебаний в транзисторных СВЧ-автогенераторах. Приложение к сборнику «Доклады и труды III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». Москва, 26-30 октября 2009 г.

Литература

1. Иванов В.Э. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / В.Э.Иванов, М.Б.Фридзон, С.П.Ессяк; под ред. В.Э.Иванова. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 596 с. ISBN 5-7691-1513-0.
2. Кудинов С.И. Исследование обобщенной регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора/ С.И. Кудинов, В.Э. Иванов // «СВЯЗЬПРОМ 2006»: Труды междунауч.-практич. конф. на III Евро-Азиатского форуме «СВЯЗЬПРОМЭКСПО 2006» (Екатеринбург, 3-5 мая 2006). – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал – Медиа », 2006. – С.106-108.
3. Аронов В.Д. Нелинейная модель генераторного СВЧ-транзистора / В.Д. Аронов., Ю.Н. Савельев, И.П. Милютина // Электронная промышленность, 1975, вып. №10 (46) – С.12-17.
4. Иванов В.Э. Исследование регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора/ В.Э.Иванов// Радиотехнические системы локации пространственно-распределенных объектов. Свердловск, 1981. Вып. 4. С. 93-99.