

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНЫХ И ФЛУКТУАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТРАНЗИСТОРНЫХ СВЧ-АВТОГЕНЕРАТОРАХ

Иванов В.Э., Кудинов С.И.

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

В статье рассматриваются вопросы компьютерного моделирования влияния ударных и флуктуационных колебаний пускового тока в колебательном контуре на развитие автоколебательного процесса в импульсных генераторах и сверхрегенеративных приемопередатчиках СВЧ диапазона.

Ударные колебания (УК), возникающие при запуске импульсных СВЧ-автогенераторов (СВЧ-АГ), оказывают существенное влияние на процесс развития автоколебаний и формирование выходного спектра радиоимпульсов [1, 2]. В некоторых случаях оказывается принципиально важным также учитывать совместное действие ударных и флуктуационных колебаний [3, 4]. Особо важным исследование этих явлений оказывается при анализе работы сверхрегенеративных усилителей (СУ) и сверхрегенеративных приемопередатчиков (СПП). В данной работе исследование УК проводится методом численного решения дифференциального уравнения колебательной системы СВЧ-АГ.

Параллельная эквивалентная схема колебательной системы СВЧ-АГ (рис.1) содержит,

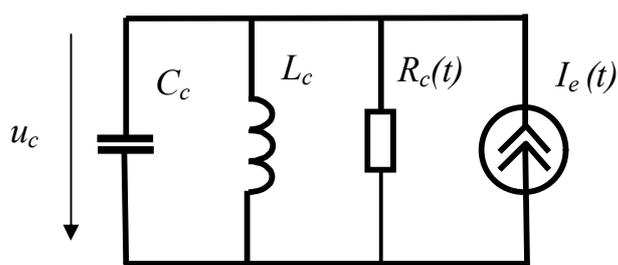


Рис.1. Эквивалентная схема
сверхрегенеративного

соответственно, C_c – емкость и L_c – индуктивность контура, $R_{\tilde{n}}(t)$ – резонансное знакопеременное сопротивление контура, управляемое генератором тока I_e . Ударные колебания возбуждаются в контуре СПП импульсами постоянного тока генератора $I_e(t)$, протекающего через активный элемент в режиме его запуска. Поскольку затухание контура $d(I_e)$ является функцией тока,

рассчитать эффект возбуждения ударных колебаний в контуре практически можно путем интегрирования дифференциального уравнения колебательной системы СПП.

Постоянную составляющую тока эмиттера при экспериментальной отработке СПП контролировать и наблюдать удобнее, чем напряжение в контуре, поэтому исходное дифференциальное уравнение, моделирующее процессы в колебательном контуре представлено в виде явной зависимости от постоянной составляющей тока эмиттера

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2\delta(t) \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C} \frac{dI_e(t)}{dt}, \quad (1)$$

где U_c - амплитуда напряжения на элементах контура СПП; $\delta(t) = \frac{1}{2R_c(t)C_c}$ - декремент затухания контура; $R_c(t) = \frac{L_c}{RC_c}$ - резонансное сопротивление параллельного контура; R - сопротивление потерь контура.

В реальном транзисторе ток эмиттера $I_e(t)$ нарастает практически по экспоненциальной зависимости. Известно, что максимальная амплитуда УК U_m оказывается пропорциональна крутизне и амплитуде пускового тока I_s . Если затухание колебательной системы положительно (декрементная система) ударные колебания имеют затухающий характер. В случае отрицательного затухания (инкрементная система) ударные колебания определяют экспоненциальное нарастание амплитуды автоколебаний.

Для осуществления численных расчетов в силу линейности системы предполагается, что амплитуда ударных колебаний достаточно мала, а флуктуации тока и регенеративной характеристики не влияют на процесс их формирования. В этом случае математическая модель диссипативной и инкрементной модели колебательной системы может быть задана в виде линейного неоднородного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами (1). Функция тока запуска автогенератора моделируется в виде импульсов с переменной крутизной переднего фронта (рис.2)

$$I_e(t) = I_s (1 - e^{-\chi t}), \quad (2)$$

где χ – показатель степени, учитывающий крутизну нарастания тока эмиттера.

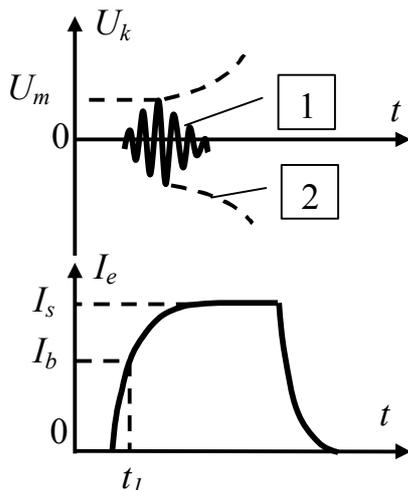


Рис. 2. Механизм ударного возбуждения колебательного контура СПП

Нарастающий ток эмиттера активного прибора, вызывая УК, одновременно управляет затуханием контура d , устремляя его значение к нулю и далее к отрицательному значению. Поэтому необходимо получить выражение, связывающее изменение затухания контура d от тока активного элемента. Функцию фактора регенерации достаточно сложно точно представить в аналитическом виде. В данном случае, фактор регенерации допустимо и удобнее представить в виде упрощенной линейной модели так, чтобы выполнялись следующие условия: при токе эмиттера $I_e = 0$ фактор регенерации равен $\Psi(I_e) = -1$, а при токе соответствующем граничному току $I_e = I_b$ фактор регенерации принимает значение $\Psi(I_e) = 0$, [5]. Это соблюдается при выражении зависимости фактора

регенерации от тока эмиттера в виде

$$\Psi(I_e) = \left(\frac{1}{I_b}\right) I_e - 1, \quad (3)$$

где $\frac{1}{I_b}$ - крутизна линеаризованной малосигнальной регенеративной характеристики.

Затухание колебательной системы СПП можно представить в виде зависимости от величины фактора регенерации, текущего значения тока эмиттера и использовать для решения дифференциального уравнения (1). Декремент затухания контура можно представить в виде

$$\delta(t) = \frac{G_\Sigma}{2 C_c} \Psi(I_e). \quad (4)$$

Учитывая соотношение (2), декремент затухания целесообразно записать следующим образом

$$\delta(t) = \frac{G_\Sigma}{2 C_c} \left[\left(\frac{1}{I_b}\right) I_s (1 - e^{-\chi t}) - 1 \right]. \quad (5)$$

При подстановке выражения для декремента затухания (5) и тока эмиттера (2) в выражение (1), уравнение автогенератора можно представить в виде

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{G_\Sigma}{C_c} \left[\left(\frac{1}{I_b}\right) I_s (1 - e^{-\chi t}) - 1 \right] \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C_c} \frac{dI_s (1 - e^{-\chi t})}{dt}. \quad (6)$$

Изменяя величину тока эмиттера в соответствии с выражением (2) от нуля до установившегося пускового значения I_s , можно рассчитать амплитуду УК для различной формы и величины импульсов тока. Следует подчеркнуть, что в решении уравнения будет учитываться соответствующее изменение затухания контура в процессе нарастания тока, как для декрементного, так и для инкрементного режимов работы СВЧ-АГ [5, 6].

Для решения данного уравнения создана программа в пакете MATLAB – «Shock». В качестве исходных данных, позволяющих моделировать различные начальные условия расчета, вводятся (для примера): $d_0 = 0,04$, начальное затухание контура; $f_0 = 1,68e9$ Åö, частота колебаний в контуре; $\chi = 1e7$, степень экспоненты, характеризующая скорость нарастания тока; $\tilde{N}_{\tilde{n}} = 5e-12$ îÔ, емкость коллекторного контура; $I_b = 2,95$ îÀ, граничный ток; $I_s = 3,00$ îÀ, амплитуда импульсного тока запуска.

Компьютерное моделирование процесса развития УК и перехода к автоколебаниям проводилось для транзисторного СПП, работающего на частоте 1680 МГц при различных значениях начального затухания нерегенерированного контура – $d_0 = 0,01 \div 0,1$. Пусковой ток I_s выбирался для транзистора КТ637А-2 в диапазоне значений $I_s = 1 \div 10$ мА, в соответствии с расчетами ОРХ, выполненными ранее. Показатель крутизны нарастания тока импульса запуска χ выбирался в диапазоне значений $1e6 \div 1e8$. Пусковое значение тока I_s устанавли-

валось на 0,05–0,1 мА больше значения граничного тока I_b . На рис.3 представлен результат компьютерного моделирования воздействия УК на развитие автоколебаний в СПП в виде зависимости напряжения на контуре от величины начального значения затухания нерегенерированного контура d_0 при пусковом $I_s = 3 \text{ мА}$ и граничном $I_b = 2,9 \text{ мА}$ токах.

Анализ показывает, что в момент времени $t = 0$ амплитуды УК в обоих случаях одинаковы. При начальном затухании контура $d_0 = 0,03$ УК не спадают до пренебрежимо малых значений флуктуационных колебаний в момент достижения током запуска граничного тока, а переходят в инкрементной области в автоколебания СПП. Следует отметить, что УК определяют фазу автоколебаний и маскируют внешний сигнал, снижая реальную чувствительность устройства [6]. При большем начальном затухании контура $d_0 = 0,09$ амплитуда УК снижается значительно быстрее. При некотором достаточном интервале времени УК снижаются до уровня флуктуационных колебаний на момент достижения током запуска граничного значения $I_s = I_b$. В этом случае УК не определяют ни начальную величину автоколебаний, ни их фазу, т.е. не оказывают существенного влияния на реальную чувствительность приемного режима СПП.

Также исследовалась зависимость амплитуды УК от скорости нарастания переднего фронта импульса тока запуска. Значения показателя степени $\chi = 4e7$ и $\chi = 6e7$ для закона изменения тока эмиттера позволяют снижать скорость нарастания переднего фронта запускающего импульса и уменьшать амплитуду УК. Для двух заданных значений χ рассчитанные уровни УК в контуре СПП существенно отличаются.

Интерес представляют результаты моделирования зависимости амплитуды УК в контуре СПП от соотношения пускового и граничного токов $D = I_s - I_b$. Расчет УК для одного значения граничного тока, но с разными значениями пусковых токов показывает, что величина превышения пускового тока над граничным существенным образом не влияет на уровень УК.

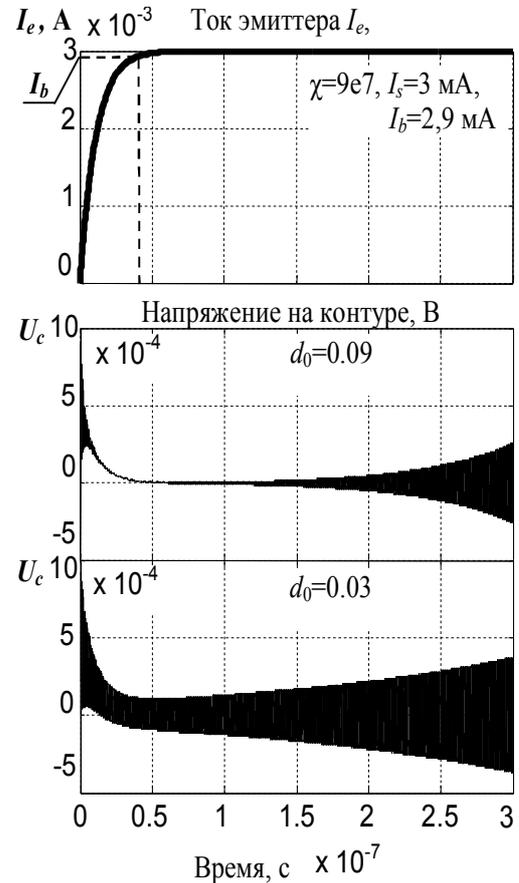


Рис.3. Зависимость амплитуды УК и автоколебаний контура СПП от собственного затухания d_0 при воздействии импульса запуска

Следует отметить, что здесь четко прослеживается другая, очень важная для выбора параметров запуска СПП, тенденция – с уменьшением значения $D = I_s - I_b$ происходит увеличение времени интегрирования внешнего входного сигнала за счет медленного роста амплитуды собственных автоколебаний, начиная от флуктуационного уровня. Интервал между значениями пускового и граничного токов $D = I_s - I_b$ определяет скорость нарастания автоколебаний в инкрементном режиме работы и, следовательно, его уменьшение наиболее существенно влияет на повышение реальной чувствительности СПП. Поэтому, при разработке СПП необходимо технически обеспечить возможность точно регулировать превышение пускового тока над граничным значением. Принципиально это можно обеспечить путем стабилизации среднего тока автогенератора СПП.

Далее представляется необходимым рассмотреть развитие колебательного процесса в СПП при одновременном воздействии ударных и флуктуационных колебаний в контуре, что практически встречается всегда. Для упрощения расчетов флуктуационные колебания моделируются эквивалентным гармоническим сигналом. Как ранее указывалось, режим работы транзистора на приемном интервале – малосигнальный, и регенеративная характеристика может быть представлена линейной зависимостью при небольших значениях тока эмиттера, соизмеримых со значением граничного тока, следовательно, допустимо суммировать воздействие токов ударных и флуктуационных колебаний. Уравнение СПП для данных условий запуска можно записать в виде

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2\delta(t) \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C_c} \frac{d(I_e(t) + I_{n\Sigma})}{dt}. \quad (7)$$

Декремент затухания $\delta(t)$ меняется во времени по закону изменения линеаризованного фактора регенерации СПП в диапазоне значений тока запуска от нуля до пускового тока и также соответствует формуле (5).

Закон изменения входного тока импульса суперизации соответствует выражению (2). Особенности моделирования флуктуационного тока при запуске СПП рассмотрены в работе [7]. Для учета совместного влияния необходимо просуммировать эти токи, продифференцировать полученное выражение

$$\frac{d[I_s(1 - e^{-\lambda t}) + 2\sqrt{\frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \left(\frac{1}{I_b}\right) I_s(1 - e^{-\lambda t}) - 1 \right| \sqrt{kTG_\Sigma + qI_s(1 - e^{-\lambda t})}} \sin(2\pi f t)]}{dt}, \quad (8)$$

а затем ввести его в уравнение (7). Окончательная форма выражения (8) не приводится из-за его громоздкости.

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4. На верхнем графике показан закон изменения тока запуска СВЧ-АГ $I_e(t)$, формируемый за счет суперлирующего импульса.

Средний график (рис. 4) представляет процесс изменения полосы пропускания во времени. Полоса пропускания уменьшается от значения Δf_0 , соответствующего начальному затуханию нерегенерированного контура d_0 декрементного участка, до минимального значения Δf_n , определяемого уровнем флуктуаций фактора регенерации СПП при достижении током запуска граничного уровня I_b . После изменения знака затухания от положительного значения к отрицательному рассчитанное значение полосы пропускания Δf принимает постоянное значение на инкрементном участке работы СВЧ-АГ.

При изменении частоты гармонических колебаний, имитирующих флуктуационные колебания, относительно резонансной частоты контура существует возможность проследить воздействие внешнего квазигармонического сигнала и УК в виде биений на переходной процесс развития автоколебаний и оценить их количественные показатели.

Таким образом, выбранная модель СВЧ-АГ и компьютерное моделирование предоставляет возможность оценить качественно и количественно параметры колебательного процесса в контуре для различных внешних сигналов, действующих на СВЧ-АГ.

Влияние УК заметно сказывается не только на реальной чувствительности, но и на спектре автоколебаний СПП. При высоком уровне УК, существенно превышающем амплитуду флуктуаций в момент выполнения условий самовозбуждения при достижении током запуска граничного значения $I_e = I_b$, происходит навязывание собственным автоколебаниям СПП, развивающимся на инкрементном участке работы, фазы затухающих колебаний с декрементного участка. В спектре излучения СПП появляются дискретные составляющие, расположенные друг от друга на интервале, равном периоду суперлирующих импульсов – $1/F_c$, (рис. 5).

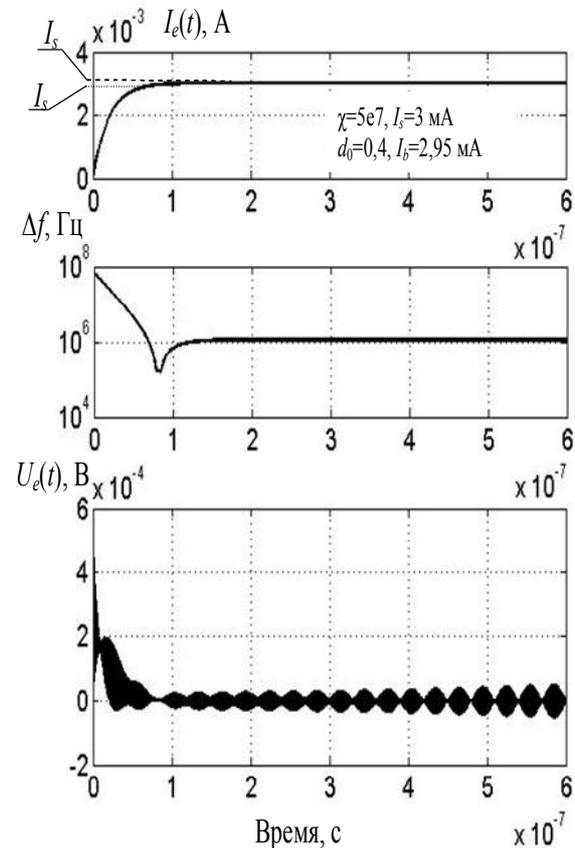


Рис. 4. Пусковой ток $I_e(t)$, полоса пропускания Δf , амплитуда автоколебаний в контуре СПП при одновременном учете ударных и внешних квазигармонических колебаний

Спектр излучения СПП принципиально должен иметь шумовой характер. Появление дискретных составляющих в спектре связано с влиянием УК. На рис.5 цифрой 1 отмечена огибающая спектра излучения последовательности радиоимпульсов СПП. Дискретные составляющие спектра вызваны влиянием УК, обозначены цифрой 2. Амплитуда сплошного (шумового) спектра излучения обозначена цифрой 3.

Результаты экспериментальных исследований позволили выработать критерий оценки уровня УК, который заключается в определении соотношения амплитуд дискретной спектральной составляющей – 2 и сплошного спектра – 3. Предложенный метод использовался при измерении предельной чувствительности опытных образцов СПП.

Под предельной (фазовой) чувствительностью понимается мощность внешнего непрерывного гармонического сигнала на резонансной частоте СПП, при которой отношение уровней дискретной спектральной составляющей – 2 и сплошного спектра – 3 равно единице. Результаты измерений показывают, что предельная чувствительность СПП на частоте 1782 МГц составляет минус 120-125 дБ при полосе пропускания 2-10 МГц.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Начальная амплитуда УК пропорциональна величине и крутизне нарастания пускового тока I_s . Амплитуда УК монотонно уменьшается на декрементном участке работы СПП. Скорость снижения амплитуды УК существенно зависит от собственного затухания контура СПП.
2. На инкрементном участке работы (при превышении током эмиттера граничного значения $I_e \geq I_b$) скорость нарастания амплитуды автоколебаний СПП определяется суммарной амплитудой ударных и флуктуационных колебаний, а также существенно зависит от величины отрицательного затухания контура, т.е. от превышения пускового тока I_e граничного значения I_b : $D = I_e - I_b$.
3. Для снижения влияния УК на чувствительность СПП величину пускового тока I_s , скорость нарастания переднего фронта импульса запуска $I_e(t)$ необходимо выбирать таким образом, чтобы к моменту выполнения условия самовозбуждения $I_e(t) = I_b$ амплитуду

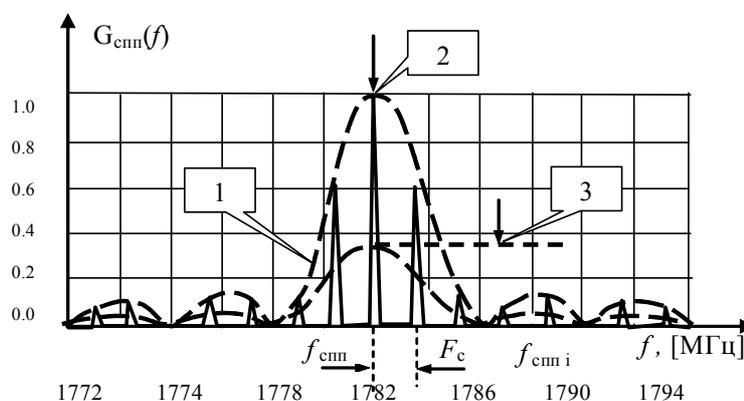


Рис. 5. Спектр излучения СПП с дискретными составляющими, возникающими из-за эффекта ударных колебаний

да УК A_{sh} успеваала снизиться до значений меньших, чем амплитуда флуктуационных колебаний $A_{n\Sigma}$: $A_{sh} \geq A_{n\Sigma}$.

4. При экспериментальных исследованиях СПП, влияние УК может эффективно оцениваться путем анализа спектра излучения. В качестве критерия оценки уровня УК предлагается использовать отношение амплитуд дискретных и шумовых составляющих спектра излучения СПП.

5. В классических импульсных автогенераторах линейчатый спектр излучения обусловлен влиянием ударных колебаний за счет импульсов пускового тока активного элемента.

Литература

1. Кравченко Г.И. Ударные колебания и пороговая чувствительность сверхрегенеративных усилителей. / Г.И. Кравченко, Ф.В. Марков, В.Л. Гуревич и др. // Радиотехника, 1973, №6, с.15.
2. Белкин М.К. Сверхрегенераторы / М.К.Белкин, Г.И.Кравченко, Ю.Г. Скоробутов, Б.А. Стрюков // Под ред. М.К. Белкина, М.: Радио и связь, 1983, 248 с.; ил. С. 125–127.
3. Иванов В.Э. Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративного приемопередатчика / В.Э.Иванов, С.И. Кудинов // «СВЯЗЬ-ПРОМ 2007»: Тр. межд. науч.-практич. конф. на IV Евро-Азиатском форуме «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007» (Екатеринбург, 2-4 мая 2007), ЗАО «Компания Реал – Медиа », 2007. С.78-80.
4. 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.
5. Кудинов С.И. Ударные колебания и чувствительность сверхрегенеративного приемопередатчика / С.И.Кудинов, В.Э. Иванов // Наука-Образование-Производство: «Опыт и перспектива развития»: мат. рег. науч.-техн.конф.:Т1. НТИ (филиал) УГТУ-УПИ.– Н.Тагил, 2007. С.171–173.
6. Кудинов С.И. Исследование флуктуаций затухания колебательной системы сверхрегенеративного приёмопередатчика в приёмном режиме / С.И. Кудинов, В.Э.Иванов // «СВЯЗЬ-ПРОМ 2007»: Тр. межд. науч.-практич. конф. на IV Евро-Азиатском форуме «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007» (Екатеринбург, 2-4 мая 2007), ЗАО «Компания Реал – Медиа », 2007. С.91-93.