

## Особенности внешнего гармонического воздействия на нелинейный колебательный СВЧ-контур

© Н.А. Максимов, Е.А. Мясин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино, Московская обл., Россия  
E-mail: maksna49@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 января 2025 г.

В окончательной редакции 30 января 2025 г.

Принято к публикации 30 января 2025 г.

Показано, что в результате внешнего воздействия на нелинейный СВЧ-контур в системе образуются резонанс на частоте, определяемой величиной индуктивности и постоянной составляющей нелинейной емкости  $p$ - $n$ -перехода при нулевом смещении на нем, и резонансы на гармониках как результат действия на  $p$ - $n$ -переход переменного напряжения. Наличие таких резонансов формирует амплитудно-частотную характеристику контура и позволяет управлять спектральной характеристикой колебаний, возбуждаемых в системе. Данное исследование было проведено на основе схемотехнического моделирования с использованием пакета программ ADS.

**Ключевые слова:** нелинейный контур, Si-Ge-транзистор,  $p$ - $n$ -переход, спектры, резонансные характеристики.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.10.60325.20252

Рассмотрим нелинейный СВЧ-контур (рис. 1, *a*). Контур состоит из линейной индуктивности и нелинейной емкости, роль которой выполняет один из  $p$ - $n$ -переходов Si-Ge-транзистора BFP 620F, граничная частота которого  $\sim 65$  GHz.

Емкость контура определяется нелинейной емкостью одного из  $p$ - $n$ -переходов транзистора BFP 620F (коллекторным в данном случае). Основная резонансная частота контура  $f_{m1} = 8.6$  GHz задается значением этой емкости при нулевом постоянном смещении на переходе и индуктивностью  $L$ , в данном случае равной 1 nH (рис. 1).

Рассмотрим резонансные характеристики контура в этом диапазоне частот и причины появления резонансов во всей области работы транзистора.

Вследствие нелинейности барьерной емкости  $C_b(t)$  ток через нее  $i_c(t) = C_b(t) \frac{dU}{dt}$  будет иметь помимо основной частоты ряд гармоник [1].

При  $L = 1$  nH (рис. 1, *b*, 2, *c*) емкости, которые лежат в основе этих резонансов, имеют следующие значения:  $C_{m1} = 0.345$  pF,  $C_{m2} = 0.06$  pF,  $C_{m3} = 0.017$  pF,  $C_{m4} = 0.006$  pF. Эти значения и по величине, и по порядку близки к емкостям, рассчитанным по формулам для высших гармоник в [1]. В данном случае наблюдалось четыре резонанса: первый на основной частоте контура, последний, четвертый, на частоте 65 GHz, т.е. в окрестности граничной частоты работы транзистора. Интенсивность (амплитуда) резонансов и их положение на оси частот зависят от величины индуктивности контура. Так, при  $L \geq 5$  nH (в данном случае) резонансами на гармониках можно пренебречь, основной резонанс превышает их на десятки децибел.

По мере уменьшения  $L$  роль резонансов на гармониках растет, и при  $L < 1$  nH происходит значительное уменьшение интенсивности в области основного резонанса и рост по амплитуде резонансов на гармониках (рис. 2, *a*, *c*, *e*). При  $L = 0.1$  nH наиболее интенсивными становятся резонансы на частотах  $\sim 47$  и 69 GHz.

Известно, что в СВЧ-контуре при достаточной амплитуде внешнего воздействия и частоте воздействия до  $0 < f_{ext} \leq 2f_{m1}$  (где  $f_{ext}$  — частота внешней силы, а  $f_{m1}$  — частота основного резонанса) возбуждаются сложные колебания, в том числе и колебания с непрерывным спектром [2]. Изменение величины  $L$  позволяет смещать интенсивность непрерывного спектра по диапазон от нижних частот (рис. 2, *a*, *b*) до граничной частоты транзистора (рис. 2, *e*, *f*) или выравнивать генерацию колебаний с непрерывным спектром во всем частотном диапазоне работы транзистора (рис. 2, *c*, *d*). Для каждого случая воздействие внешним сигналом происходит на частотах главного резонанса  $m1$ .

Следует отметить, что для 18 различных значений индуктивности, рассмотренных в работе в интервале  $L = 0.1$ –50 nH, величина емкости первого резонанса (соответственно и гармоник) изменяется в пределах от 0.49 pF при  $L = 0.1$  nH до 0.16 pF при  $L = 50$  nH. Среднее значение емкости первого резонанса оказалось равным  $\sim 0.2$  pF. Такое же значение емкости перехода коллектор–база приводится в паспортных данных транзистора BFP 620F. Интересен тот факт, что при заданной индуктивности система при сканировании внешнего сигнала по частоте выбирает невозмущенную емкость основного резонанса из приведенного выше интервала 0.16–0.49 pF.

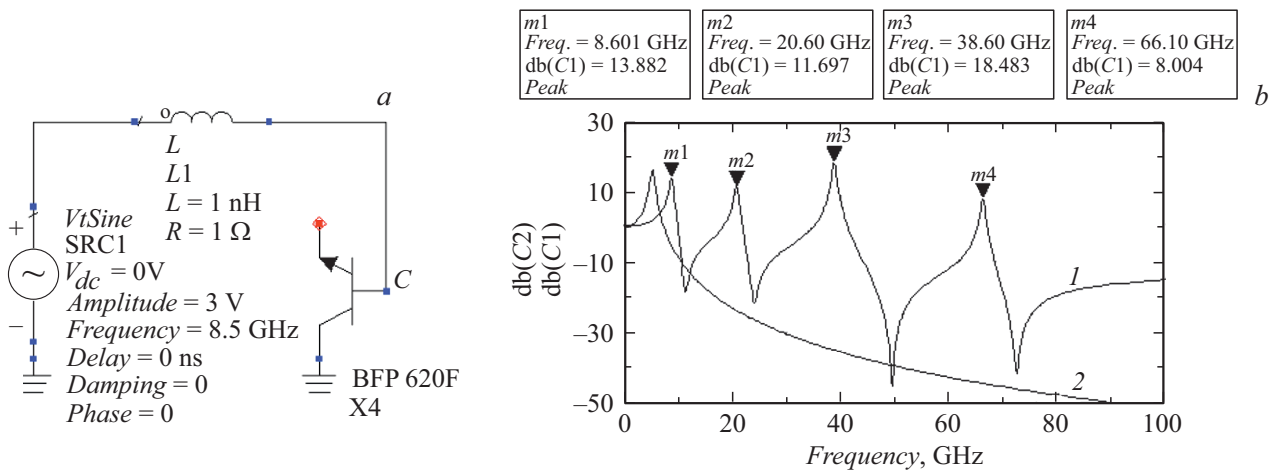


Рис. 1. *a* — нелинейный контур на основе *p-n*-перехода транзистора BFP 620F и индуктивности  $L = 1$  нН при внешнем гармоническом воздействии. *b* — резонансные характеристики нелинейного контура (1) и для сравнения линейного контура с  $C = 1$  пФ,  $L = 1$  нН (2).

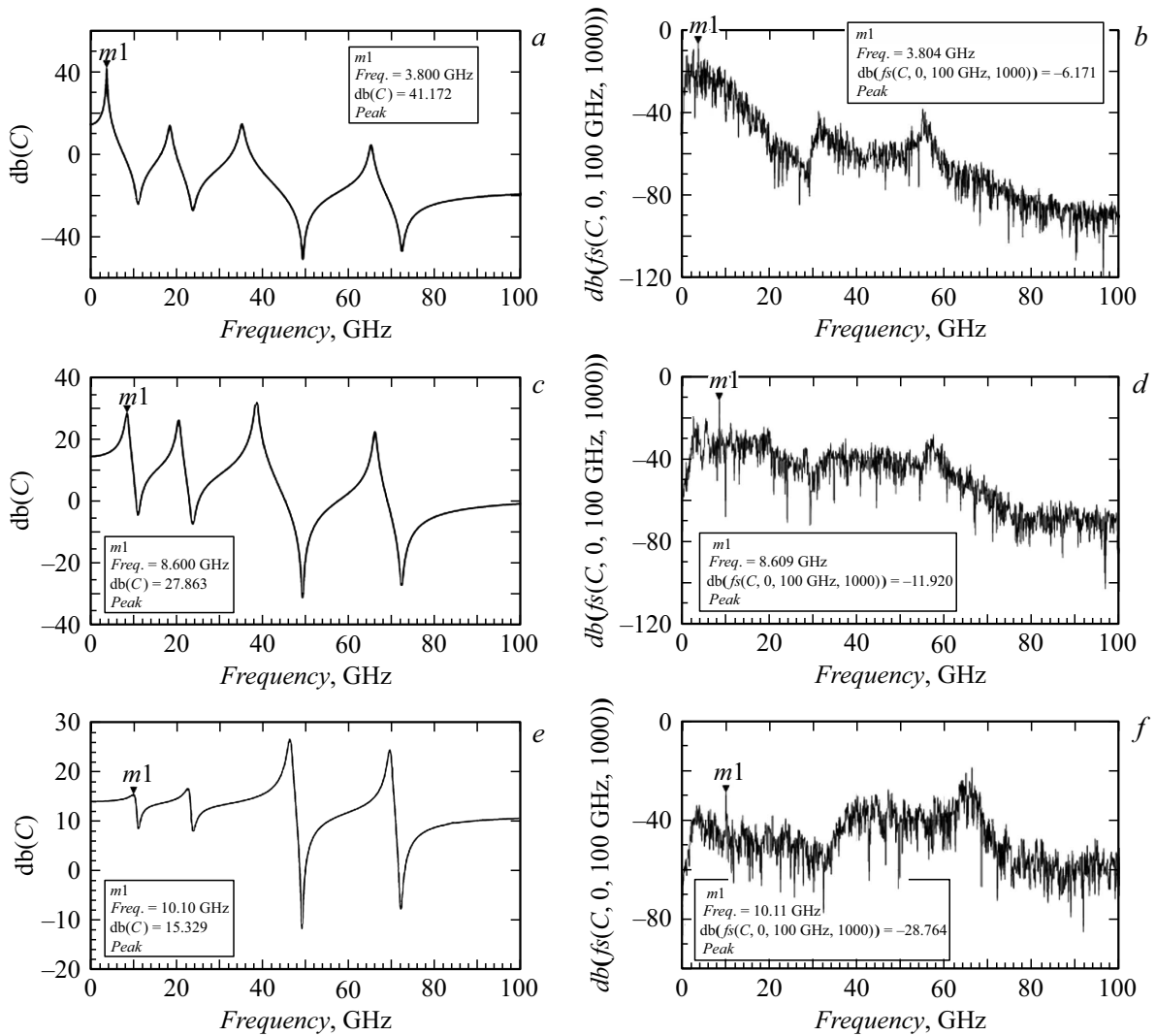


Рис. 2. Динамика изменения резонансных характеристик контура в зависимости от величины индуктивности  $L$  (*a, c, e*) и соответствующее изменение спектральных характеристик непрерывных колебаний в контуре (*b, d, f*).  $L = 10$  (*a, b*),  $1$  (*c, d*) и  $0.1$  нН (*e, f*).

На основании проведенного исследования схемотехнической модели можно сделать заключение, что в нелинейном колебательном контуре, в котором в качестве нелинейности используется емкость  $p-n$ -перехода СВЧ-гетеротранзистора BFP 620F, формирование общей резонансной характеристики системы происходит с участием как резонанса на основной частоте контура, так и резонансов на высших гармониках. Вид резонансной характеристики зависит от величины индуктивности контура, что позволяет управлять спектральной характеристикой колебаний, возбуждаемых в контуре, во всем диапазоне работы транзистора (вплоть до его граничной частоты  $\sim 65$  GHz). Эту особенность нужно учитывать при разработке генераторов СВЧ-диапазона для различных приложений.

### **Финансирование работы**

Исследование проведено при выполнении планового задания.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### **Список литературы**

- [1] Л.С. Берман, *Введение в физику варикапов* (Наука, Л., 1968).
- [2] А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.А. Максимов, А.И. Панас, *Генерация хаоса* (Техносфера, М., 2012).