

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛИКЕР-ШУМОВ ВАРИКАПОВ

А. С. Лучинин, Е. В. Вострещова

Шумы варикапов оказывают существенное влияние на качество генераторов, управляемых напряжением, широко применяемых в современной радиоэлектронной аппаратуре. Шумовые свойства варикапов до настоящего времени изучены недостаточно, неясен механизм возникновения низкочастотных флуктуаций барьерной емкости обратносмещенного  $p-n$ -перехода. В опубликованных работах содержится очень мало экспериментальных данных о фликер-шумах этих приборов [1, 2].

В данном сообщении представлены результаты экспериментального исследования шумов варикапов. Цель исследования: оценить уровень фликер-шумов нескольких типов приборов при использовании их на разных частотах; проверить, есть ли связь между уровнями низкочастотных флуктуаций напряжения на варикапах при прямом смещении и флуктуаций их емкости при обратном смещении; установить взаимосвязь уровня шумов варикапов с другими их параметрами, а также током и напряжением смещения.

Измерения шумового напряжения варикапов при прямом смещении выполнены прямым методом с помощью малощумящего усилителя аналогично [3]. Флуктуации емкости измерены генераторным методом. Для измерений использованы малощумящие LC-генераторы с частотами колебаний 63 и 227 МГц и спектральными плотностями мощности фазовых флуктуаций на частоте 1 кГц соответственно 112 и 106 дБ/Гц. Флуктуации частоты генераторов измерены с помощью малощумящего частотного детектора, настроенного на частоту 1 МГц, и преобразователя частоты. В качестве гетеродинов применены кварцевые генераторы. Измерения спектров шумов выполнены анализатором спектра С5-3.

Основные результаты измерений представлены на рис. 1—4. На первом рисунке проиллюстрирована связь между уровнями флуктуаций напряжения на варикапах при прямом смещении и емкости при обратном смещении. Флуктуации напряжения пересчитаны в относительные флуктуации тока и показаны в виде точек на плоскости, где по горизонтальной оси отложена нормированная к постоянному току (1 мА) спектральная плотность мощности

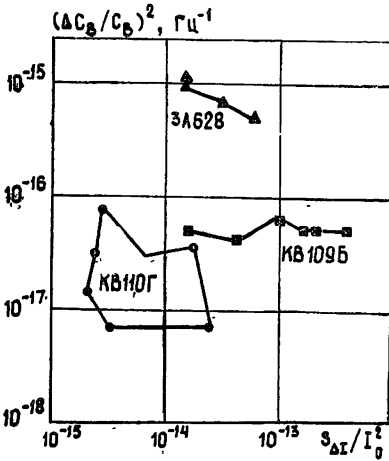


Рис. 1.

флуктуаций тока, а по вертикальной оси — нормированная к значению емкости варикапов в рабочем режиме (при смещении 13 В) спектральная плотность флуктуаций емкости. Указанные спектральные плотности измерены на частоте 80 Гц. Точки соответствуют экземплярам варикапов.

На рис. 2 показаны зависимости спектральных плотностей мощности (на частоте 80 Гц) шумового напряжения варикапов при прямом смещении от тока и флуктуаций емкости от напряжения смещения для варикапов КВ 109Б, КВ 110Г, КВС 111Б, КВ 112Б. Флуктуации емкости нормированы к значениям емкости варикапов при указанных на рисунке смещениях. Разница в величинах крутизны управления емкостью варикапов не учитывалась. Однако ее легко учесть, имея в виду, что зависимость емкости от напряжения описывается выражением [4]

$$C_n = C_0 / \sqrt[n]{\varphi + U}, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение смещения, прикладываемое к варикапу;  $\varphi$  — контактная разность потенциалов;  $n$  — степень корня, для варикапов КВ 110Г, КВС 111Б, КВ 112Б и 3А 628 близка к двум, а для варикапов КВ 109Б —  $n \approx 1$ ;  $C_0$  — постоянная, для названных типов варикапов соответственно равна 39, 68, 33, 2, 6, 45 (пФ·В<sup>-n</sup>) с разбросом от экземпляра к экземпляру примерно 20%.

Флуктуации напряжения можно пересчитать во флуктуации тока варикапов. Вольт-амперные характеристики этих приборов описываются соотношением

$$i_n = I_0 (e^{\gamma U} - 1), \quad (2)$$

где  $\gamma = 23 - 30$  для варикапов КВ 110Г, КВС 111Б, КВ 112Б и  $32 - 36$  для варикапов КВ 109Б и 3А 628;  $I_0 = 10^{-15} \div 10^{-9}$  для разных типов и экземпляров варикапов.

Для сопоставления относительных уровней флуктуаций при прямом и обратном смещении на рис. 2 цифрами указаны экземпляры варикапов. Пунктиром в верхнем ряду графиков показан уровень собственных шумов измерительной установки. Многие экземпляры варикапов (особенно КВС 111Б) имеют уровень шумов при прямом смещении меньше, чем порог чувствительности установки.

Измерение флуктуаций емкости варикапов на разных частотах дало одинаковые результаты.

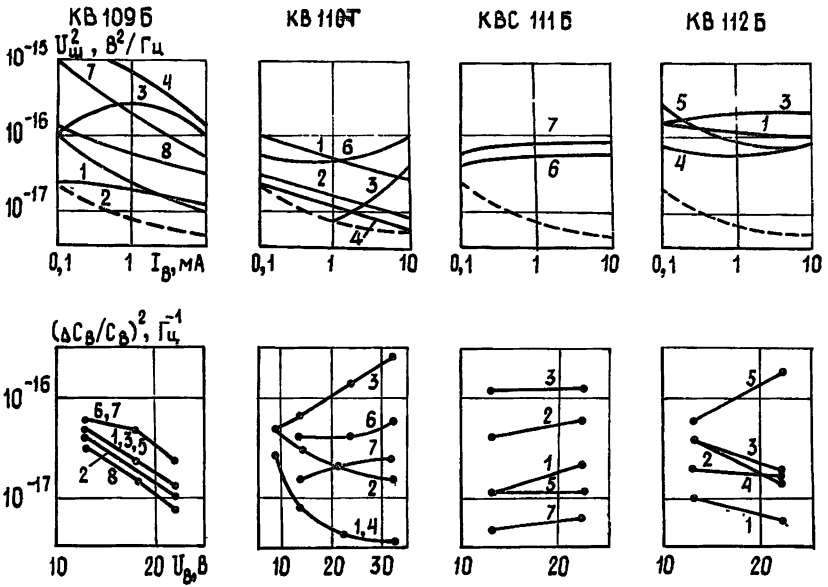


Рис. 2.

При измерениях флуктуаций емкости варикапы включались в контур генераторов с малым коэффициентом включения, чтобы избежать влияния амплитудных шумов генераторов [1, 2]. Крутизна управления частотой составляла 0,5—1 МГц/В на частоте 227 МГц и 0,1—0,2 МГц/В на частоте 63 МГц. Однако даже при такой крутизне уровень шумов генераторов возрастал на 10—20 дБ по сравнению с шумом без варикапов. На рис. 3 показаны спектры фазовых шумов генератора с частотой колебаний 227 МГц в трех случаях: 1 — уровень шумов без варикапов; 2 и 3 — спектры с варикапом KB 109Б в контуре, крутизна управления 0,7 МГц/В (2 — смещение на варикап подается через дроссель, 3 — через сопротивление 820 К).

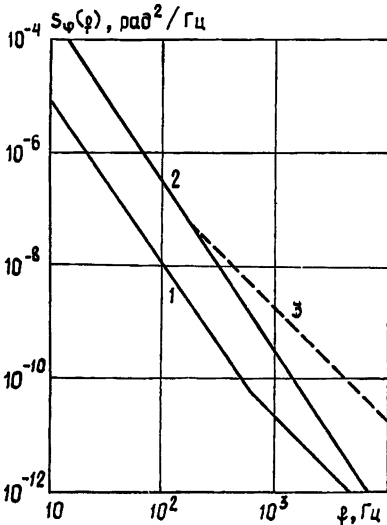


Рис. 3.

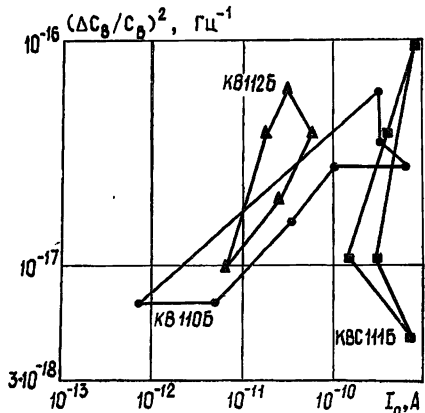


Рис. 4.

На рис. 4 показана взаимосвязь спектральной плотности относительных флуктуаций емкости варикапов (при  $U = 13 В$ ) и параметра аппроксимации их вольт-амперных характеристик  $I_0$ .

Анализируя результаты измерений, можно отметить следующее.

- 1) Относительные флуктуации емкости варикапов на несколько порядков меньше относительных флуктуаций тока варикапов при прямом смещении.
- 2) Уровни флуктуаций тока варикапов и их емкости практически некоррелированы (см. рис. 1).

3) Разные типы и экземпляры варикапов имеют существенно различные уровни флуктуаций емкости (на 10—20 дБ и более). При этом варикапы 3А 628 со значительно меньшей емкостью, чем остальные (из перечисленных), имеют существенно больший уровень относительных флуктуаций емкости.

4) Несмотря на весьма малый относительный уровень флуктуаций емкости варикапов они сильно увеличивают уровень шумов генераторов.

5) Зависимости уровней шумового напряжения варикапов от тока и флуктуаций емкости от напряжения существенно разнородны у разных типов и экземпляров варикапов (рис. 2). Это дополнительно подчеркивает отсутствие связи между ними.

Рис. 2 показывает, что вклад шумов варикапов во флуктуации генераторов, управляемых напряжением, увеличивается с ростом напряжения смещения. Это следует из сопоставления зависимостей спектральных плотностей флуктуаций емкости варикапов от напряжения смещения и крутизны управления их емкостью (см. (1)).

6) Имеет место значительная корреляция между уровнем относительных флуктуаций емкости варикапов и видом их вольт-амперных характеристик (рис. 4), в частности параметром  $I_0$  (2), связанным с величиной тока обратносмещенного  $p-n$ -перехода. Малошумящие варикапы обладают малым  $I_0$ .

Измерения вольт-фарадных характеристик варикапов показали, что какую-либо заметную связь их с уровнем флуктуаций указать сложно.

7) При измерениях установлено, что спектральные плотности мощности шумового напряжения при прямом смещении и флуктуаций емкости варикапов в области низких частот подчиняются закону  $1/f^\alpha$  и  $\alpha \approx 1$ , особенно у экземпляров с низким уровнем флуктуаций. Некоторое отличие от этого закона имеют некоторые (не все) сильно шумящие экземпляры. При этом корреляции в форме спектров шумового напряжения и флуктуаций емкости нет.

8) Целесообразно выделить варикапные сборки КВС 111Б (два варикапа в одном кристалле). Как уровни шумового напряжения, так и уровни флуктуаций емкости обоих варикапов в сборке имеют очень малое отличие — не более 0,5—1 дБ. Причем если имеется отклонение от закона  $1/f^\alpha$  спектральной плотности шумов, то оно тоже одинаково. Уровни шумов при прямом и обратном смещении у этих варикапов, как и у остальных, некоррелированы (рис. 2).

9) Уровень флуктуаций емкости варикапов не зависит от рабочей частоты.

10) Закономерности поведения флуктуаций емкости при обратном смещении и шумового напряжения при прямом смещении варикапов на основе кремния и арсенида галлия (3А 628) не отличаются (рис. 1). Зависимость уровня шумового напряжения от тока для варикапов 3А 628 примерно такая же, как у варикапов КВ 112Б.

При исследовании шумов варикапов генераторным методом обычно возникает вопрос о влиянии амплитудных шумов генератора на результат измерений. В данной работе, обратившись к полученным результатам, можно отметить следующее. Шумы генераторов с варикапами типов КВ 110Г, КВС 111Б, КВ 112Б и 3А 628 имеют большой разброс в уровнях при разных экземплярах варикапов, что указывает на преобладание вклада именно шумов варикапов. Некоторое сомнение вызывает результат применения варикапов КВ 109Б (рис. 1). Однако кривые зависимости флуктуаций емкости варикапов от напряжения смещения не подтверждают это. Если даже имеет место преобладание влияния амплитудных шумов при наименьшем смещении, то должен наблюдаться более сильный спад флуктуаций емкости с увеличением смещения (рис. 2).

Не подтверждает факт преобладания влияния амплитудных флуктуаций также эксперимент со встречно-последовательным включением варикапов. Включение четырех варикапов вместо одного приводит к уменьшению уровня шумов генератора примерно на 6 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко М. П., Кулешов В. Н. — Электросвязь, 1984, № 2, с. 55.
2. Палян С. Р. — Межвузовский сборник научных трудов. — Новосибирск: НЭТИ, 1985, с. 94.
3. Лучинин А. С., Ковалев Е. И., Коробейников А. В., Костин А. А. — Метрология, 1984, № 10, с. 58.
4. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений / Под ред. Н. Н. Горюнова, Ю. Р. Носова. — М.: Сов. радио, 1968, с. 108.

Уральский политехнический институт

Поступила в редакцию  
2 января 1986 г.,  
после доработки  
23 мая 1986 г.