

УДК 621.391.82: 621.3.049.77

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Н.А.Титович

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Проведены экспериментальные исследования и расчеты влияния ВЧ и СВЧ электромагнитных помех на характеристики и параметры р-п-перехода и биполярного транзистора (БТ). Разработанные точные модели воздействия электромагнитных помех на простейшие полупроводниковые приборы (ПП) позволяют значительно снизить затраты по оценке восприимчивости более сложных интегральных схем (ИС) и электронных устройств.

**Ключевые слова:** полупроводниковые приборы, интегральные схемы, ВЧ и СВЧ помехи; электромагнитная восприимчивость.

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND INTEGRATED MICROCIRCUITS

N. Titovich

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** Experimental studies and calculations of the influence of high-frequency and microwave electromagnetic interference on the characteristics and parameters of the p-n junction and bipolar transistor (BT) were conducted. The developed accurate models of the impact of electromagnetic interference on the simplest semiconductor devices (SD) allow to significantly reduce the costs of assessing the susceptibility of more complex integrated circuits (IC) and electronic devices.

**Keywords:** semiconductor devices, integrated circuits, high-frequency and microwave interference; electromagnetic susceptibility.

### Введение

Современные подходы к проектированию радиоэлектронной аппаратуры, работающей в сложной помеховой обстановке, предполагают рассмотрение вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС) уже на стадии выбора элементной базы. Микросхемы являются сердцем практически любой электронной системы. Благодаря небольшим размерам соединения между элементами ИС малы и поэтому не могут функционировать в качестве эффективных антенн. Поэтому уровни излучаемых ими помех, а также уровни наводок на эти соединения существенно меньше, чем от помех, присутствующих на значительно более длинных проводниках печатных плат, на которых размещены ИС. Основными источниками ЭМП, которые воздействуют на ИС, являются шины питания и заземления, незащищенные сигнальные проводники. Нелинейность активных элементов ИС может привести к детектированию мешающих ВЧ и СВЧ помех. Продукты детектирования могут вызвать как искажение полезных сигналов, так и сдвиги постоянного напряжения и тока в чувствительных узлах ИС, что может вывести ее из правильного режима работы. На практике аналоговые ИС более восприимчивы к электромагнитным воздействиям, чем цифровые, так как они, как правило, не работают с заранее установленными уровнями сигналов, которые предполагают пороговую устойчивость к помехам [1].

К настоящему времени разработаны критерии, методики и специализированная аппаратура для исследования восприимчивости полупроводниковых ПП и ИС к воздействию ВЧ и СВЧ электромагнитных помех (ЭМП). Они позволяют выявить общие тенденции поведения различных элементов при воздействии радиопомех,

накопить определенную справочную информацию. Однако для более детального исследования восприимчивости более сложных ИС проведение натуральных экспериментов все более сдерживается их громоздкостью, высокой стоимостью. Именно поэтому уже с 80-х годов исследователи все больше используют расчетный метод [2, 3]. Разработка точных моделей реакции простейших элементов на воздействие ЭМП позволяет в дальнейшем перейти к моделированию сложных схем и получить достоверные результаты, прибегая к натурным экспериментам только для подтверждения полученных в ходе расчетов выводов.

### Основная часть

При анализе влияния внеполосных ВЧ и СВЧ ЭМП на работу ИС можно выделить два основных подхода. В основу первого подхода положено использование программы SPICE, предназначенной для описания электрических цепей, расчета во временной и частотной областях и для анализа переходных процессов. Моделирование сложных интегральных схем связано с обработкой больших объемов данных и значительными затратами машинного времени, что вызвано большим количеством элементов схемы. Несмотря на то, что результаты приведенных расчетов достаточно хорошо совпадают с данными экспериментальных исследований, главная трудность такого схемотехнического моделирования микросхем – секретность, т.е. отсутствие в свободном доступе принципиальных электрических схем ИС, тем более с физическими параметрами пассивных и активных элементов. Полной информацией обладают только разработчики ИС [2, 4].

Второй подход предполагает детальное описание входных/выходных цепей ИС и представление внутренней структуры микросхемы, как черный ящик. Упрощенная модель ОУ для анализа воздействия радиопомехи на инверсный вход, представленная на рис.1а, требует минимальных вычислительных затрат [3]. Учет влияния ЭМП на входные цепи усилителя осуществляется введением в цепь прямого или инверсного входа ОУ генератора напряжения смещения  $U_{11}$  (рис.1а), который обусловлен детектированием ВЧ помехи в  $p-n$ -переходах. Величина напряжения генератора зависит от поглощаемой мощности ЭМП  $P_{RF}$  и для малых значений амплитуд помехового сигнала составляет  $U_{11} = KP_{RF}$ , где  $K$  – постоянная, зависящая от частоты ЭМП и положения рабочей точки ОУ по постоянному току.

На рис.1б представлены результаты расчетов с помощью макро- , полной и упрощенной моделей, а также экспериментальные зависимости выходного напряжения ОУ от уровня мощности ВЧ помехи с частотой 220 МГц, воздействующей на инверсный вход [2].

Анализ полученных результатов показывает, что точность моделирования с помощью упрощенной модели во многом зависит от точности описания влияния помех на входные, выходные цепи или шины питания и заземления ИС. При этом не требуется полная информация о физических параметрах всех пассивных и активных элементов, как в полной и макромоделях. Достаточно детально учесть параметры элементов расположенных по периферии кристалла ИС, на которые воздействия ЭМП наиболее вероятны.

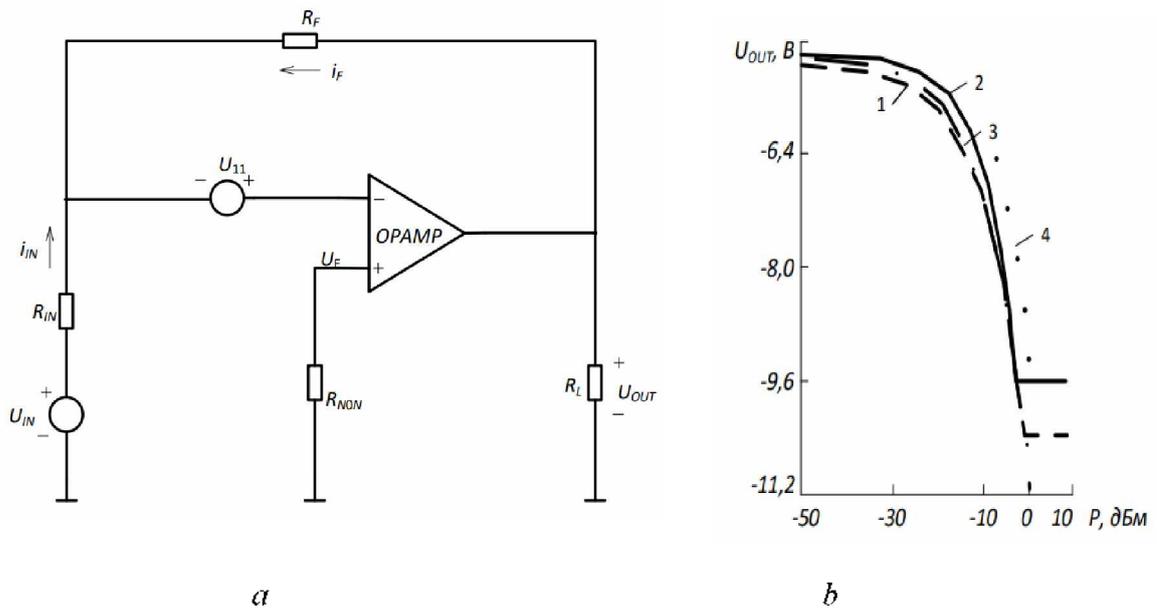


Рис. 1. Упрощенная модель ОУ  $\mu A741$  для анализа восприимчивости при подаче ЭМП на инверсный вход (а) и результаты (б) экспериментов (4) и расчетов с помощью макро- (1), полной (2) и упрощенной (3) моделей

Fig. 1. Simplified model of the MCA741 op-AMP for the analysis of susceptibility when EMF is applied to the reverse input (a) and the results (b) of experiments (4) and calculations using macro (1), full (2) and simplified (3) models.

Проведенные исследования показали, что при оценке восприимчивости отдельных ПП и логических элементов (ЛЭ) целесообразно применять метод прямого введения мощности ВЧ и СВЧ помехи в цепь исследуемого элемента [1, 3]. Результаты эксперимента позволяют учесть все особенности влияния ЭМП на ПП и простейшие ИС и отразить это в расчетных моделях. Используя для построения моделей сложных ИС библиотеку простых моделей, можно прибегать к проведению эксперимента только на стадии испытаний законченного блока или устройства, что позволяет значительно сократить затраты времени и средств.

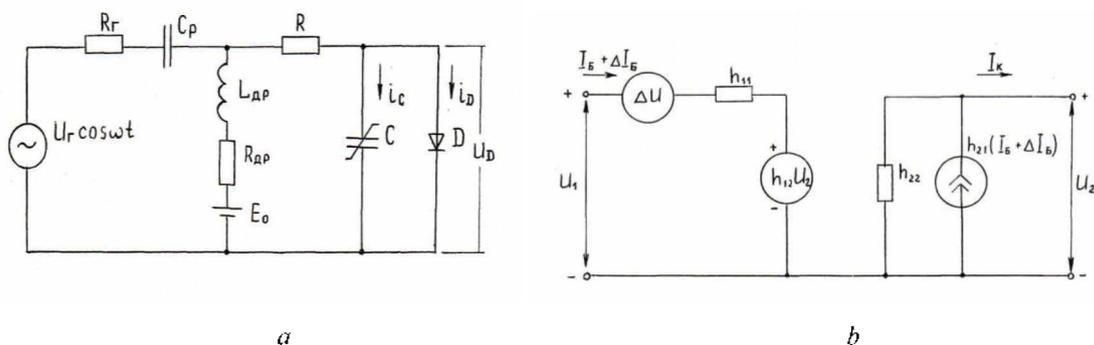


Рис. 2. Эквивалентные схемы  $p-n$  перехода (а) и биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (б), учитывающие воздействие ВЧ помехи

Fig. 2. Equivalent circuits of a  $p-n$  junction (a) and a bipolar transistor in a circuit with a common emitter (b), taking into account the effects of RF interference

Известны несколько моделей, учитывающих воздействие радиопомех на характеристики и параметры  $p-n$  переходов и транзисторов [2, 4]. Важным условием для их дальнейшего использования при оценке восприимчивости ИС является хорошая корреляция с результатами эксперимента и относительная простота при определении эквивалентных параметров. На рис.2 представлены эквивалентные схемы  $p-n$ -перехода (а) и биполярного транзистора (б), на которые действует ВЧ помеха, превышающая граничные рабочие частоты ПП. В данном случае  $U_{\Gamma}$  напряжение гармонического помехового сигнала,  $R_{\Gamma}$  – выходное сопротивление генератора помехи,  $E_0$  – напряжение источника смещающего напряжения,  $L_{\text{ДР}}$  и  $R_{\text{ДР}}$  – индуктивность и сопротивление ВЧ-дресселя, препятствующего проникновению ВЧ-помех в цепь источника смещения,  $R$  и  $C$  – последовательное сопротивление и эквивалентная параллельная емкость перехода. При рассмотрении данной модели важно учитывать не только нелинейность  $p-n$ -перехода, но и нелинейность его диффузионной емкости [2].

На рис. 3, а изображены снятые экспериментально и рассчитанные с помощью модели (рис. 2, а), вольт-амперные характеристики  $p-n$ -перехода при воздействии ВЧ помех различной мощности.

При расчетах закон изменения емкости перехода представлялся как линейной (штрих-пунктирные линии), так и экспоненциальной (штриховые) функцией. Из рис. 3, а видно, что линеаризация ВАХ, описанная в [3], не позволяет достичь высокой точности, учет же нелинейности емкости дает результаты значительно более близкие к данным эксперимента (сплошные линии). По результатам расчетов (рис. 3, а) не сложно определить величины изменения напряжения рабочей точки  $\Delta U$  и приращения тока  $\Delta I$  за счет детектирования огибающей ВЧ помехи относительно ВАХ при  $P_{\text{п}}=0$ .

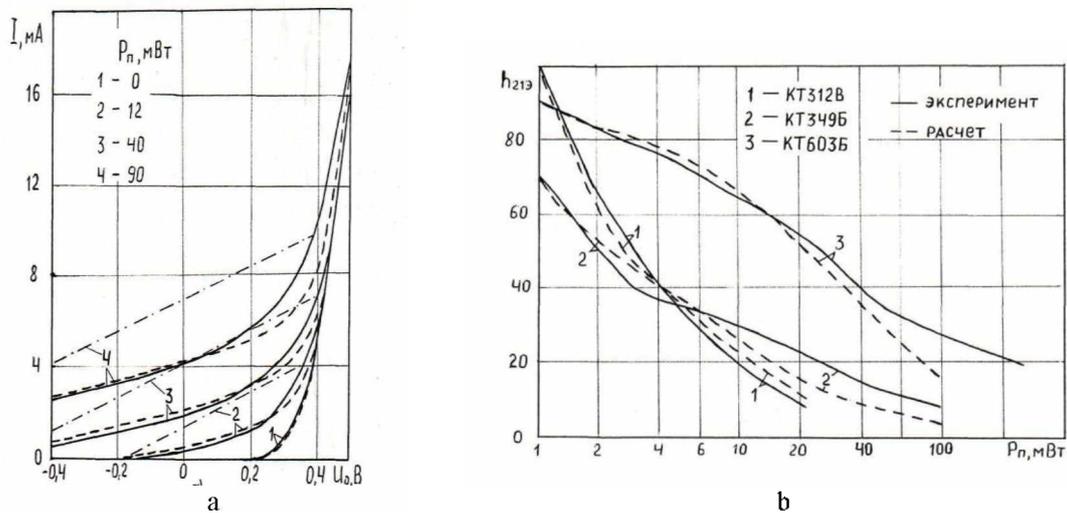


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные изменения характеристик  $p-n$  перехода (а) и коэффициента передачи по току биполярных транзисторов (б) от уровня поглощенной энергии ЭМП с частотой 400 МГц

Fig. 3. Experimental and calculated changes in the characteristics of the  $p-n$  junction (а) and the current transfer coefficient of bipolar transistors (б) from the level of absorption by the action of EMF with a frequency of 400 MHz

В эквивалентную схему биполярного транзистора (БТ) (рис.2б), представленную в системе  $h$ -параметров, введены дополнительный источник напряжения  $\Delta U$  и увеличение выходного тока на величину  $\Delta I$ , обусловленные детектированием огибающей радиопомехи на эмиттерном переходе транзистора, которые можно

определить по изменению ВАХ  $p$ - $n$ -перехода. При оценке восприимчивости транзисторов изменения ВАХ сравнивать неудобно. Поэтому для БТ в качестве обобщенного критерия удобнее всего выбрать степень снижения коэффициента передачи по току  $h_{21э}$ , которую можно рассчитать с помощью выражения:

$$h_{21э} = h_{21э0} / (1 + qP_{п}((R_6A_3)/(2\pi f_{п}C_{п}))^{1/2}/(2kTP_3I_{6н}(R_6+(1+h_{21э0})R_3))), \quad (1)$$

где  $h_{21э0}$  – значение коэффициента передачи при  $P_{п}=0$ ;  $R_3$  и  $R_6$  – сопротивления эмиттера и базы БТ;  $I_{6н}$  – ток базы в режиме насыщения;  $P_{п}$ ,  $f_{п}$  – мощность и частота воздействующей ЭМП;  $P_3$  – периметр эмиттера;  $A_3$  – площадь перехода Э-Б;  $C_{п}$  – емкость перехода Э-Б;  $kT/q = 0,026$  В.

На рис. 3, б представлены рассчитанные и экспериментальные зависимости изменения  $h_{21э}$  от уровня воздействующих помех [4]. Результаты расчетов и экспериментов для нескольких типов БТ достаточно хорошо совпадают. Это позволяет использовать предложенную модель  $p$ - $n$ -перехода (рис.2а) для определения величины дополнительного напряжения смещения  $U_{11}$  в схеме ОУ (рис. 1, а). Установлено, что менее восприимчивыми являются БТ с большим периметром эмиттера  $P_3$ , т. е. имеющие встречно-штыревую конструкцию эмиттерного перехода. Более восприимчивы к воздействию радиопомех чувствительные схемы ОУ, маломощные БТ, быстродействующие ИС. Восприимчивость ПП и ИС снижается с увеличением частоты воздействующих помех.

### Заключение

Измерения и расчеты влияния ВЧ и СВЧ помех на различные типы диодов, транзисторов и ИС [2, 4] показали, что описанные выше модели достаточно достоверно отражают влияние радиопомех на ВАХ  $p$ - $n$ -переходов и транзисторов. Это позволяет снизить затраты на проведение натуральных испытаний восприимчивости более сложных электронных устройств. Точные модели реакции простейших элементов на воздействие ЭМП позволяют использовать их при моделировании сложных схем.

### Список использованных источников

1. Redouté J.-M., Steyaert M. (2010) *EMC of Analog Integrated Circuits, Analog Circuits and Signal Processing*. Springer Science+Business Media B.V. – 248 p.
2. Титович Н.А. Моделирование воздействия радиопомех на логические элементы (2005). 6-й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: материалы симпозиума. 21-24 июня 2005 г. – Санкт-Петербург. – С. 220–223.
3. Бригидин А.М., Титович Н.А., Кириллов В.М., Юсов Ю.П., Листопад Н.И., Ясюля Г.И. (1992). Влияние электромагнитных помех на работоспособность полупроводниковых приборов и интегральных схем (обзор). *Электронная техника. Управление качеством*. Вып. 1 (148). С. 3–13.
4. Титович Н.А., Ползунов В.В. (2015) Исследование восприимчивости полупроводниковых приборов к воздействию электромагнитных помех // *Журнал «Доклады БГУИР»*. №1. с.114-118.

### References

1. Redouté J.-M., Steyaert M. (2010) *EMC of Analog Integrated Circuits, Analog Circuits and Signal Processing*. Springer Science+Business Media B.V. – 248 p.
2. Titovich N. Modeling the impact of radio interference on logical elements (2005). *6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology: Symposium Proceedings, June 21-24, 2005* – St. Petersburg. – P.220-223.
3. Brigidin A., Titovich N., Kirillov V., Yusov Yu., Listopad N., Yasyulya G. (1992). Influence of electromagnetic interference on the performance of semiconductor devices and integral circuits (review). *Electronic engineering. Quality management*. Iss. 1 (148). P. 3–13.

4. Titovich N., Polzunov V. (2015) Study of susceptibility of semiconductor devices to electromagnetic interference // *Journal "Reports of BSUIR"*, No. 1, pp. 114-118.

**Сведения об авторе**

**Титович Н.А.**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ИРТ, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
nikolai.titovich@gmail.com.

**Information about the author**

**Titovich N.**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the IRT Department, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",  
nikolai.titovich@gmail.com.