

# МЕТОД РАСЧЁТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В УСТРОЙСТВАХ, СОДЕРЖАЩИХ PIN-ДИОДЫ

## METHOD OF CALCULATION NONLINEAR DISTORTIONS IN THE DEVICES CONTAINING PIN-DIODES

*N. Unru*

### Annotation

The question on nonlinear distortions of a high-frequency signal in pin-diodes is considered. The method of calculation is offered and the analytical expressions allowing simply and precisely enough to calculate level of nonlinear distortions in devices, containing pin-diodes are presented. The settlement data experimental and corresponding to them is cited.

**Keywords:** pin-diode, distortions, nonlinear.

*Унру Николай Эдуардович*

*К. т. н., доцент, каф. радиоприёмных  
и радиопередающих устройств,  
радиотехника, Новосибирский  
государственный технический  
университет, г. Новосибирск*

### Аннотация

Рассмотрен вопрос о нелинейных искажениях высокочастотного сигнала в pin-диодах. Предложен метод расчёта и представлены аналитические выражения, позволяющие просто и достаточно точно рассчитать уровень нелинейных искажений в устройствах, содержащих pin-диоды. Приведены экспериментальные и соответствующие им расчётные данные.

### Ключевые слова:

Pin-диод, искажения, нелинейные.

**П**роблема нелинейного преобразования входных сигналов в устройства, содержащих pin-диоды, рассматриваются в работах [1 – 3] и др. Однако использовать метод рядов Вольтера, обладающий хорошей точностью и универсальностью, для анализа нелинейных искажений на практике достаточно трудно, так как он требует большого объёма вычислений. Полученные же в [1] аналитические выражения пригодны лишь для расчёта нелинейных искажений в цепях с прямосмещёнными pin-диодами при уровне входной мощности не более +30 дБ/мВт и при дифференциальном сопротивлении прямосмещённого pin-диода, много меньшем волнового сопротивления тракта передачи, содержащего последовательно включённый pin-диод. Представленный же в [2, 3] метод расчёта ориентирован больше не на разработчиков радиоэлектронных устройств, а на разработчиков самих pin-диодов, так как основан на использовании характеристических параметров диодов, отсутствующих в справочной литературе.

В данной работе предлагаются аналитические выражения, с помощью которых можно рассчитать уровень нелинейных искажений как при прямом, так и при обратном смещениях на pin-диодах, справедливые при менее жёстких ограничениях, чем в [1], а также при меньших ограничениях, накладываемых на схемотехнику устройства, например, в дискретно перестраиваемых фильтрах [4 и др.].

Активная дифференциальная проводимость pin-диода при обратном смещении зависит от частоты [5] и не может быть определена по обратной ветви статической вольт-амперной характеристики. Однако ёмкость обратносмещённого pin-диода можно считать постоянной, так как влияние нелинейности этой зависимости от напряжения обратного смещения значительно меньше влияния нелинейности зависимости активной проводимости. Будем считать, что последняя зависимость представлена полиномом

$$\frac{di}{dU} = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2 \quad (1)$$

где  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – постоянные коэффициенты;  $U$  – напряжение. Отличительные качества прямосмещённого pin-диода по сравнению с другими полупроводниковыми СВЧ диодами с резистивной нелинейностью обусловлены наличием в  $i$ -области объёмного заряда  $Q_0$  за счёт постоянного тока  $I_0$ . Это позволяет ввести понятие квазиёмкости прямосмещённого pin-диода при постоянном напряжении на нём  $U_0$ :

$$C_0 = \frac{Q_0}{U_0} \quad (2)$$

Под действием протекающего через прямосмещённый pin-диод гармонического высокочастотного (ВЧ) тока

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (3)$$

амплитудой  $I_m$  и круговой частотой  $\omega = 2\pi/T$ , величина заряда  $i$ -области будет также изменяться с той же частотой и амплитудой

$$q = \int_0^{T/2} i(t) dt = 2I_m/\omega = 2U_m k_1/\omega \quad (4)$$

где  $U_m$  – амплитуда ВЧ напряжения на диоде;

$$k_1 = \beta_0 + \beta_1 U_0 + \beta_2 U_0^2 \quad (5)$$

Вследствие этого мгновенное значение абсциссы рабочей точки  $p\text{-}$ диода на вольт-амперной характеристике (ВАХ) будет изменяться с амплитудой

$$U = \frac{q}{C_0} = 2U_m k_1 \frac{U_0}{\omega Q_0} \quad (6)$$

и, следовательно, границами рабочей области на ВАХ будут напряжения  $U_0-U$  и  $U_0+U$ .

Происходит как бы "сжатие" амплитуды ВЧ напряжения на  $p\text{-}$ диоде в  $2k_1 \frac{U_0}{\omega Q_0}$  раз по сравнению с чисто резистивной нелинейностью.

Сказанное будет справедливо при условии, что  $q < Q_0$

или иначе 
$$I_m < \omega \frac{Q_0}{2} \quad (7)$$

Этим, в сущности, закончено описание способа сопоставления нелинейности, обладающей зарядом, резистивной нелинейности.

Продуктом нелинейного преобразования ВЧ напряжения будет ток  $I_H$ , который можно рассматривать как результат последовательного включения с активным дифференциальным сопротивлением  $p\text{-}$ диода источника напряжения с э. д. с.

$$E_H = \frac{I_H}{k_1} \quad (8)$$

как показано на рис. 1.

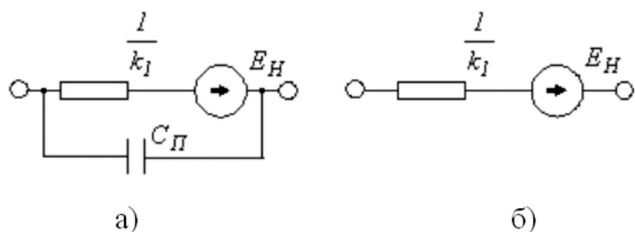


Рисунок 1. Эквивалентные схемы обратносмещённого - а и прямосмещённого - б  $p\text{-}$ диода

Выполнив несложные преобразования, находим, приведённые в табл. 1., выражения для  $E_H$  для различных критериев нелинейности (КН), при этом

$$k_2 = \frac{\beta_1}{2} + \beta_2 U_0 \quad (9)$$

$$k_3 = \frac{\beta_2}{3} \quad (10)$$

$K_2, K_3$  – коэффициенты гармоник по 2-ой и 3-ей гармоникам соответственно;  $K_{02}$  и  $K_{03}$  – коэффициенты гармоник соответственно 2-го и 3-го порядков огибающей амплитудно-модулированного сигнала с глубиной модуляции  $M$ ;  $K_{11}$  и  $K_{12}$  – соответственно коэффициенты интермодуляции 2-го и 3-го порядков;  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  – амплитуды ВЧ напряжения с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно.

Рассмотрим область применения предложенного метода расчёта. Очевидно, что для обратносмещённого  $p\text{-}$ диода во избежание пробоя требуется выполнение неравенства

$$\text{где } U_{\text{проб}} > 2U_m, \quad (11)$$

$U_{\text{проб}}$  – напряжение пробоя  $p\text{-}$ диода, а рассеиваемая прямосмещённым  $p\text{-}$ диодом ВЧ мощность не должна превышать предельно-допустимой или иначе

$$I_m < 2kIP_m. \quad (12)$$

Приравняв (12) и (7), можно найти выражение для частоты  $f_C$ , выше которой более жестким является ограничение (12), а ниже – ограничение (7):

$$f_C = 2P_m k_1 / (\pi Q_0) \quad (13)$$

Для трёх типов  $p\text{-}$ диодов (условно малой, средней и большой мощности) при постоянном токе 100 мА в таблице 2 приведены значения  $f_C, P_m$  и  $1/k_1$ , откуда видно, что предлагаемый метод расчёта нелинейных искажений в  $p\text{-}$ диоде работоспособен для частот больших  $f_C$  при значительно больших уровнях ВЧ мощности, чем метод [1]. Для экспериментальной проверки предлагаемого метода использовался  $p\text{-}$ диод типа КА507А, последовательно включённый в 50-омную линию передачи, как показано на рис. 2 и рис. 3. Там же представлены результаты измерений и расчётов для прямого (рис. 2) и обратного (рис. 3) смещений. Вычисления выполнялись следующим образом. Сначала общеизвестными методами теории цепей вычислялось значение  $U_m$  на  $p\text{-}$ диоде. Потом по формулам табл. 1. рассчитывалось значение

$$E_H = 2k_1 k_2 U_0^2 U_m^2 / (\omega Q_0)^2$$

для прямосмещённого или

$$E_H = k_2 U_m^2 / (2k_1)$$

– для обратносмещённого  $p\text{-}$  диода.

Таблица 1.

КН	При прямом смещении	При обратном смещении
K2	$2k_1k_2U_0^2U_m^2/(\omega Q_0)^2$	$k_2U_m^2/(2k_1)$
K2	$2k_1^2k_3U_0^3U_m^3/(\omega Q_0)^3$	$k_3U_m^3/(4k_1)$
Ko2	$9/2M^2k_1^2k_3U_0^3U_m^3/(\omega Q_0)^3$	$9M^2k_3U_m^3/(16k_1)$
Ko3	$3/4M^3k_1^2k_3U_0^3U_m^3/(\omega Q_0)^3$	$3M^3k_3U_m^3/(32k_1)$
K11	$4k_1k_2U_0^2U_{m1}U_{m2}/(\omega_1\omega_2Q_0^2)$	$k_2U_{m1}U_{m2}/k_1$
K12	$6k_1^2k_3U_0^3U_{m1}^2U_{m2}/(\omega_1\omega_2Q_0^3)$	$3k_3U_{m1}^2U_{m2}/(4k_1)$

Затем опять методами электрических цепей рассчитывался уровень нелинейного продукта на нагрузке. результат сравнения **рис. 2** и **рис. 3** противоречит выводу [1] о том, что уровень нелинейных продуктов в рpn-диоде при обратном смещении гораздо меньше, чем при прямом. К сказанному следует добавить, что нелинейные свойства рpn-диодов могут сильно различаться от образца к образцу даже для диодов одного типа. Это может в отдельных случаях заставить производить подбор рpn-диодов по нелинейным свойствам (см. рpn-диоды 2Д531А-6, 2Д531Б-6 [6]).

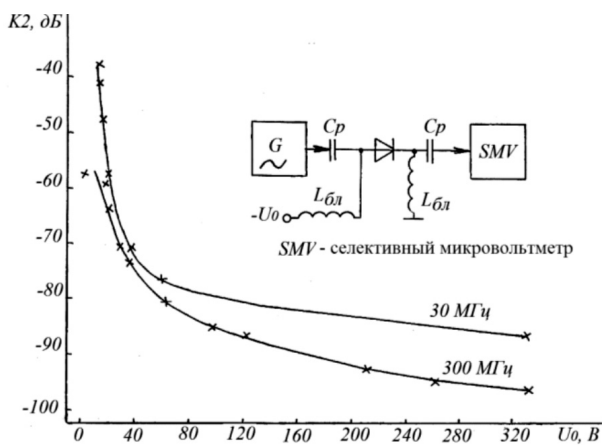


Рисунок 2. Экспериментальные - x и теоретические - — зависимости K2 от тока прямого смещения.

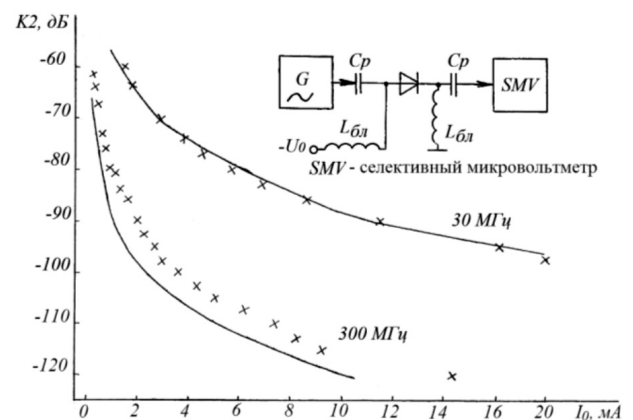


Рисунок 3. Экспериментальные - x и теоретические - — зависимости K2 от тока прямого смещения.

Последнее хорошо видно из **рис. 4**, на котором для 3-х экземпляров рpn-диодов типа КА507А изображены экспериментальные и теоретические зависимости значений K12 от напряжения обратного смещения, а также схема измерений. Измерения и расчёты выполнены для частот интермодуляционных составляющих 162 и 164 МГц и их значения достаточно хорошо совпадают.

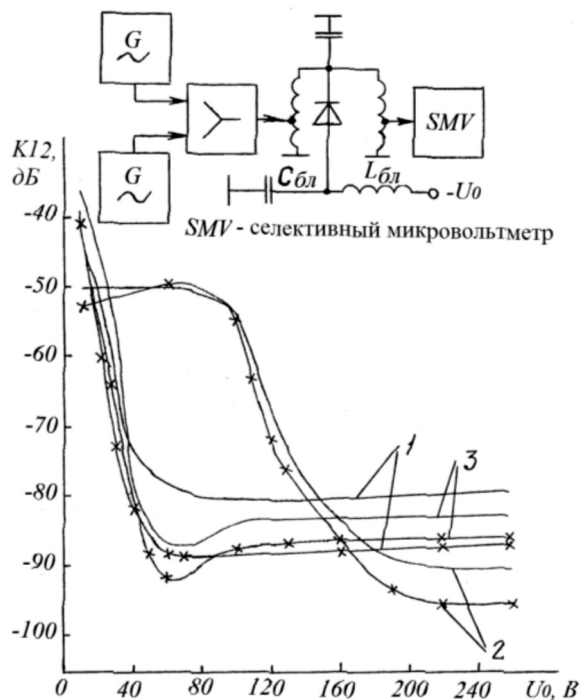


Рисунок 4.  
Экспериментальные -  $\times$   
и теоретические - — зависимости  $K_{12}$   
от напряжения обратного смещения.

## ВЫВОД

Предложен простой метод расчёта нелинейных искажений, порождаемых *rip*-диодом, который может быть с достаточной достоверностью использован на практике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hiller G., Caverly R. *Microwaves and RF*, vol. 24, 1985, N 13, pp. 103–105, 107–108; vol. 25, 1986, N 1, pp. 111–113, 115–116.
2. Абрамов А. А., Кошоридзе С.И. – Изв. вузов СССР, сер. Радиозлектроника, 1991, N 3, с. 42 – 47.
3. Абрамов А. А., Горбатый И.Н., Кошоридзе С.И., Ткачёв В.А. – Радиотехника и электроника, т. 34, 1989, N 1, с. 147–154.
4. Унру Н.Э. Методы синтеза дискретно перестраиваемого резонатора на отрезке регулярной длинной линии. – Радиотехника, 2010, № 1 – с. 82–87.
5. Хижа Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели. – М.: Радио и связь, 1984, 184 с.
6. Хрулёв А.К., Черепанов В.П. Диоды и их зарубежные параметры. Справочник. В 3 т. т. 2. – М.: ИП РадиоСофт, 2001. – 640 с.

© Н.Э. Унру, ( [nickonro@ngs.ru](mailto:nickonro@ngs.ru) ), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,



Новосибирский государственный технический университет