

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АВТОСМЕЩЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН УСИЛИТЕЛЕЙ СВЧ НА РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Осадчий Евгений Николаевич
кандидат технических наук, доцент

Барашян Валерий Геннадьевич
магистрант

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация. Рассматривается влияние автосмещения в резонансно-туннельном диоде (РТД) на динамический диапазон усилителей на данных диодах. Учитывая автосмещение, были выявлены два возможных вида амплитудных характеристик и границы их существования. Для этих двух типов амплитудных характеристик были получены выражения, определяющие динамический диапазон усилителя.

Ключевые слова: резонансно-туннельный диод, вольтамперная характеристика (ВАХ) диода, динамический диапазон, коэффициент усиления, степень регенерации, режим питания усилителя на РТД.

ANALYSIS OF AUTOMOTIVE REPLACEMENT ON THE DYNAMIC RANGE OF MICROWAVE AMPLIFIERS ON RESONANCE-TUNNEL DIODES

Osadchiy Evgeniy Nikolaevich
Ph.D.

Barashyan Valeriy Gennad'evich
master student

Southern Federal University, Rostov-on-Don

Abstract. Influence of auto offset in the resonant-tunneling diode (RTD) on dynamic range of amplifiers on these diodes is considered. Considering auto offset, two possible types of amplitude characteristics and boundary of their existence were revealed. For these two types of amplitude characteristics the expressions defining dynamic range of the amplifier were received.

Keywords: resonant-tunneling diode, current–voltage characteristic of the diode, dynamic range, amplification factor, regeneration level, mode power of amplifier on RTD.

В работах [1; 2] рассмотрены вопросы нелинейных свойств усилителей на РТД однако без учета автосмещения, возникающего, как правило, в нелинейных режимах и способного значительно изменить условия работы РТД, когда сопротивление цепи питания приближается по значению к отрицательному сопротивлению диода. Таким образом представляет интерес рассмотреть влияние автосмещения в усилителях на РТД, чему и посвящена данная работа. Если рассматривать усиление на резонансной частоте, то влияние высших гармоник можно не учитывать, так как можно предположить, что они не создадут значительного падения напряжения на нелинейном сопротивлении диода. Можно предположить, что усиление достаточно большое, тогда характер зависимости коэффициентов усиления от степени регенерации будет одинаков для усилителей «на проход» и на «отражение». Это позволит рассмотреть задачу для обоих типов усилителей на РТД.

В линейном приближении коэффициент усиления регенеративного усилителя мощности можно представить следующим выражением

$$K_0 = A(1 - \theta)^2, \quad (1)$$

где $\theta = -i'/\text{Re}[Y]$ – степень регенерации устройства; i' – отрицательная проводимость РТД в рабочей точке; $\text{Re}[Y]$ – действительная часть полной проводимости схемы, которая подключена параллельно нелинейному сопротивлению диода; A – слабо зависящий от степени регенерации θ и определяемый типом усилителя, коэффициент.

Учитывая нелинейность вольтамперной характеристики (ВАХ) РТД выражение (1) преобразуется к следующему виду

$$K = A/[1 - \theta F(U)]^2, \quad (2)$$

где $F(U) = 1 + vU^2 + \mu U^4 + \dots$ – представляет амплитуду переменного напряжения на туннельном промежутке.

Виды амплитудных характеристик $K = f(P_{\text{вх}})$, которые возможны для усилителя на РТД изображены на рис. 1.

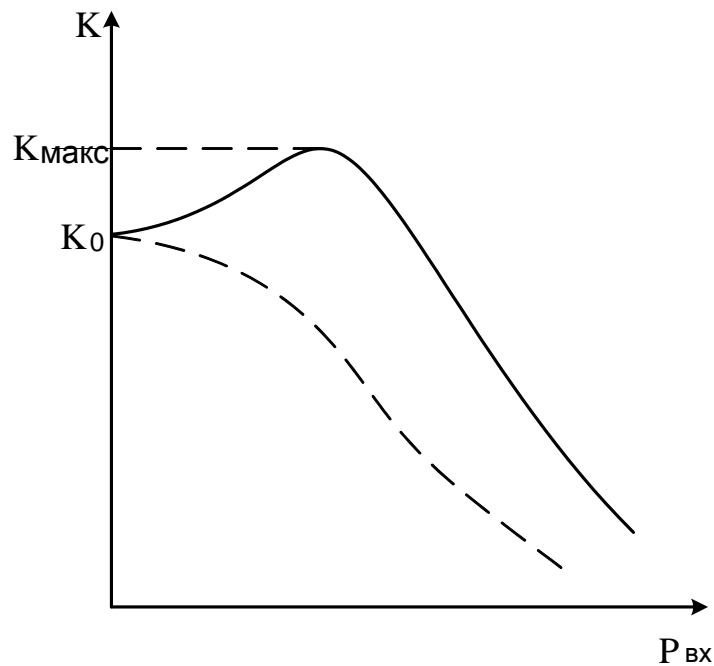


Рис. 1. Зависимости $K = f(P_{\text{вх}})$

Если $\frac{K_{\text{макс}}}{K_0} = n$, где $1 \leq n \leq 2$, то при неравномерности амплитудной характеристики $\frac{K_{\text{макс}}}{K} = 2$ выражение для динамического диапазона примет следующий вид

$$x = -\frac{v}{2\mu n} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\mu^2 - n}{v^2} \frac{1 - \theta}{n \theta}} \right], \quad (3)$$

где $x = P_{\text{вх}} K_0 Z_H / k$ – определяющий динамический диапазон усилителя параметр; $P_{\text{вх}}$ – мощность насыщения, т.е. входная мощность, соответствующая уменьшению коэффициента усиления на 3 децибелла по сравнению с максимальным; Z_H – сопротивление нагрузки; $k = U^2_{\text{ВВЫХ}} / U^2$ – коэффициент, учитывающий потери мощности на сопротивлении растекания РТД. При частотах намного меньших предельной $k \sim 1$ [3].

Значения параметров $v > 0, \mu > 0$ и $v < 0, \mu > 0$ в формуле (3) физически не реализуются, но для случая $v > 0, \mu < 0$ (формула (3) будет со знаком плюс) при $K_{\text{макс}}/K_0 < 81/16$ можно реализовать зависимость $K = f(P_{\text{вх}})$, показанную на рис. 1 сплошной линией, но при нарушении

данного неравенства может иметь место амплитудный гистерезис. Найдя максимум правой части выражения (2) и приравняв его к величине $K_0 n$ можно получить условие $\frac{K_{\max}}{K_0} = n$. Параметры u и μ при этом должны удовлетворять условию

$$\frac{v^2}{4\mu} = \frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{n}} \frac{1 - \theta}{\theta} \quad (4)$$

Подставляя формулу (4) в (3) для $1,5 \leq n \leq 2$ получим выражение, которое определяет x в следующем виде

$$x \sim \frac{0.586}{v} \frac{1 - \theta}{\theta}. \quad (5)$$

С учетом автосмещения величины u и μ можно определить из ВАХ РТД с помощью выражений [4]

$$v = \frac{1}{8i'} \left[i'''' - \frac{2(i'')^2}{\frac{1}{R} + i'} \right], \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{192i'} \left[i^{(5)} - 9 \frac{i'' i^{(4)}}{\frac{1}{R} + i'} + 12 \frac{(i'')^2 i''''}{\left(\frac{1}{R} + i'\right)^2} \right], \quad (7)$$

где R – сопротивление по постоянному току цепи питания (i с индексом – это дифференцирование $i(u)$ по u , но вместо u подставляем E_0 – напряжение смещения). Применяя аппроксимацию ВАХ РТД вида [3]

$$i = aue^{-u/U_1} + I_0(e^{Du} - 1), \quad (8)$$

где U_1 – напряжение в максимуме ВАХ. Если пренебречь диффузионным током и подставив (6) и (7) в формулу (4), то можно получить

$$\frac{v^2}{4\mu} = \frac{3}{4(1-y)} \frac{[3 - y - 2(y-2)^2 F(y)^2]}{[5 - y - 9(y-2)(y - 4F(y) + 12(y-2)^2(3-y)F^2(y)]} \quad (9)$$

где $F(y) = \left[1 - y + \frac{1}{RG_{\max}} e^{y-2} \right]^{-1}$; $y = \frac{E_0}{U_1}$;

$G_{\text{макс}} = ae^{-2}$ – величина модуля максимальной отрицательной проводимости туннельного промежутка.

На рис. 2 представлены построенные по формуле (9) зависимости $v^2/4\mu = f(E_0/U_1)$ для нескольких значений $RG_{\text{макс}}$.

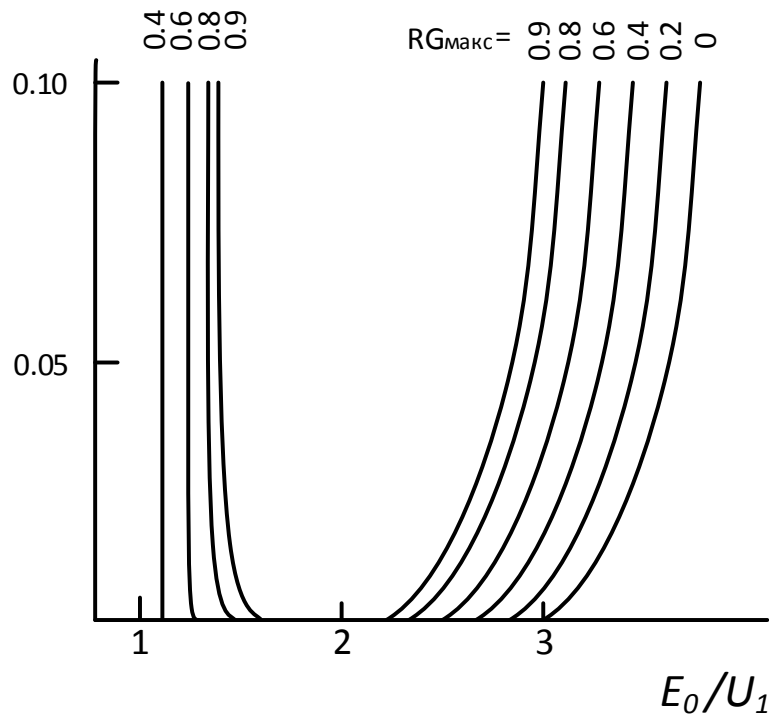


Рис. 2. Зависимость $v^2/4\mu = f(E_0/U_1)$

Для каждого значения $RG_{\text{макс}}$ при заданных n и θ , используя рис. 2, можно при помощи формулы (4) определить положение рабочей точки E_0/U_1 , обеспечивающее заданный режим усилителя. Определить значение параметра x , характеризующего динамический диапазон, можно подставив полученное значение E_0/U_1 в (6) а затем (6) в (5). Показанные сплошной кривой на рис. 1, границы существования амплитудной характеристики, определяемой из условия $v = 0$, записываются в виде [4]

$$RG_{\text{макс}} = \left[\frac{2(y-2)^2}{3-y} + y - 1 \right]^{-1} e^{y-2} \quad (10)$$

Когда величина RG_{max} больше значений, определяемой правой частью формулы (10), амплитудные характеристики будут иметь вид сплошных кривых на рис. 1. Если $RG_{max} = 1$, что соответствует границе устойчивости схемы по постоянному току, амплитудные характеристики имеют место во всех рабочих точках кроме точки перегиба. В отсутствие автосмещения (при нулевом сопротивлении цепи питания) они будут наблюдаться лишь при значении E_0/U_1 большим трем.

Для стабильной работы (при больших коэффициентах усиления) не всегда требуется возрастание K_y с ростом уровня сигнала (пунктир на рис. 1). В данном случае $\nu \leq 0, \mu < 0$ (в формуле (3) – знак минус, $n = 1$). Для увеличения динамического диапазона режим питания схемы усилителя подбираем таким образом, чтобы ν и μ имели минимальные значения. Как следует из формулы (10), подбирая величину R , при заданном E_0 , параметр ν может быть сделан равным нулю на значительной части ВАХ РТД. Динамический диапазон при этом

$$x = \sqrt{-\frac{1}{2\mu_1} \frac{1-\theta}{\theta}}. \quad (11)$$

Здесь выражение для μ_1 можно определить подставляя (10) в (7) и при использовании аппроксимации (8) оно будет иметь следующий вид

$$\mu_1 = -\frac{1}{384U_1^4} \left[1 + \frac{4y^2 - 16y + 10}{(1-y)(y-2)^2} \right]. \quad (12)$$

Зависимости $x^2/U_1^2 = f(E_0/U_1)$, построенные по формуле (11) представлены на рис. 3 сплошной линией, штрих-пунктирной кривой – построенные по формуле (3), когда предполагается отсутствие автосмещения для двух значений степени регенерации [5]. На рис. 3 видно, что в области, находящейся правее точки перегиба ВАХ, автосмещение будет вызывать малое уменьшение динамического диапазона (x) при небольших значениях степени регенерации ($\theta = 0,8$) и некоторое его увеличение при больших значениях θ ($\theta = 0,9$). Это увеличение будет тем больше,

чем больше величина θ . В области, лежащей левее точки перегиба также подбирая величину R можно добиться некоторого увеличения x . Условие $\nu = 0$ в точке $E_0/U_1 = 2$ без нарушения устойчивости цепи по постоянному току не может быть выполнено (на рис. 3 этот участок сплошной линии показан пунктиром). Для амплитудной характеристики, изображенной на рис. 1, ширина динамического диапазона будет определяться сопротивлением цепи питания, предельная величина которого будет при $E_0/U_1 = 3$ и $R = 0$. Значение E_0/U_1 , которое соответствует максимальной величине x при заданном R можно выразить из (10), а сама величина x находится из выражения (11).

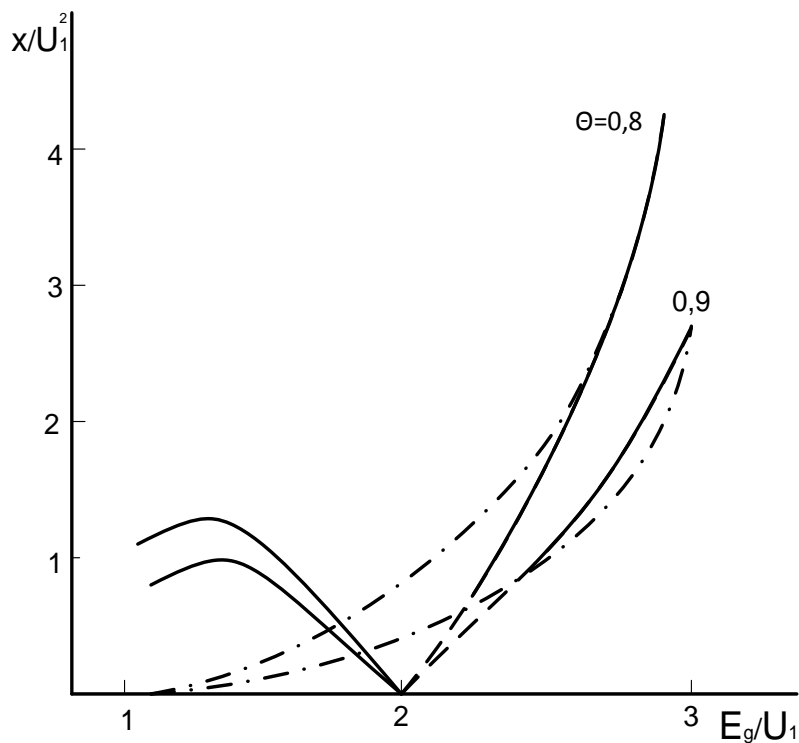


Рис. 3. Зависимость x/U_1^2 от E_g/U_1

Исходя из вышеизложенного следует, что при использовании амплитудной характеристики первого типа (сплошная кривая на рис. 1) автосмещение расширяет область существования этой амплитудной характеристики и приводит к уменьшению динамического диапазона (x). При амплитудной характеристики второго типа (пунктирная кривая на

рис. 1) для больших значений степени регенерации можно подбором параметров цепи питания и режима добиться некоторого расширения динамического диапазона [6]. Данный анализ динамического диапазона усилителей на резонансно-туннельных диодах с учетом автосмещения может быть полезным для проектирования усилителей микроволнового диапазона на РТД, работающих в нелинейных режимах.

Список использованных источников

1. Будяков П.С., Белич С.С., Семенищев Е.А., Федосеев С.В., Медведев Д.В., Серебряков А.И. Управляемые избирательные усилители СВЧ диапазона // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/250>
2. Moskaliuk V. Simplified analytical model of resonant-tunneling diode // Abstracts Proceedings of 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology «ISSE 2009». Brno, Czech Republic. 2009. С. 1-5.
3. Осадчий Е.Н. Квазилинейный анализ работы резонансно-туннельного диода с помощью полиномов различных степеней // Успехи современной науки. 2016. № 12. С. 132-138.
4. Zohta Y. Improved optical model for resonant tunneling diode // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. С. 6996-6998.
5. Qiu Z.J. Experimental verification of origin of plateau-like current-voltage characteristics of resonant tunneling diodes / Z.J. Qiu, Y.S. Gui, S.L. Guo et. al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 4. P. 1961-1963.
6. Караваев С.В., Осадчий Е.Н. О возможности преобразования частоты с усилением резонансными туннельными диодами // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 1. Т. 36. 2004. С. 101-105.