

## Анализ динамического диапазона микроволновых усилителей на резонансно-туннельных диодах с учетом автосмещения

*Е.Н. Осадчий*

*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, автосмещение, режим питания усилителя на РТД.

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  $\theta = -t'/Re[Y]$  - степень регенерации устройства;  $t'$  - отрицательная проводимость РТД в рабочей точке;  $Re[Y]$  - действительная часть полной проводимости схемы, которая подключена параллельно нелинейному сопротивлению диода;  $A$  - слабо зависящий от степени регенерации  $\theta$  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  $F(U) = 1 + \nu U^2 + \mu U^4 + \dots$  - представляет амплитуду переменного напряжения на туннельном промежутке.

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

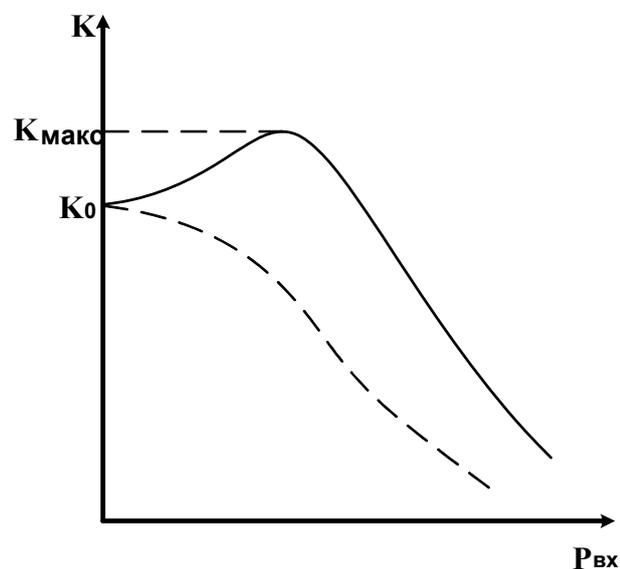


Рис. 1. – Зависимости  $K = f(P_{вх})$

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

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

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;  $k = U^2 D_{\text{вып}} / U^2$  - коэффициент, учитывающий потери мощности на сопротивлении растекания РТД. При частотах намного меньших предельной  $k \sim 1$  [3].

Значения параметров  $\nu > 0, \mu > 0$  и  $\nu < 0, \mu > 0$  в формуле (3) физически не реализуются, но для случая  $\nu > 0, \mu < 0$  (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 приравнивая его к величине  $K_0 n$  можно получить условие  $\frac{K_{\text{макс}}}{K_0} = n$ . Параметры  $\nu$  и  $\mu$  при этом должны удовлетворять условию

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

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  $v$  и  $\mu$  можно определить из ВАХ РТД с помощью выражений [4]

$$v = \frac{1}{9tr} \left[ i^{(3)} - \frac{2(t^{(2)})^2}{\frac{1}{R} + tr} \right], \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{192tr} \left[ i^{(5)} - 9 \frac{tr i^{(4)}}{\frac{1}{R} + tr} + 12 \frac{(t^{(2)})^2 i^{(3)}}{\left(\frac{1}{R} + tr\right)} \right], \quad (7)$$

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 [я]

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

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

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

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

$G_{\max} = ae^{-2}$  – 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  $RG_{max}$ .

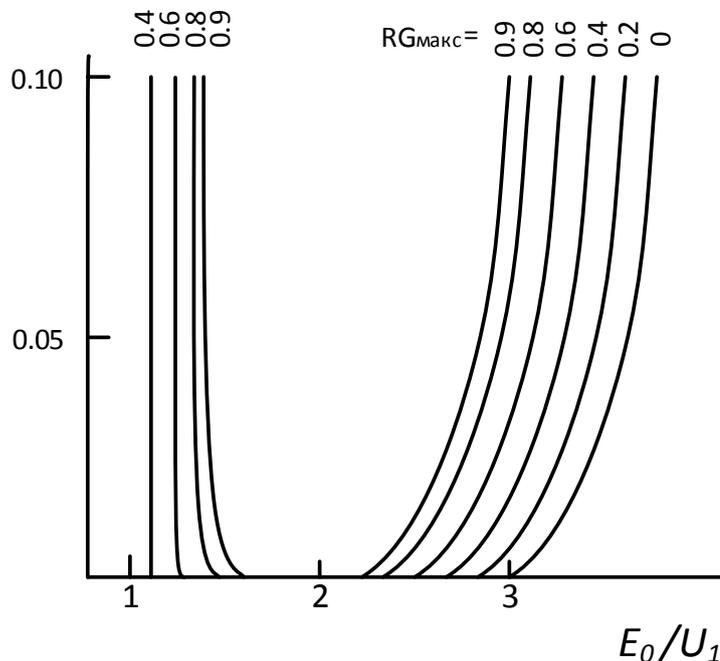


Рис. 2. – Зависимости  $v^2/4\mu = f(E_0/U_1)$

Для каждого значения  $RG_{max}$  при заданных  $n$  и  $\theta$ , 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

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

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 отсутствии автосмещения (при нулевом сопротивлении цепи питания) они будут наблюдаться лишь при значении  $E_0/U_1$  большим трем.

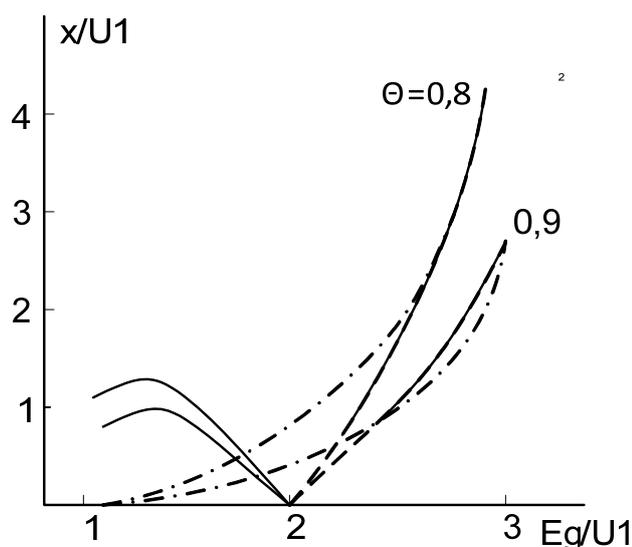
Для стабильной работы (при больших коэффициентах усиления) не всегда требуется возрастание  $K_y$  с ростом уровня сигнала (пунктир на рис. 1). В данном случае  $\nu \leq 0, \mu < 0$  (в формуле (3) – знак минус,  $n = 1$ ). Для увеличения динамического диапазона режим питания схемы усилителя подбираем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

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

Здесь выражение для  $\mu_1$  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.

Рис. 3. - Зависимости  $x^2/U_1^2 = f(E_0/U_1)$ 

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  $\theta$  ( $\theta = 0,9$ ). Это увеличение будет тем больше, чем больше величина  $\theta$ . 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).

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 характеристике второго типа (пунктирная кривая на рис. 1) для больших значений степени регенерации можно подбором параметров цепи питания и режима добиться некоторого расширения динамического диапазона. 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.

### Литература

1. Демьяненко А.В., Алексеев Ю.И., Геворкян А.В. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя на лавинно-пролетном диоде в режиме детектирования СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2396](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2396).
2. Осадчий Е.Н. Квазилинейный анализ работы резонансно-туннельного диода с помощью полиномов различных степеней // Успехи современной науки. 2016. №12. С. 132 - 138.
3. 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. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1059](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1059).
4. Алимов А.П. Змий Б.Ф. Синтез усилителей промежуточной частоты с повышенными показателями качества // Инженерный вестник Дона. 2017. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4027](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4027).
5. 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. pp. 1-5.

6. Zohta Y. Improved optical model for resonant tunneling diode // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. pp. 6996–6998.
7. Schulman J.N. Extension of Tsu-Esaki model for effective mass effects in resonant tunneling / J.N. Schulman // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. pp. 2829 – 2831.
8. 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. Vol. 4. pp. 1961–1963.
9. Алкеев Н. В., Любченко В. Е., Velling P., Khorenko E., Prost W., Tegude F. J. Эквивалентная схема резонансно-туннельного диода на основе InGaAs/InAlAs в миллиметровом диапазоне длин волн // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 7. С. 886-892.
10. Капаев В.В. Высокочастотный отклик и возможности перестраиваемого по частоте терагерцового узкополосного усиления в резонансно-туннельных наноструктурах // ЖЭТФ 2013. Т.143. С. 569.

### References

1. Demyanenko AV, Alekseev Yu.I., Gevorkyan A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2014. No. 2. С. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2396](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2396).
  2. Osadchij E.N. Uspehi sovremennoj nauki. № 12, 2016. S.132 - 138.
  3. Budyakov P.S., Belich S.S., Semenishchev Ye.A., Fedoseyev S.V., Medvedev D.V., Serebryakov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2012. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1059](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1059).
  4. Alimov A.P. Zmiy B.F. Sintez Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4027](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4027).
  5. Moskaliuk V. Abstracts Proceedings of 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology "ISSE 2009". Brno, Czech Republic. 2009. pp. 1-5.
-



6. Zohta Y. J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. pp. 6996–6998.
7. Schulman J.N. Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. pp. 2829 – 2831.
8. Qiu Z.J. Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 4. pp. 1961–1963.
9. Alkeyev N. V., Lyubchenko V. Ye., Velling R., Khorenko Ye., Prost W., Tegude F. J. Radiotekhnika i elektronika. 2004. T. 49. № 7. S. 886-892.
10. Karayev V.V. ZHETF 2013. T.143. S. 569.