

# **Амплитудно-частотная характеристика усилителя на лавинно-пролетном диоде в режиме детектирования СВЧ-амплитудно-модулированных оптических колебаний**

А.В. Демьяненко, А.В. Геворкян, Ю.И. Алексеев

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились во ФГАОУ ВПО ЮФУ.

Достаточно часто в инженерной практике встречаются случаи, когда радиотехнические системы, составляющие части которых разнесены в пространстве, должны быть соединены воедино. В таких системах не всегда возможно использовать радиочастотные линии передачи. Например, из-за большого расстояния передаваемые сигналы могут получить различную фазовую задержку или большое затухание. В этой связи целесообразно рассмотреть в качестве несущего колебания оптические сигналы. При этом возникает необходимость в разработке элементной базы радиопередающих и радиоприемных устройств оптического диапазона. В диапазоне частот до единиц гигагерц в настоящее время такие элементы широко внедрены, однако, несмотря на достаточно высокий уровень развития этой области фотоники, в ряде случаев классические решения не подходят. Альтернативное детектирование оптических СВЧ-амплитудно-модулированных сигналов получает всё большее развитие в связи с ограниченными (в основном по частотному диапазону) возможностями фотодиодов или просто с их отсутствием в отдельных участках СВЧ и особенно КВЧ-диапазонов [1 - 3]. В этой связи становится актуальным

детектирование на основе СВЧ-диодов с нелинейным отрицательным сопротивлением, типичным представителем которых является ЛПД. При этом механизм, позволяющий считать ЛПД эффективным детектором в том числе и оптических колебаний, состоит в следующем.

Облучаемый модулированным светом р-п переход ЛПД, активная и реактивная компоненты проводимости которого являются существенно нелинейными элементами, осуществляет разложение сложного модулированного оптического колебания, и, таким образом, в рабочем частотном диапазоне колебательной системы, в которой находится ЛПД, оказывается в том числе и СВЧ-сигнал, которым промодулирован оптический луч. Выделение модулирующего сигнала частотно-избирательной колебательной системой, по сути и является процессом детектирования, а тот факт, что этот сигнал попадает в активную регенеративную среду, создаваемую отрицательным сопротивлением ЛПД, приводит к усилению выделенного сигнала [4]. Таким образом, детектирование усилительным устройством предусматривает, что такая колебательная система должна находиться в устойчивом состоянии, когда баланс амплитуд не реализуется. Это обстоятельство является одним из условий, которое должно быть соблюдено при решении дифференциального уравнения, описывающего процессы в детектирующей усилительной системе.

Рассмотрим описанный выше процесс на предмет определения АЧХ детектора-усилителя, из которой вытекают существенные радиотехнические характеристики исследуемой активной колебательной системы.

Эквивалентная схема усилителя с учётом оптического воздействия на р-п переход ЛПД изображена на рисунке 1.

где  $R = R_n + R_{om} + R_\partial$  – суммарное активное сопротивление усилителя;

$X = X_{om} + X_\partial - X_{cd}$  – суммарное реактивное сопротивление усилителя без учёта «холодной» ёмкости;

$$\frac{1}{j\omega C} = X_{cd} \quad - \text{«ХОЛОДНАЯ» ёмкость диода};$$

$$j\omega L = X_p \quad - \text{индуктивность резонатора};$$

$$R_o = \beta_1 + \frac{3}{4}\beta_3 A^2 \quad - \text{активное сопротивление ЛПД};$$

$$X_o = \frac{\alpha_1}{\omega} + \frac{3}{4}\frac{\alpha_3}{\omega^3} A^2 \quad - \text{реактивное сопротивление ЛПД};$$

$$R_{om} = \frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \cos \varphi_s - \frac{K}{y} \frac{m I_{s0}}{A} \cos \varphi \quad - \text{активное сопротивление, вызванное оптическим воздействием на р-п-переход ЛПД};$$

$$X_{om} = -\frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \sin \varphi_s + \frac{K}{y} \frac{m I_{s0}}{A} \sin \varphi \quad - \text{реактивное сопротивление, вызванное оптическим воздействием на р-п-переход ЛПД};$$

$A$  – амплитуда колебаний;

$I_{s0}$  – постоянная составляющая фототока, вызванного оптическим воздействием;

$I_0$  – ток питания диода;

$m$  – коэффициент модуляции оптического сигнала;

$$y = 1 - \frac{\omega^2}{(2\pi\Omega_L)^2};$$

$$\varphi = \varphi_s - \varphi_1;$$

$$K = \frac{2}{\omega^2 \tau_a C_d} \left[ \left( \frac{1 - \cos \theta_d}{\theta_d} \right)^2 + \left( \frac{\sin \theta_d}{\theta_d} + \frac{l_a}{W - l_a} \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$\varphi_s = \arctg \left[ \frac{\frac{1 - \cos \theta_d}{\theta_d}}{\frac{\sin \theta_d}{\theta_d} + \frac{l_a}{W - l_a}} \right];$$

где  $\Omega_L$  – лавинная частота;

$C_d$  – ёмкость области дрейфа;

$\tau_a$  – время пролёта носителем заряда эквивалентного слоя умножения;  
 $\theta_d$  – угол пролёта носителем заряда области дрейфа;  
 $l_a$  – ширина эквивалентного слоя умножения;  
 $\alpha_1, \alpha_3, \beta_1, \beta_3$  – коэффициенты, зависящие от выбора рабочей точки на вольтамперной характеристике диода;  
 $W$  – ширина запирающего слоя;  
 $\varphi_s$  – фаза оптического колебания (добавка к фазе колебаний, вызванная оптическим воздействием);  
 $\varphi_1$  – фаза СВЧ колебания;  
 $\omega$  – текущая частота.

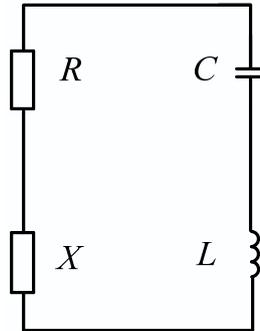


Рисунок 1 – Эквивалентная схема генератора

Для представленной на рисунке 1 схемы дифференциальное уравнение, описывающее исследуемый усилитель, имеет вид:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \left( \omega_0^2 - \frac{\omega X}{L} \right) i = 0, \quad (1)$$

где  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$  – квадрат резонансной частоты контура «холодного» усилителя.

Решение этого уравнения методом «медленно меняющихся амплитуд» [5] позволяет получить укороченные уравнения, которые после ряда преобразований имеют следующий вид:

$$R_n + \beta_1 + \frac{3}{4} \beta_3 A^2 + \frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \cos \varphi_s = \frac{K}{y} \frac{m I_{s0}}{A} \cos \varphi ;$$

$$L \left( \omega - \frac{\omega_0^2}{\omega} \right) + \frac{3}{4} \frac{\alpha_3}{\omega^3} A^2 - \frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \sin \varphi_s = - \frac{K}{y} \frac{m I_{s0}}{A} \sin \varphi$$

$$\text{Сделав замену } - \frac{A}{m I_{s0}} = a$$

, возводя в квадрат обе части уравнений и складывая левые и правые части, получаем уравнение 6-ой степени вида:

$$a^6 x_3 + a^4 x_2 + a^2 x_1 = 0, \quad (2)$$

где  $x_3 = 1$ ;

$$x_2 = \left[ 2 \left( R_H + \beta_1 + \frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \cos \varphi_s \right) \right] \frac{1}{\left( \frac{3}{4} \beta_3 (m I_{s0})^2 \right)^2};$$

$$x_1 = \left[ \left( R_H + \beta_1 + \frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \cos \varphi_s \right)^2 + \left( L \left( \omega - \frac{\omega_0^2}{\omega} + \omega_{oon} \right) - \frac{K}{y^2} \frac{I_{s0}}{I_0} \sin \varphi_s \right)^2 \right]_{\text{X}}$$

$$\text{X} \frac{1}{\left( \frac{3}{4} \beta_3 (m I_{s0})^2 \right)^2} - \frac{1}{a^2} \left( \frac{K}{y} \right)^2 \frac{1}{\left( \frac{3}{4} \beta_3 (m I_{s0})^2 \right)^2};$$

$$\omega_{oon} = \frac{3}{4L} \frac{\alpha_3}{\omega^3} A^2$$

Нетрудно видеть, что решением настоящего уравнения является АЧХ детектора оптических СВЧ АМ колебаний на основе усилителя на ЛПД, описываемого уравнением (1). На рисунках 2а и 2б представлены графики зависимости мощности продетектированного сигнала и коэффициента его усиления без учёта нелинейной зависимости импеданса диода от амплитуды СВЧ напряжения при различных параметрах.

Из графиков зависимости мощности выходного сигнала от частоты, представленных на рисунке 2, видно, что коэффициент усиления продетектированного сигнала  $K_u$  слабо зависит от постоянной составляющей фототока  $I_{s0}$ , вызванной оптическим воздействием. Параметр  $I_{s0}$  является аналогом мощности несущего оптического колебания и его величина такова, что используется только линейный участок амплитудной характеристики

активного элемента, в результате чего входной сигнал усилителя-детектора вызывает пропорциональное увеличение выходного сигнала.

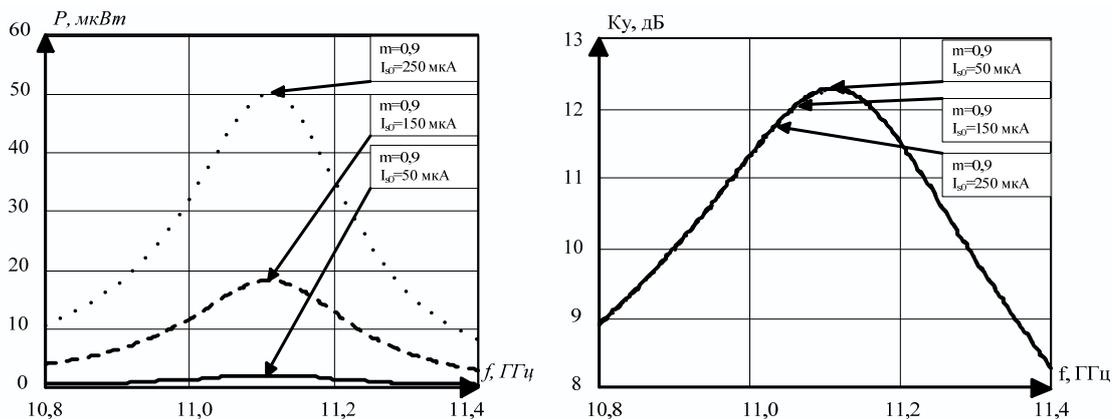


Рисунок 2а – Мощность протектированного сигнала (слева) и коэффициент его усиления (справа) при коэффициенте модуляции  $m = 0,9$  и индуктивности резонатора  $L = 0,795 \text{ нГн}$

Для проведения подробного анализа исследуемой сложной колебательной системы целесообразно на основании уравнения (2) рассчитать ряд важных зависимостей, позволяющих проследить влияние параметров исследуемой системы на эффективность процесса детектирования, как показано на рисунке 3.

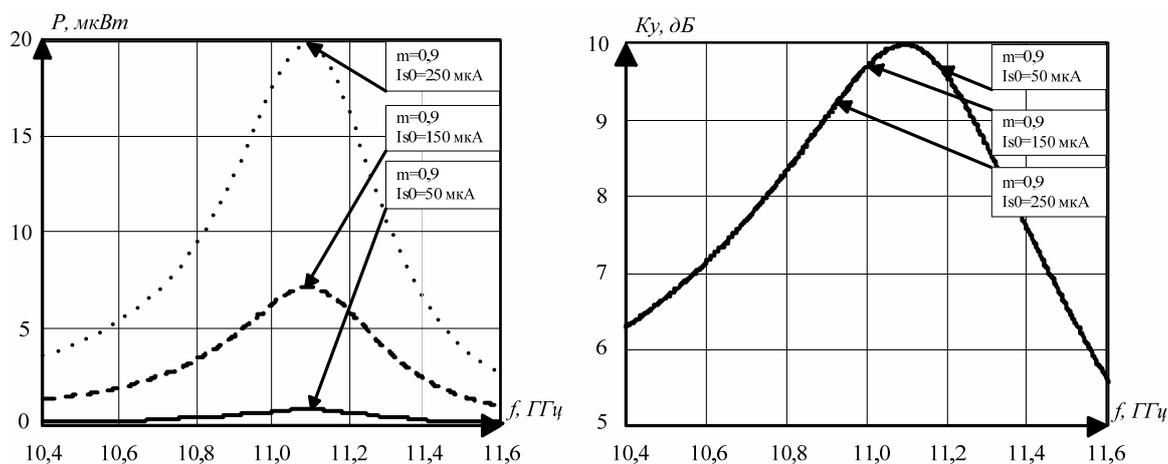


Рисунок 2б – Мощность протектированного сигнала (слева) и коэффициент его усиления (справа) при коэффициенте модуляции  $m = 0,9$  и индуктивности резонатора  $L = 0,795 \text{ нГн}$

Из рисунка 3 следует, что уменьшение индуктивности резонатора (эквивалентно увеличению резонансной частоты) сопровождается уменьшением мощности протектированного сигнала и коэффициента усиления; полоса пропускания при этом увеличивается. Коэффициент модуляции влияет в основном на мощность протектированного сигнала; его влияние на коэффициент усиления весьма мало (порядка десятых - сотых долей дБ).

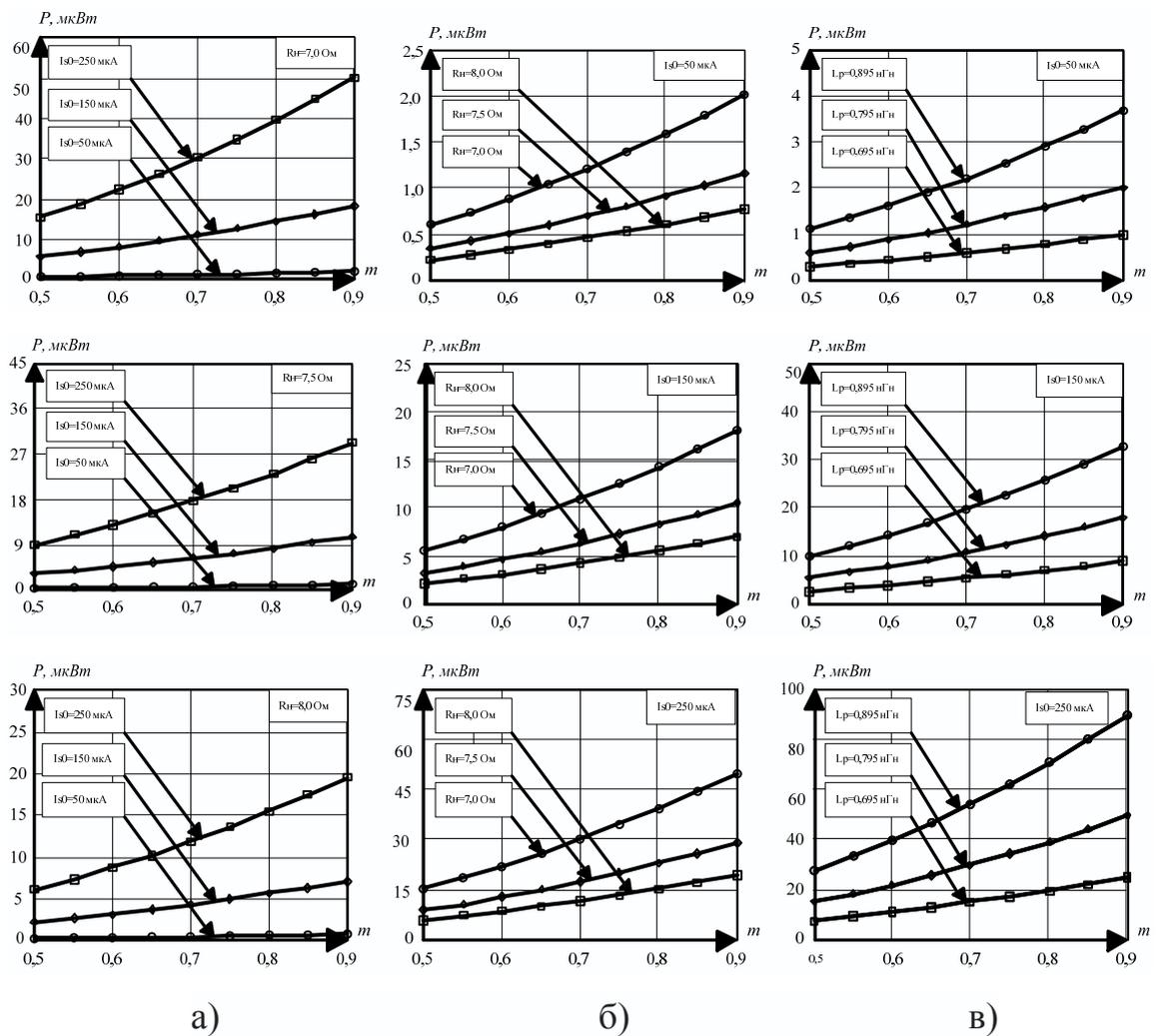


Рисунок 3 – Зависимость мощности протектированного сигнала от коэффициента модуляции: а) при различных постоянных составляющих фототока  $I_{s0}$ ; б) при различных сопротивлениях нагрузки  $R_n$ ; в) при различных индуктивностях резонатора  $L_p$

Кроме того, чем больше сопротивление нагрузки, тем меньше мощность протектированного сигнала. Например, при сопротивлении  $R_n = 7,0 \text{ Ом}$ , (когда коэффициент модуляции  $m = 0,9$ , постоянная составляющая фототока  $I_{s0} = 250 \text{ мкА}$ , индуктивность резонатора  $L = 0,895 \text{ нГн}$ ) мощность составляет примерно 90 мкВт; при  $R_n = 7,5 \text{ Ом}$  - 53 мкВт, при  $R_n = 8,0 \text{ Ом}$  - примерно 36 мкВт, то есть, увеличение сопротивления нагрузки на 1 Ом приводит к уменьшению мощности протектированного сигнала примерно на 60%. Причем, эта тенденция остается такой же и при других значениях параметров детектора.

Увеличение сопротивления  $R_n$  сопровождается увеличением полосы пропускания усилителя-детектора. Так при вышеприведенных параметрах она составляет: для  $R_n = 7,0 \text{ Ом}$  - 444 МГц,  $R_n = 7,5 \text{ Ом}$  - 611 МГц и  $R_n = 8,0 \text{ Ом}$  - 791 МГц, то есть для данного случая увеличение сопротивления на 1 Ом даёт увеличение полосы пропускания почти на 350 МГц.

Проведенный выше анализ АЧХ детектора сделан без учёта нелинейной зависимости импеданса диода от амплитуды СВЧ напряжения, вызывающей добавку к частоте  $\omega_{\text{non}} = \frac{3}{4L} \frac{\alpha_3}{\omega^3} A^2$  [6, 7], в связи с тем, что усилительное устройство, как правило, рассчитывается на малом сигнале, позволяющем получить максимальный коэффициент усиления [8 - 10].

Таким образом, в работе установлено, что в зависимости от соотношения варьируемых параметров, значения которых показаны выше, можно изменять мощность протектированного колебания и существенно влиять на два основных параметра усилителя-детектора – коэффициент усиления и полосу пропускания, что весьма важно при инженерных разработках подобных устройств.

## Литература

1. Biswas B.N., Bhattacharya A.K., Mukhopadhyay, Chaudhury S. A new possibility of detecting lightwave signals through IMPATT oscillators [Text] / B.N. Biswas, A.K. Bhattacharya, Mukhopadhyay, S. Chaudhury // IEEE Journal on Selected Areas in Communication. - 1990. – Vol. 8, №7. – P. 1387-1396.
2. Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В. Определение влияния оптического сигнала на импедансные свойства лавинно-пролетного диода. [Текст] / Ю.И. Алексеев, А.В. Демьяненко - Известия ВУЗов. Электроника. - 2008. - №3. – С. 58-62.
3. Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В. Детектирование оптических амплитудно-модулированных колебаний лавинно-пролетными диодами. [Текст] / Ю.И. Алексеев, А.В. Демьяненко – Радиотехника. - 2008. - №11. – С. 80-82
4. Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролётные диоды и их применение в технике СВЧ. [Текст] / А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов – М.: Сов. радио, 1968. – 480 с.
5. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: учебное пособие для вузов. [Текст] / В.С. Андреев – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
6. Алексеев Ю.И., Орда-Жигулина М.В., Демьяненко А.В. Вопросы СВЧ-модуляции и демодуляции излучения инжекционных полупроводниковых лазеров. [Текст] / Ю.И. Алексеев, М.В. Орда-Жигулина, А.В. Демьяненко – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. – 209 с.
7. Будяков П.С., Белич С.С., Семенищев Е.А., Федосеев С.В., Медведев Д.В., Серебряков А.И. Управляемые избирательные усилители СВЧ диапазона [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (часть 1). - Режим доступа:

<http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1059> (доступ свободный) –  
Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Клевцов С.И. Моделирование алгоритма краткосрочного прогнозирования изменения быстроизменяющейся физической величины в реальном времени [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. - Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/920> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Sheng S. Li. Semiconductor Physical Electronics (Microdevices) [Text]: Softcover reprint of the original 1st ed. 1993 edition / Sheng S. Li. – Springer. - 2013. – 528 p.
10. Федоров Н. Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы [Текст]: Учебник для вузов. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979.— с.288.