

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ РАДИОФОТОННЫХ ТРАКТОВ ДИАПАЗОНА СВЧ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПЕРЕДАЧИ.

*Вольхин Юрий Николаевич, ОАО “Центральное конструкторское бюро автоматики”,
г. Омск, e-mail: ur-vol@yandex.ru*

*Гамиловская Анастасия Вадимовна, Омский Государственный Технический Университет,
г. Омск, e-mail: nagavaomsk@bk.ru*

Представлены результаты теоретических исследований количественных зависимостей коэффициентов передачи сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ от основных параметров их составных частей: мощности излучения источника оптического сигнала, полуволнового напряжения электрооптического модулятора, реализованного в виде интерферометра Маха-Цандера, и уровня потерь в оптическом тракте данного модулятора, а так же от фоточувствительности фотодетектора. На основе данных исследований определены условия, при которых радиофотонные тракты будут иметь положительные коэффициенты передачи.

Ключевым элементом любой волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) является радиофотонный тракт (РФТ). Типичная структурная аналогового РФТ диапазона СВЧ с внешней модуляцией приведена на рис.1. В данном случае модуляция оптического сигнала лазерного диода (ЛД) входным СВЧ сигналом ($U_{свч.вх}$) осуществляется в электрооптическом модуляторе (ЭОМ), который реализован в виде интерферометра Маха-Цандера [1]. Такие ЭОМ называются модуляторами Маха-Цандера (ММЦ [2-6]). С выхода ММЦ модулированный оптический сигнал через оптоволоконный тракт (ОВТ) поступает на фотодетектор (ФД), на СВЧ выходе которого выделяется протектированный сигнал ($U_{свч.вых}$), спектр которого, в идеальном случае, должен быть копией спектра входного СВЧ сигнала.

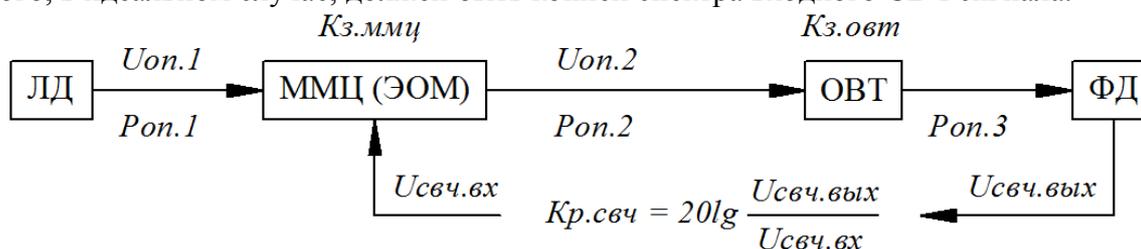


Рис. 1. Структурная простейшего РФТ (ЛД - лазерный диод, ММЦ - модулятор Маха-Цандера, ОВТ - оптоволоконный тракт, ФД - фотодетектор, ЭОМ - электрооптический модулятор)

В настоящий момент ЛД, ММЦ и ФД реализуются в виде герметизированных гибридных интегральных схем (ГИС) с коаксиальными входами/выходами и оптическими входами/выходами [2-7], на которых установлены элементы оптических механических сочленений - коннекторы [8]. Диапазоны рабочих частот (ДРЧ) по коаксиальным входам/выходам у этих ГИС достигают 40 ГГц и более. В качестве ОВТ могут использоваться оптические кабели [9], состоящие из простейших “коммерческих” одномодовых волокон типа SMF-28 [10], на концах которых смонтированы упомянутые выше коннекторы. Таким образом, в настоящий момент, используя лишь самые примитивные “отвёрточные” технологии, можно смонтировать аналоговый РФТ СВЧ - и, в том числе, сверхширокополосный с ДРЧ до 40 ГГц и выше - из имеющихся на рынке ГИС ММЦ, ЛД, ФД и ОВТ. Определим возможные количественные значения параметров таких РФТ.

На рис. 2 схематически изображено устройство простейшего сегнетоэлектрического ММЦ, оптический тракт (ОТ) которого состоит из входного световодного канала (СК), входного Y-разветвителя, первого и второго параллельных световодных каналов (ПСК), выходного Y-световителя, выходного СК. Предполагается, что длины обоих ПСК абсолютно равны между собой. Вдоль второго ПСК располагаются первый и второй электроды управляющей линии (ЭУЛ), на вход которой и поступает управляющий сигнал СВЧ. Предположим, что напряжение на ЭУЛ ($U_{эул}$) и потери в ОТ ММЦ ($K_{з.мму}$) равны нулю, а коэффициенты прело-

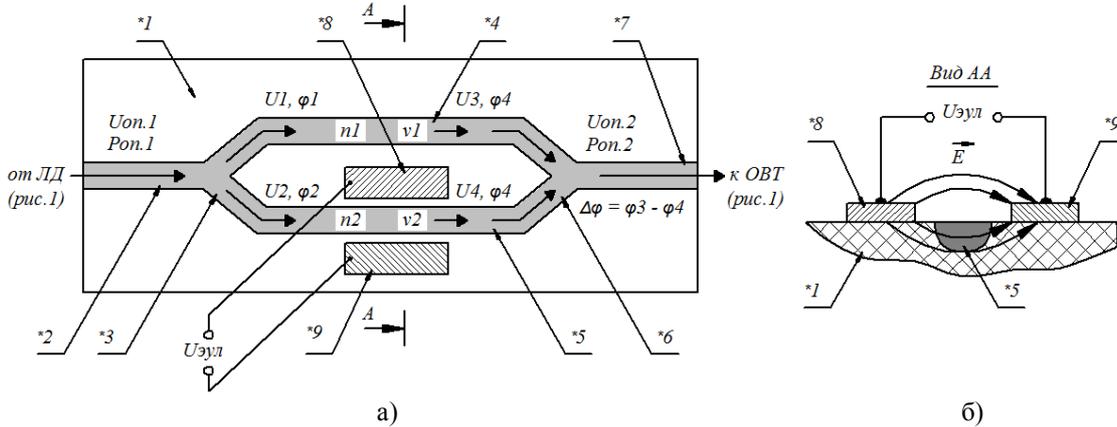


Рис. 2. Схематическое изображение ММЦ на пластине из сегнетоэлектрика (*1 - пластина из сегнетоэлектрика, *2 - входной световодный канал, *3 - входной Y-разветвитель, *4, *5 - первый и второй параллельные световодные каналы, *6 - выходной Y-световитель, *7- выходной световодный канал, *8, *9 - первый и второй электроды управляющей линии СВЧ).

мления обоих ПСК одинаковы ($n1 = n2$). В этом случае, входной оптический сигнал от ЛД с амплитудой $U_{on.1}$ поступает во входной СК, делится во входном Y-ветвителе на два оптических сигнала с одинаковыми амплитудами ($U1 = U2$) и фазами ($\varphi1 = \varphi2$). Далее эти сигналы с одинаковыми скоростями ($v1=v2$) и без затухания проходят ПСК и поступают на входы выходного Y-световителя с такими же амплитудами, как и на выходах входного Y-разветвителя: $U3=U1$ и $U4=U2$ и фазами $\varphi3$ и $\varphi4$. При этом, $\varphi3 \neq \varphi1$, а $\varphi4 \neq \varphi2$, но $\varphi3 = \varphi4$. В этом случае, в выходном СК происходит формирование выходного оптического сигнала с амплитудой $U_{on.2} = U_{on.1}$ так, как это показано на рис. 3а. Однако, если $U_{зул} \neq 0$, то между ЭУЛ создаётся электрическое поле (рис.2б), величина которого $|E|$ прямо пропорциональна $U_{зул}$. В этом случае, во втором ПСК в соответствии с эффектом Поккельса [1], происходит изменение коэффициента преломления $n2$, которое линейно зависит от изменения величины $|E|$, причём, при одной полярности электрического поля $n2$ увеличивается, а при другой - уменьшается. Изменение $n2$ влечёт за собой обратно-пропорциональное изменение скорости $v2$, и, как следствие, фазы $\varphi4$ и разности фаз $\Delta\varphi = \varphi3 - \varphi4$, значение которой становится отличным от нуля (рис.3б,в,г).

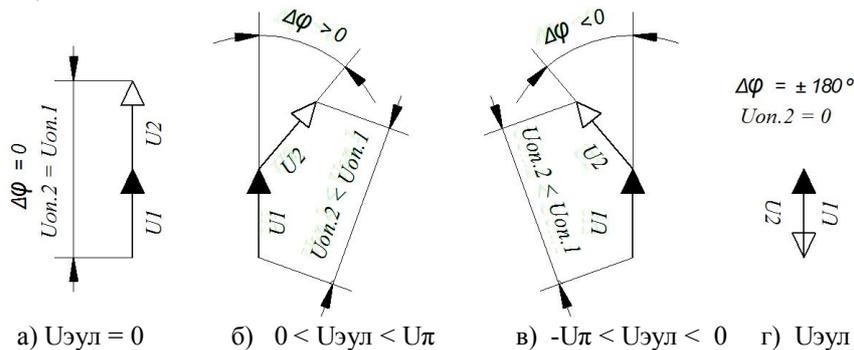


Рис. 3. Векторные диаграммы для различных значений $U_{зул}$ в выходном световодном канале (рис. 2)

Таким образом, можно утверждать следующее: $\Delta\varphi$ линейно зависит от $U_{зул}$, причём знак $\Delta\varphi$ при одной полярности $U_{зул}$ будет положительным, а при другой - отрицательным, например, так, как это показано на рис. 4.

На рис. 4 необходимо обратить внимание на те значения $U_{зул}$, при которых $\Delta\varphi$ равно $+180^\circ$ или -180° . При таких значениях $U_{зул}$ сигналы с амплитудами $U1$ и $U2$ будут складываться в выходном Y-световителе противофазно, а величина $U_{on.2}$ будет равна нулю (рис.3г). Такие значения $U_{зул}$ называются **полувольтными напряжениями** ($Uп$), которые являются одними из основных параметров ММЦ. Используя простейшие геометрические приёмы, можно показать, что уровень $U_{on.2}$ (рис.1,2) для случая $Kз.ммц=0$ ($U_{on.2}'$) можно вычислить по

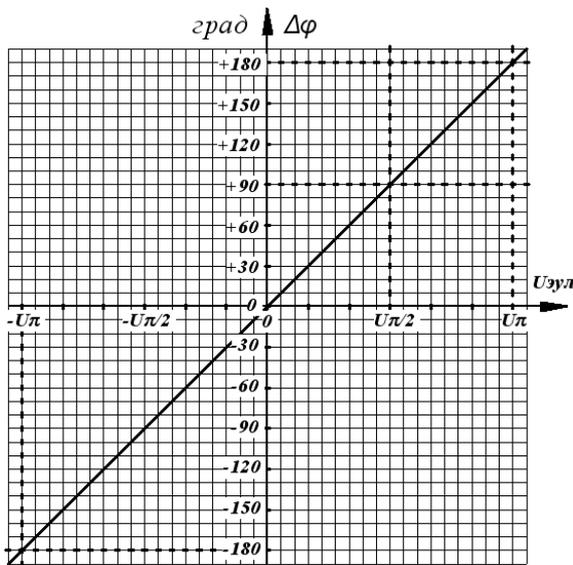


Рис. 4. Зависимость $\Delta\varphi$ от $U_{\text{Эул}}$ (рис. 2)

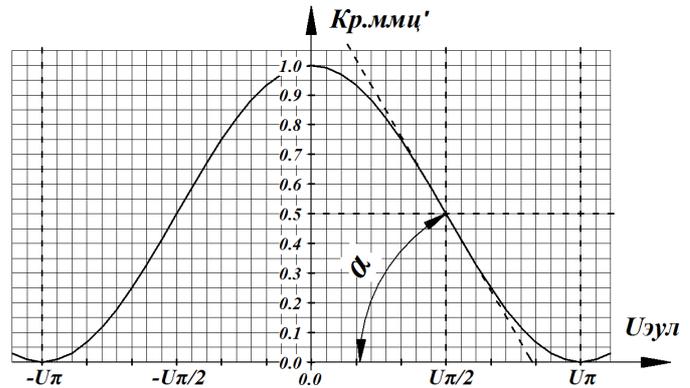


Рис. 5. Зависимость $K_{р.ммц'}$ от $U_{\text{Эул}}$

формуле 1, коэффициент передачи по напряжению для случая $K_{з.ммц}=0$ ($K_{и.ммц}'$) по формуле 2, а коэффициент передачи по мощности для случая $K_{з.ммц}=0$ ($K_{р.ммц}'$) - по формуле 3.

$$U_{оп.2}' = \sqrt{0,5U_{оп.1}^2(1 + \cos(\pi \times U_{\text{Эул}} / U\pi))} \quad (1)$$

$$K_{и.ммц}' = \sqrt{0,5(1 + \cos(\pi \times U_{\text{Эул}} / U\pi))} \quad (2)$$

$$K_{р.ммц}' = 0,5(1 + \cos(\pi \times U_{\text{Эул}} / U\pi)) \quad (3)$$

В соответствии с формулой 3 зависимость $K_{р.ммц}'$ от $U_{\text{Эул}}$ выглядит так, как это показано на рис.5. Данная зависимость, фактически, является модуляционной характеристикой ММЦ. Необходимо отметить, что аналогичные формула для расчёта $K_{р.ммц}'$ и графики зависимости $K_{р.ммц}'$ от $U_{\text{Эул}}$ приведены в [11].

Определим для случая $K_{з.ммц}=0$ (рис.6) форму огибающей промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом $T_{мод}$ и амплитудой $U_{свч.вх} = U\pi$ (формула 4).

$$U_{\text{Эул}} = U_{свч} \times \sin(2\pi / T_{мод})t \quad (4)$$

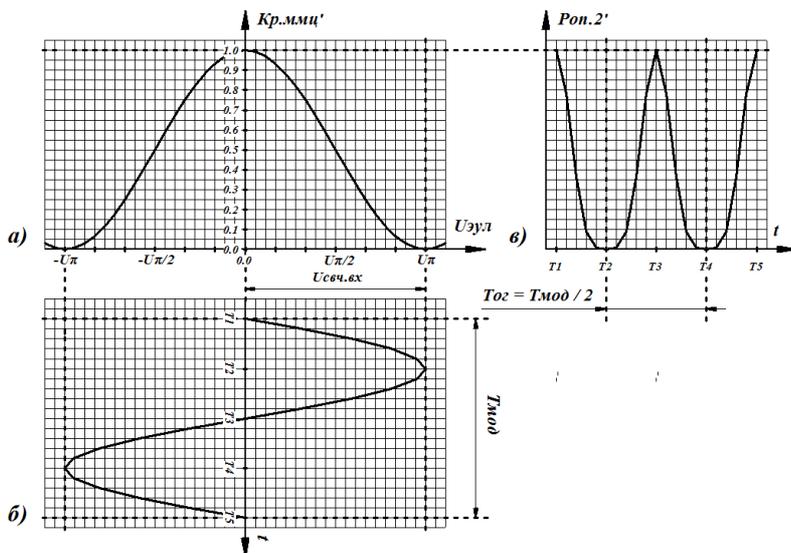


Рис. 6. Модуляция оптического сигнала при подаче на ЭУЛ гармонического сигнала с периодом $T_{мод}$ и амплитудой $U_{свч.вх} = U\pi$ (рис.2)

В этом случае, форма огибающей будет выглядеть так, как это показано на рис.6в. Из этого рисунка видно, что период огибающей $T_{ог}$ в два раза меньше $T_{мод}$, что говорит о серьёзных искажениях спектра передаваемого сигнала. Фактически, при таком электрическом режиме эксплуатации ММЦ, РФТ становится высокоэффективным сверхширокополосным множителем частоты на 2, но так как мы этой цели не преследуем, то придётся принимать меры, чтобы ликвидировать это паразитное умножение частоты. Например - подавая на ЭУЛ некоторое напряжение смещения ($U_{см}$, рис.7) - и тем самым формируя некоторый отличный от нуля постоянный фазовый сдвиг ($\Delta\phi_{см}$). Очевидно, что в идеальном случае, $U_{см} = U\pi/2$ (рис.8), при котором $\Delta\phi_{см} = \pi/2$ (рис.4), а модуляционная характеристика имеет максимальную крутизну - угол α достигает максимального значения (рис.5). В этом случае формула 4 трансформируется в формулу 5. Так же необходимо, для снижения искажений, значительно уменьшить амплитуду модулирующего сигнала СВЧ.

$$U_{эул} = U\pi/2 + U_{свч.вх} \times \sin(2\pi/T_{мод})t \quad (5)$$

В этом случае, форма огибающей промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ будет выглядеть так, как это показано на рис. 8в.

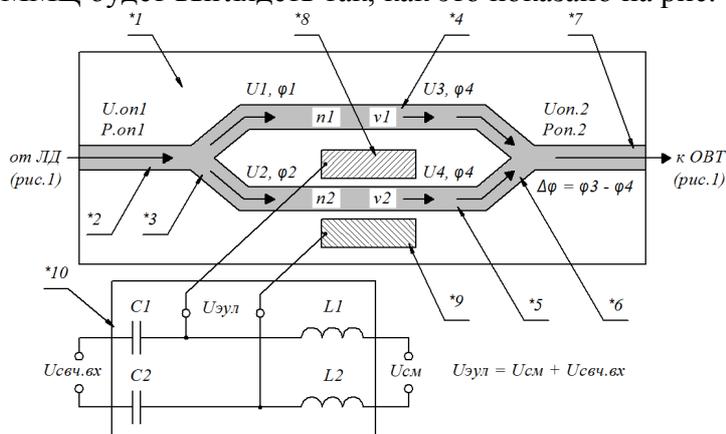


Рис. 7. Схематическое изображение ММЦ на пластине из сегнетоэлектрика со схемой подачи напряжения смещения (*1 - пластина из сегнетоэлектрика, *2 - входной световодный канал, *3 - входной Y-разветвитель, *4, *5 - первый и второй параллельные свето-водные каналы, *6 - выходной Y-световител, *7- выходной световодный канал, *8, *9 - первый и второй электроды управляющей линии СВЧ, 10 - внешняя ЦНС).

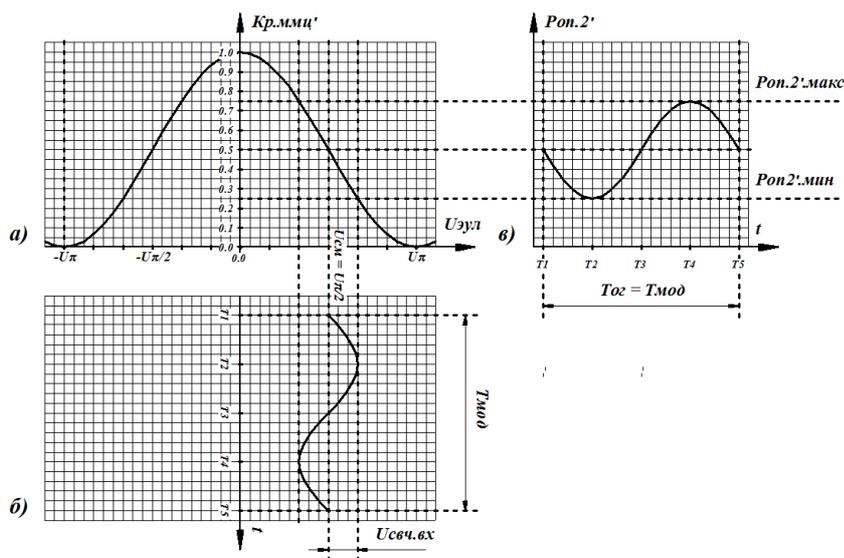


Рис. 8. Модуляция оптического сигнала при подаче на ЭУЛ (рис.2а) гармонического сигнала с периодом $T_{мод}$ и амплитудой $U_{свч.вх} < U\pi$ при поданном напряжении смещения $U_{см} = U\pi/2$ (рис.7)

Необходимо отметить, что формирование требуемого $\Delta\phi_{см}$ можно осуществить многими способами: при помощи внешней цепи напряжения смещения (ЦНС), состоящей из ёмкостей $C1$ и $C2$ и индуктивностей $L1$ и $L2$ (рис.7), или с использованием собственных ЦНС,

как, например, у ММЦ LN05S фирмы Thorlabs [2], а так же другими способами, которые могут быть основаны на других, принципиально отличных от эффекта Погкельса физических явлениях [12], и к которым параметр $U\pi$ не имеет никакого отношения. Поэтому, необходимо будет вывести более универсальную формулу зависимости $Kp.mmc'$ от $U_{\text{эл}}$, в которой не будет алгебраической взаимосвязи между $\Delta\phi_{cm}$ и $U\pi$. Для этого, в формулу 3 подставим формулу 5, и, проведя некоторые алгебраические преобразования, получим формулу 6

$$\begin{aligned} Kp.mmc' &= 0,5(1 + \cos(\pi \times \frac{U\pi / 2 + U_{\text{свч}} \times \sin(2\pi / T_{\text{мод}})t}{U\pi})) = \\ &= 0,5(1 + \cos(\frac{\pi \times U\pi / 2}{U\pi} + \frac{\pi \times U_{\text{свч}} \times \sin(2\pi / T_{\text{мод}})t}{U\pi})) = \\ &= 0,5(1 + \cos(\pi / 2 + \frac{\pi \times U_{\text{свч}} \times \sin(2\pi / T_{\text{мод}})t}{U\pi})) \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, уровень $P_{op.2}$ (рис.1) для случая $Kz.mmc=0$ ($P_{op.2}'$) можно вычислить по формуле 7

$$P_{op.2}' = P_{op.1} \times 0,5(1 + \cos(\pi / 2 + \frac{\pi \times U_{\text{свч}} \times \sin(2\pi / T_{\text{мод}})t}{U\pi})) \quad (7)$$

Подставим в формулу 7 значения $t = 0.25T_{\text{мод}}$ и $t = 0.75T_{\text{мод}}$ и (моменты времени T_2 и T_4 , рис.8) и определим минимальные и максимальные значения $P_{op.2}'$ ($P_{op.2}'_{\text{мин}}$ и $P_{op.2}'_{\text{макс}}$) по формулам 8,9 соответственно

$$P_{op.2}'_{\text{мин}} = P_{op.1} \times 0,5(1 + \cos(\pi / 2 + \frac{\pi U_{\text{свч}}}{U\pi})) \quad (8)$$

$$P_{op.2}'_{\text{макс}} = P_{op.1} \times 0,5(1 + \cos(\pi / 2 - \frac{\pi U_{\text{свч}}}{U\pi})) \quad (9)$$

Далее вычислим реальные минимальные и максимальные значения мощности оптического сигнала на выходе ММЦ ($P_{op.2.\text{мин}}$ и $P_{op.2.\text{макс}}$) с учётом реальных значений $Kz.mmc$ (рис.1) по формулам 10,11 соответственно

$$P_{op.2.\text{мин}} = P_{op.2}'_{\text{мин}} / Kz.mmc \quad (10)$$

$$P_{op.2.\text{макс}} = P_{op.2}'_{\text{макс}} / Kz.mmc \quad (11)$$

Далее вычислим минимальные и максимальные значения мощности оптического сигнала на входе ФД ($P_{op.3.\text{мин}}$ и $P_{op.3.\text{макс}}$) с учётом реальных значений $Kz.ovt$ (рис.1) по формулам 12,13 соответственно

$$P_{op.3.\text{мин}} = P_{op.2.\text{мин}} / Kz.ovt \quad (12)$$

$$P_{op.3.\text{макс}} = P_{op.2.\text{макс}} / Kz.ovt \quad (13)$$

Необходимо отметить, что потери в современных одномодовых волокнах типа SMF-28 [10] ничтожно малы: 0.2дБ/км на длине волны 1550 нм. Однако, ОБТ (рис.1) стыкуется с ММЦ и ФД при помощи упомянутых выше коннекторов [8], и на этих стыках можно потерять до 3 дБ.

Далее, с использованием приведённых в справочных данных на фотодетекторы значений фоточувствительности $P\phi$ (Responsivity [5,6,7]) вычислим минимальные и максимальные значения наведённого тока в ФД, ($I\phi.\text{мин}$ и $I\phi.\text{макс}$) по формулам 14,15 соответственно.

$$I\phi.\text{мин} = P_{op.3.\text{мин}} \times P\phi \quad (14)$$

$$I\phi.\text{макс} = P_{op.3.\text{макс}} \times P\phi \quad (15)$$

Далее вычислим минимальные и максимальные значения напряжения, которые формируются в нагрузке ФД при протекании через неё наведённого фототока I_f . На рис. 9 приведена схема фотодетектора XPDV3120R фирмы u²t Photonics [6], нагрузкой которого является резистор $R_2 = 50$ Ом. Однако, к этой нагрузке параллельно подсоединяется выходной коаксиальный тракт с волновым сопротивлением $Z_v = 50$ Ом. Следовательно, I_f протекает через нагрузку с сопротивлением 25 Ом.

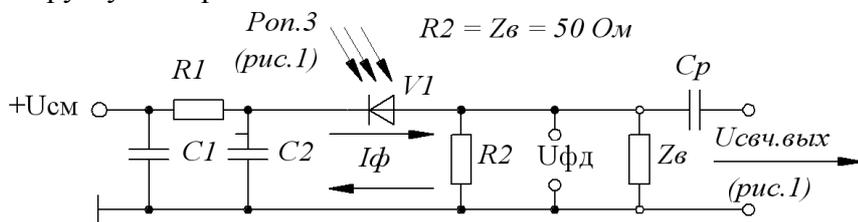


Рис. 9. Схема фотодетектора XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics (www.u2t.com)

Рассчитаем минимальные и максимальные напряжения $U_{фд}$ (рис.9) на такой нагрузке ($U_{фд.мин}$ и $U_{фд.макс}$) по формулам 16,17 соответственно.

$$U_{фд.мин} = I_{ф.мин} \times 25 \text{ Ом} \quad (16)$$

$$U_{фд.макс} = I_{ф.макс} \times 25 \text{ Ом} \quad (17)$$

Далее, по формуле 18 вычислим амплитуду колебаний переменной составляющей $U_{фд}$ (рис.9), которая и является искомой амплитудой выходного сигнала СВЧ ($U_{свч.вых}$)

$$U_{свч.вых} = (U_{фд.макс} - U_{фд.мин}) / 2 \quad (18)$$

Физически, выходной сигнал СВЧ выделяется при помощи разделительного конденсатора C_p (рис.9), который необходимо будет установить на выходе ФД.

И наконец, вычислим по формуле 19 коэффициент передачи РФТ ($K_{р.свч}$) от СВЧ входа ММЦ до СВЧ выхода ФД

$$K_{р.свч} = 20 \lg(U_{свч.вых} / U_{свч.вх}) \quad (19)$$

При помощи данной методики были рассчитаны зависимости $K_{р.свч}$ от $U_{п}$ при различных значениях $P_{ф}$ (рис.10), $R_{оп.1}$ (рис.11) и $K_{з.ммц}$. Из этих рисунков можно сделать следующие выводы. Во-первых, $K_{р.свч}$ прямо пропорционален $P_{ф}$ и $R_{оп.1}$, и обратно пропорционален $K_{з.ммц}$ и $U_{п}$. Во-вторых, РФТ может иметь положительный коэффициент передачи и использоваться в качестве сверхширокополосного усилителя при $R_{оп.1} \sim 200$ мВт и при $U_{п} < 1$ В. Сообщения об экспериментальных образцах ММЦ с такими значениями $U_{п}$ периодически появляются в различных источниках информации [13]. А если в составе РФТ использовать только доступную на рынке элементную базу [2-7]: ЛД с выходной мощностью порядка 20 мВт, ММЦ с $K_{з.ммц}$ порядка 5-6 дБ и $U_{п}$ порядка 5-6 В и ФД с $P_{ф}$ порядка 0.6 А/Вт, можно ожидать получения $K_{р.свч}$ в диапазоне (-40) - (-30) дБ.

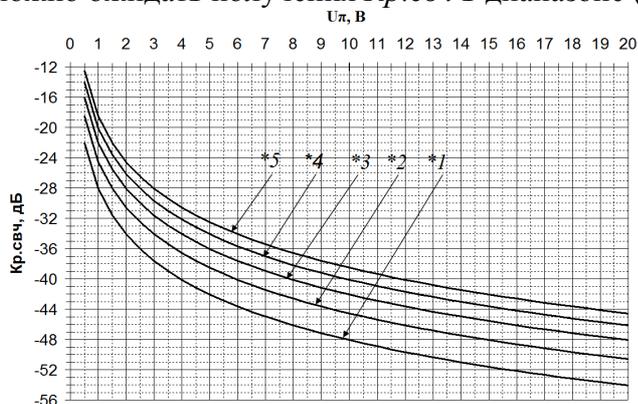


Рис. 10. Зависимость $K_{р.свч}$ (рис. 1) от $U_{п}$ при $R_{оп.1} = 20$ мВт, $K_{з.ммц} = 6$ дБ и при различных значениях фоточувствительности ФД (*1 - $P_{ф} = 0.4$ А/Вт, *2 - $P_{ф} = 0.6$ А/Вт, *3 - $P_{ф} = 0.8$ А/Вт, *4 - $P_{ф} = 1.0$ А/Вт, *5 - $P_{ф} = 1.2$ А/Вт)

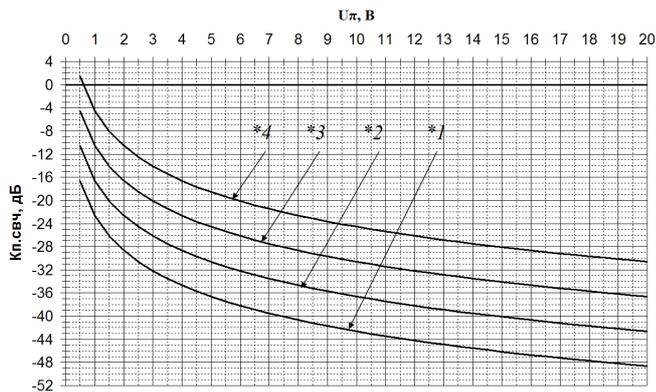


Рис. 11. Зависимость Кр.свч (рис. 1) от $U_{п}$ при $K_{з.ммц} = 6$ дБ, $P_{ф} = 0.6$ А / Вт и при различных значениях мощности излучения ЛД (*1 - $P_{оп.л} = 25$ мВт, *2 - $P_{оп.л} = 50$ мВт, *3 - $P_{оп.л} = 100$ мВт, *4 - $P_{оп.л} = 200$ мВт)

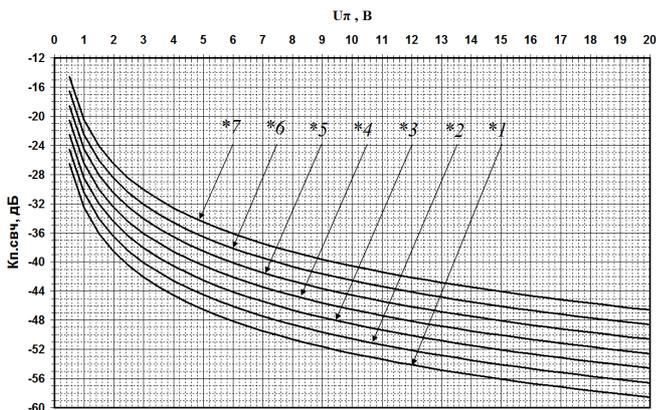


Рис. 12. Зависимость Кр.свч (рис. 1) от $U_{п}$ при $P_{оп.л} = 20$ мВт, $P_{ф} = 0.6$ А / Вт и при различных значениях уровня затухания в ОТ ММЦ (*1 - $K_{з.ммц} = 10$ дБ, *2 - $K_{з.ммц} = 9$ дБ, *3 - $K_{з.ммц} = 8$ дБ, *4 - $K_{з.ммц} = 7$ дБ, *5 - $K_{з.ммц} = 6$ дБ, *6 - $K_{з.ммц} = 5$ дБ, *7 - $K_{з.ммц} = 4$ дБ.).

- [1] Сивухин Д. В. Общий курс физики. - Издание 3-е, стереотипное. - М.: [Физматлит](#), [МФТИ](#), 2002. - Т. IV. Оптика. - 792 с.
- [2] www.thorlabs.com
- [3] www.oclaro.com
- [4] www.jdsu.com
- [5] www.hhi.fraunhofer.de
- [6] www.u2t.com
- [7] www.discoverysemi.com
- [8] www.exalan.ru
- [9] www.eurocabel-1.ru
- [10] www.corning.com
- [11] Активные фазированные антенные решётки/Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. -М.:Радиотехника, 2004, -488с.,ил.
- [12] www.gigoptix.com
- [13] Vincent J. Urick, Jason D. McKinney, John F. Diehl, and Keith J. Williams. Fiber-Optic Links with All-Photonic RF Gain and Low RF Noise Figure. 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2011)