

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «Радиотехнические устройства и системы диагностики»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему: «Определение электрических параметров радиотонного тракта»
по дисциплине: Приемные устройства СВЧ и радиотоника

Выполнил:
студент группы
Иванов И.И.

Проверил:
старший преподаватель
кафедры РТУ и СД
Петров П.П.

Омск 2020

Содержание

Введение	3
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	7
3 ВЫБОР ВАРИАНТА СХЕМЫ СТРУКТУРНОЙ РФТ	8
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РФТ	13
4.1 Определение значений $f_{эл.нг}$ и $f_{эл.вг}$	13
4.2 Определение значения $U_{см.ммц}$	14
4.3 Определение значения $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$	15
4.4 Определение значения $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.}$ 30?	
4.5 Определение верхней границы динамического диапазона РФТ - или максимальной амплитуды входного электрического сигнала $U_{эл.вх.1}$ - по уровню КНИ = 2% при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ 333?	
Заключение	36
Библиографический список	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А	38
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	39
ПРИЛОЖЕНИЕ В	42
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	45

Введение

Радиофотоника - это область науки и техники, в рамках которой исследуются взаимодействия оптических и высокочастотных электрических полей (сигналов, волн), а также создаются технические устройства, принцип работы которых основан на таких взаимодействиях [1]. В настоящий момент основным объектом приложения методов и средств радиофотоники являются аналоговые радиофотонные тракты (далее по тексту РФТ).

Цель работы:

Определение электрических параметров радиофотонного тракта (далее по тексту РФТ).

Задачи:

1. Выбрать схему структурную РФТ.
2. Определить значение частоты входного и выходного электрических сигналов (далее по тексту $f_{эл}$) на нижней и верхней границе диапазона рабочих частот (далее по тексту ДРЧ) РФТ: $f_{эл.нг}$ и $f_{эл.вг}$ соответственно.
3. Определить ориентировочное оптимальное значение напряжения смещения на электродах управляющей линии ММЦ или на специализированных низкочастотных контактах для подачи напряжения смещения (далее по тексту $U_{см.ммц}$).
4. Произвести расчёт коэффициента передачи РФТ (далее по тексту $K_{п.рфт}$) при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ и $f_{эл} = f_{эл.вг}$ для входного электрического сигнала (далее по тексту $U_{эл.вх}$) с амплитудой (далее по тексту $V_{эл.вх}$) 5 мВ;
5. Определить верхнюю границу динамического диапазона РФТ - или максимальное значение $V_{эл.вх}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ и уровне коэффициента нелинейных искажений (далее по тексту КНИ) 2%.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Типичная укрупнённая схема структурная РФТ, представленная на рисунке 1, содержит модуль электрооптического преобразования (далее по тексту МЭП), оптоволоконный тракт (далее по тексту ОВТ) и модуль оптоэлектронного преобразования (далее по тексту МОП).

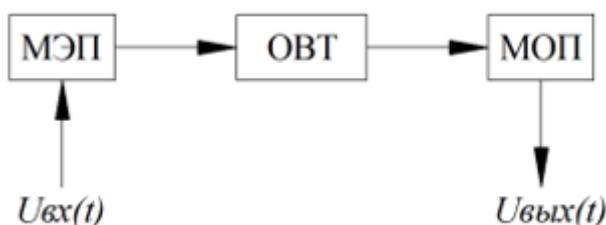


Рисунок 1 – Типичная укрупнённая схема структурная РФТ: МОП – модуль оптоэлектронного преобразования, МЭП – модуль электрооптического преобразования, ОВТ – оптоволоконный тракт

В МЭП может осуществляться либо прямая модуляция оптического сигнала электрическим сигналом $U_{вх}(t)$, либо - внешняя модуляция. В случае реализации прямой модуляции МЭП, фактически, состоит из одного лазерного диода с прямой модуляцией (далее по тексту ЛДПМ). Реализация я прямой модуляции МЭП продемонстрирована на рисунке 2. В случае реализации внешней модуляции, показанной на рисунке 3, в состав МЭП входит источник оптического излучения (далее по тексту ИОС) и электрооптический модулятор (далее по тексту ЭОМ). Как правило, в качестве ИОС используются лазерные диоды (далее по тексту ЛД), а в качестве ЭОМ, как правило, используется либо электропоглощающие модуляторы (далее по тексту ЭПМ), либо “интерференционные” ЭОМ. Принцип действия ЭПМ основан на эффекте Франца-Келдыша [2]. “Интерференционные” ЭОМ, как правило, реализованы по принципу интерферометра Маха-Цандера, а воздействие электрического сигнала на оптический осуществляется с использованием эффекта Поккельса [3]. Такие ЭОМ называют модуляторами Маха-Цандера (далее по тексту ММЦ). В качестве МОП, как правило, используются фотодетекторы (далее по тексту

ФД), на электрическом выходе которых выделяется протектированный сигнал $U_{вых}(t)$. Пример можно увидеть на рисунке 4. В качестве ОВТ в подавляющем большинстве случаев может использоваться обычное “коммерческое” одномодовое волокно типа SMF-28 [4].

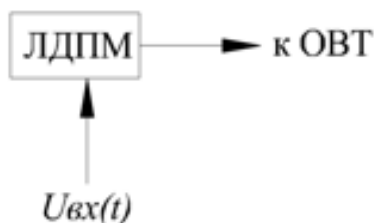


Рисунок 2 - Схема структурная МЭП с прямой модуляцией

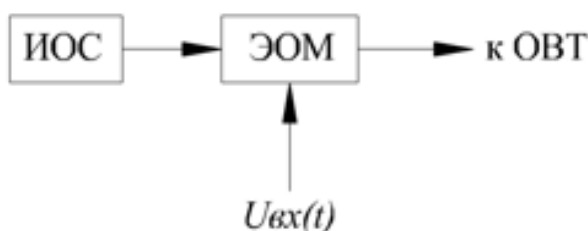


Рисунок 3 - Схема структурная МЭП с внешней модуляцией

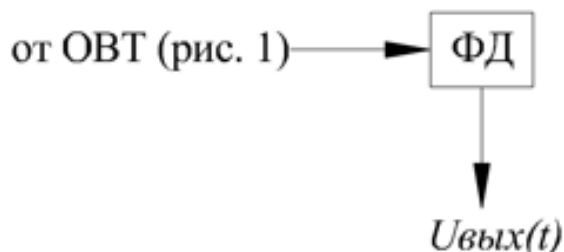


Рисунок 4 - Схема структурная МОП

В данной курсовой работе предлагается определить электрические параметры РФТ с внешней модуляцией. Типичная схема структурная такого РФТ выглядит так, как это показано на рисунке 5.

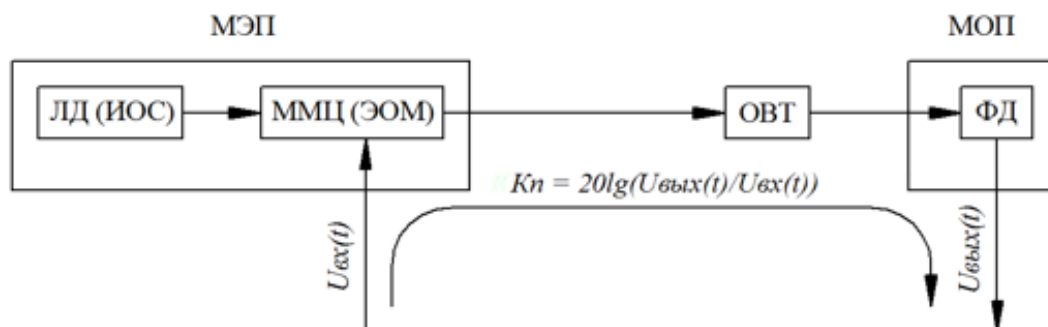


Рисунок 5 - Типичная схема структурная РФТ с внешней модуляцией

Определение электрических параметров РФТ будут производиться в соответствии с методиками, описанными в лекционном курсе и прилагаемых литературных источниках [5, 6, 7].

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В соответствии с техническим заданием на курсовую работу (далее по тексту ТЗ, Приложение А) предлагается рассчитать электрические параметры РФТ (вариант №25), в котором будут использоваться следующие фотонные и радиофотонные компоненты

– DFB Laser Module DFB-C-PM-M производства Optilab, LLC (www.legacy.optilab.com) в качестве ИОС (Приложение Б);

– 20 GHz Analog Intensity Modulator MXAN-LN-20 производства Photline Technologies (www.photline.com) в качестве ММЦ (Приложение В);

– 50 GHz Photodetector XPDV2120R производства u2tphotonics (www.u2t.com) в качестве ФД (Приложение Г).

3 ВЫБОР ВАРИАНТА СХЕМЫ СТРУКТУРНОЙ РФТ

Оценим потребность установки в тракт РФТ (Рисунок 5) - от входа электрического сигнала $U_{вх}(t)$ до выхода электрического сигнала $U_{вых}(t)$ - дополнительных элементов.

Предложенная в Приложении А модель ММЦ располагает специализированными низкочастотными контактами для подачи $U_{см.ммц}$ (Приложение В, стр. 3, таблица «Electrical Characteristics», наименование параметра «Vp DC electrodes», стр. 5, раздел «Mechanical Diagram and pinout», Port «1» и Port «2»). Поэтому, в данном случае, на вход электрического сигнала ММЦ не надо установить узел подачи напряжения смещения.

В Приложении Г (раздел «Block Diagram») показано, что предложенная в Приложении А модель ФД располагает выходным, развязывающим по постоянному току, конденсатором. Поэтому, в данном случае, на выход электрического сигнала ФД не надо устанавливать узел развязки по постоянному току.

Далее оценим возможность «механической» стыковки оптических и электрических входов/выходов перечисленных выше моделей ИОС (Приложение Б), ММЦ (Приложение В) и ФД (Приложение Г).

В соответствии с Приложением Б предложенная модель ИОС имеет выходной оптический тракт (Таблица «Mechanical Specifications», наименование параметра «Optical Fiber Type») в виде одномодового волокна с сохранением поляризации (PANDA for PM Output, которое так же может обозначаться как PMF), на которое смонтирован оптический коннектор типа FC/APC (Таблица «Mechanical Specifications», наименование параметра «Optical Connectors»).

А в соответствии с Приложением В предложенная модель ММЦ имеет входной оптический тракт в виде одномодового волокна с сохранением поляризации (стр. 5, раздел «Mechanical Diagram and pinout», Port «IN, Function «Optical input port», Note «Polarization maintaining fiber, Corning PM

98-U25A», которое так же может обозначаться как PMF). При этом, в Приложении В не указан тип оптического коннектора, который используется во входном оптическом тракте. Поэтому, в соответствии с ТЗ (Приложение А), которое допускает выбор и установку требуемых оптических коннекторов при проектировании РФТ, будем считать, что перед сборкой РФТ во входном оптическом тракте предложенной модели ММЦ был установлен коннектор типа FC/APC.

Таким образом, предложенные модели ИОС и ММЦ - *после доработки входного оптического тракта ММЦ* - можно будет стыковать между собой, так как входной оптический тракт ММЦ будет аналогичен выходному оптическому тракту ИОС - как по типу волокна, так и по типу коннектора.

В соответствии с Приложением В предложенная модель ММЦ имеет выходной оптический тракт в виде одномодового волокна с сохранением поляризации (стр. 5, раздел «Mechanical Diagram and pinout», Port «OUT», Function «Optical output port», Note «Polarization maintaining fiber, Corning PM 98-U25A», которое так же может обозначаться как PMF), на которое может быть установлен коннектор типа FC/APC (раздел «Ordering information»).

А в соответствии с Приложением Г (Ordering Information) предложенная модель ФД «по-умолчанию» имеет входной оптический тракт в виде одномодового волокна без сохранения поляризации типа SMF, на которое - в стандартной конфигурации - смонтирован оптический коннектор типа SC/PC.

Таким образом, предложенные модели ММЦ и ФД невозможно стыковать между собой. При этом, различие типов волокон в выходном тракте ММЦ (PMF) и входном тракте ФД (SMF) проблемой не является, так как при передаче оптической волны из PMF в SMF никаких проблем не возникает. А вот коннектор типа SC/PC во входном оптическом тракте ФД - в

соответствии ТЗ (Приложение А) - предлагается заменить на коннектор типа FC/APC.

Таким образом, предложенные модели ММЦ и ФД - после доработки входного оптического тракта ФД - можно будет стыковать между собой, а схема структурная РФТ - в данном случае - будет выглядеть так, как это показано на рисунке 6.

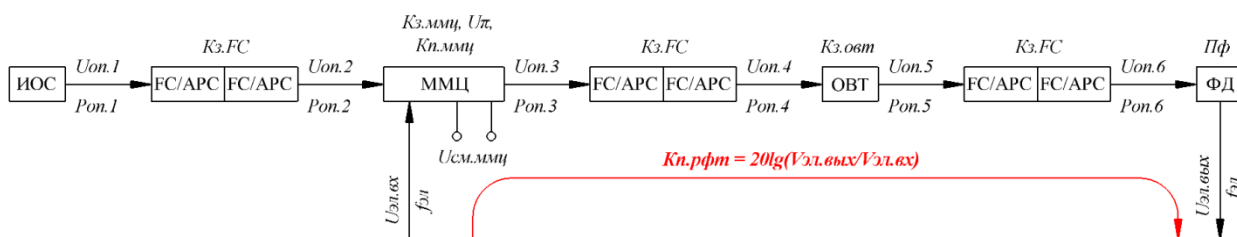


Рисунок 6 - Схема структурная РФТ для случая предложенного набора моделей фотонных, радиофотонных и электронных компонентов

Далее оценим возможность стыковки оптических входов/выходов перечисленных выше моделей ИОС (Приложение Б), ММЦ (Приложение В) и ФД (Приложение Г) с точки зрения совместимости диапазонов рабочих длин волн (далее по тексту ДРДВ) и энергетических режимов.

ДРДВ по оптическим входам/выходам данных моделей фотонной и радиофотонной компонентной базы приведён в Таблице 1.

Таблица 1

Наименование устройства (рисунок 6)	ДРДВ
ИОС (Приложение Б)	1528 - 1564 нм (Таблица «Technical specifications», наименование параметра «Available Wavelength Range», C-band)
ММЦ (Приложение В)	1530 - 1580 нм (стр. 3, Таблица «Optical Characteristics», наименование параметра «Operating wavelength»,)
ФД (Приложение Г)	1480 - 1620 нм (Таблица «Operation Condition», наименование параметра «Operating wavelength range»)

В соответствии с Таблицей 1 можно констатировать следующее: предложенные модели ИОС (Приложение Б), ММЦ (Приложение В) и ФД (Приложение Г) совместимы по ДРДВ, так как возможные длины волн излучаемого ИОС сигнала (далее по тексту $\lambda_{\text{ИОС}}$, 1528 - 1564 нм) попадают как в ДРДВ ММЦ (1530 - 1580 нм), так и в ДРДВ ФД (1480 - 1620 нм).

Значения уровня максимальной мощности выходного оптического сигнала ИОС (далее по тексту $P_{\text{ИОС.макс}}$) и значения уровней предельно-допустимой мощности входных оптических сигналов ММЦ (далее по тексту $P_{\text{ММЦ.оп.пд}}$) и ФД (далее по тексту $P_{\text{ФД.оп.пд}}$) приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Наименование устройства (рисунок б)	Наименование параметра	Значение уровня мощности
ИОС (Приложение Б)	$P_{\text{ИОС.макс}}$	16 dBm (40 мВт) (Таблица «Technical specifications» наименование параметра «Output Power Level»,)
ММЦ (Приложение В)	$P_{\text{ММЦ.оп.пд}}$	20 dBm (100 мВт) (стр. 3, Таблица « Absolute maximum ratings», наименование параметра «Optical Input Power», столбец «Max»)
ФД (Приложение Г)	$P_{\text{ФД.оп.пд}}$	16 dBm (40 мВт) (Таблица «Absolute maximum ratings», наименование параметра «Maximum average optical input power», столбец «Max.»)

В соответствии с Таблицей 2 можно констатировать следующее: предложенные модели ИОС, ММЦ и ФД совместимы по энергетическим режимам, так как значение $P_{\text{ИОС.макс}}$ в 2.5 раза меньше значения $P_{\text{ММЦ.оп.пд}}$ и равно значению $P_{\text{ФД.оп.пд}}$. При этом, с учётом потерь в оптических трактах ММЦ (далее по тексту $K_{\text{з.ммц}}$, рисунок б) уровни мощности оптического сигнала на входе ФД (см. ниже формулы 19, 20) будут более чем на порядок ниже $P_{\text{ФД.оп.пд}}$. Поэтому, и была выбрана модель ИОС с самым высоким уровнем мощности выходного сигнала - 40 мВт (Таблица «Technical

specifications» наименование параметра «Output Power Level»), так как в соответствии с [5, 6, 7] значение Кп.рфт тем выше, чем выше значение уровня мощности выходного сигнала ИОС.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РФТ

В данном случае (рисунок 6) предстоит определить значения следующих параметров:

- $f_{эл.нг}$ и $f_{эл.вг}$;
- $U_{см.ммц}$;
- $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ и $f_{эл} = f_{эл.вг}$;
- верхнюю границу динамического диапазона РФТ - или максимальное значение $V_{эл.вх}$ входного электрического сигнала $U_{эл.вх}$ - при $f_{эл} = f_{эл.вг}$ и $KНИ = 2\%$.

Перед проведением вычислений напомним, что в соответствии с ТЗ (Приложение А):

- значения потерь в ОВТ (далее по тексту $K_{з.овт}$) принимаются равными 0,0 дБ;
- значения потерь при стыковке коннекторов типа FC/APC (далее по тексту $K_{з.FC}$) принимаются равными 1,5 дБ.

4.1 Определение значений $f_{эл.нг}$ и $f_{эл.вг}$

Для определения значений $f_{эл.нг}$ и $f_{эл.вг}$ занесём в Таблицу 3 значения частот электрических сигналов на верхних и нижних границах ДРЧ ММЦ и ФД (далее по тексту $f_{эл.нг}'$ и $f_{эл.вг}'$ соответственно).

Таблица 3

Наименование устройства (рисунок б)	фэл.нг', ГГц	фэл.вг', ГГц
1	2	3
ММЦ (Приложение В)	0,000000*	18,000000 (стр. 3, таблица «Electrical Characteristics», наименование параметра «Electro-optic bandwidth», столбец «Min»)
ФД (Приложение Г)	~0,000020**	45,000000 (Таблица «Optical and Electrical Specifications», наименование параметра «3 dB cut-off frequency», столбец «Min.»)
	фэл.нг, ГГц	фэл.вг, ГГц
РФТ	0,000000	18,000000

* В Приложении В значение фэл.нг' не приведено, но для ММЦ такого типа это значение - «по-умолчанию» - составляет 0,0 ГГц.

** В Приложении Г значение фэл.нг' не приведено, но с учётом огромной (100 нанофарад) ёмкости выходного развязывающего по постоянному току конденсатора (раздел «Block Diagram») можно предположить, что значение *фэл.нг'* - по уровню «-3 дБ» - у данной модели ФД не превышает 20 КГц

Для определения значения фэл.нг, выберем самое большое значение во 2-м столбце Таблицы 3. Таким образом, в данном случае фэл.нг = 0,000020 ГГц или 20 КГц (определяется нижней границей ДРЧ ФД).

Для определения значения фэл.вг, выберем самое малое значение в 3-м столбце Таблицы 3. Таким образом, в данном случае фэл.вг = 18,0 ГГц (определяется верхней границей ДРЧ ММЦ).

4.2 Определение значения $U_{см.ммц}$

В данном случае $U_{см.ммц}$ подаётся на специальные низкочастотные клеммы (Приложение В, стр. 5, раздел «Mechanical Diagram and pinout», Port «1» и Port «2»), которые [5] гальванически соединены с контактными площадками для подачи напряжения смещения (далее по тексту КПНС). В

соответствии с рекомендациями [5] - при реализации РФТ с минимальными искажениями сигнала - величина $U_{см.ммц}$ должна быть равна половине полуволнового напряжения по КПНС (далее по тексту $U_{п.кпнс}$). В данном случае, под $U_{п.кпнс}$ следует понимать параметр « V_p DC electrodes» из Таблицы «Electrical Characteristics» Приложения В и выбрать его значение из столбца «Тур» - т.е. $U_{п.кпнс}$ принять равным 6,5 В, а $U_{см.ммц} = U_{п.кпнс}/2 = 3,25$ В.

4.3 Определение значения $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$

Выше, в пункте 3 (Таблица 2) была выбрана модель ИОС с уровнем мощности выходного оптического сигнала (далее по тексту $P_{оп.1}$, рисунок 6) 16 дБм или 40 мВт.

Проведённые ниже вычисления проводятся в соответствии с [5, 6, 7].

Определим значение уровня мощности оптического сигнала на оптическом входе ММЦ (далее по тексту $P_{оп.2}$, **рисунок 6**) по формуле 1:

$$P_{оп.2} = P_{оп.1}(\text{мВт})/K_{з.ФС}(\text{раз}) = 40/1,4126 \approx 28,3166. \quad (1)$$

Определим значение уровня мощности оптического сигнала на оптическом выходе ММЦ (далее по тексту $P_{оп.3}$, **рисунок 6**) по формуле 2:

$$P_{оп.3}(\text{мВт}) = P_{оп.2}(\text{мВт}) \times K_{п.ммц}(\text{раз}), \quad (2)$$

где $K_{п.ммц}$ - коэффициент передачи по мощности оптического тракта ММЦ в раз

Подставим в формулу 2 определённое по формуле 1 значение $P_{оп.2} = 28,3166$ мВт и получим формулу 3:

$$P_{оп.3} = 28,3166 \times K_{п.ммц}. \quad (3)$$

Значения $K_{п.ммц}$ в раз **- в соответствии с рекомендациями [5] -** вычисляются по формуле 4:

$$K_{п.ммц}(\text{раз}) = \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{кпнс}(\text{В})}{U_{п.кпнс}(\text{В})} + 180^\circ \times \frac{U_{эул}(\text{В})}{U_{п.эул.нг}(\text{В})}\right)}{2 \times K_{з.ммц}(\text{раз})} \quad (4)$$

где $U_{эул}$ - напряжение на электродах управляющей линии ММЦ, В;

Укпнс - напряжение на контактных площадках для подачи напряжения смещения ММЦ, В;

Уп.эул.нг - полуволновое напряжение ММЦ по ЭУЛ при $f_{эл} = f_{нг}$, В;

Уп.кпнс - полуволновое напряжение ММЦ по КПНС, В;

Кз.ммц - потери в оптическом тракте ММЦ, раз.

Как уже было сказано выше, на КПНС подаётся $U_{см.ммц} = U_{п.кпнс}/2$.

Следовательно, формулу 4 можно преобразовать в формулу 5 следующим образом:

$$\begin{aligned}
 K_{п.ммц} (\text{раз}) &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{U_{кпнс} (В)}{U_{п.кпнс} (В)} + 180^\circ \times \frac{U_{эул} (В)}{U_{п.эул.нг} (В)} \right)}{2 \times K_{з.ммц} (\text{раз})} = \\
 &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{U_{см.ммц} (В)}{U_{п.кпнс} (В)} + 180^\circ \times \frac{U_{эул} (В)}{U_{п.эул.нг} (В)} \right)}{2 \times K_{з.ммц} (\text{раз})} = \\
 &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{U_{п.кпнс}/2 (В)}{U_{п.кпнс} (В)} + 180^\circ \times \frac{U_{эул} (В)}{U_{п.эул.нг} (В)} \right)}{2 \times K_{з.ммц} (\text{раз})} = \\
 &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{1}{2} + 180^\circ \times \frac{U_{эул} (В)}{U_{п.эул.нг} (В)} \right)}{2 \times K_{з.ммц} (\text{раз})} = \\
 &= \frac{1 + \cos \left(90^\circ + 180^\circ \times \frac{U_{эул} (В)}{U_{п.эул.нг} (В)} \right)}{2 \times K_{з.ммц} (\text{раз})} \tag{5}
 \end{aligned}$$

Графическое изображение зависимости $K_{п.ммц}$ от $U_{эул}$ - для данного случая (при $U_{кпнс} = U_{п.кпнс}/2$ эул) - приведено на рисунке 7.

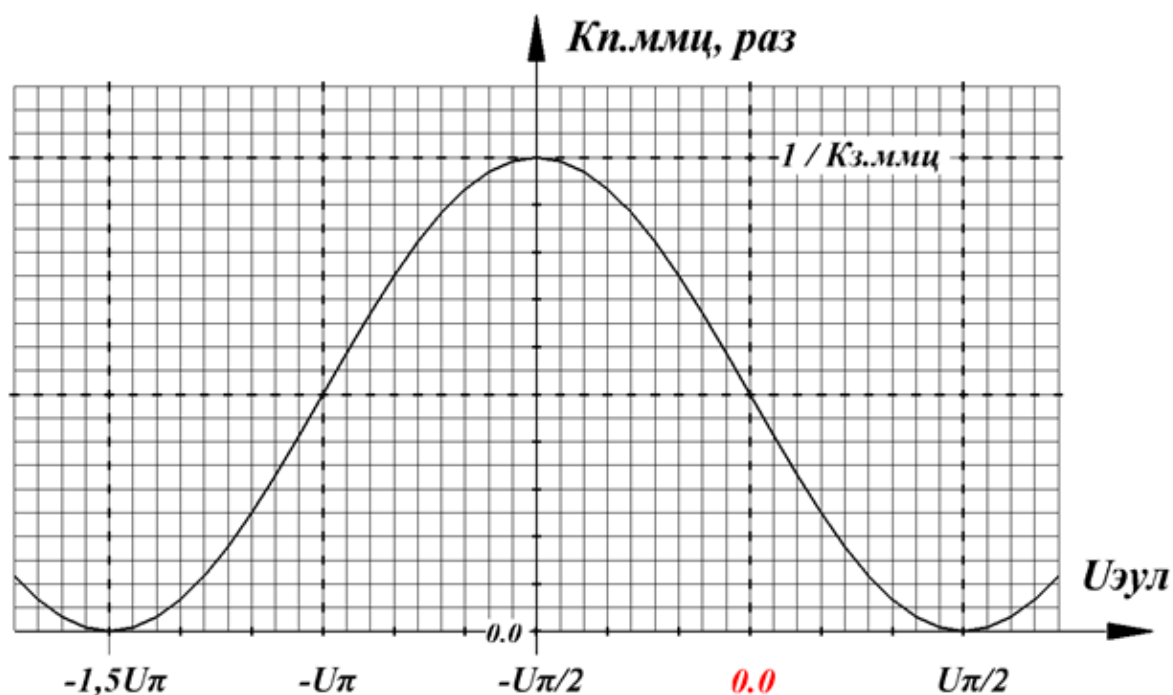


Рисунок 7 - Графическое изображение зависимости Кп.ммц от Uэул (или модуляционная характеристика ММЦ по ЭУЛ при $U_{кпнс} = U_{л.кпнс}/2$)

Под КЗ.ммц - в данном случае - следует понимать параметр под наименованием «Insertion loss». Исходя из традиционной практики инженерных расчётов - когда расчёт ведётся по самым худшим из ожидаемых значений параметров - принимаем $Kз.ммц = 3$ дБ или ~ 2 раза (Приложение В, стр. 3, таблица «Optical Characteristics», наименование параметра «Insertion loss» для случая «Option Low IL», столбец «Max»).

Под $U_{л.эул.нг}$ - в данном случае - следует понимать параметр под наименованием «Vp RF @50 kHz». Исходя из традиционной практики инженерных расчётов - когда расчёт ведётся по самым худшим из ожидаемых значений параметров - принимаем $U_{л.эул.нг} = 6,0$ В (Приложение В, стр. 3, таблица «Optical Characteristics», наименование параметра «Vp RF @50 kHz», столбец «Max»).

Значения $U_{эул}$ **из** формулы 5 определяется по формуле 6:

$$U_{эул} (В) = U_{эл.вх} (В) =$$

$$= V_{эл.вх}(В) \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(сек)) \times t(сек)), \quad (6)$$

где $V_{эл.вх}$ - амплитуда входного электрического сигнала, которая по условиям ТЗ (Приложение А) равна 5 мВ или 0,005 В;

$T_{эл}$ - период колебаний входного электрического сигнала, сек;

t - текущее время, сек.

Подставим в формулу 6 заданное по ТЗ значение $V_{эл.вх} = 0,005$ В и получим формулу 7:

$$U_{эул} = 0,005 \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t). \quad (7)$$

Далее выражение $U_{эул}$ из формулы 7 подставим в формулу 5 и получим для описания Кп.ммц формулу 8:

$$Кп.ммц = \frac{1 + \cos(90^\circ + 180^\circ \times \frac{0,005 \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t)(В)}{U_{п.эул.нг}(В)})}{2 \times Кз.ммц(раз)} \quad (8)$$

Далее в формулу 8 подставим определённое выше значение $U_{п.эул.нг} = 6,0$ В и получим формулу 9:

$$Кп.ммц = \frac{1 + \cos(90^\circ + 180^\circ \times \frac{0,005 \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t)(В)}{6,0(В)})}{2 \times Кз.ммц(раз)}. \quad (9)$$

Далее в формулу 9 подставим определённое выше значение $Кз.ммц \approx 2,0$ раза и получим формулу 10:

$$Кп.ммц = \frac{1 + \cos(90^\circ + 180^\circ \times \frac{0,005 \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t)(В)}{6,0(В)})}{2 \times 2(раз)} \quad (10)$$

Далее преобразуем формулу 10 в формулу 11 следующим образом:

$$Кп.ммц = \frac{1 + \cos(90^\circ + 180^\circ \times \frac{0,005 \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t)(В)}{6,0(В)})}{2 \times 2(раз)} =$$

$$= \frac{1 + \cos \left(90^\circ + 180^\circ \times \frac{0,005 \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t)(B)}{6,0 (B)} \right)}{4 \text{ (раз)}} =$$

$$= \frac{1 + \cos \left(90^\circ + 180^\circ \times \frac{0,005(B)}{6,000(B)} \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t) \right)}{4 \text{ (раз)}} =$$

$$= \frac{1 + \cos \left(90^\circ + 180^\circ \times 0,000833 \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t) \right)}{4 \text{ (раз)}} =$$

$$= \frac{1 + \cos \left(90^\circ + 0,15^\circ \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t) \right)}{4 \text{ (раз)}} =$$

$$= \frac{1 + 1 \times \cos \left(90^\circ + 0,15^\circ \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t) \right)}{4 \text{ (раз)}} =$$

$$= \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \times \cos \left(90^\circ + 0,15^\circ \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t) \right) =$$

$$= 0,25 + 0,25 \times \cos \left(90^\circ + 0,15^\circ \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t) \right) \quad (11)$$

Далее подставим формулу 11 в формулу 3 и получим формулу 12:

$$\begin{aligned} P_{оп.3} &= 28,3166 \text{ мВт} \times K_{п.ммц} = \\ &= 28,3166 \text{ мВт} \times (0,25 + 0,25 \times \cos (90^\circ + 0,15^\circ \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t))) = \\ &= 7,07915(\text{мВт}) + 7,07915(\text{мВт}) \times \\ &\quad \times \cos(90^\circ + 0,15^\circ \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}) \times t)) \quad (12) \end{aligned}$$

Итак, формула 12 описывает временную зависимость $P_{оп.3}$ от текущего времени t . «Качественное» графическое представление этой зависимости приведено на рисунке 8б (без соблюдения пропорций). В соответствии с этим рисунком можно сделать следующий вывод: значение $P_{оп.3}$ (рисунок 8б) изменяется в такт с изменением амплитуды входного электрического сигнала $U_{эл.вх}$ (рисунок 8в) в диапазоне от некоторого максимального значения

(далее пол тексту Роп.3.макс) до некоторого минимального значения (далее по тексту Роп.3.мин).

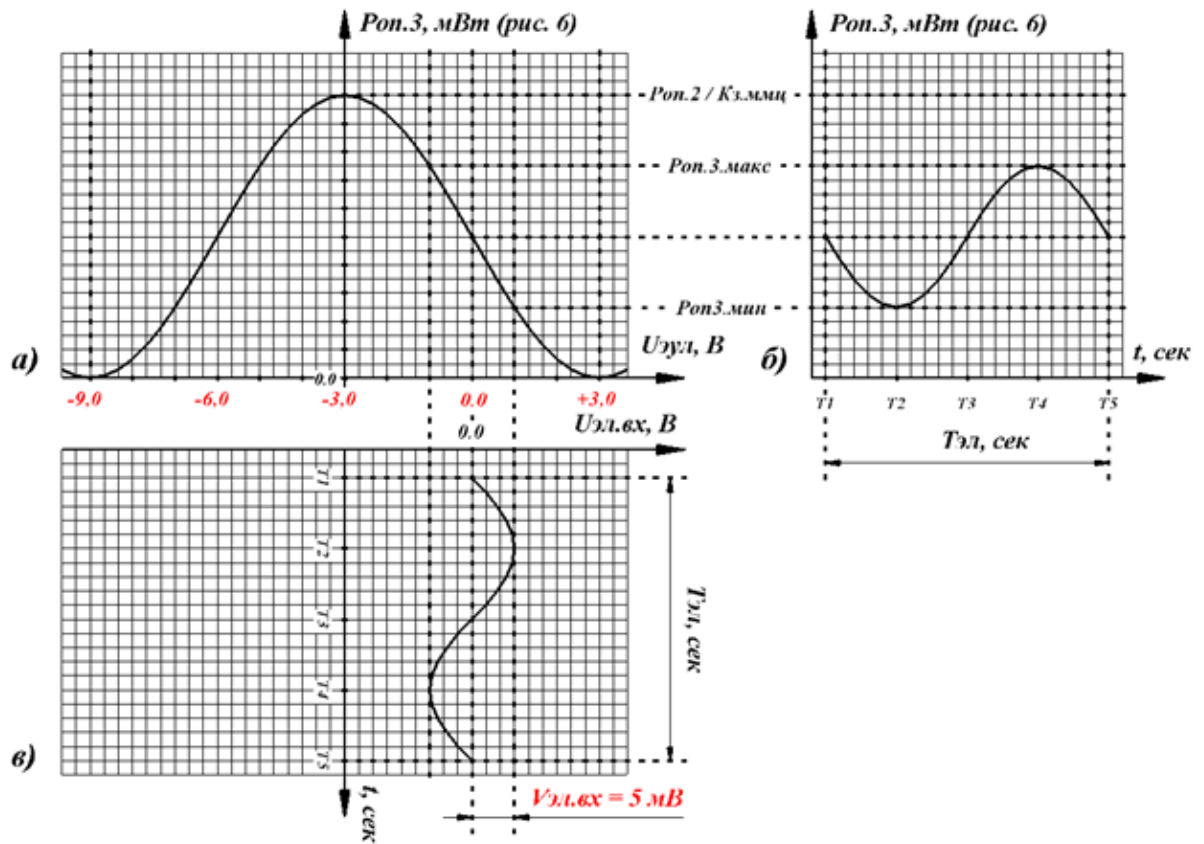


Рисунок 8 - Графическое изображение качественных временных зависимостей $U_{эл.вх}$ (в) и $Роп.3$ (б)

Определим абсолютные значения этих максимумов и минимумов, для чего обратимся к формуле 12. В этой формуле имеется гармоническая функция $\sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек}))$. Очевидно, что значение этой функции будет изменяться во времени по синусоидальному закону от своего минимального значения (-1) до своего максимального значения (+1). При этом - в первом случае - формула 12 будет трансформироваться в формулу 13, а во втором - в формулу 14:

$$Роп.3 = 7,07915(\text{мВт}) + 7,07915(\text{мВт}) \times \cos(90^\circ + 0,15^\circ \times (-1)) \quad (13)$$

$$Роп.3 = 7,07915(\text{мВт}) + 7,07915(\text{мВт}) \times \cos(90^\circ + 0,15^\circ \times (+1)) \quad (14)$$

Очевидно, что

– при вычислении $P_{оп.3}$ по формуле 13 мы будем получать $P_{оп.3.макс}$, так как выражение $\cos(90^\circ + 0,15^\circ \times (-1))$ будет иметь положительное значения: $\sim (+ 0,002618)$,

– а при вычислении $P_{оп.3}$ по формуле 14 мы будем получать $P_{оп.3.мин}$, так как выражение $\cos(90^\circ + 0,15^\circ \times (-1))$ будет иметь отрицательное значение: $\sim (- 0,002618)$.

Таким образом, мы можем вычислить значение $P_{оп.3.макс}$ по формуле 15, а значение $P_{оп.3.мин}$ - по формуле 16:

$$\begin{aligned} P_{оп.3.макс} &= 7,07915(\text{мВт}) + 7,07915(\text{мВт}) \times (+ 0,002618) = \\ &= 7,07915(\text{мВт}) + 0,01853 = 7,09768 \text{ мВт} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_{оп.3.макс} &= 7,07915(\text{мВт}) + 7,07915(\text{мВт}) \times (- 0,002618) = \\ &= 7,07915(\text{мВт}) - 0,01853 = 7,06062 \text{ мВт} \end{aligned} \quad (16)$$

Временная зависимость уровня мощности оптического сигнала на входе ОВТ (далее по тексту $P_{оп.4}$, *рисунки 6, 9*) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности $P_{оп.3}$ с той только разницей, что и максимальные значения $P_{оп.4}$ (далее по тексту $P_{оп.4.макс}$), и минимальные значение $P_{оп.4}$ (далее по тексту $P_{оп.4.мин}$) будут меньше значений $P_{оп.3.макс}$ и $P_{оп.3.мин}$ в соответствии с формулами 17 и 18:

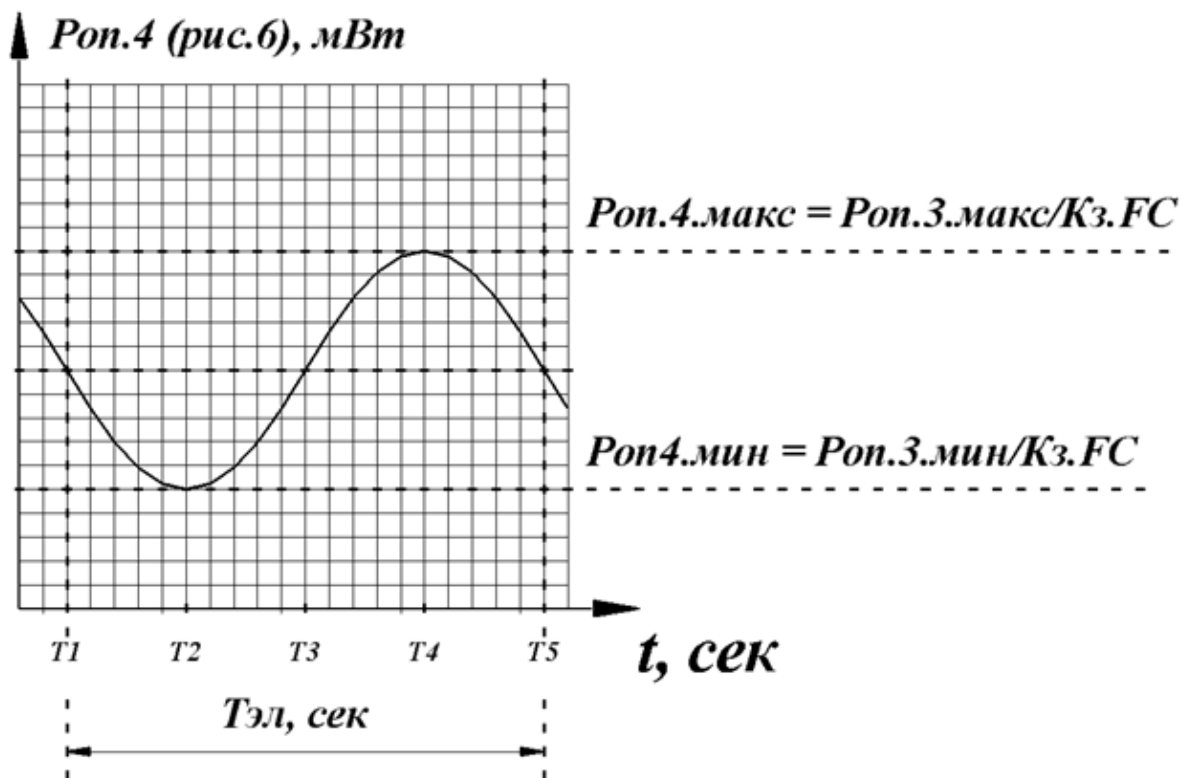


Рисунок 9 - Графическое изображение качественной временной зависимости $P_{оп.4}$

$$P_{оп.4.макс} = P_{оп.3.макс}/K_{з.ФС} = 7,09768 \text{ мВт} / 1,4126 \approx 5,024551 \quad (17)$$

$$P_{оп.4.мин} = P_{оп.3.мин}/K_{з.ФС} = 7,06062 \text{ мВт} / 1,4126 \approx 4,998315 \quad (18)$$

Временная зависимость уровня мощности оптического сигнала на выходе ОВТ (далее по тексту $P_{оп.5}$, **рисунки 6, 10**) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности $P_{оп.4}$. При этом максимальные значение $P_{оп.5}$ (далее по тексту $P_{оп.5.макс}$) и минимальное значение $P_{оп.5}$ (далее по тексту $P_{оп.5.мин}$) будут равны $P_{оп.4.макс}$ и $P_{оп.4.мин}$, так как по условиям ТЗ (**Приложение А**) значение $K_{з.овт} = 0$ дБ.

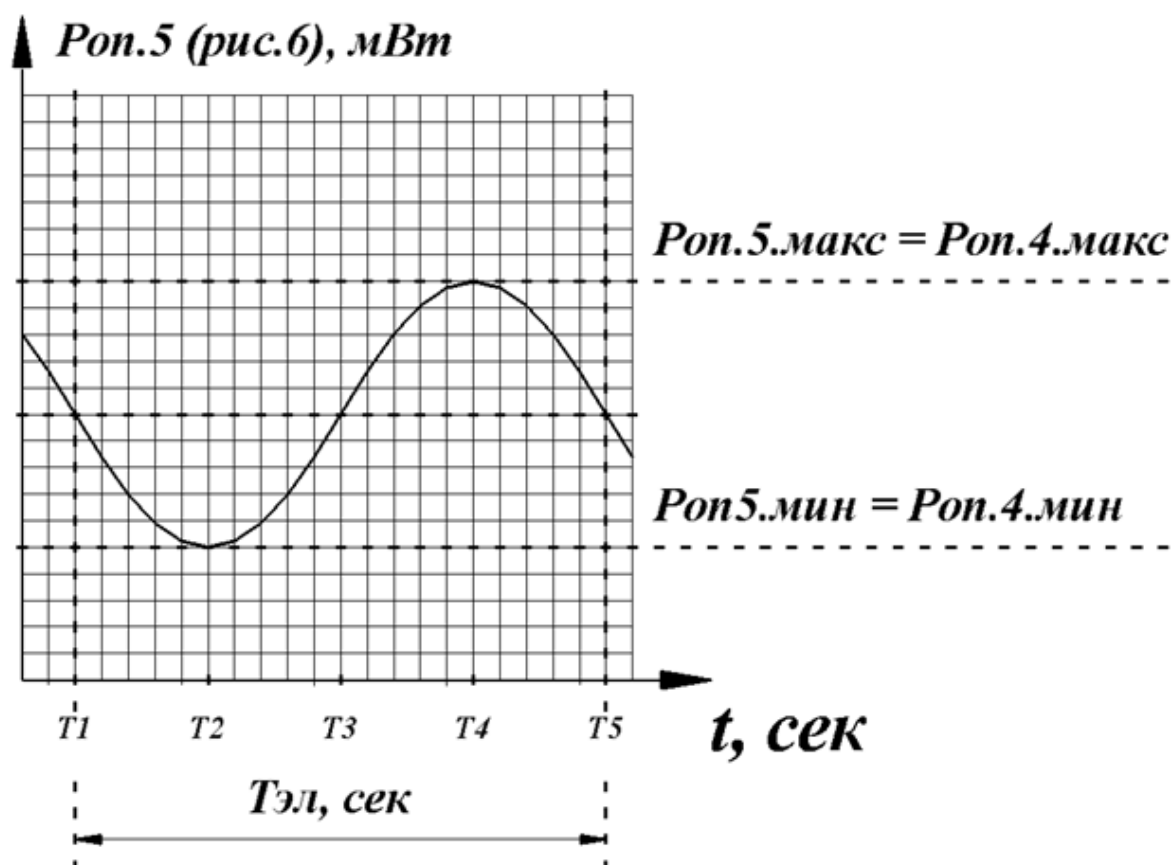


Рисунок 10 - Графическое изображение качественной временной зависимости $P_{оп.5}$

Временная зависимость уровня мощности оптического сигнала на входе ФД (далее по тексту $P_{оп.6}$, **рисунки 6, 11**) будет иметь такой же характер, как и временная зависимость уровня мощности $P_{оп.5}$ с той только разницей, что и максимальные значения $P_{оп.6}$ (далее по тексту $P_{оп.6.макс}$), и минимальные значения $P_{оп.6}$ (далее по тексту $P_{оп.6.мин}$) будут меньше значений $P_{оп.5.макс}$ и $P_{оп.5.мин}$ в соответствии с формулами 19 и 20:

$$\begin{aligned}
 P_{оп.6.макс} &= P_{оп.5.макс} / Kз.FC = \\
 &= 5,024551 / 1,4126 \approx 3,556953 \text{ (мВт)} \approx 0,003557 \text{ Вт} \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{оп.6.мин} &= P_{оп.5.мин} / Kз.FC = \\
 &= 4,998315 / 1,4126 \approx 3,538380 \text{ (мВт)} \approx 0,003539 \text{ Вт.} \quad (20)
 \end{aligned}$$

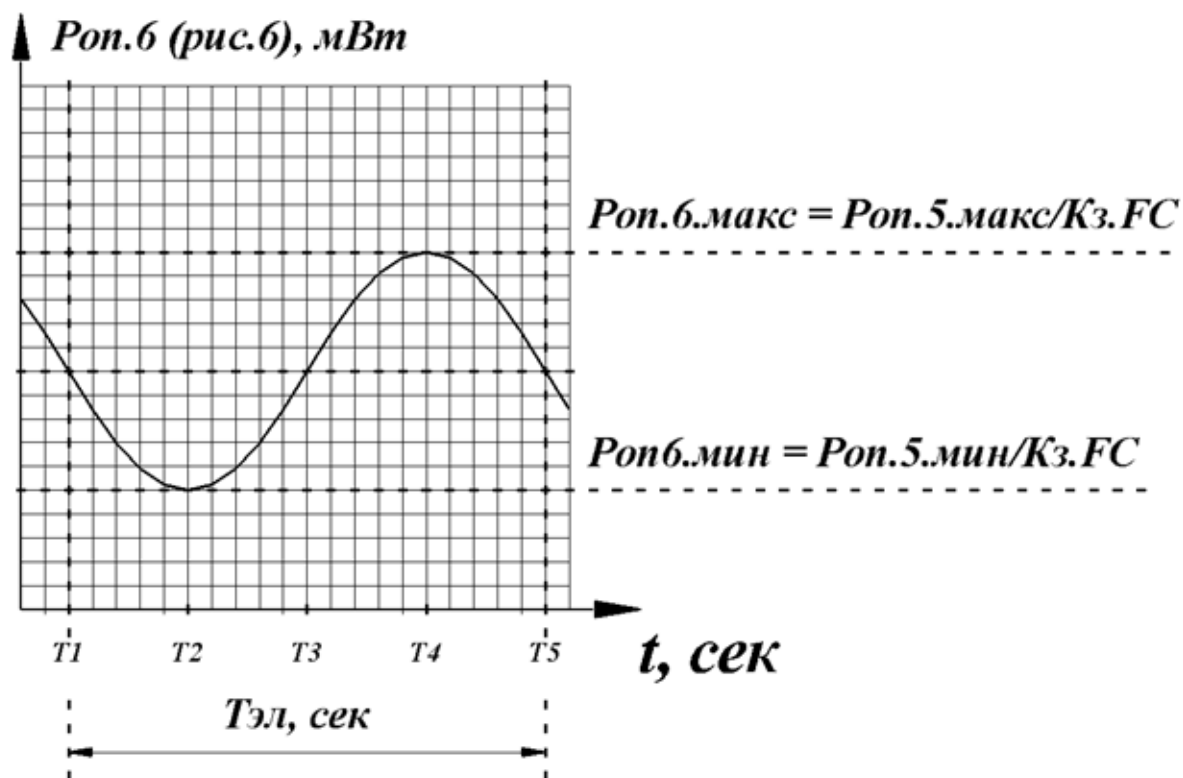
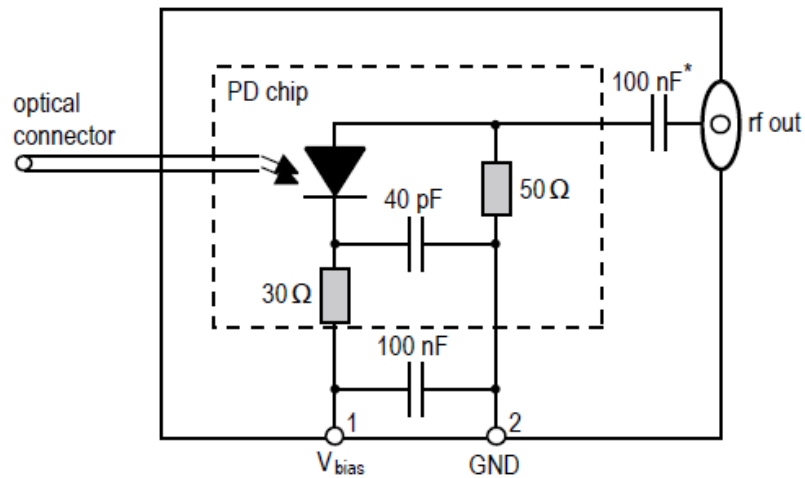


Рисунок 11 - Графическое изображение качественной временной зависимости $P_{оп.6}$

Для проведения дальнейших вычислений рассмотрим схему электрическую принципиальную ФД. Приведённый в Приложении Г эскиз схемы электрической принципиальной (раздел «Block Diagram») будет не очень удобно использовать для иллюстрации дальнейших вычислений.

Block Diagram



* optional

Рисунок 12 - Эскиз схемы электрической принципиальной ФД

Поэтому, эта схема электрическая принципиальная была изображена в несколько изменённом виде - так, как это показано на рисунке 13.

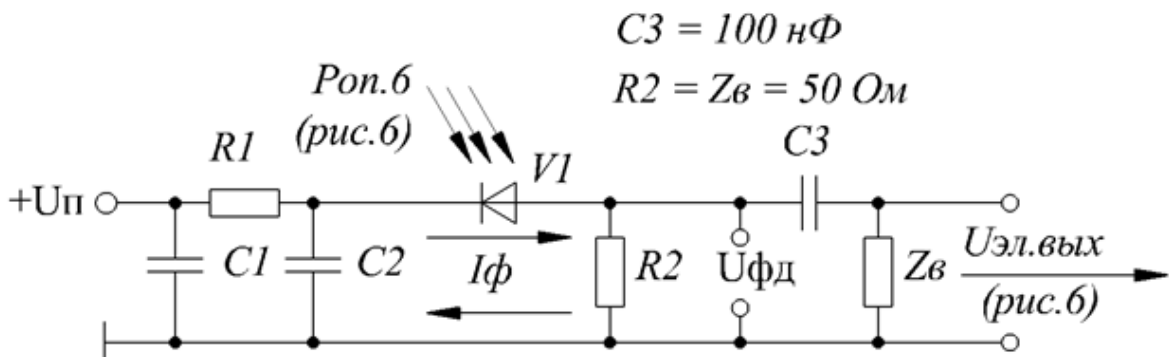


Рисунок 13 - Схема электрическая принципиальная ФД

Ключевым элементом этой схемы является р-і-п-фотодиод V1, на который подано положительное запирающее напряжение питания (далее по тексту +Uп). Поэтому - в отсутствии падающего на область «і» оптического сигнала с уровнем мощности Pоп.б - р-і-п-фотодиод V1 имеет огромное сопротивление и через него протекает наноскопический ток, который принято называть темновым током (Приложение Г, Таблица «Optical and

Electrical Specifications», наименование параметра «Photodiode dark current»), и величина которого не превышает 200 наноампер.

Однако, при попадании на область «i» оптического сигнала с уровнем мощности $P_{оп.6}$ сопротивление p-i-n-фотодиода V1 начинает снижаться и через него начинает протекать более сильный ток, который принято называть наведённым фототоком (далее по тексту I_f). При этом, взаимосвязь значений I_f и $P_{оп.6}$ выражается формулой 21:

$$I_f(A) = P_f(A/Wt) \times P_{оп.6}(Вт), \quad (21)$$

где P_f - фоточувствительность p-i-n-фотодиода V1, А/Вт.

В Приложении Г не приведено значение P_f при $f_{эл} = f_{эл.нг} = 20,0$ КГц. Однако, в Таблице «Optical and Electrical Specifications» данного приложения приведено минимальное значение $P_f = 0,5$ А/Вт при $f_{эл} = 0$ (наименование параметра «Photodiode DC responsivity @ 1550», столбец «Min.»). А так как верхняя граница ДРЧ у данной модели ФД составляет 45 ГГц (см. Таблицу 3, столбец 3), то можно предположить, что значение P_f при $f_{эл} = f_{эл.нг} = 20$ КГц практически не отличается от значения P_f при $f_{эл} = 0$. Поэтому, значение P_f при $f_{эл} = f_{эл.нг} = 20$ КГц можно принять равным значению P_f при $f_{эл} = 0$ - т.е. **0,5 А/Вт**.

Выбор минимального значения P_f (0,5 А/Вт) обусловлен исходя из традиционной практики инженерных расчётов, когда расчёт ведётся по самым худшим из ожидаемых значений параметров.

В соответствии с формулой 21 можно утверждать следующее - величина I_f имеет прямую линейную зависимость от величины $P_{оп.6}$. Поэтому, так же можно утверждать, что временная зависимость I_f (**рисунок 14**) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности $P_{оп.6}$, которую можно увидеть на рисунке **11**.

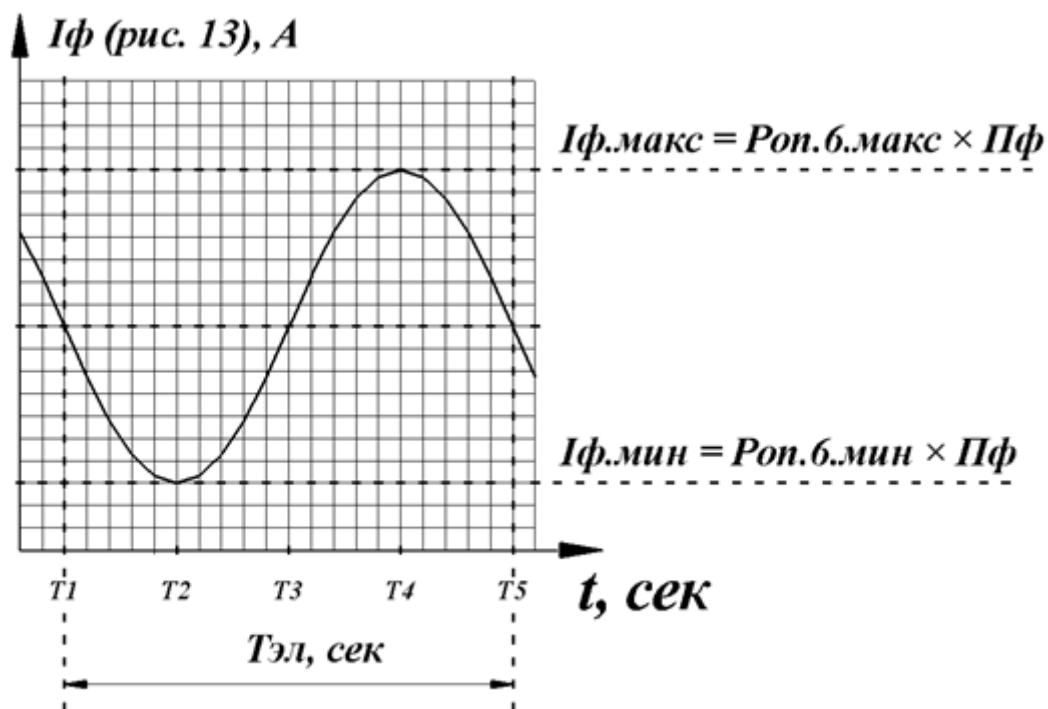


Рисунок 14 - Графическое изображение качественной временной зависимости $I\phi$

При этом, максимальное значение $I\phi$ (далее по тексту $I\phi.\text{макс}$) будет вычисляться по формуле 22, а минимальное значение $I\phi$ (далее по тексту $I\phi.\text{мин}$) будет вычисляться по формуле 23:

$$I\phi.\text{макс(А)} = P_{\text{оп.б.макс(Вт)}} \times P\phi(\text{А/Вт}) = 0,003557 \times 0,5 = 0,0017785 \text{ А} \quad (22)$$

$$I\phi.\text{мин(А)} = P_{\text{оп.б.мин(Вт)}} \times P\phi(\text{А/Вт}) = 0,003539 \times 0,5 = 0,0017695 \text{ А} \quad (23)$$

При проведении дальнейших вычислений необходимо принять во внимание то, что конденсатор $C3 = 100 \text{ нФ}$ (рисунок 13) в ДРЧ РФТ (20,0 кГц - 18,0 ГГц, см. Таблицу 3) имеет низкое реактивное сопротивление. Поэтому, схему на рисунок 13 можно трансформировать так, как это показано на рисунок 15.

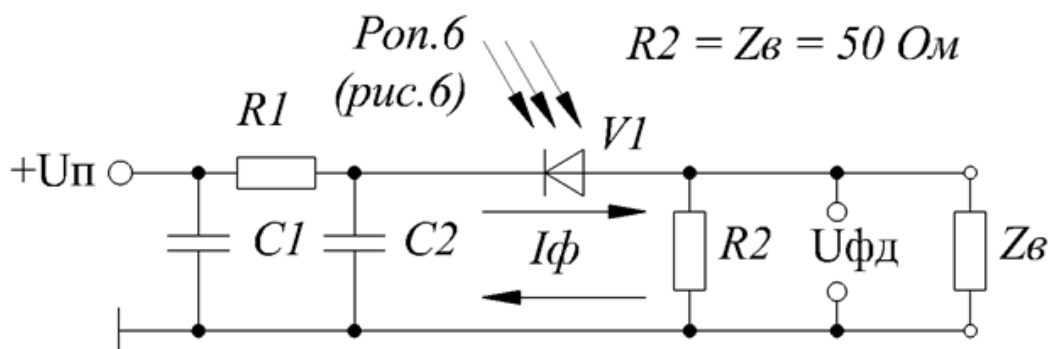


Рисунок 15 - Эскиз упрощённой схемы электрической принципиальной ФД

Далее необходимо определить величину наведённого I_f напряжения в нагрузке ФД (далее по тексту $U_{фд}$, рисунок 15). При этом, «штатным» сопротивлением нагрузки у данного ФД (рисунок 15) является резистор R_2 с сопротивлением 50 Ом. Однако, в процессе эксплуатации данного ФД к его коаксиальному выходу, «по умолчанию», подключается коаксиальный тракт с волновым сопротивлением (далее по тексту $Z_в$, рисунок 15) так же равным 50 Ом. Поэтому, фактически, схема электрическая принципиальная ФД выглядит не так, как это показано на рисунке [12](#), а так, как, как это показано на [рисунке 13](#) или [рисунке 15](#). И потому $U_{фд}$ наводится в нагрузке, которая представляет собой параллельно-включённые $R_2 = 50$ Ом и $Z_в = 50$ Ом. Поэтому, сопротивление нагрузки ФД составляет не 50 Ом, а 25 Ом, а величина $U_{фд}$ вычисляется по формуле 24:

$$U_{фд}(В) = I_f(A) \times ((R_2 \times Z_в) / (R_2 + Z_в)) = I_f \times 25 \text{ Ом}. \quad (24)$$

В соответствии с формулой 24 можно утверждать следующее: величина $U_{фд}$ имеет прямую линейную зависимость от величины I_f . Поэтому, так же можно утверждать, что временная зависимость $U_{фд}$ ([рисунком 16](#)) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости I_f ([рисунком 14](#)).

При этом, максимальное значение $U_{фд}$ (далее по тексту $U_{фд.макс}$, рисунок 16) будет вычисляться по формуле 25, а минимальное значение $U_{фд}$ (далее по тексту $U_{фд.мин}$, рисунок 16) будет вычисляться по формуле 26.

$$U_{фд.макс} = I_{ф.макс} \times 25 = 0,0017785 \times 25 = 0,044463 \text{ В} \quad (25)$$

$$U_{\text{фд.мин}} = I_{\text{ф.мин}} \times 25 = 0,0017695 \times 25 = 0,044238 \text{ В} \quad (26)$$

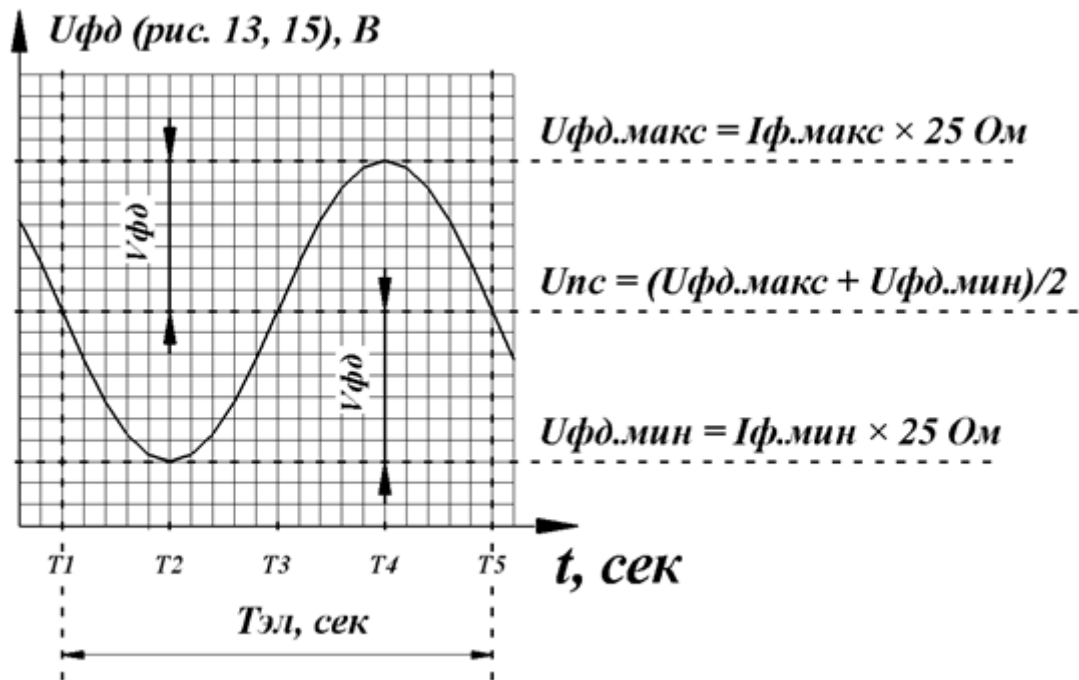


Рисунок 16 - Графическое изображение качественной временной зависимости $U_{\text{фд}}$

График на рисунке 16 состоит из 2-х составляющих: постоянной и переменной. Постоянную составляющую (далее по тексту $U_{\text{пс}}$, рисунок 16) можно представить формулой 27:

$$\begin{aligned} U_{\text{пс}} &= \frac{U_{\text{фд.макс}} - U_{\text{фд.мин}}}{2} + U_{\text{фд.мин}} = \\ &= \frac{U_{\text{фд.макс}} - U_{\text{фд.мин}} + 2 \times U_{\text{фд.мин}}}{2} = \frac{U_{\text{фд.макс}} + U_{\text{фд.мин}}}{2} = \\ &= \frac{0,044463 + 0,044238}{2} = 0,044351 \text{ В} \end{aligned} \quad (27)$$

Амплитуду переменной составляющей (далее по тексту $V_{\text{фд}}$, рисунок 16) можно вычислить по формуле 28:

$$V_{\text{фд}} = \frac{U_{\text{фд.макс}} - U_{\text{фд.мин}}}{2} = \frac{0,044463 - 0,044238}{2} = 0,0001125 \text{ В} \quad (28)$$

Так же необходимо отметить, что в данном случае временная зависимость выходного сигнала ФД, а следовательно, и выходного сигнала РФТ $U_{\text{эл.вых}}$ (рисунок 6, 13) будет отличаться от временной зависимости

Уфд (рисунок 13, 15) тем, что в её спектре не будет присутствовать упомянутой выше $U_{пс}$ (рисунок 16), которую не пропустит на выход ФД конденсатор $C3$ (рисунок 13). Амплитуда выходного сигнала РФТ (далее по тексту $V_{эл.вых}$) будет равна $V_{фд} = 0,0001125В = 0,1125 мВ$ (рисунок 17).

После определения значения $V_{эл.вых}$ можно будет определить значение $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ (далее по тексту $K_{п.рфт.нг}$) по формуле 29:

$$K_{п.рфт.нг} = 20lg(V_{эл.вых}/V_{эл.вх}) = 20lg(0,1125 / 5) = - 32,96 дБ \quad (29)$$

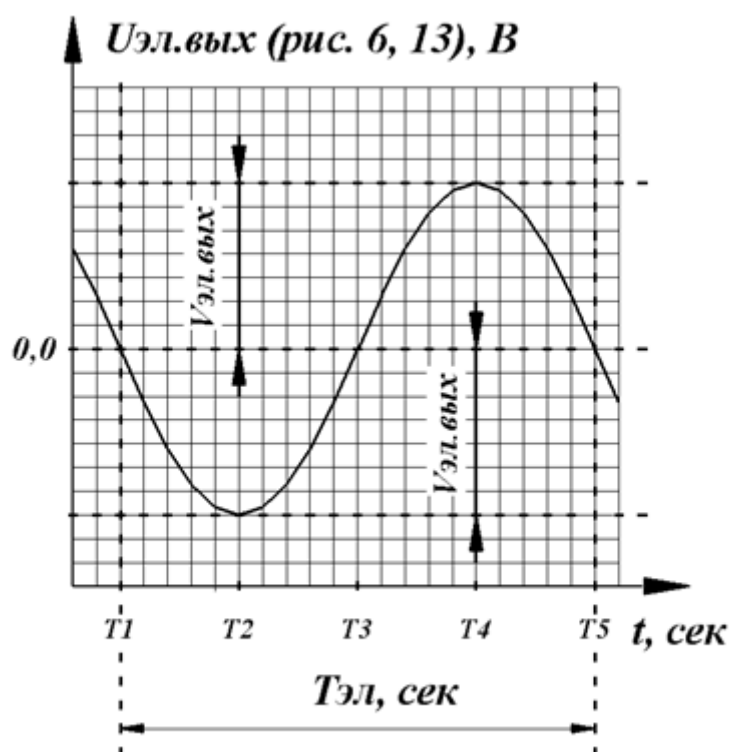


Рисунок 17 – Графическое изображение качественной временной зависимости $U_{эл.вых}$ (рисунок 6,13)

4.4 Определение значения $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.вг}$

Определение $K_{п.рфт}$ при $F_{эл} = F_{эл.вг}$ (далее по тексту $K_{п.рфт.вг}$) можно было бы проводить по той же методике, что и определение $K_{п.рфт.нг}$. Однако, для этого, надо иметь информацию о значениях $U_{л}$ и $P_{ф}$ при $F_{эл} = F_{эл.вг}$. К сожалению, такой информацией мы располагаем только относительно значения $U_{л.эул} = 8,5 В$ (Приложение В, стр. 3, таблица

«Electrical Characteristics», наименование параметра «Vp RF @20 GHz», столбец «Max»), а в Приложении Г значение Пф приведено лишь для случая $f_{эл} = 0$ (Таблица «Optical and Electrical Specifications», наименование параметра «Photodiode DC responsivity @ 1550», столбец «Min.», 0,5 A/W).

В такой ситуации Кп.рфт.вг можно будет определить только с использованием эмпирической методики. Суть этой методики заключается в следующем.

В приложении В на стр. 4 приведено графическое изображение частотной зависимости снижения эффективности модуляции в данном ММЦ.

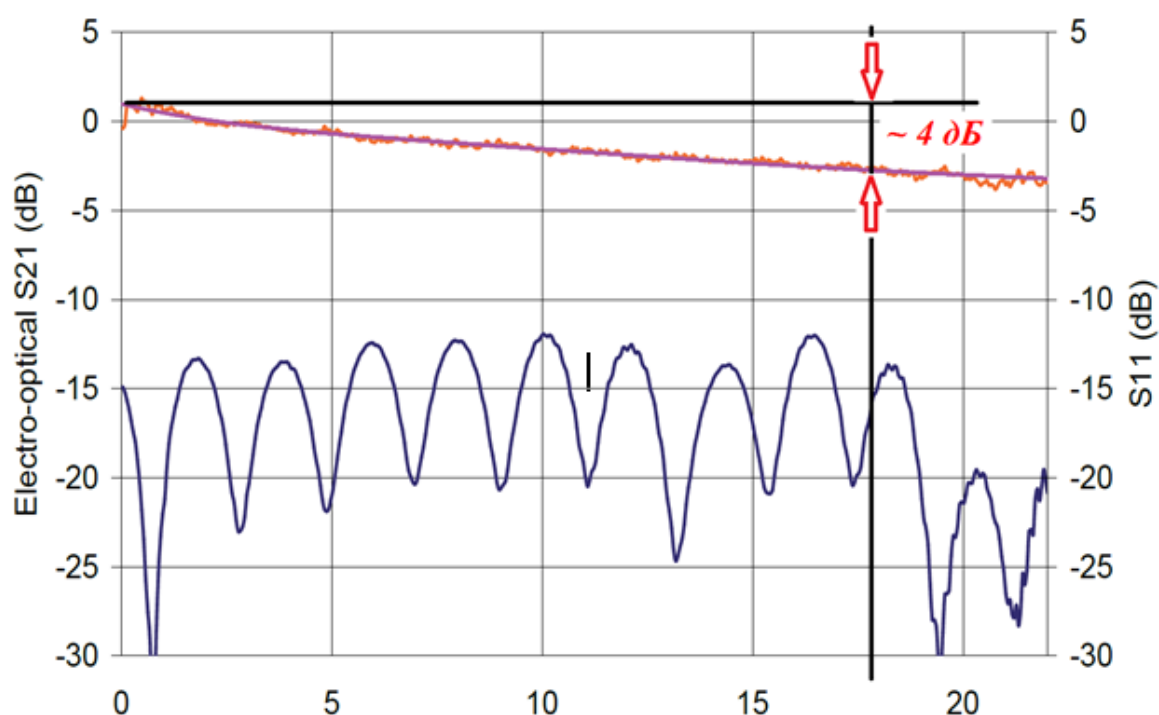


Рисунок 18 - Графическое изображение частотной зависимости снижения эффективности модуляции в ММЦ

Эту информацию надо воспринимать следующим образом - если собрать РФТ, состоящий из данного ММЦ (Приложение В) и некоего гипотетического - «идеального» - частотнонезависимого ФД, то при изменении значения $f_{эл}$ от $f_{эл.нг} = 20,0$ КГц до $f_{эл.вг} = 18$ ГГц, Кп.рфт снизится на ~ 4 дБ. Эту величину снижения Кп.рфт (рисунок 6) будем далее обозначать $\Delta K_{п.рфт.ммц}$.

А вклад в снижение $K_{p.rft}$ со стороны ФД можно определить следующим образом. В Приложении Г приведён график «Frequency Response», показанный на рисунке 19.

Frequency Response

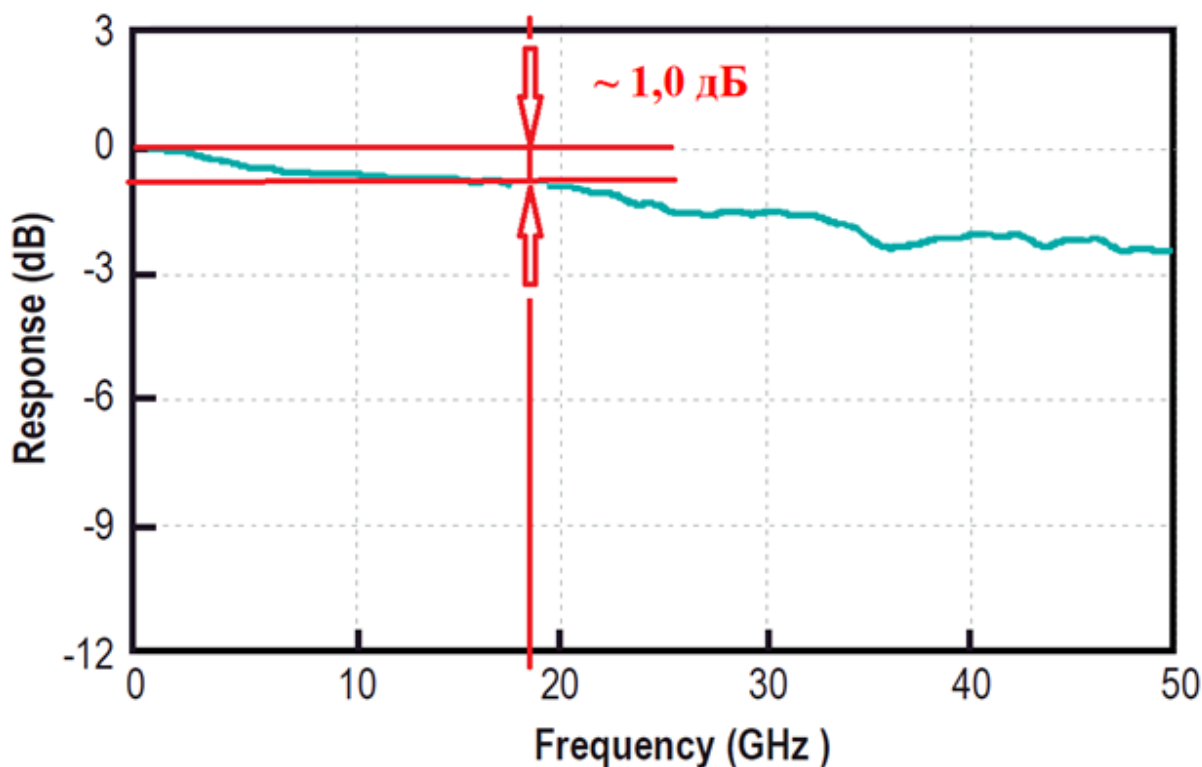


Рисунок 19 - Частотная зависимость эффективности детектирования ФД

Эту информацию надо воспринимать следующим образом - если собрать РФТ, состоящий из данного ФД и некоего гипотетического - «идеального» - частотнонезависимого ММЦ, то при изменении значения $f_{эл}$ от $f_{эл.нг} = 20$ КГц до $f_{эл.вг} = 18$ ГГц $K_{p.rft}$ снизится на $\sim 1,0$ дБ.

Это последнее значение снижения $K_{p.rft}$ будем далее обозначать $\Delta K_{p.rft.фд}$.

Имея информацию о $\Delta K_{p.rft.ммц}$ и $\Delta K_{p.rft.фд}$ можно эмпирически вычислить значение $K_{p.rft.вг}$ по формуле 30:

$$\begin{aligned} K_{p.rft.вг} &= K_{p.rft.нг} - \Delta K_{p.rft.ммц} - \Delta K_{p.rft.фд} = \\ &= - 32,96 \text{ дБ} - 4,0 - 1,0 = - 37,96 \text{ дБ} \end{aligned} \quad (30)$$

Таким образом, можно предположить, что частотная зависимость $K_{п.рфт}$ – или амплитудно-частотная характеристика (далее по тексту АЧХ) – будет выглядеть приблизительно так, как это показано на рисунке 20.

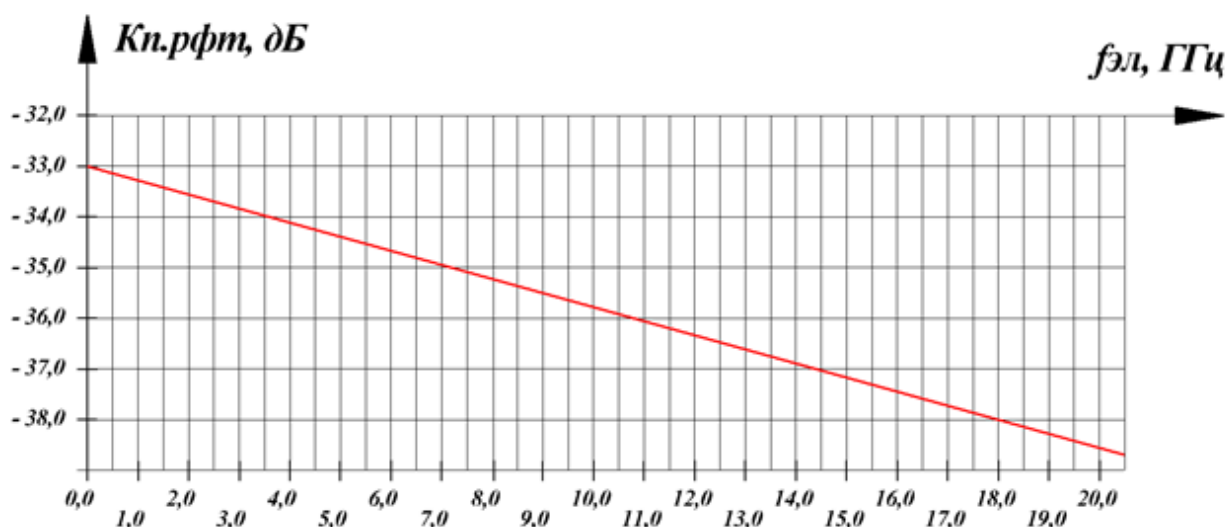


Рисунок 20 - Ориентировочная АЧХ РФТ (рисунок 6)

4.5 Определение верхней границы динамического диапазона РФТ – или максимальной амплитуды входного электрического сигнала $U_{эл.вх.1}$ – по уровню КНИ = 2% при $f_{эл} = f_{эл.нг}$.

Определение верхней границы динамического диапазона РФТ (рисунок 6) будет проводиться следующим образом.

В [7] – в графическом виде – приведена зависимость КНИ от соотношения амплитуды входного электрического сигнала на коаксиальном электрическом входе ММЦ ([7], рисунок 12, $U_{свч.вх}$) и величины $U_{л}$ ММЦ. Эта зависимость приведена на рисунке 21.

В данном случае, под $U_{свч.вх}$ следует подразумевать $V_{эл.вх}$ (формула 6). Поэтому, рисунок 21 можно представить в виде рисунка 22.

В соответствии с рисунком 22 можно сделать следующий вывод: уровень КНИ = 2% в РФТ с внешней модуляцией и ММЦ в качестве модулирующего устройства будет иметь место при $V_{эл.вх}/U_{л} \approx 0,18$. Поэтому, максимальная амплитуда $U_{эл.вх}$ – или верхняя граница

динамического диапазона РФТ (далее по тексту $V_{эл.вх.макс}$) с данным ММЦ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ и КНИ = 2% может быть определена по формуле 31:

$$V_{эл.вх.макс} = U_{л.нг} \times 0,18. \quad (31)$$

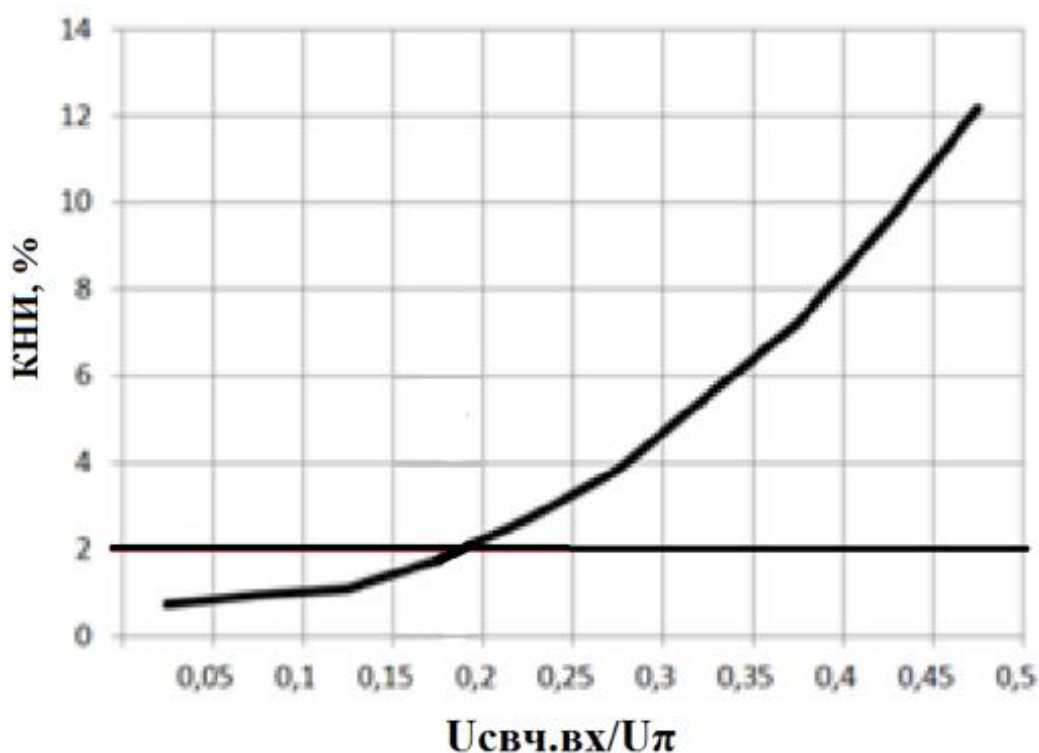


Рисунок 21 - Зависимость КНИ от соотношения амплитуды входного электрического сигнала на коаксиальном электрическом входе ММЦ и величины $U_{л}$ ММЦ [7].

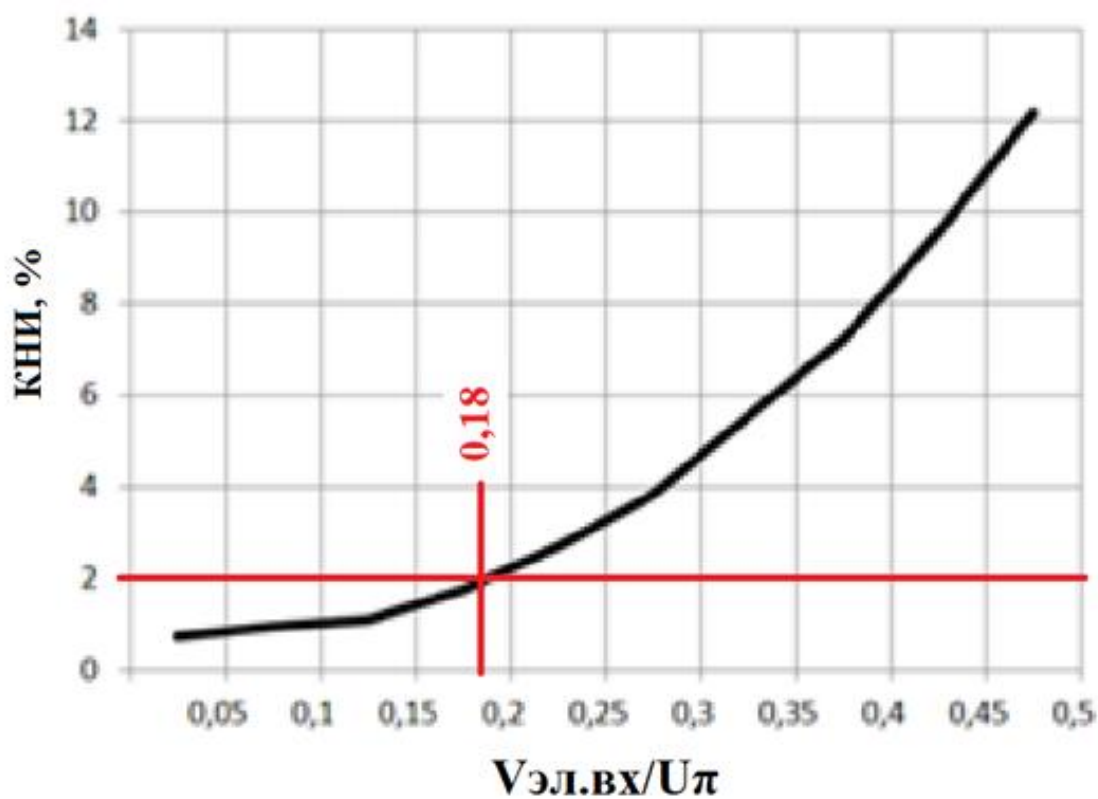


Рисунок 22 - Зависимость КНИ от соотношения амплитуды входного электрического сигнала на входе РФТ (рисунок 6) и величины $U_{л}$ ММЦ.

При этом, в данном случае, следует ориентироваться на такое значение $U_{л.нг}$, при котором будет получено самое низкое значение параметра, то есть наименьшее из всех возможных значение $V_{эл.вх.макс}$. Поэтому, в данном случае - в отличии, например, от расчетов $K_{п.ртф}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ - расчет по формуле 31 следует вести не по самому высокому - из всех указанных значений - значению $U_{л.нг}$, а по самому низкому, то есть $U_{л.нг} = 5,5$ В (Приложение В, наименование параметра « V_p RF @50 kHz», столбец «Тур»). Таким образом,

$$V_{эл.вх.макс} = U_{л.нг} \times 0,18 = 5,5 \times 0,18 = 0,99. \quad (32)$$

Заключение

В соответствии с ТЗ была разработана схема структурная РФТ. Рассчитанные электрические параметры данного РФТ приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты расчетов электрических параметров РФТ

Наименование параметра	Значение параметра
$f_{эл.нз}$	20 КГц
$f_{эл.вз}$	18 ГГц
$U_{см.мму}$ при $f_{эл} = f_{эл.нз}$	3,25 В
$Kп.рфт$ при $f_{эл} = f_{эл.нз}$	- 32,96 дБ
$Kп.рфт$ при $f_{эл} = f_{эл.вз}$	- 37,96дБ
<i>Верхняя граница динамического диапазона РФТ ($V_{эл.вх.макс}$) при $f_{эл} = f_{эл.нз}$ и $KНИ = 2\%$</i>	0,99 В

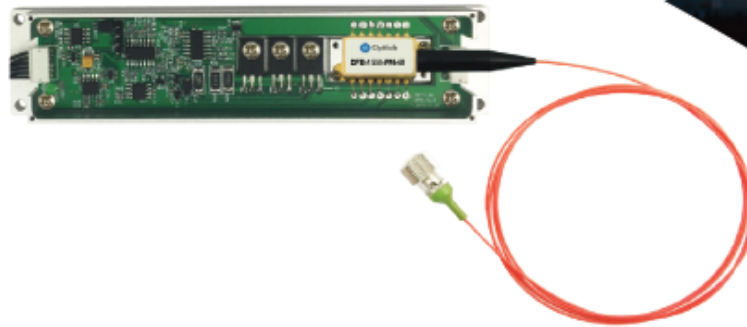
Библиографический список

1. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А., Тихонов В.В. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника, №1, -Пермь, -2014.
2. Parameter analysis of laser emission modulators on the basis of Frants-Keldysh effect [*Issledovanie parametrov modulatorov lasernogo izlucheniya na effekte Franca-Keldisha*]/ Georgobiani A.N. [and others], *Kvantovaya Elektronika - Quantum Electronics*, 1980, V. 7, No. 3, p. 624-626.
3. Sivukhin D.V. General course of physics [*Obshchiy kurs fiziki - tret'e izdanie*]. Moscow, Fizmatlit Publ., 3rd publication. - 2002, - V. 4 "Optics", p. 792 (Pockels, ИМС).
4. Оптическая связь [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.corning.com – (Дата обращения 15.05.2020)
5. Лекция №2. Теоретическое и экспериментальное моделирование сверхширокополосных и аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ [Электронный ресурс]: <http://radiophotonics.ru/materials/lec002pr.pdf>
6. Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В. О возможности реализации сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ с положительными коэффициентами передачи // Материалы XVIII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике - Нижегородская область, п. Хахалы, -2013.
7. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А. Теоретическое и экспериментальное моделирование сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов дециметрового, сантиметрового, и миллиметрового диапазонов длин волн // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны» - Москва: Радиотехника. -2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Это ТЗ

DFB-C-PM-M



DFB Laser Module, Designed for Use with CMB

The Optilab DFB-C-P-M is a Distributed Feedback (DFB) Polarization Maintaining (PM) laser source module designed to work with Optilab Compact Modulator w/ Bias Control (CMB) for RFoF applications. The DFB-C-P-M can be ordered from more than 20 wavelengths in 1310 nm and 1550 nm ranges. The DFB laser's operating temperature and output power are precisely controlled to ensure constant wavelength stability and power stability. Using its USB interface, the user can control the laser drive current and wavelength via PC interface. Contact Optilab for more information.

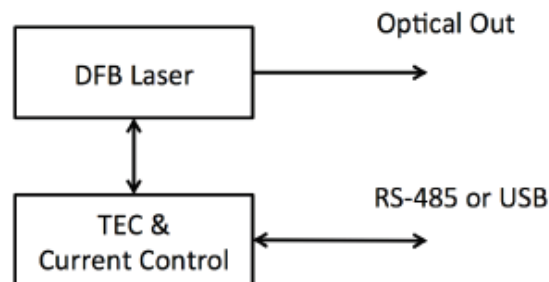
Features

- > Designed for CMB series
- > Polarization Maintaining (PM) output
- > Laser linewidth <1 MHz is available
- > Built in heat sink
- > Up to 40 mW output
- > Wavelength tuning range: ± 1 nm
- > Over 20 wavelengths available
- > USB interface remote control

Applications

- > Light source 40G RFoF analog link
- > External modulated DWDM networks
- > Laboratory testing and measurement
- > DFB laser testing
- > Interface to CMB for integration

Functional Diagram



Compact DFB Laser Module, Polarization Maintaining

OPTIONS

DFB-C-PM-M-xxxx-yy

xxxx Wavelength

yy Output power (mW)

TECHNICAL INFO

For technical info and support:

sales@optilab.com

www.optilab.com

WEB ORDER

To order, please visit OEQuest.com.



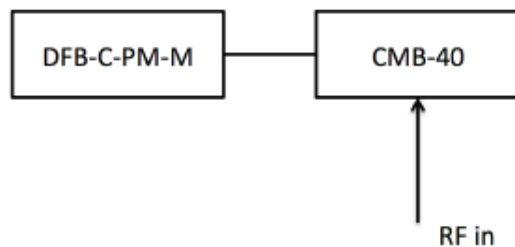
Optilab Advantage

- > Innovation
- > Performance
- > Quality
- > Customization
- > Warranty

Technical Specifications	
Available Wavelength Range	O-band: 1270-1350 nm C-band: 1528-1564 nm See attached Table 1.0
Wavelength Accuracy	±50 pm max.
Output Power Level	10 mW, 20 mW, 30 mW, 40 mW
Output Power Stability	±0.2 dB over 8 hours
Wavelength Accuracy	±10 pm over 8 Hours
Laser Linewidth	2 MHz typ., < 1 MHz is available
Side Mode Suppression Ratio	45 dB typ.
Optical Isolation	30 dB typ.
Relative Intensity Noise (RIN)	-140 dB/Hz typ.; -145 dB/Hz is available
Polarization Extinction Ratio	20 dB typ.
Adjustable Features and Output	
DFB Power Output	10 -100% adjustable range
DFB Wavelength Tuning (optional)	±1.0 nm (from wavelength center)

Mechanical Specifications	
Operating Temperature	10 °C to +50 °C
Operating Temperature (TQ Version)	-55 °C to +70 °C
Storage Temperature	-65 °C to +85 °C
Operating Humidity	0% to 85% Relative Humidity
Power Supply	± 5 V DC, 500 mA
Power Consumption	5 W max.
Dimensions	145 x 32.5 x 18 mm
Control / Monitoring	LD Current, Laser Wavelength
Remote Control	RS-485 or USB
Optical Connectors	FC/APC; Other options are available
Optical Fiber Type	PANDA for PM Output
Accessories included	USB cable, USB power supply

Application Example of DFB-C-PM-M for RFoF system



Compact DFB Laser Module, Polarization Maintaining

Mechanical Drawing

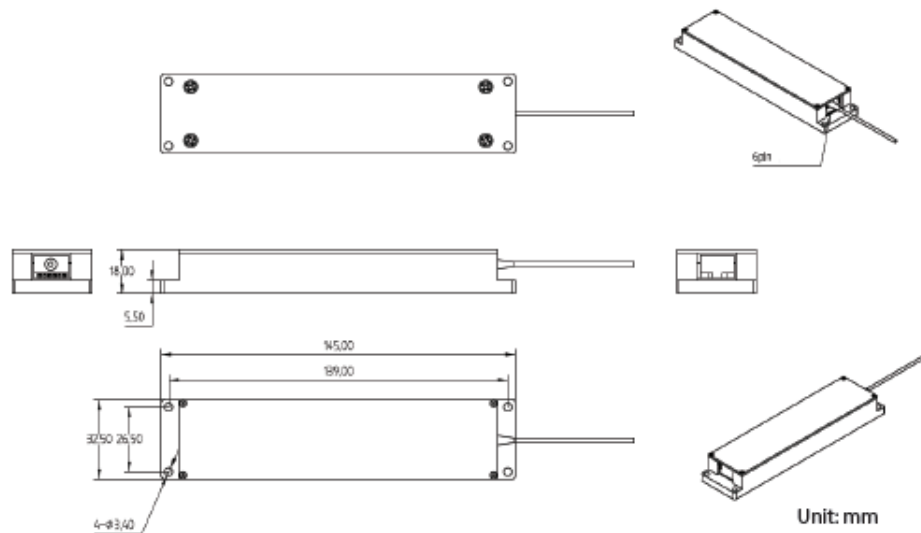


Table 1.0 Available DFB-PM Wavelengths for C-band

Wavelength	
1528 nm	1546 nm
1530 nm	1548 nm
1532 nm	1550 nm
1534 nm	1552 nm
1536 nm	1554 nm
1538 nm	1556 nm
1540 nm	1558 nm
1542 nm	1560 nm
1544 nm	1562 nm

*Other wavelengths are available upon request.



FEATURES

- High linearity
- High EO bandwidth 10, 20, 30 GHz
- High stability
- Low insertion loss
- Operation in C and L bands

APPLICATIONS

- RoF
- Antenna remoting
- Microwave and Radar links
- Space and defence systems

OPTIONS

- 1300, 1000, 800 nm band versions
- Hermetic sealing

RELATED EQUIPMENTS

- DR-AN RF amplifiers
- MBC ditherless Bias Controllers
- Turn-key ModBox systems

The MXAN-LN series are high bandwidth intensity modulators specially designed for the transmission of analog signals over optical fibers.

The MXAN-LN's performance parameters meet the requirement of the most demanding analog transmission links for military and civil applications : the x-cut design offers an unmatched stability, the low insertion loss optimizes links gain and the high linearity preserves the signal quality. They are specially suitable for microwave links and remoted antennas.

MXAN-LN-10 Performance Highlights

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Operating wavelength	1530	-	1580	nm
Insertion loss	-	2.7	-	dB
Electro-optical bandwidth	10	12	-	GHz
V _π RF @50 kHz	-	5.5	-	V
2nd harmonic suppression ratio	-	70	-	dB
Input 3rd order intercept	-	30	-	dB

Specifications given at 25 °C, 50 Ω, 1550 nm

MXAN-LN-20 Performance Highlights

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Operating wavelength	1530	-	1580	nm
Insertion loss	-	2.7	-	dB
Electro-optical bandwidth	18	20	-	GHz
V _π RF @50 kHz	-	5.5	-	V
2nd harmonic suppression ratio	-	70	-	dB
Input 3rd order intercept	-	30	-	dB

Specifications given at 25 °C, 50 Ω, 1550 nm

MXAN-LN-20 20 GHz Analog Intensity Modulator

Electrical Characteristics 50 Ω RF input

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Electro-optic bandwidth	S_{21}	RF electrodes, from 2 GHz	18	20	-	GHz
Ripple S21	ΔS_{21}	RF electrodes, $f < 20$ GHz	-	0.5	1	dB
Electrical return loss	ES_{11}	RF electrodes, $f < 20$ GHz	-	-12	-10	dB
V_{π} RF @50 kHz	$V_{\pi RF_{50kHz}}$	RF electrodes	-	5.5	6	V
V_{π} RF @20 GHz	$V_{\pi RF_{20GHz}}$	RF electrodes	-	8	8.5	V
V_{π} DC electrodes	$V_{\pi DC}$	DC electrodes	-	6.5	7	V
2 nd harmonic suppression ratio	$H_1 - H_2$	Measured @5 GHz	-	70	-	dB
Input 3 rd order intercept	IIP3	Measured @5 GHz	28	30	-	dBm
RF input impedance	Z_{inRF}	-	-	40	-	Ω
DC input impedance	Z_{inDC}	-	-	1	-	M Ω

Optical Characteristics All specifications given at 25°C, 1550 nm, unless differently specified

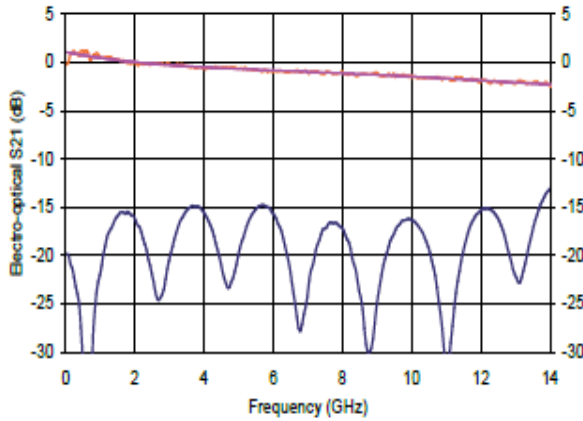
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Crystal	-	-	Lithium Niobate X-Cut Y-Prop			
Operating wavelength	λ	-	1530	1550	1580	nm
Insertion loss	IL	Without connectors	-	4	5	dB
		Option Low IL, without connectors	-	2.7	3	dB
DC extinction ratio	ER	Measured with narrow source linewidth < 200 MHz	20	22	-	dB
Optical return loss	ORL	-	-40	-45	-	dB
Chirp	α	-	-0.1	0	0.1	-

Absolute Maximum Ratings

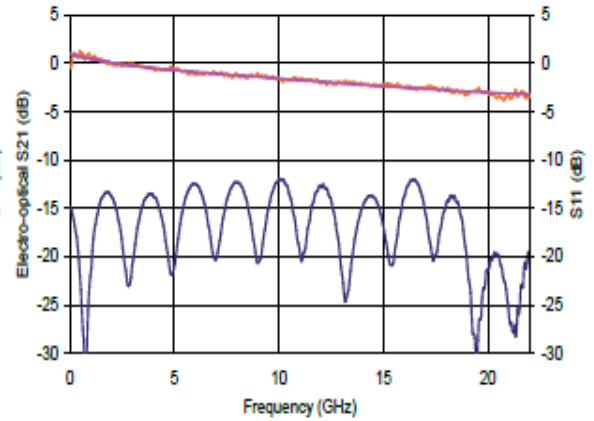
Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. These are absolute stress ratings only. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of the data sheet. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods can adversely affect device reliability.

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
RF input power	EP_{in}	-	28	dBm
Bias voltage	V_{bias}	-20	+20	V
Optical input power	OP_{in}	-	20	dBm
Operating temperature	OT	0	+70	°C
Storage temperature	ST	-40	+85	°C

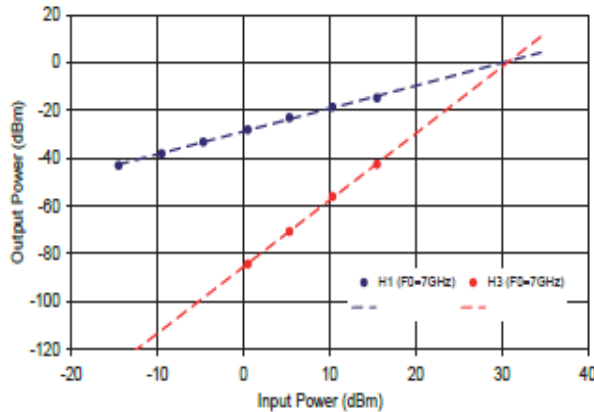
MXAN-LN-10 Typical S21 & S11 Curves



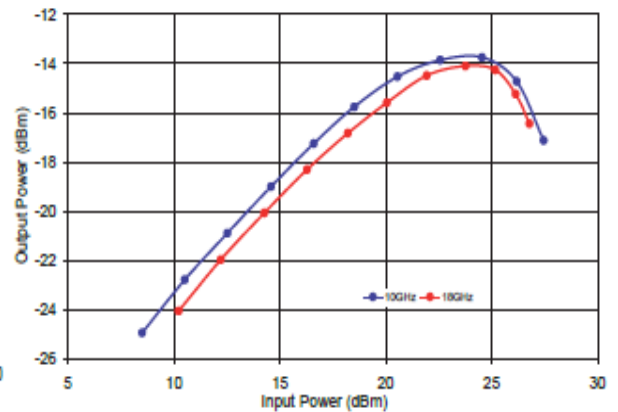
MXAN-LN-20 Typical S21 & S11 Curves



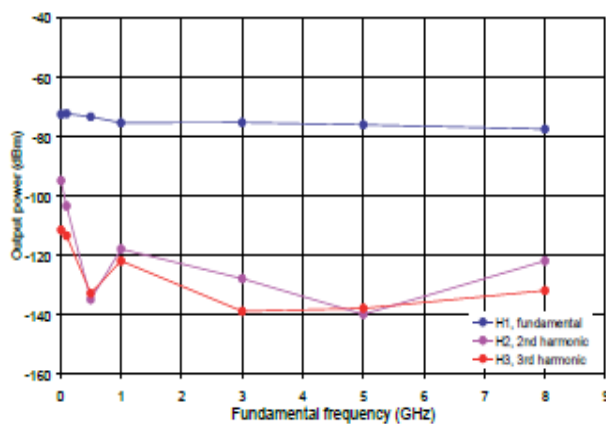
Input IP3 Typical curve, @7 GHz



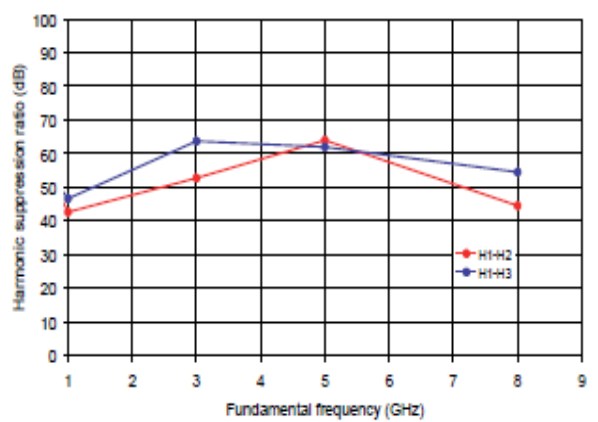
Typical compression curve (MX-AN-LN-20)



Harmonics output, Pin = 0 dBm



Harmonic suppression ratio, Pin = 0 dBm

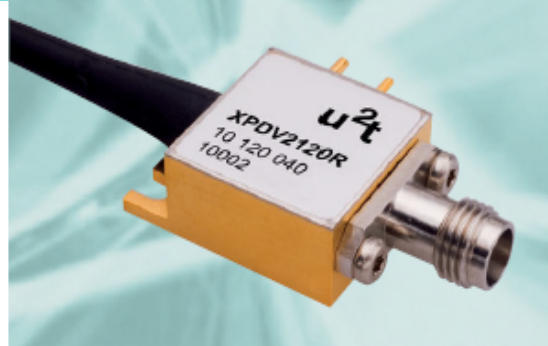


Datasheet



50 GHz Photodetector

Product Code: XPDV21xxR(A)



Product Description

The Photodetector XPDV21xxR(A) platform is designed to exhibit an optimized frequency response in both, power and phase. It is ideally suited for OC-768/STM-256 long haul systems. The high power capability of up to 13 dBm allows for use of optical amplification at the detector input resulting in a high output voltage swing of up to 1 V avoiding the need for electrical amplification.

A waveguide integrated pin diode provides an excellent linearity, high responsivity and a superior flatness of the rf response. An integrated biasing and a hermetic package guarantees a very robust and highly reliable component.

Features

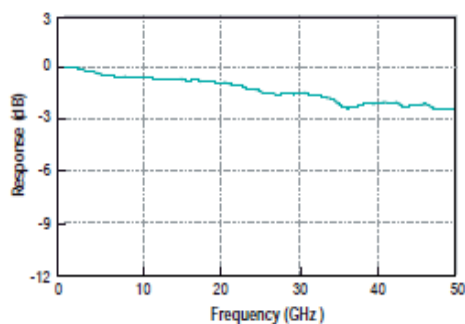
- Highest bandwidth with flat response
- Excellent pulse behavior
- Unsurpassed high-power handling capability
- High responsivity
- Unique on-chip integrated bias network
- Well matched to 50 Ω
- Hermetically sealed package

Applications

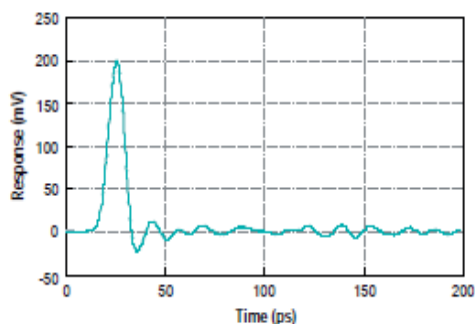
- Communication systems at 40 Gbit/s (OC-768) and beyond
- Microwave photonics up to 60 GHz
- High speed lightwave characterization

Typical Performance

Frequency Response



Pulse Response



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Storage temperature	T_{stg}	non condensing	-40		+85	°C
Photo diode reverse voltage	V_{PD}				3.5	V
Maximum average optical input power	P_{opt}	NRZ			16	dBm
Maximum output peak voltage	V_{Peak}				1.5	V
Electro static discharge	V_{ESD}	C= 100 pF, R= 1.5 kΩ HBM	-250		250	V
Fiber bend radius			16			mm

Operation Conditions

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating case temperature range	T_{case}		0		+75	°C
Relative humidity range	RH	non condensing	5		85	%
Operating wavelength range	λ		1480		1620	nm
Average optical input power range	P_{opt}		-20		13	dBm
Photodiode reverse voltage	V_{PD}		2.0	2.8	3.3	V

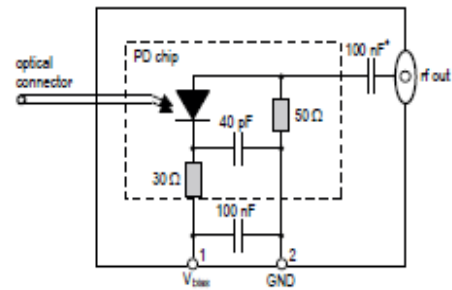
Optical and Electrical Specifications ¹⁾

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Photodiode DC responsivity @ 1550 nm	R	optimum polarization	0.5	0.65		AW
Polarization dependent loss XPDV2120R XPDV2150R	PDL			0.3 0.1	0.5 0.2	dB
Optical return loss	ORL		27			dB
3dB cut-off frequency XPDV21xxR XPDV21xxRA	f_{3dB}	2)	45 33	50 40		GHz
Output reflection coefficient	S_{22}	0.05 - 50 GHz female V-connector® male V-connector® AC-coupled		-10 -10 -8	-8 -8	dB
Photodiode dark current	I_{dark}	$T_{case} = 25^{\circ}C$		5	200	nA
Pulse width XPDV21xxR XPDV21xxRA		3)		9	10 11	ps

Notes: 1) $\lambda = 1550$ nm, $V_{bias} = 2.8$ V, $T = 25^{\circ}C$ 2) Measured using Agilent 86030A 50 GHz Lightwave component analyzer
3) Measured using Tektronix oscilloscope with 50 GHz sampling head

V Connector® is a registered trademark of Anritsu Company.

Block Diagram

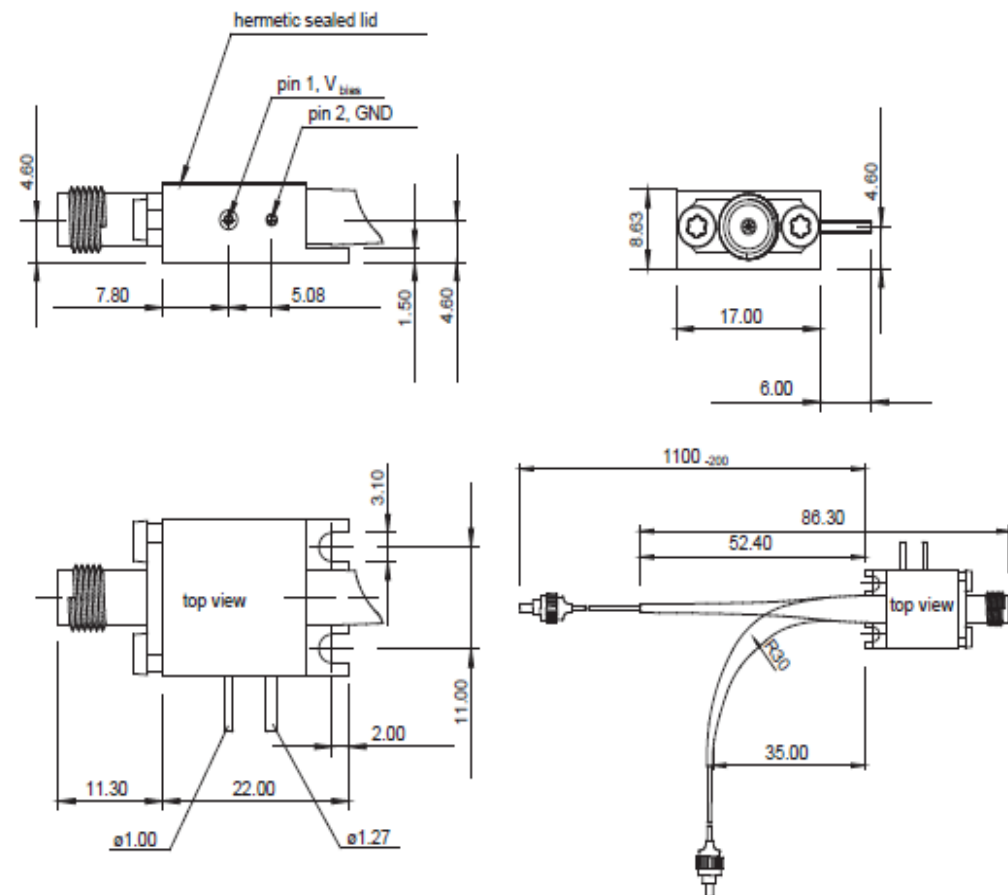


* optional

Pin Description

Pin#	Symbol	Description
1	V_{bias}	bias supply, typ. 2.8 V
2	GND	Case ground

Mechanical Dimensions



All dimensions in mm.