

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

КУРСОВАЯ РАБОТА

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

Выполнил(-а):

Студент(-ка) группы _____

Иванов(-а) И.И.

Проверил:

ст. преп. _____

Омск 2020

ВВЕДЕНИЕ

Радиофотоника - это область науки и техники, в рамках которой исследуются взаимодействия оптических и высокочастотных электрических полей (сигналов, волн), а так же создаются технические устройства, принцип работы которых основан на таких взаимодействиях ([1] < стр. 68 > - записать в перечень литературы). В настоящий момент основным объектом приложения методов и средств радифотоники являются аналоговые радиотонные тракты (далее по тексту РФТ).

Цель работы: определение электрических параметров 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: $f_{эл.н2}$ и $f_{эл.в2}$ 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 $U_{см.мми}$).
4. Произвести расчёт коэффициента передачи РФТ (далее по тексту $Kп.рфт$) при $f_{эл} = f_{эл.н2}$ и $f_{эл} = f_{эл.в2}$ для входного электрического сигнала (далее по тексту $U_{эл.вх.1}$ - для случаев рис. 1, 2 или $U_{эл.вх}$ - для случаев рис. 3, 4) с амплитудой (далее по тексту $V_{эл.вх}$) 5 мВ;
5. Определить верхнюю границу динамического диапазона РФТ (рис. 1, 2, 3, 4) - или максимальное значение $V_{эл.вх}$ входного электрического сигнала (далее по тексту $U_{эл.вх.1}$ - для случаев рис. 1,2 или $U_{эл.вх}$ - для случаев рис. 3,4) - при $f_{эл} = f_{эл.н2}$ и уровне коэффициента нелинейных искажений (далее по тексту $KНИ$) 2%.

1. Теоретические сведения (*вопрос по поводу формулировки - в курсовых Политеха используется именно это словосочетание?*).

Типичная укрупнённая схема структурная РФТ [1] < стр. 69 > содержит (рис. 1) модуль электрооптического преобразования (далее по тексту МЭП), оптоволоконный тракт (далее по тексту ОВТ) и модуль оптоэлектронного преобразования (далее по тексту МОП).

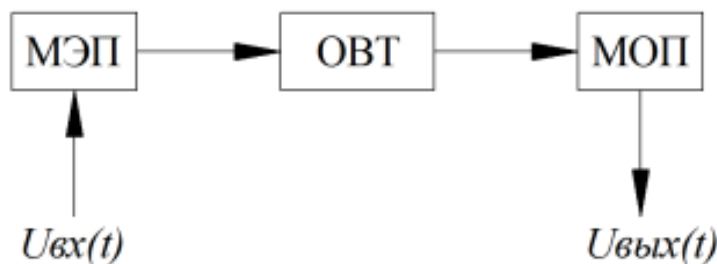
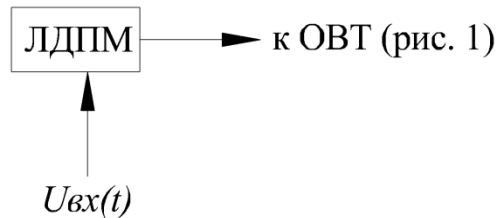


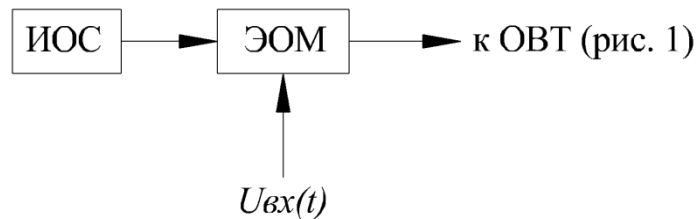
Рис. 1. Типичная укрупнённая схема структурная РФТ: МОП - модуль оптоэлектронного преобразования, МЭП - модуль электрооптического преобразования, ОВТ - оптоволоконный тракт

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, рис. 2а). В случае реализации внешней модуляции (рис. 2б) 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

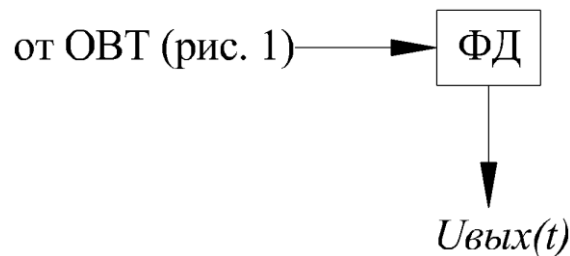
(далее по тексту ММЦ). В качестве МОП, как правило, используются фотодетекторы (далее по тексту ФД, рис. 2в), на электрическом выходе которых выделяется протектированный сигнал $U_{вых}(t)$. В качестве ОВТ в подавляющем большинстве случаев может использоваться обычное “коммерческое” одномодовое волокно типа SMF-28 [4].



а) МЭП с прямой модуляцией



б) МЭП с внешней модуляцией



в) МОП

Рис. 2. Схемы структурные МЭП и МОП (рис. 1): ИОС - источник оптического сигнала, ЛДПМ - лазерный диод с прямой модуляцией, ФД - фотодетектор, ЭОМ - электрооптический модулятор

В данной курсовой работе предлагается определить электрические параметры РФТ с внешней модуляцией (Приложение А - это лист ТЗ). Типичная схема структурная такого РФТ выглядит так, как это показано на рис. 3

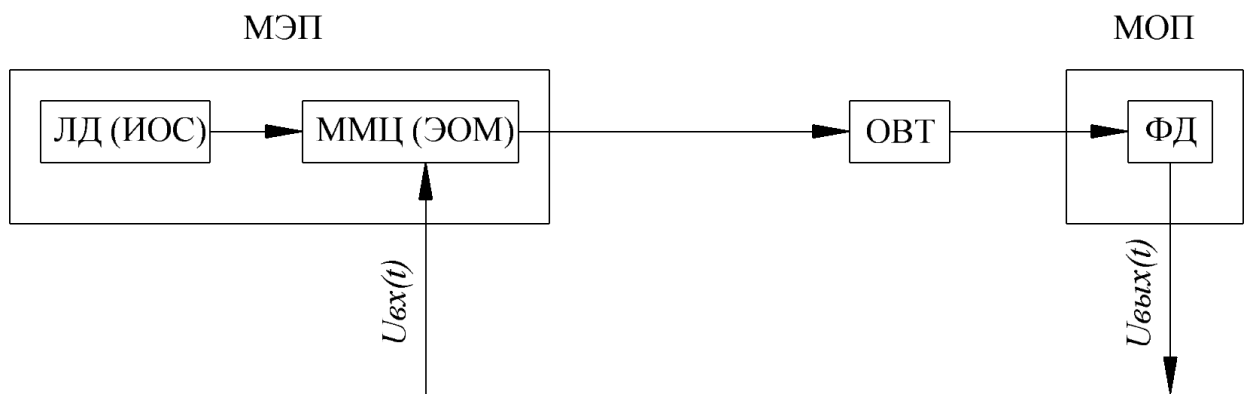


Рис. 3. Типичная схема структурная РФТ (рис. 1) с внешней модуляцией:
 ИОС - источник оптического сигнала, ЛД - лазерный диод, ММЦ – модулятор Маха-Цандера, МОП - модуль оптоэлектронного преобразования, МЭП - модуль электрооптического преобразования, ОВТ - оптоволоконный тракт, ФД - фотодетектор, ЭОМ - электрооптический модулятор

Определение электрических параметров РФТ будут производиться в соответствии с методиками, описанными в [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 №48), в котором будут использоваться следующие фотонные и радиофотонные компоненты:

- DFB Laser Module DFB-1550-14BF производства АО "НОЛАТЕХ" (www.nolatech.ru) в качестве ИОС (Приложение Б - [справочные материалы на ИОС](#));

- Lucent 2623-NA 10Gb/s Electro-Optic Modulator производства Lucent Technologies Inc. (www.lucnet.com) в качестве ММЦ (Приложение В - [справочные материалы на ММЦ](#));

- 50 GHz Dual Window Photodetector XPDV2320R производства u2tphotonics (www.u2t.com) в качестве ФД (Приложение Г - [справочные материалы на ФД](#)).

3 Выбор варианта схемы структурной РФТ.

Оценим потребность установки в тракт РФТ (рис. 3) - от входа электрического сигнала $U_{вх}(t)$ до выхода электрического сигнала $U_{вых}(t)$ - дополнительных элементов.

В Приложении В показано, что предложенная в Приложении А модель ММЦ не располагает специализированными низкочастотными контактами для подачи $U_{см.ммц}$. Поэтому, в данном случае, на вход электрического сигнала необходимо установить узел подачи напряжения смещения (далее по тексту УПНС). В качестве такого УПНС предлагается использовать 45 GHz Broadband Bias-Tee SHF BT45R производства SHF Communication Technologies AG (www.sfh-communication.com, Приложение Д - *справочные материалы на УПНС*).

В Приложении Г показано, что предложенная в Приложении А модель ФД не располагает выходным - развязывающим по постоянному току - конденсатором. Поэтому, в данном случае, на выход электрического сигнала необходимо установить узел развязки по постоянному току (далее по тексту УРПТ). В качестве такого УРПТ предлагается использовать DC-BLOCK - DCZF29F29 производства Marki Microwave (www.markimicrowave.com, Приложение Е - *справочные материалы на УРПТ*).

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

В соответствии с Приложением Б (стр. 1), предложенная модель ИОС может иметь выходной оптический тракт как в виде одномодового волокна без сохранения поляризации, так и в виде одномодового волокна с сохранением поляризации (SM or PM Fiber). В данном случае, следует выбрать модель ИОС с одномодовым волокном с сохранением поляризации (PM Fiber, которое так же может обозначаться как PMF или PANDA), на которое

смонтирован оптический коннектор типа FC-APC (который так же может обозначаться как FC/APC).

А в соответствии с Приложением В (таблица «Technical Specifications») предложенная модель ММЦ имеет входной оптический тракт (Input Fiber) в виде одномодового волокна с сохранением поляризации (PANDA - 900 Micron Loose Tube, которое так же может обозначаться как PM Fiber или PMF), на которое смонтирован оптический коннектор (Input Connector) типа FC/PC. Такой оптический коннектор невозможно состыковать в выходном оптическим коннектором типа FC-APC предложенной модели ИОС. Однако, по условиям ТЗ (Приложение А) предполагается, что при изготовлении требуемого РФТ есть возможность производить замену одних оптических коннекторов на другие (*что является довольно распространённой практикой*). Поэтому, будем считать, что перед сборкой РФТ входной оптический коннектор типа FC/PC на предложенной модели ММЦ будет заменён на коннектор типа FC-APC (который так же может обозначаться как FC/APC).

Таким образом, предложенные модели ИОС и 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 (таблица «Technical Specifications») предложенная модель ММЦ имеет выходной оптический тракт (Output Fiber) в виде одномодового волокна без сохранения поляризации типа SMF28, на которое смонтирован оптический коннектор (Input Connector) типа FC/PC.

А в соответствии с Приложением Г (раздел «Ordering Information») предложенная модель ФД «по-умолчанию» имеет входной оптический тракт в виде одномодового волокна без сохранения поляризации типа SMF28, на которое - в стандартной конфигурации - смонтирован оптический коннектор типа FC/APC. Такой оптический коннектор невозможно состыковать в выходном оптическим коннектором типа FC/PC предложенной модели

ММЦ. Однако, как уже было сказано выше, по условиям ТЗ (Приложение А) предполагается, что при изготовлении требуемого РФТ есть возможность производить замену одних оптических коннекторов на другие. Поэтому, будем считать, что перед сборкой РФТ выходной оптический коннектор типа FC/PC на предложенной модели ММЦ будет заменён на коннектор типа FC/APC.

Таким образом, предложенные модели ММЦ и ФД можно будет стыковать между собой, так как входной оптический тракт ФД будет аналогичен выходному оптическому тракту ММЦ - как по типу волокна, так и по типу коннектора.

В соответствии с Приложением В (таблица «Technical Specifications») предложенная модель ММЦ имеет входной коаксиальный электрический коннектор (RF Connector) типа SMA («гнездо» или «female»). А в соответствии с Приложением Д (разделы «Configurations» и «Mechanical Drawing») предложенная модель УПНС может иметь выходной коаксиальный электрический коннектор (AC+DC port) типа «2.92 mm male» («штырь»).

Таким образом, предложенные модели ММЦ и УПНС можно стыковать между собой, так как входной коаксиальный электрический коннектор ММЦ (RF Connector) типа SMA («гнездо» или «female») может быть состыкован с выходным коаксиальным электрическим коннектором УПНС (AC+DC port) типа «2.92 mm male» («штырь»).

В соответствии с Приложением Г (раздел «Ordering Information») предложенная модель ФД может иметь выходной оптический коннектор типа «female V Connector®» («гнездо»). А в соответствии с Приложением Е (таблица «Part Number Options») предложенная модель УРПТ - для случая конструктивного исполнения (Package Style) DCZF29F29 - может иметь входной коаксиальный электрический коннектор типа «Female 2.92» («гнездо»). Такой входной коаксиальный электрический коннектор невозможно состыковать с выходным коаксиальным электрическим коннектором, предложенной модели ФД. Однако, по условиям ТЗ (Приложение А) предполагается,

что при изготовлении требуемого РФТ - в таких случаях - есть возможность использовать коаксиальные кабели с соответствующими коннекторами для обеспечения требуемой стыковки различных типов электрических коаксиальных входов/выходов.

Таким образом, предложенные модели ФД и УРПТ можно стыковать между собой с использованием коаксиальных кабелей с соответствующими коннекторами для обеспечения требуемой стыковки различных типов электрических коаксиальных входов/выходов, а схема структурная РФТ - в данном случае - будет выглядеть так, как это показано на рис. 4.

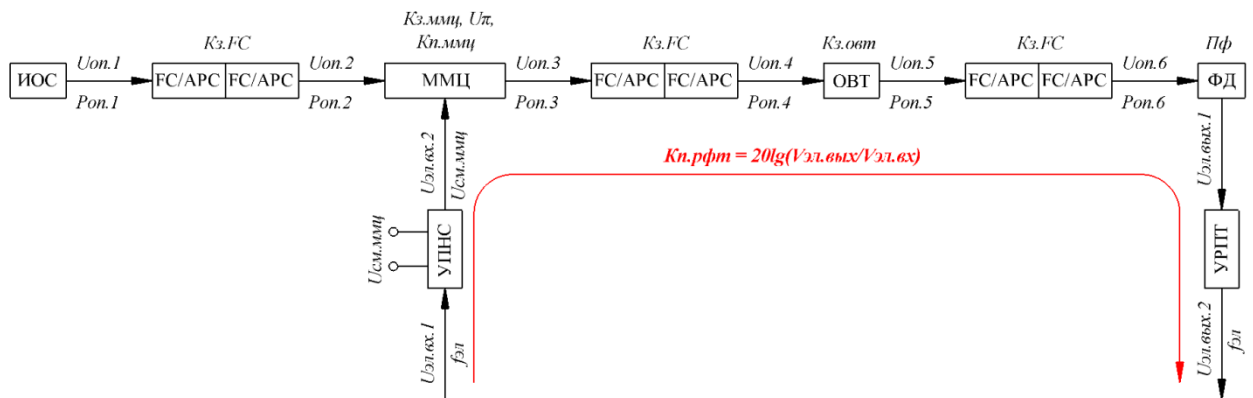


Рис. 4. Схема структурная РФТ для случая предложенного набора моделей фотонных, радиофотонных и электронных компонентов: ИОС - источник оптического сигнала, ММЦ - модулятор Маха-Цандера, ОВТ - оптоволоконный тракт, УПНС - узел подачи напряжения смещения (на электроды ММЦ), УРПТ - узел развязки по постоянному току, ФД - фотодетектор, FC/APC - волоконные коннекторы.

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 приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Наименование устройства (рис. 4)	ДРДВ
ИОС (Приложение Б)	1545 - 1555 нм (Таблица «Optical and electrical characteristics», наименование параметра «Center Wavelength»)
ММЦ (Приложение В)	1525 - 1610 нм (Таблица «Technical Specifications», наименование параметра «Operating Wavelength Range»)
ФД (Приложение Г)	1300 - 1330 нм, 1530 - 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 *λиос*, 1545 - 1555 нм) попадают как в ДРДВ ММЦ (1525 - 1610 нм), так и в «верхний» ДРДВ ФД (1530 - 1620 нм).

Значения уровня максимальной мощности выходного оптического сигнала ИОС (Приложение Б, далее по тексту *Риос.макс*) и значения уровней предельно-допустимой мощности входных оптических сигналов ММЦ (Приложение В, далее по тексту *Рмц.оп.пд*) и ФД (Приложение Г, далее по тексту *Рфд.оп.пд*) приведены в Таблице 2.

В соответствии с Таблицей 2 можно констатировать следующее: *предложенные модели ИОС (Приложение Б), ММЦ (Приложение В) и ФД (Приложение Г) совместимы по энергетическим режимам*, так как значение *Риос.макс* в 10 раз меньше значения *Рмц.оп.пд* и в 4 раза меньше значения *Рфд.оп.пд*.

Таблица 2

Наименование устройства (рис. 4)	Наименование параметра	Значение уровня мощности
ИОС (Приложение Б)	Риос.макс	10 mW (10 мВт) (Таблица «Optical and electrical characteristics», наименование параметра «Output Power, CW», столбец «Max.»)
ММЦ (Приложение В)	Рммц.оп.пд	100 мВт*
ФД (Приложение Г)	Рфд.оп.пд	16 dBm (40 мВт) (Таблица «Absolute maximum ratings», наименование параметра «Maximum average optical input power»)

* - В Приложении В значение *Рммц.оп.пд* не приведено, но для световодных каналов ММЦ в ниобате лития, полученных методом диффузии титана (см. Таблицу «Technical Specifications», строки «Substrate Material» и «Waveguide Process»), это значение, как правило, составляет около 100 мВт.

4 Определение электрических параметров радиофотонного тракта

В данном случае (рис. 4) предстоит определить значения следующих параметров:

- $f_{эл.нз}$ и $f_{эл.вз}$,
- $U_{см.мми}$,
- $Kп.рфт$ при $f_{эл} = f_{эл.нз}$ и $f_{эл} = f_{эл.вз}$ для входного электрического сигнала $U_{эл.вх.1}$ с $V_{эл.вх} = 5$ мВ;
- верхнюю границу динамического диапазона РФТ (рис. 4) - или максимальное значение $V_{эл.вх}$ входного электрического сигнала $U_{эл.вх.1}$ - при $f_{эл} = f_{эл.нз}$ и $KНИ = 2\%$.

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

- значения потерь в ОВТ (далее по тексту $Kз.овт$) принимаются равными 0,0 дБ;

- значения потерь при стыковке коннекторов типа FC/APC (далее по тексту *Кз.FC*) принимаются равными 1,5 дБ;

- значения потерь от высокочастотного коаксиального входа УПНС до коаксиального входа ММЦ принимаются равными 0,0 дБ;

- потери от высокочастотного коаксиального выхода ФД до коаксиального выхода УРПТ принимаются равными 0,0 дБ.

4.1 Определение значений $f_{эл.нз}$ и $f_{эл.вз}$

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

Таблица 3

Наименование устройства (рис. 4)	$f_{эл.нз}'$, ГГц	$f_{эл.вз}'$, ГГц
1	2	3
УПНС (Приложение Д)	0,000020 (Таблица «Specifications - SHF BT45R», наименование параметра «Low Frequency 3 dB Point»)	45,000000 (Таблица «Specifications - SHF BT45R», наименование параметра «High Frequency 3 dB Point»)
ММЦ (Приложение В)	0,000000*	10,000000 (Таблица «Technical Specifications», наименование параметра «Electro-optic Bandwidth»)
ФД (Приложение Г)	0,000000**	45,000000 (Таблица «Optical and Electrical Specifications», наименование параметра «3 dB cut-off frequency»)

Продолжение Таблицы 3

Наименование устройства (рис. 4)	$f_{эл.нз}'$, ГГц	$f_{эл.вз}'$, ГГц
1	2	3
УРПТ (Приложение Е)	0,000004 (Таблица «Electrical Specifications», наименование параметра «Frequency Range»)	40,000000 (Таблица «Electrical Specifications», наименование параметра «Frequency Range»)
	$f_{эл.нз}$, ГГц	$f_{эл.вз}$, ГГц
РФТ (рис. 4)	0,000020	10,000000

* - В Приложении В значение $f_{эл.нз}'$ не приведено, но для ММЦ такого типа это значение - «по-умолчанию» - составляет 0,0 ГГц.

** - В Приложении Г значение $f_{эл.нз}'$ не приведено, но для ФД такого типа это значение - «по-умолчанию» - составляет 0,0 ГГц.

Для определения значения $f_{эл.нз}$ выберем самое большое значение во 2-м столбце Таблицы 3. Таким образом, в данном случае $f_{эл.нз} = 0,000020$ ГГц или 20 КГц (определяется нижней границей ДРЧ УПНС).

Для определения значения $f_{эл.вз}$ выберем самое малое значение в 3-м столбце Таблицы 3. Таким образом, в данном случае $f_{эл.вз} = 10,0$ ГГц (определяется верхней границей ДРЧ ММЦ).

4.2 Определение значения $U_{см.мми}$

В соответствии с [5], [6] и [7] значение $U_{см.мми}$ принимается равным половине полуволнового напряжения ММЦ (далее по тексту U_{π}) при $f_{эл} = f_{эл.нз}$ (далее по тексту $U_{\pi.нз}$). К сожалению, в Приложении В не приведено значение $U_{\pi.нз}$ (при $f_{эл} = f_{эл.нз} = 20,0$ КГц). Однако, в Таблице «Technical Specifications» данного приложения приведено значения $U_{\pi} = 3,1$ В при $f_{эл} = 0,0$ (3.1V Typical @ DC, наименование параметра «Drive Voltage V_{pi} »). А так

как верхняя граница ДРЧ у данной модели ММЦ составляет 10,0 ГГц (см. Таблицу 3, столбец 3), то можно предположить, что значение $U_{п.н2}$ (при $f_{эл} = f_{эл.н2} = 20$ КГц) практически не отличается от значения $U_{п}$ при $f_{эл} = 0,0$. Поэтому. значение $U_{п.н2}$ (при $f_{эл} = f_{эл.н2} = 20$ КГц) можно принять равным значению $U_{п}$ при $f_{эл} = 0,0$ - т.е. 3,1 В, а значение $U_{см.ммц}$ - равным половине $U_{п}$ при $f_{эл} = 0,0$ - т.е. 1,55В.

4.3 Определение значения $K_{п.рфт}$ при $f_{эл} = f_{эл.н2}$

В [5], [6] и [7] было установлено следующее - чем ниже уровень мощности выходного оптического сигнала ИОС (рис. 4, далее по тексту $P_{оп.1}$) - тем ниже $K_{п.рфт}$. Поэтому, в данном случае - в отличие от Таблицы 2 - при расчётах должно использоваться не максимальное, а минимальное значение $P_{оп.1}$. К сожалению, в Приложении Б приведены только максимальное и типовое значение $P_{оп.1}$, а минимальное - не приведено. Поэтому, в данном случае, при дальнейших расчётах будем пользоваться типовым значением $P_{оп.1} = 5$ мВт (5 mW, Приложение Б, Таблица «Optical and electrical characteristics», наименование параметра «Output Power, CW», столбец «Тур.»).

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

Определим значение уровня мощности оптического сигнала на оптическом входе ММЦ (рис. 4, далее по тексту $P_{оп.2}$) по формуле 1

$$P_{оп.2} = P_{оп.1} / K_{з.ФС(раз)} = 5(\text{мВт}) / 1,4126(\text{раз}) \approx 3,5396(\text{мВт}) \quad (1)$$

Правило перевода
значения $K_{з.ФС}$ в децибелах
в значение $K_{з.ФС}$ в разгах по мощности.

Выше было сказано, что $K_{з.ФС}$ следует принимать равным 1.5 дБ.

Взаимосвязь $K_{з.ФС}$ в разгах по мощности и $K_{з.ФС}$ в децибелах выражается следующей формулой:

$$Kз.FC(\partial Б) = 10 \times \lg(Kз.FC(\text{раз})).$$

Начинаем трансформации этой формулы с перестановки значений справа и слева от знака равенства:

$$10 \times \lg(Kз.FC(\text{раз})) = Kз.FC(\partial Б)$$

Далее вместо обозначения $Kз.FC(\partial Б)$ подставляем его цифровое значение:

$$10 \times \lg(Kз.FC(\text{раз})) = 1,5(\partial Б)$$

Далее левую и правую часть равенства делим на 10 - вот так:

$$(10 \times \lg(Kз.FC(\text{раз}))) / 10 = 1,5 / 10$$

В результате этого деления получаем следующее равенство:

$$\lg(Kз.FC(\text{раз})) = 0,15$$

Далее вспоминаем, что означает вычисление десятичного логарифма.

А оно заключается, в данном случае, в поиске значения степени, в которую надо возвести 10, чтобы получилось значение $Kз.FC$ в размах - т.е. решается следующее уравнение

$$10^X = Kз.FC(\text{раз})$$

В данном случае, этот поиск уже проведён и $X = 0,15$, так как $\lg(Kз.FC(\text{раз})) = 0,15$.

Следовательно, в данном случае $Kз.FC(\text{раз}) = 10^{0,15} \approx 1,4126$ раза, что я и использовал в формуле 1.

Определим значение уровня мощности оптического сигнала на оптическом выходе ММЦ (рис. 4, далее по тексту **Роп.3**) по формуле 2:

$$Роп.3(\text{мВт}) = Роп.2(\text{мВт}) \times Кп.ммц(\text{раз}), \quad (2)$$

где **Кп.ммц** - коэффициент передачи по мощности оптического тракта ММЦ в размах.

Подставим в формулу 2 определённое по формуле 1 значение **Роп.2** = 3,5396 мВт и получим формулу 3

$$Роп.3(\text{мВт}) = 3,5396(\text{мВт}) \times Кп.ммц(\text{раз}) \quad (3)$$

Значения $K_{п.ммц}$ в размах вычисляются по формуле 4

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

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

$U_{п.нг}$ - полуволновое напряжение ММЦ при $f_{эл} = f_{нг}$, В,

$K_{з.ммц}$ - потери в оптическом тракте ММЦ, раз.

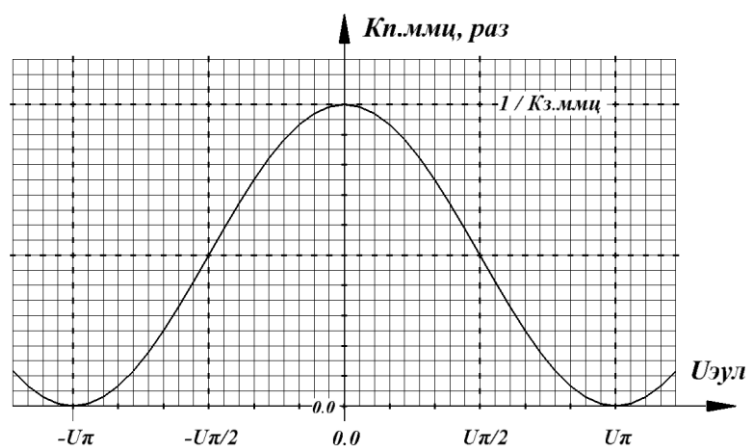


Рис. 5. Графическое изображение зависимости $K_{п.ммц}$ от $U_{эул}$ (или модуляционная характеристика ММЦ)

Значения $U_{п.нг}$ и $K_{з.ммц}$ указаны в Приложении В (Таблица «Technical Specifications», наименование параметров «Drive Voltage V_{pi} » и «Insertion Loss»). Графическое изображение зависимости $K_{п.ммц}$ от $U_{эул}$ приведено на рис. 5, а значения $U_{эул}$ вычисляются по формуле 5

$$U_{эул} (\text{В}) = U_{см.ммц} (\text{В}) + U_{эл.вх.2} (\text{В}), \quad (5)$$

где $U_{см.ммц}$ - напряжение смещения на электродах управляющей линии (вычислено в п. 4.2), В,

$U_{эл.вх.2}$ - напряжение электрического сигнала на коаксиальном электрическом входе ММЦ (рис. 4), В.

Выше уже отмечалось, что в соответствии с ТЗ (Приложение А) значения потерь от высокочастотного коаксиального входа УПНС до коаксиального входа ММЦ принимаются равными 0,0 дБ. А это значит, что значение $U_{эл.вх.2}$ равно напряжению электрического сигнала на коаксиальном высокочастотном входе УПНС - и как следствие - напряжению на входе РФТ - $U_{эл.вх.1}$ (рис. 4).

Изменение $U_{эл.вх.1}$ во времени можно описать, например, формулой 6

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

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 (Приложение А) значение $V_{эл.вх} = 0,005$ В и получим формулу 7

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

Далее, с учётом того, что $U_{эл.вх.2} = U_{эл.вх.1}$, заменим в формуле 5 $U_{эл.вх.2}$ на выражение из формулы 6 и вместо формулы 5 получим формулу 8.

$$\begin{aligned} U_{эул}(В) &= U_{см.ммц}(В) + U_{эл.вх.2}(В) = U_{см.ммц}(В) + U_{эл.вх.1}(В) = \\ &= U_{см.ммц}(В) + 0,005(В) \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(сек)) \times t(сек)) \quad (8) \end{aligned}$$

Далее выражение $U_{эул}$ из формулы 8 подставим в формулу 4 и получим для описания $Kп.ммц$ формулу 9

$$K_{п.ммц}(\text{раз}) = \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{U_{см.ммц}(B) + 0,005(B) \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек}))}{U_{л.нг}(B)} \right)}{2 \times K_{з.ммц}(\text{раз})} \quad (9)$$

Далее в формулу 9 подставим определённое в п. 4.2 значение $U_{см.ммц} = 1,55$ В и получим формулу 10

$$K_{п.ммц}(\text{раз}) = \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{1,55(B) + 0,005(B) \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек}))}{U_{л.нг}(B)} \right)}{2 \times K_{з.ммц}(\text{раз})} \quad (10)$$

Далее в формулу 10 подставим значение $K_{з.ммц} \approx 3,5482$ раза (что соответствует 5,5 дБ из Приложения В, Таблица «Technical Specifications», наименование параметра «Insertion Loss» для случая Maximum) и получим формулу 11.

$$K_{п.ммц}(\text{раз}) = \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{1,55(B) + 0,005(B) \times \sin (360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек}))}{U_{л.нг}(B)} \right)}{2 \times 3,5482(\text{раз})} \quad (11)$$

**Правило перевода
значения $K_{з.ммц}$ в децибелах
в значение $K_{з.ФС}$ в разгах по мощности.**

Выше было сказано, что $K_{з.ммц}$ прили равным 5.5 дБ.

Взаимосвязь $K_{з.ммц}$ в разгах по мощности и $K_{з.ФС}$ в децибелах выражается следующей формулой: $K_{з.ммц} = 10 \times \lg(K_{з.ммц}(\text{раз}))$.

Начинаем трансформации этой формулы с перестановки значений справа и слева от знака равенства:

$$10 \times \lg(K_{з.ммц}(\text{раз})) = K_{з.ммц}(\text{дБ})$$

Далее вместо обозначения $K_{з.ммц}(\text{дБ})$ подставляем его цифровое значение:

$$10 \times \lg(K_{з.ммц}(\text{раз})) = 5,5 \text{ дБ}$$

Далее левую и правую часть равенства делим на 10 - вот так:

$$(10 \times \lg(K_{з.ммц}(\text{раз}))) / 10 = 5,5 / 10$$

В результате этого деления получаем следующее равенство:

$$\lg(K_{з.ммц}(\text{раз})) = 0,55$$

Далее вспоминаем, что означает вычисление десятичного логарифма.

А оно заключается, в данном случае, в поиске значения степени, в которую надо возвести 10, чтобы получилось значение Кз.ммц в размах - т.е. решается следующее уравнение

$$10^X = \text{Кз.ммц (раз)}$$

В данном случае, этот поиск уже проведён и $X = 0,55$, так как $\lg(\text{Кз.ммц(раз)}) = 0,55$

Следовательно, в данном случае $\text{Кз.ммц (раз)} = 10^{0,55} \approx 3,5482$ раза, что я и использовал в формуле 11).

Выше - при определении **Усм.ммц** (п. 4,2) - было определено значение **Уп.нг** при $f_{эл} = f_{эл.нг}$, которое составило 3,1 В (Приложение В, Таблица «Technical Specifications», наименование параметра «Drive Voltage V_{pi}», 3.1V Typical @ DC). Подставим значение **Уп.нг** = 3,1 В в формулу 11 и получим формулу 12

$$\text{Кп.ммц(раз)} = \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{1,55(\text{В}) + 0,005(\text{В}) \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right)}{3,1(\text{В})} \right)}{2 \times 3,5482(\text{раз})} \quad (12)$$

Далее преобразуем формулу 12 в формулу 13 следующим образом

$$\begin{aligned} \text{Кп.ммц(раз)} &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \frac{1,55(\text{В}) + 0,005(\text{В}) \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right)}{3,1(\text{В})} \right)}{2 \times 3,5482(\text{раз})} = \\ &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times \left(\frac{1,55(\text{В})}{3,1(\text{В})} + \frac{0,005(\text{В})}{3,1(\text{В})} \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right) \right) \right)}{2 \times 3,5482(\text{раз})} = \\ &= \frac{1 + \cos \left(180^\circ \times (0,5 + 0,0016 \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right)) \right)}{2 \times 3,5482(\text{раз})} = \\ &= \frac{1 + \cos \left((180^\circ \times 0,5) + (180^\circ \times 0,0016) \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right) \right)}{2 \times 3,5482(\text{раз})} = \\ &= \frac{1 + \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right))}{2 \times 3,5482(\text{раз})} = \\ &= \frac{1 + \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin \left(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек}) \right))}{7,0964(\text{раз})} = \quad (13) \end{aligned}$$

Далее подставим формулу (13) в формулу (3) и получим формулу 14

$$\text{Роп.3(МВт)} = 3,5396(\text{МВт}) \times \frac{1 + \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin(360^\circ \times (1/\text{Тэл(сек)}) \times t(\text{сек})))}{7,0964(\text{раз})} \quad (14)$$

Далее формулу 14 преобразуем в формулу 15

$$\begin{aligned}
 P_{оп.3}(\text{мВт}) &= 3,5396(\text{мВт}) \times \frac{1 + \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек})))}{7,0964(\text{раз})} = \\
 &= \frac{3,5396(\text{мВт})}{7,0964(\text{раз})} \times (1 + \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек})))) = \\
 &= 0,4988(\text{мВт}) \times (1 + \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек})))) = \\
 &0,4988(\text{мВт}) + 0,4988(\text{мВт}) \times \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(\text{сек})) \times t(\text{сек}))) \quad (15)
 \end{aligned}$$

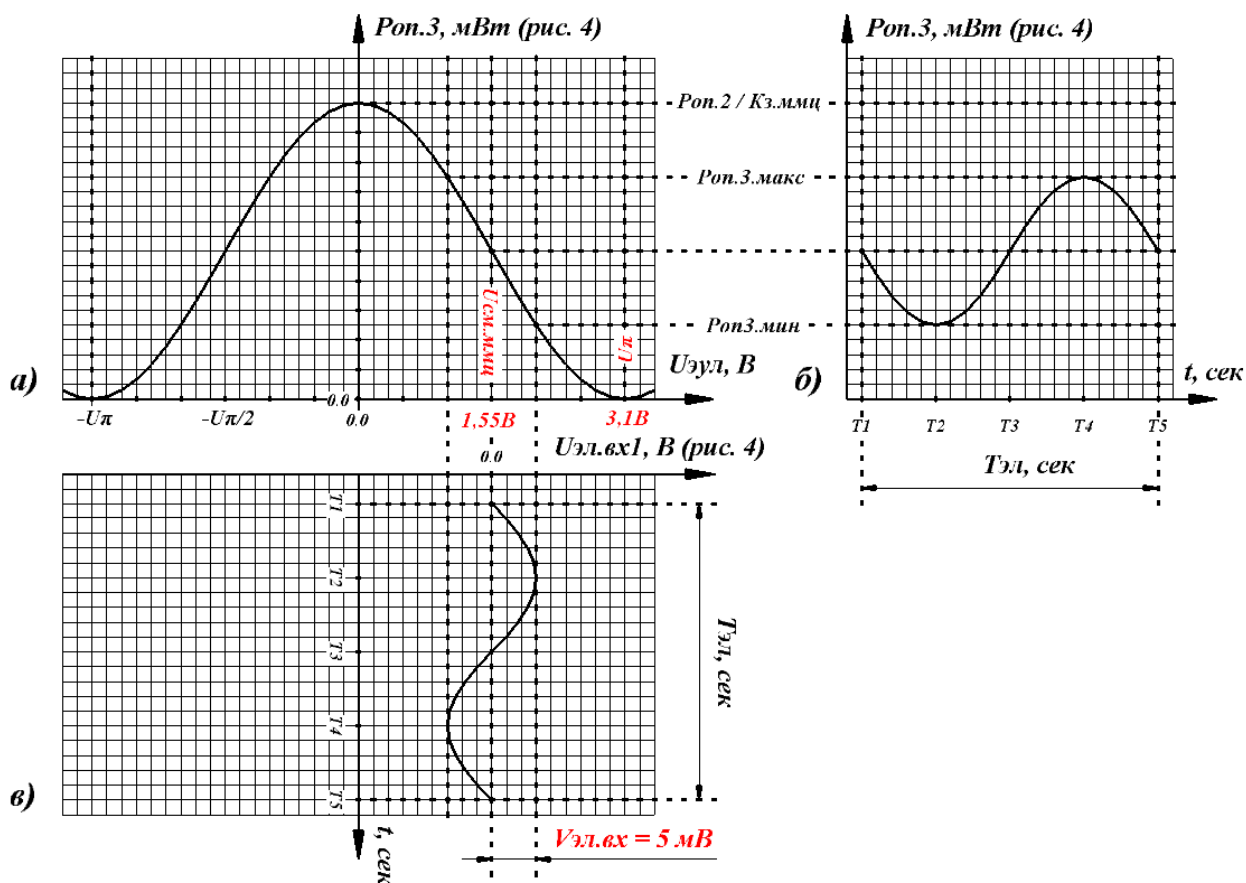


Рис. 6. Графическое изображение качественных временных зависимостей $U_{эл.вх.1}$ (рис. в) и $P_{оп.3}$ (рис. б)

Итак, формула 15 описывает временную зависимость $P_{оп.3}$ (рис. 4) от текущего времени t . «Качественное» графическое представление этой зависимости приведено на рис. 6б (без соблюдения пропорций). В соответствии с этим рисунком можно сделать следующий вывод: значение $P_{оп.3}$ (рис. 6б) изменяется в такт с изменением амплитуды входного электрического сигнала $U_{эл.вх.1}$ (рис. 6в) в диапазоне от некоторого максимального значения (рис. 6б, далее пол тексту $P_{оп.3.макс}$) до некоторого минимального значения

(рис. 6б, далее по тексту *Роп.3.мин*). Определим абсолютные значения этих максимумов и минимумов, для чего обратимся к формуле 15. В этой формуле имеется гармоническая функция $\sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(сек)) \times t(сек))$. 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 15 будет трансформироваться в формулу 16, а во втором - в формулу 17

$$P_{оп.3}(мВт) = 0,4988(мВт) + 0,4988(мВт) \times \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times (-1)) \quad (16)$$

$$P_{оп.3}(мВт) = 0,4988(мВт) + 0,4988(мВт) \times \cos(90^\circ + 0,288^\circ \times (+1)) \quad (17)$$

Очевидно, что

- при вычислении *Роп.3* по формуле 16 мы будем получать максимальные значения *Роп.3* (*Роп.3.макс*, рис.6б), так как значение выражения $\cos(90^\circ + 0,288^\circ \times (-1))$ будет иметь положительное значение: $\sim (+0,005)$,

- а при вычислении при *Роп.3* по формуле 17 мы будем получать минимальные значения *Роп.3* (*Роп.3.мин*, рис. 6б), так как значение выражения $\cos(90^\circ + 0,288^\circ \times (+1))$ будет иметь отрицательное значение: $\sim (-0,005)$.

Таким образом, мы можем вычислить значение *Роп.3.макс* (рис. 6б) по формуле 18, а значение *Роп.3.мин* (рис. 6б) - по формуле 19.

$$\begin{aligned} P_{оп.3.макс}(мВт) &= 0,4988(мВт) + 0,4988(мВт) \times 0,005 = \\ &= 0,4988(мВт) + 0,0025(мВт) = 0,5013(мВт) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_{оп.3.мин}(мВт) &= 0,4988(мВт) + 0,4988(мВт) \times (-0,005) = \\ &= 0,4988(мВт) - 0,0025(мВт) = 0,4963(мВт) \end{aligned} \quad (19)$$

Временная зависимость уровня мощности оптического сигнала на входе ОВТ (рис. 4, далее по тексту *Роп.4*) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности *Роп.3* (рис. 6б) с той только разницей, что и максимальные значения *Роп.4* (рис. 7, далее по тексту

$P_{оп.4.макс}$), и минимальные значение $P_{оп.4}$ (рис. 7, далее по тексту $P_{оп.4.мин}$) будут меньше значений $P_{оп.3.макс}$ и $P_{оп.3.мин}$ в соответствии с формулами 20 и 21.

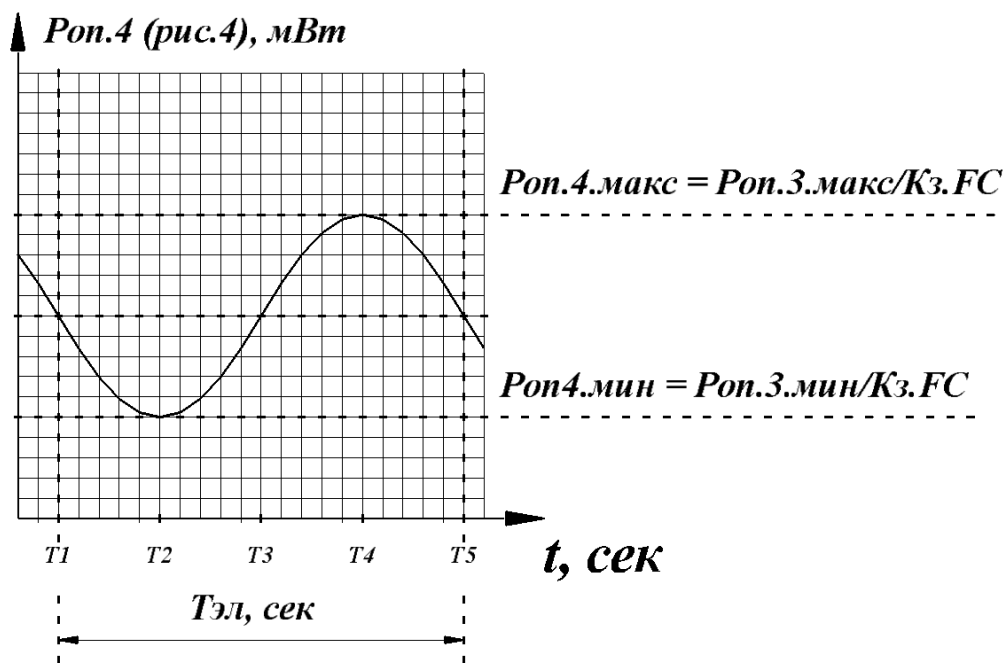


Рис. 7. Графическое изображение качественной временной зависимости $P_{оп.4}$ (рис. 4)

$$\begin{aligned}
 P_{оп.4.макс}(мВт) &= P_{оп.3.макс}(мВт) / Кз.ФС(раз) = \\
 &= 0.5013(мВт) / 1,4126(раз) \approx 0,3549 \text{ мВт}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 P_{оп.4.мин}(мВт) &= P_{оп.3.мин}(мВт) / Кз.ФС(раз) = \\
 &= 0.4963(мВт) / 1,4126(раз) \approx 0,3514 \text{ мВт}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Временная зависимость уровня мощности оптического сигнала на выходе ОВТ (рис. 4, далее по тексту $P_{оп.5}$) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности $P_{оп.4}$ (рис. 7). При этом максимальные значение $P_{оп.5}$ (рис. 8, далее по тексту $P_{оп.5.макс}$) и минимальное значение $P_{оп.5}$ (рис. 8, 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 $Кз.овт = 0$ дБ.

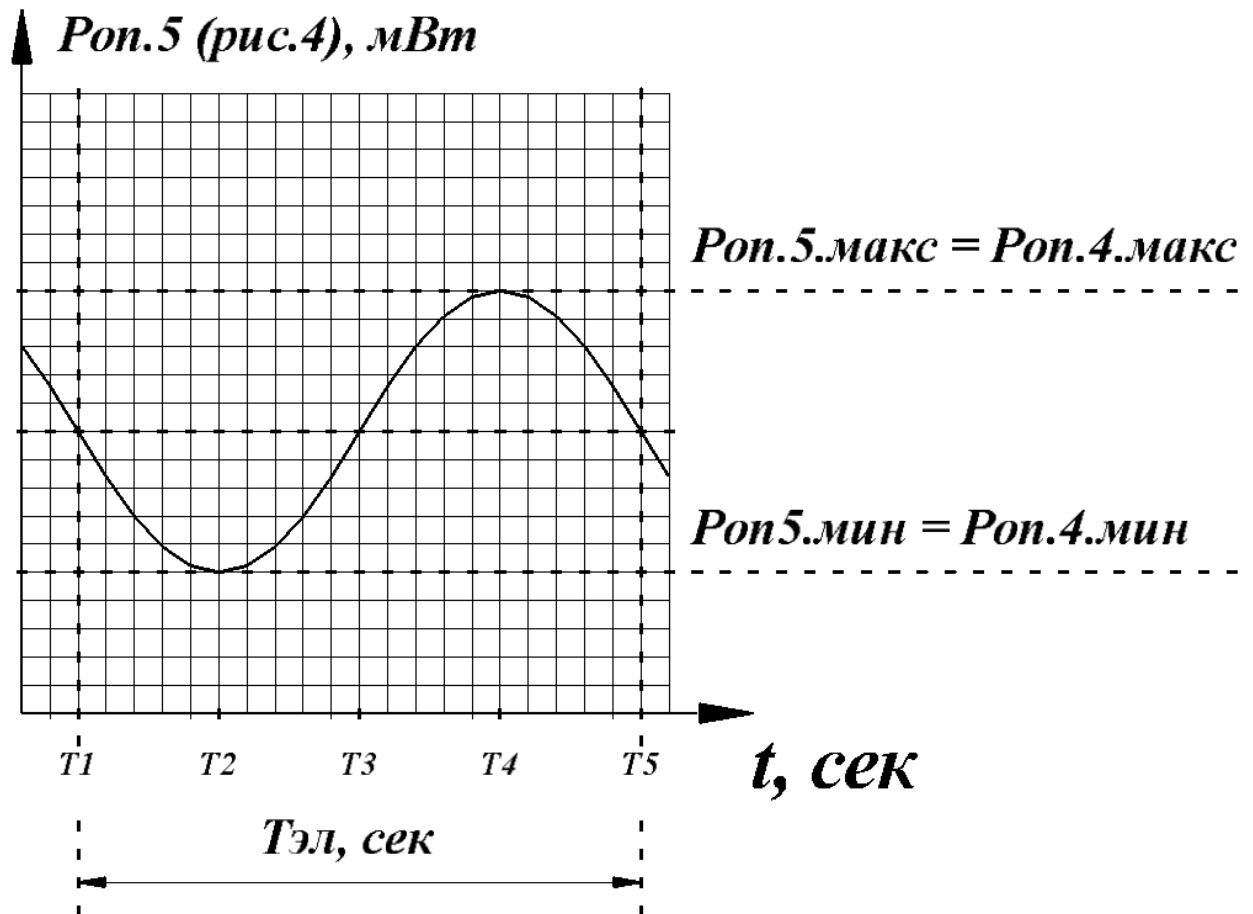


Рис. 8. Графическое изображение качественной временной зависимости $P_{оп.5}$ (рис. 4)

Временная зависимость уровня мощности оптического сигнала на входе ФД (рис. 4, далее по тексту $P_{оп.6}$) будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности $P_{оп.5}$ (рис. 8) с той только разницей, что и максимальные значения $P_{оп.6}$ (рис. 9, далее по тексту $P_{оп.6.макс}$), и минимальные значение $P_{оп.6}$ (рис. 9, далее по тексту $P_{оп.6.мин}$) будут меньше значений $P_{оп.5.макс}$ и $P_{оп.5.мин}$ в соответствии с формулами 22 и 23.

$$\begin{aligned}
 P_{оп.6.макс}(мВт) &= P_{оп.5.макс}(мВт)/Kз.FC(раз) = \\
 &= 0.3549(мВт)/1,4126(раз) \approx 0,2513 мВт \approx 0,0002513 ВТ \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{оп.6.мин}(мВт) &= P_{оп.5.мин}(мВт)/Kз.FC(раз) = \\
 &= 0.3514(мВт)/1,4126(раз) \approx 0,2488 мВт \approx 0,0002488 ВТ \quad (23)
 \end{aligned}$$

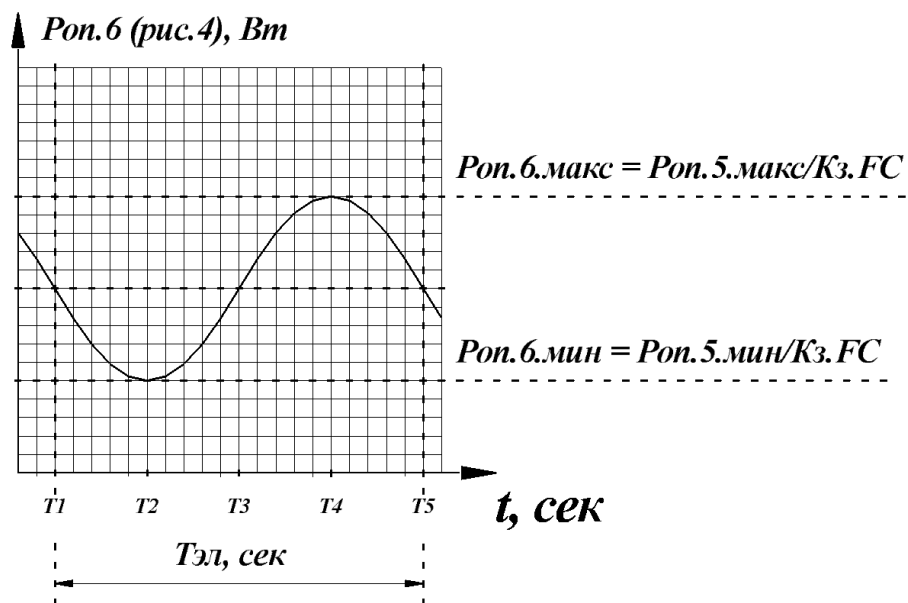


Рис. 9. Графическое изображение качественной временной зависимости ***P_{out.6}*** (рис. 4)

Для проведения дальнейших вычислений рассмотрим схему электрическую принципиальную ФД (рис. 4). Приведённый в Приложении Г эскиз схемы электрической принципиальной (Block Diagram, рис. 10) будет не очень удобно использовать для иллюстрации дальнейших вычислений.

Block Diagram

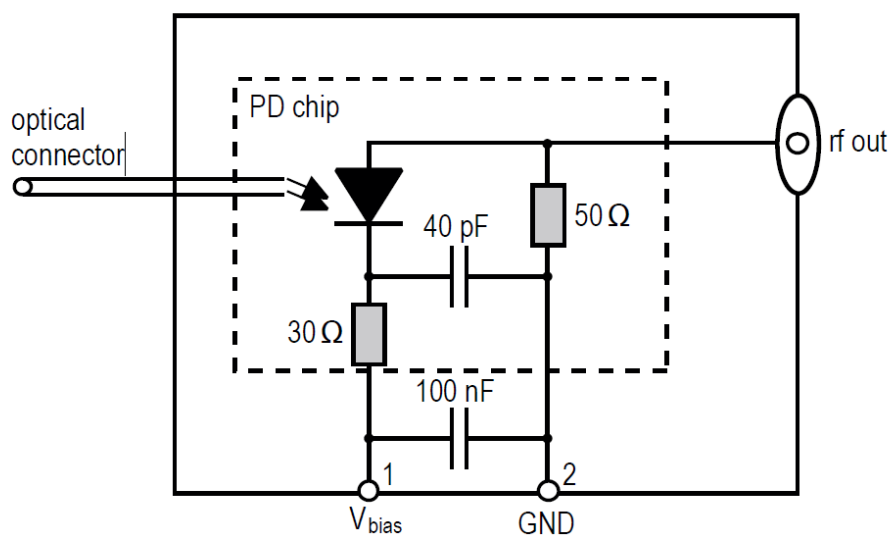


Рис. 10. Эскиз схемы электрической принципиальной ФД (рис. 4) из Приложения Г

Поэтому, эта схема электрическая принципиальная была изображена в несколько изменённом виде - так, как это показано на рис. 11.

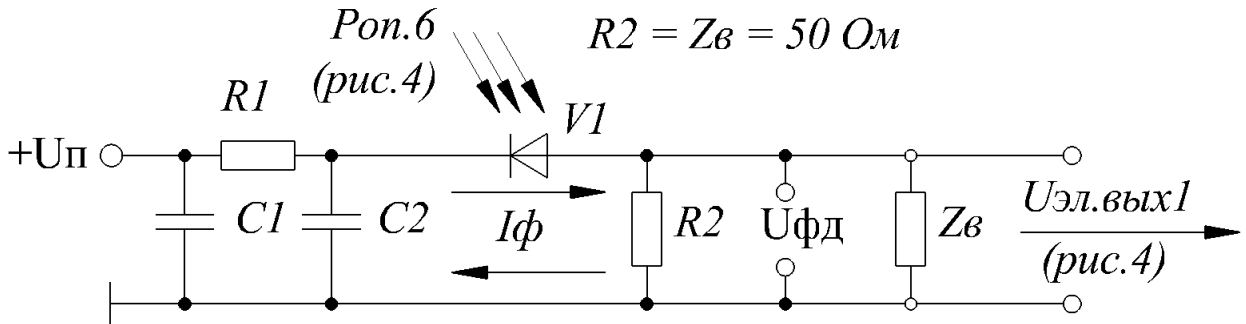


Рис. 11. Эскиз схемы электрической принципиальной ФД (рис. 4)

Ключевым элементом этой схемы является р-і-п-фотодиод V1, на который подано положительное обратное (запирающее) напряжение питания (далее по тексту $+U_n$, рис.11). Поэтому - в отсутствии падающего на область «і» оптического сигнала с уровнем мощности $P_{оп.6}$ - 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 «і» оптического сигнала с уровнем мощности $P_{оп.6}$ сопротивление р-і-п-фотодиода V1 начинает снижаться и через него начинает протекать более сильный ток, который принято называть наведённым фототоком (далее по тексту $I_{ф}$, рис. 11). При этом, взаимосвязь значений $I_{ф}$ и $P_{оп.6}$ выражается формулой 24.

$$I_{ф}(A) = P_{ф}(A/Вт) \times P_{оп.6}(Вт), \quad (24)$$

где $P_{ф}$ - фоточувствительность р-і-п-фотодиода V1, А/Вт

К сожалению, в Приложении Г не приведено значение $P_{ф}$ при $f_{эл} = f_{эл.нг} = 20,0$ КГц. Однако, в Таблице «Optical and Electrical Specifications» данного приложения приведено минимальное значение $P_{ф} = 0,55$ А/Вт при

$f_{эл} = 0,0$ (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 $Пф$ при $f_{эл} = f_{эл.нг} = 20$ КГц практически не отличается от значения $Пф$ при $f_{эл} = 0,0$. Поэтому, значение $Пф$ при $f_{эл} = f_{эл.нг} = 20$ КГц можно принять равным значению $Пф$ при $f_{эл} = 0,0$ - т.е. 0,55 А/Вт.

Выбор минимального значения $Пф$ (0,55 А/Вт) обусловлен исходя из традиционной практики инженерных расчётов, когда расчёт ведётся по САМЫМ худшим из ожидаемых значений параметров.

В соответствии с формулой 24 можно утверждать следующее - величина $Iф$ имеет прямую линейную зависимость от величины $Роп.6$. Поэтому, так же можно утверждать, что временная зависимость $Iф$ будет иметь такой же характер, как и временная зависимости уровня мощности $Роп.6$ (рис. 12).

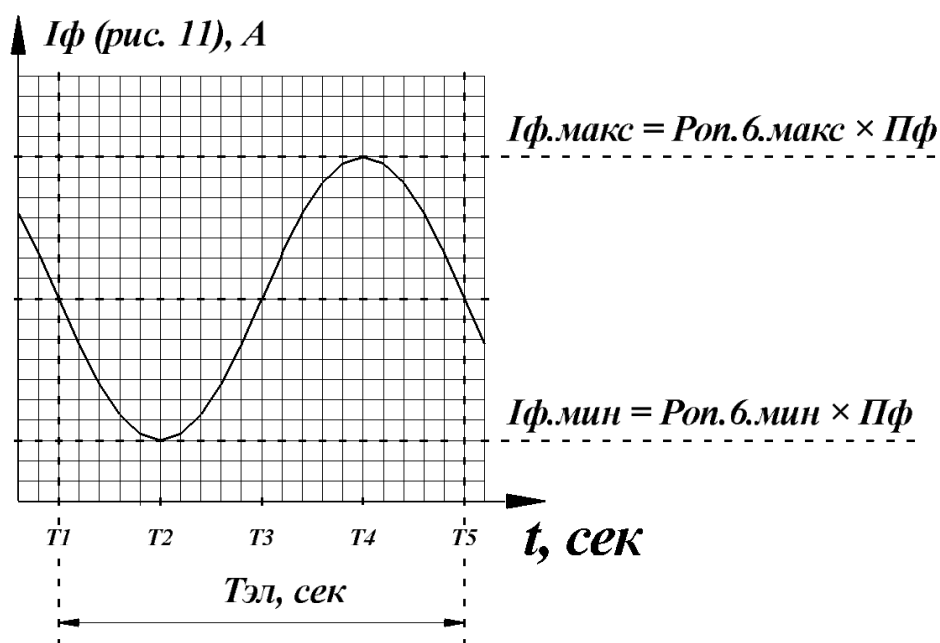


Рис. 12. Графическое изображение качественной временной зависимости $Iф$ (рис. 11)

При этом, максимальное значение $Iф$ (далее по тексту $Iф.макс$, рис. 12) будет вычисляться по формуле 25, а минимальное значение $Iф$ (далее по тексту $Iф.мин$, рис. 12) будет вычисляться по формуле 26.

$$\begin{aligned}
I_{\text{ф.макс}}(A) &= R_{\text{оп.б.макс}}(B_T) \times \text{Пф}(A/B_T) = \\
&= 0,0002513(B_T) \times 0,55(A/B_T) = 0,0001382(A) \quad (25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{\text{ф.мин}}(A) &= R_{\text{оп.б.мин}}(B_T) \times \text{Пф}(A/B_T) = \\
&= 0,0002488(B_T) \times 0,55(A/B_T) = 0,0001369(A) \quad (26)
\end{aligned}$$

Далее необходимо определить величину наведённого $I_{\text{ф}}$ напряжения в нагрузке ФД (далее по тексту $U_{\text{фд}}$, рис. 11). При этом, «штатным» сопротивлением нагрузки у данного ФД (рис. 10, 11) является резистор R2 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 $Z_{\text{в}}$, рис. 11) так же равным 50 Ом. Поэтому, фактически, схема электрическая принципиальная ФД выглядит не так, как это показано на рис. 10, а так, как, как это показано на рис. 11. И потому $U_{\text{фд}}$ наводится в нагрузке, которая представляет собой параллельно-включённые R2 = 50 Ом и $Z_{\text{в}}$ = 50 Ом. Поэтому, сопротивление нагрузки ФД составляет не 50 Ом, а 25 Ом, а величина $U_{\text{фд}}$ вычисляется по формуле 27

$$U_{\text{фд}}(B) = I_{\text{ф}}(A) \times ((R2 \times Z_{\text{в}}) / (R2 + Z_{\text{в}})) = I_{\text{ф}} \times 25 \text{ Ом} \quad (27)$$

В соответствии с формулой 27 можно утверждать следующее - величина $U_{\text{фд}}$ имеет прямую линейную зависимость от величины $I_{\text{ф}}$. Поэтому, так же можно утверждать, что временная зависимость $U_{\text{фд}}$ будет иметь такой же характер, как и временная зависимости $I_{\text{ф}}$ (рис. 13).

При этом, максимальное значение $U_{\text{фд}}$ (далее по тексту $U_{\text{фд.макс}}$, рис. 13) будет вычисляться по формуле 28, а минимальное значение $U_{\text{фд}}$ (далее по тексту $U_{\text{фд.мин}}$, рис. 13) будет вычисляться по формуле 29.

$$\begin{aligned}
U_{\text{фд.макс}}(B) &= I_{\text{ф.макс}}(A) \times 25 \text{ (Ом)} = \\
&= 0,0001382(A) \times 25 \text{ (Ом)} = 0,0034550(B) \quad (28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{\text{фд.мин}}(B) &= I_{\text{ф.мин}}(A) \times 25 \text{ (Ом)} = \\
&= 0,0001369(A) \times 25 \text{ (Ом)} = 0,0034225(B) \quad (29)
\end{aligned}$$

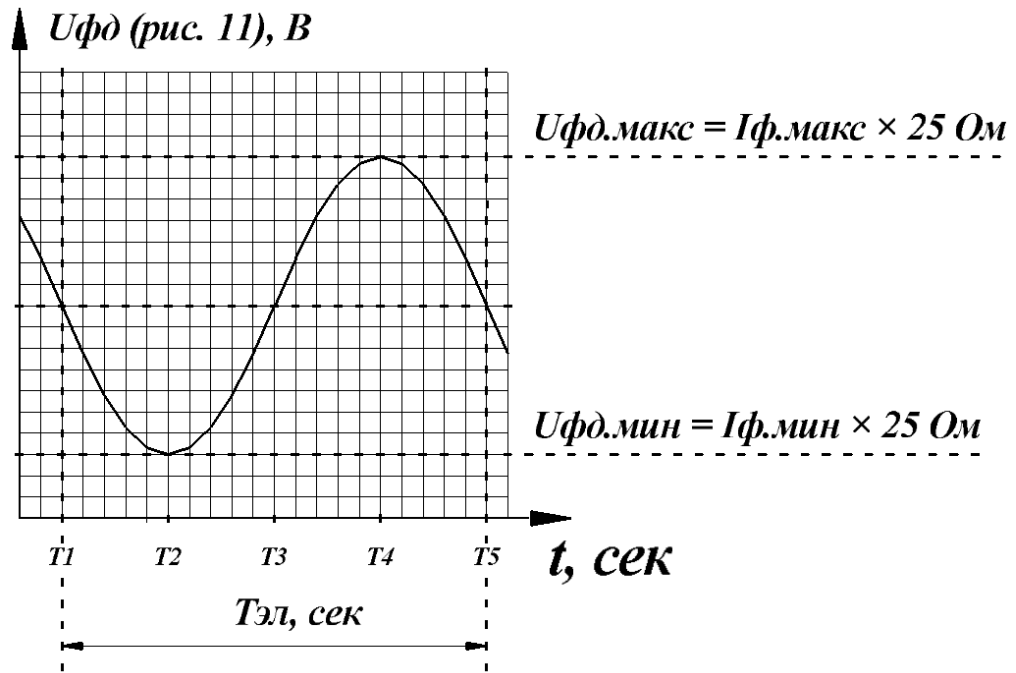


Рис. 13. Графическое изображение качественной временной зависимости U_{fd} (рис. 11)

Так же необходимо отметить, что, в данном случае, временная зависимость выходного сигнала ФД: $U_{эл.вых.1}$ (рис. 4, 11) будет тождественна временной зависимости U_{fd} (рис. 13). Поэтому, временная зависимость $U_{эл.вых.1}$ будет выглядеть так, как это показано на рис. 14.

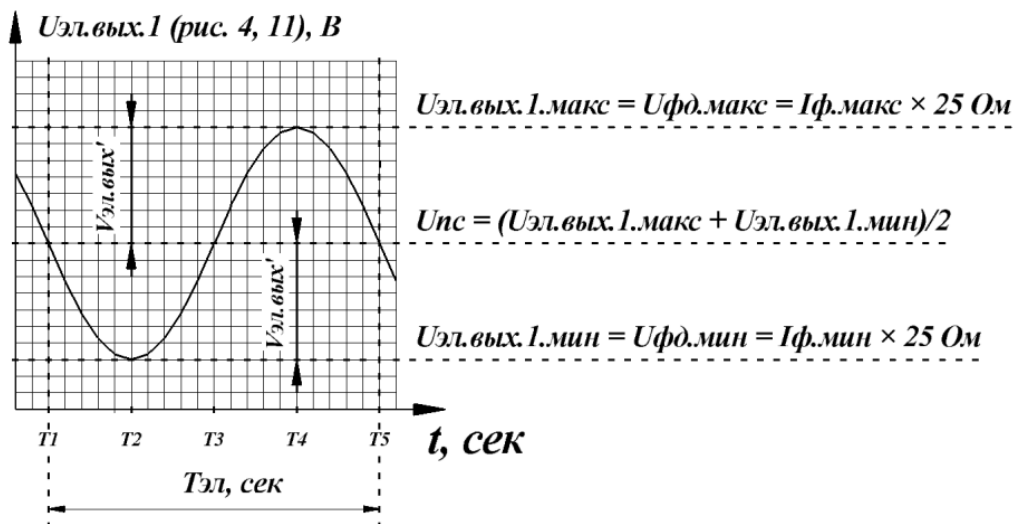


Рис. 14. Графическое изображение качественной временной зависимости $U_{эл.вых.1}$ (рис. 4,11)

При этом максимальное значение $U_{эл.вых.1}$ (далее по тексту $U_{эл.вых.1.макс}$) будет равно $U_{фд.макс}$, а минимальное значение $U_{эл.вых.1}$ (далее по тексту $U_{эл.вых.1.мин}$) будет равно $U_{фд.мин}$.

Очевидно, что график на рис. 14 состоит из 2-х составляющих: переменной и постоянной. Постоянную составляющую (далее по тексту $U_{пс}$) можно представить формулой 30

$$\begin{aligned}
 U_{пс} &= \frac{U_{эл.вых.1.макс} - U_{эл.вых.1.мин}}{2} + U_{эл.вых.1.мин} = \\
 &= \frac{U_{эл.вых.1.макс} - U_{эл.вых.1.мин} + 2 \times U_{эл.вых.1.мин}}{2} = \frac{U_{эл.вых.1.макс} + U_{эл.вых.1.мин}}{2} = \\
 &= \frac{0,0034550(\text{В}) + 0,0034225(\text{В})}{2} = 0,00343875(\text{В}) \quad (30)
 \end{aligned}$$

А амплитуду переменной составляющей (далее по тексту $V_{вых}'$) можно вычислить по формуле 31

$$V_{эл.вых}' = \frac{U_{эл.вых.1.макс} - U_{эл.вых.1.мин}}{2} \quad (31)$$

Далее необходимо определить параметры выходного электрического сигнала $U_{эл.вых.2}$ (рис.4). В соответствии с требованиями ТЗ (Приложение А) потери от высокочастотного коаксиального выхода ФД до коаксиального выхода УРПТ (или выхода РФТ) принимаются равными 0,0 дБ. Поэтому, выходной электрический сигнал РФТ $U_{эл.вых.2}$ (рис. 15) будет отличаться от выходного электрического сигнала ФД $U_{эл.вых.1}$ только отсутствием постоянной составляющей $U_{пс}$ (рис. 14), а амплитуда $U_{эл.вых.2}$ (далее по тексту $V_{эл.вых}$) будет равна $V_{эл.вых}'$ (рис. 14) и будет так же определяться формулой 31.

$$\begin{aligned}
 V_{эл.вых} &= V_{эл.вых}' = \frac{U_{эл.вых.1.макс} - U_{эл.вых.1.мин}}{2} = \\
 &= \frac{0,0034550(\text{В}) - 0,0034225(\text{В})}{2} = 0,00001625(\text{В}) = 0,01625 \text{ мВ}
 \end{aligned}$$

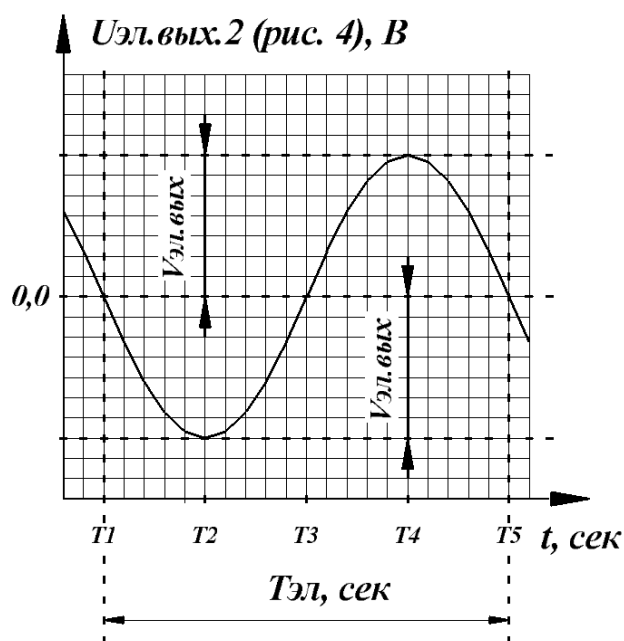


Рис. 15. Графическое изображение качественной временной зависимости $U_{эл.вых.2}$ (рис. 4)

После определения значения $V_{эл.вых}$ можно будет определить значение $Kп.рфт$ при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ (далее по тексту $Kп.рфт.нг$) по формуле 32

$$\begin{aligned}
 Kп.рфт.нг &= 20\lg(V_{эл.вых(мВ)}/V_{эл.вх(мВ)}) = \\
 &= 20\lg(0,01625(мВ)/5(мВ)) = \underline{\underline{-49,762 дБ}}
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

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

Определение $Kп.рфт$ при $F_{эл} = F_{эл.вг}$ (далее по тексту $Kп.рфт.вг$) можно было бы проводить по той же методике, что и определение $Kп.рфт.нг$. Однако, для этого, надо иметь информацию о значениях $U_{п}$ и $P_{ф}$ при $F_{эл} = F_{эл.вг}$. К сожалению, такой информацией мы располагаем только относительно значения $U_{п} = 6,5$ В (Приложение В, Таблица «Technical Specifications», наименование параметра «Drive Voltage V_{pi} », 6.5V Typical @ 10Gb/s), а в Приложении Г значение $P_{ф}$ приведено лишь для случая $F_{эл} = 0,0$ (Таблица «Optical and Electrical Specifications», наименование параметра «Photodiode DC responsivity @ 1550», столбец «Min.», 0,55 A/W).

В такой ситуации $K_{п.рфм.вг}$ можно будет определить только с использованием эмпирической методики. Суть этой методики заключается в следующем.

В Приложении В в Таблице «Technical Specifications» (раздел «Electrical Specifications», подраздел «RF/Bias Port») приведено значение параметра «Electro-optic Bandwidth» - 10GHz Minimum @ -3dB. Эту информацию следует понимать 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 $f_{эл.вг} = 10$ ГГц, $K_{п.рфм}$ снизится на 3 дБ. Эту величину снижения $K_{п.рфм}$ (рис. 4) будем далее обозначать $\Delta K_{п.рфм.ммц}$.

А вклад в снижение $K_{п.рфм}$ (рис. 4) со стороны ФД можно определить следующим образом. В Приложении Г приведён график «Frequency Response» (рис. 16).

Frequency Response

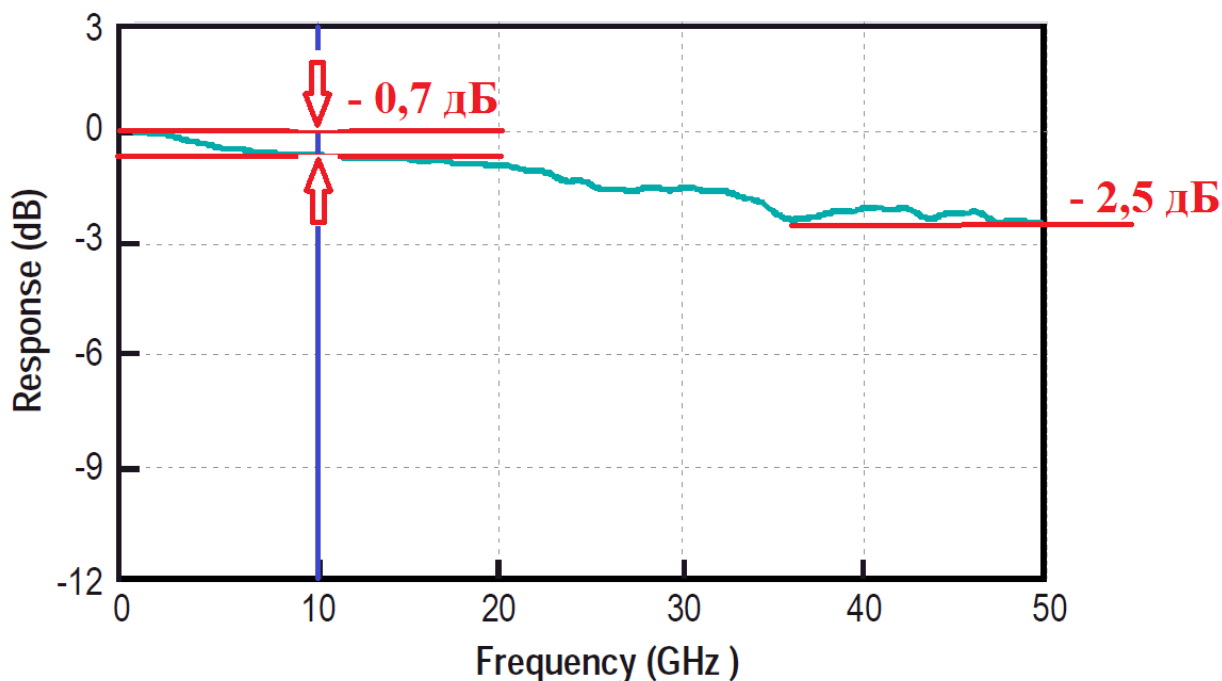


Рис. 16. Частотная зависимость эффективности детектирования ФД

Эту информацию следует понимать следующим образом - если собрать РФТ, состоящий из данного ФД (Приложение Г) и некоего гипотетического - «идеального» - частотнонезависимого ММЦ, то

- при изменении значения $f_{эл}$ от $f_{эл.нг} = 20$ КГц до $f_{эл} = 40 \dots 50$ ГГц $Kп.рфт$ снизится на $\sim 2,5$ дБ,

- а при изменении значения $f_{эл}$ от $f_{эл.нг} = 20$ КГц до $f_{эл.вг} = 10$ ГГц $Kп.рфт$ снизится на $\sim 0,7$ дБ

Это последнее значение снижения $Kп.рфт$ (рис. 4, 16) будем далее обозначать $\Delta Kп.рфт.фд$.

Имея информацию о $\Delta Kп.рфт.ммц$ и $\Delta Kп.рфт.фд$ можно эмпирически вычислить значение $Kп.рфт.вг$ по формуле 33

$$\begin{aligned} Kп.рфт.вг &= Kп.рфт.нг - \Delta Kп.рфт.ммц - \Delta Kп.рфт.фд = \\ &= - 49,762(\text{дБ}) - 3,0(\text{дБ}) - 0,7(\text{дБ}) = \underline{- 53,462(\text{дБ})} \end{aligned} \quad (33)$$

Таким образом, можно предположить, что частотная зависимость $Kп.рфт$ (рис.4) - или амплитудно-частотная характеристика (далее по тексту АЧХ) - будет выглядеть приблизительно так, как это показано на рис. 17.

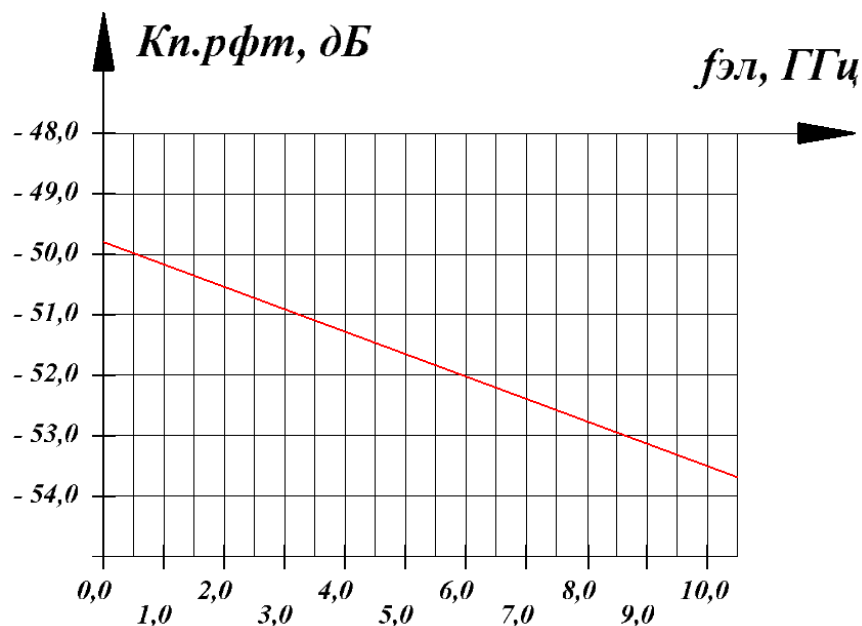


Рис. 17. Ориентировочная АЧХ РФТ (рис. 4)

4.5 Определение верхней границы динамического диапазона РФТ (рис. 4) - или максимального значения $V_{эл.вх}$ входного электрического сигнала $U_{эл.вх.1}$ - при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ и $КНИ = 2\%$.

Определение верхней границы динамического диапазона РФТ (рис. 4) будет проводиться следующим образом.

В [7] - в графическом виде - приведена зависимость КНИ от соотношения амплитуды входного электрического сигнала на коаксиальном электрическом входе ММЦ ([7], рис. 12, $U_{свч.вх}$) и величины $U_{п}$ ММЦ. Эта зависимость приведена на рис. 18.

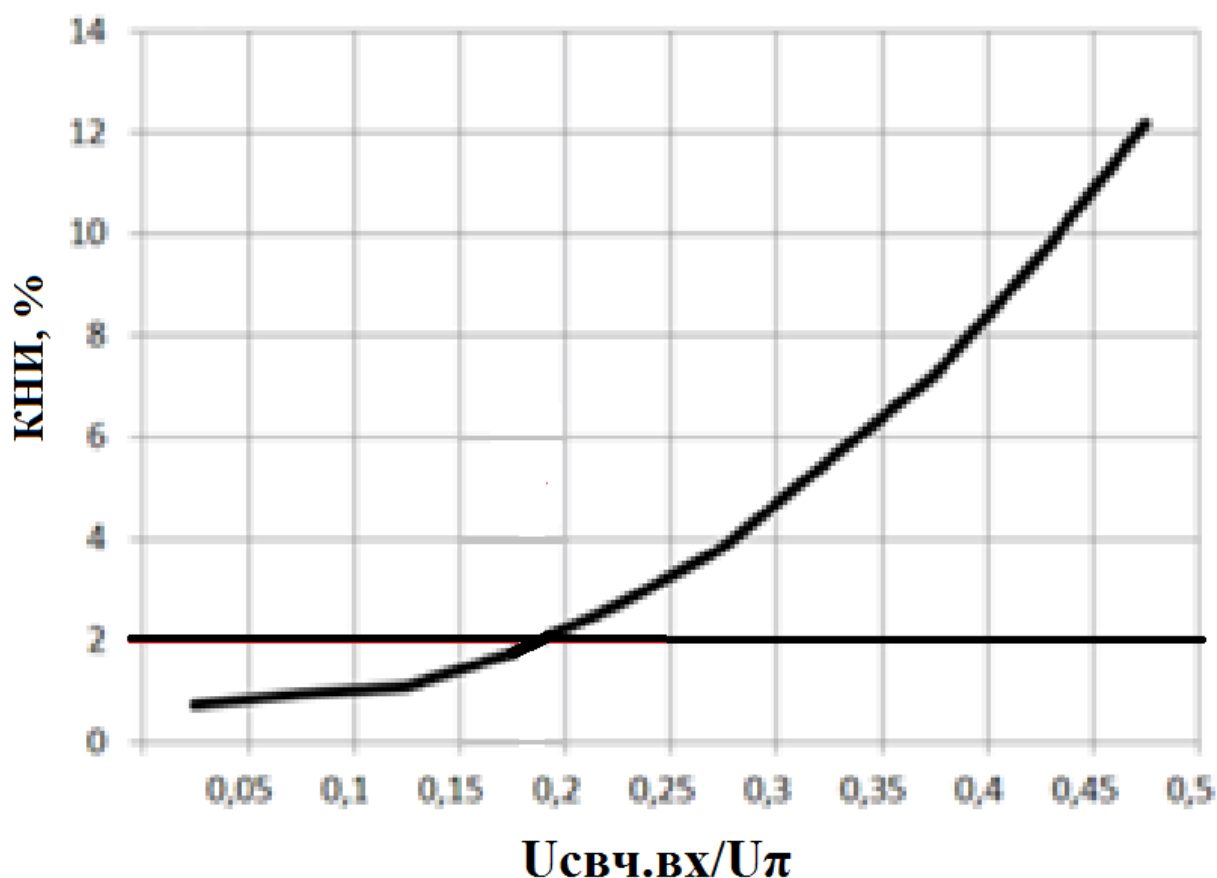


Рис. 18. Зависимость КНИ от соотношения амплитуды входного электрического сигнала на коаксиальном электрическом входе ММЦ ([7], рис. 12, $U_{свч.вх}$) и величины $U_{п}$ ММЦ.

В данном случае, под $U_{свч.вх}$ следует подразумевать $V_{эл.вх}$ (формула 6). Поэтому, рис. 18 можно представить в виде рис. 19

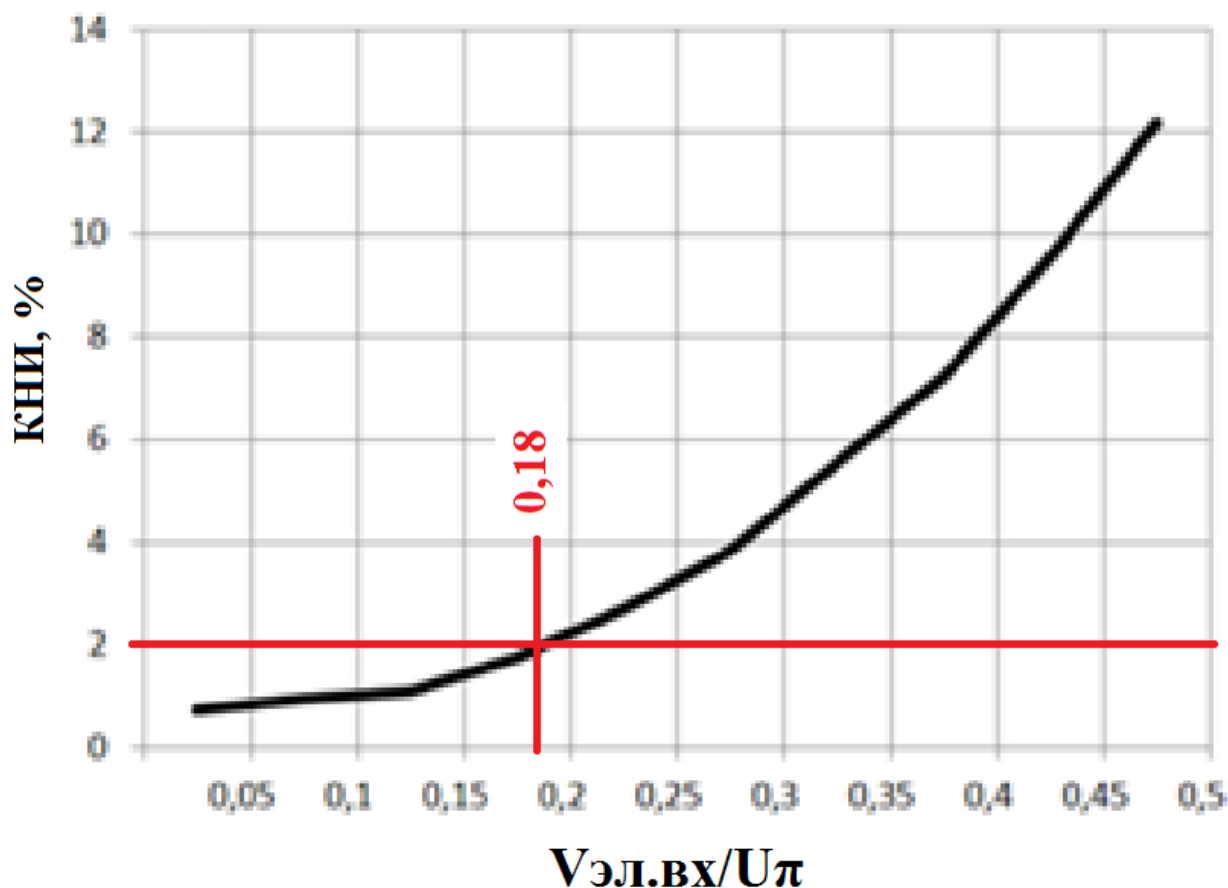


Рис. 19. Зависимость КНИ от соотношения амплитуды входного электрического сигнала на входе РФТ (рис. 4) и величины $U_{п}$ ММЦ.

В соответствии с рис. 19 можно сделать следующий вывод: уровень $K_{НИ} = 2\%$ в РФТ с внешней модуляцией и ММЦ в качестве модулирующего устройства будет иметь место при $V_{эл.вх}/U_{п} \approx 0,18$. Поэтому, максимальная амплитуда $U_{эл.вх.1}$ - или верхняя граница динамического диапазона РФТ (далее по тексту $V_{эл.вх.макс}$) - с данным ММЦ (Приложение В) при $f_{эл} = f_{эл.нг}$ и $K_{НИ} = 2\%$ может быть определена по формул 34

$$V_{эл.вх.макс} = U_{п.нг} \times 0,18 = 3,1(\text{В}) \times 0,18 = 0,558(\text{В}) \quad (34)$$

4.6 Заключение.

В соответствии с ТЗ (Приложение А) была разработана структурная РФТ (рис. 4). Рассчитанные электрические параметры данного РФТ приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты расчётов электрических параметров РФТ (рис. 4)

Наименование параметра	Значение параметра
$f_{эл.нз}$	20 КГц
$f_{эл.вз}$	10 ГГц
$U_{см.ммиц}$ при $f_{эл} = f_{эл.нз}$	1,55 В
$Kп.рфт$ при $f_{эл} = f_{эл.нз}$	- 49,762 дБ
$Kп.рфт$ при $f_{эл} = f_{эл.вз}$	- 53,462 дБ
Верхняя граница динамического диапазона РФТ ($V_{эл.вх.макс}$) при $f_{эл} = f_{эл.нз}$ и $KНИ = 2\%$	0,558 В

4.7 Список литературы (или как там принято это называть в курсовых Политеха?)

[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 (*есть в Интернете на официальном сайте этого журнала*).

[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, IMC)

[4] - www.corning.com

[5] - [ссылка на Лекцию №2 с сайта www.radiophotonics.ru](http://www.radiophotonics.ru)

[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. – [есть на сайте www.radiophotonics.ru](http://www.radiophotonics.ru) в дополнительной литературе

[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. – [есть на сайте www.radiophotonics.ru](http://www.radiophotonics.ru) в дополнительной литературе

Ну и далее приложения - начиная с приложения, начиная с А

