



Открытое акционерное общество  
«Центральное конструкторское бюро автоматики»  
[www.ckba.net](http://www.ckba.net)

*Интегральные  
электро-оптические модуляторы Маха-Цандера  
и другая пассивная компонентная база  
радифотоники*

*Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А.*

Омск - «Компонент - 2014»



Станция предупреждения о радиолокационном облучении (Л-150)

*Основные изделия ОАО «ЦКБА»*



Аппаратура управления и целеуказания

*Основные изделия ОАО «ЦКБА»*



Л-112Э

*Основные изделия ОАО «ЦКБА»*

*Наши изделия это*



*Сверхширокополосные приёмники*

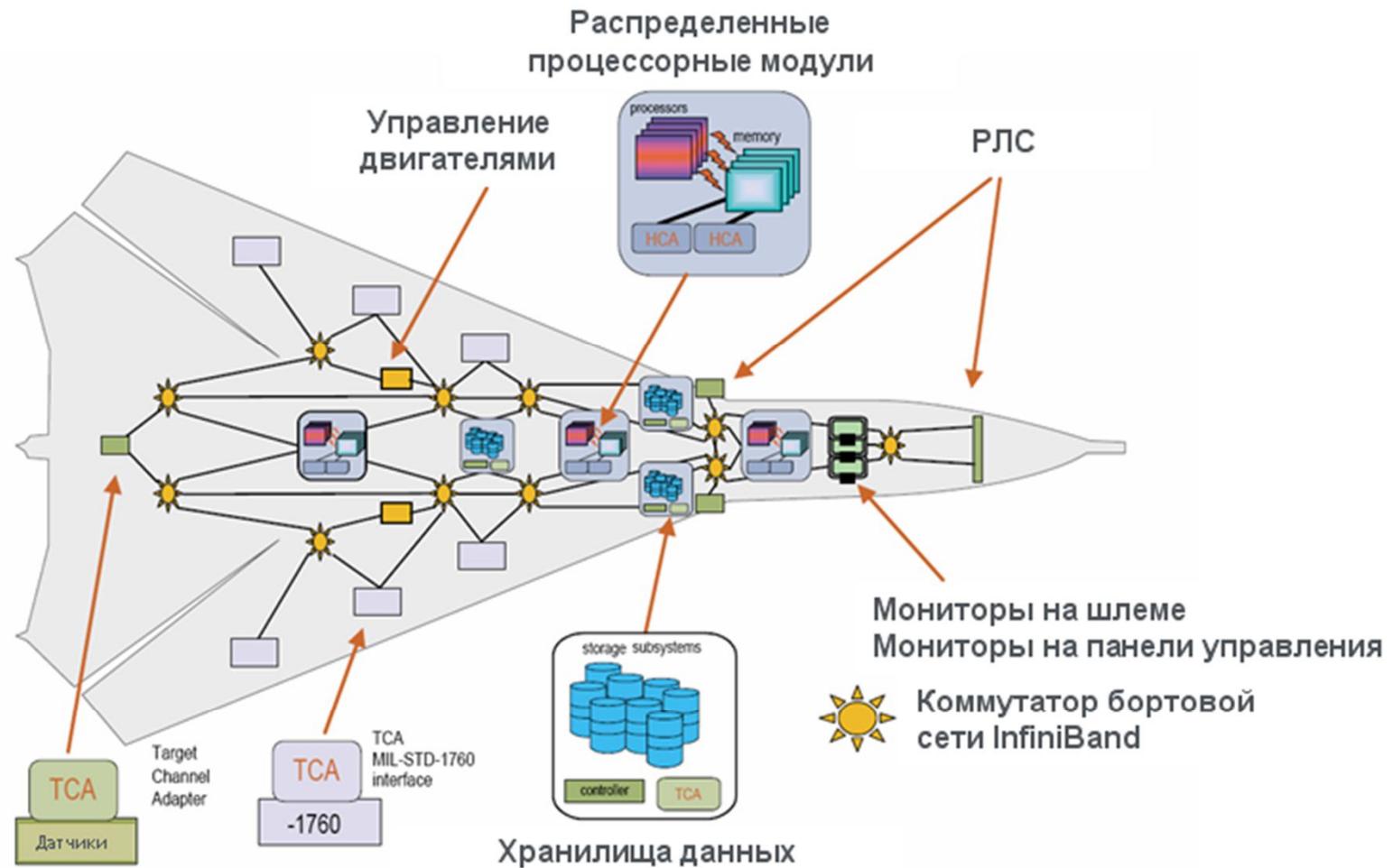
*- дециметрового*

*- сантиметрового,*

*- миллиметрового*

*диапазонов длин волн*

# “Полёт на свете”



## Взаимодействия уровня «подсистема-подсистема»

*“полет на свете” - следующий этап после “полета на проводах”*

# *Волоконно-оптические линии связи*

*- цифровые*

*- аналоговые*

## Определение микроволновой фотоники (MWP)

[ru.wikipedia.org/wiki](http://ru.wikipedia.org/wiki)

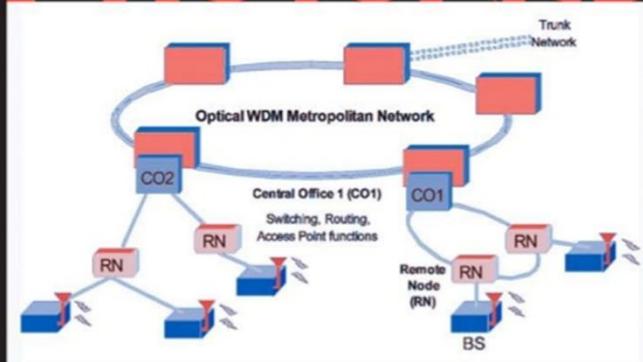
**Микроволновая фотоника изучает взаимодействие**

- между оптическим сигналом
- и высокочастотным (больше 1 ГГц) электрическим сигналом.

**Эта область включает**

- основы оптико-микроволнового взаимодействия,
- работу фотонных устройств на СВЧ,
- фотонный контроль СВЧ устройств и линий высокочастотной передачи,
- использование фотоники для выполнения различных функций в микроволновых схемах

# MICROWAVE PHOTONICS



Edited by  
**Chi H. Lee**



 **CRC Press**  
Taylor & Francis Group



# Microwave Photonic Links

*Components and Circuits*

**Christian Rumelhard**  
**Catherine Algani**  
**Anne-Laure Billabert**

 **ISTE**

 **WILEY**



2013 IEEE International Topical Meeting on

## Microwave Photonics (MWP)

October 28 - 31, 2013  
Alexandria, Virginia, USA

[Home](#)

[Participation](#)

[Program](#)

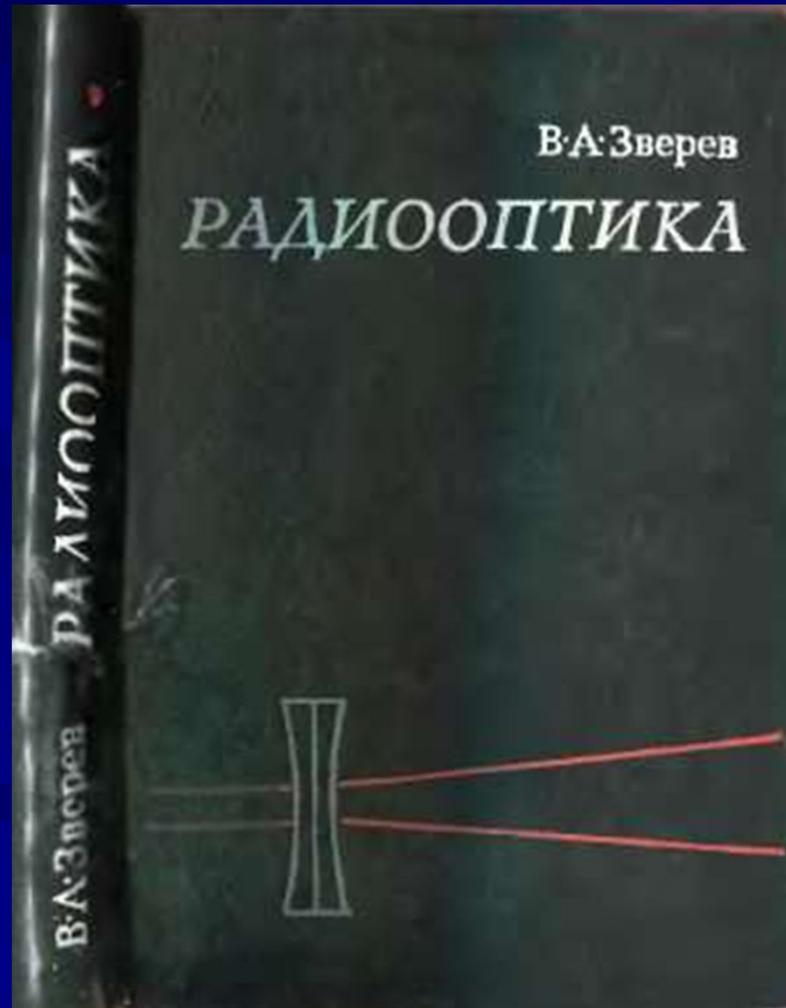
[General Information / Accommodations](#)

[Organizers](#)

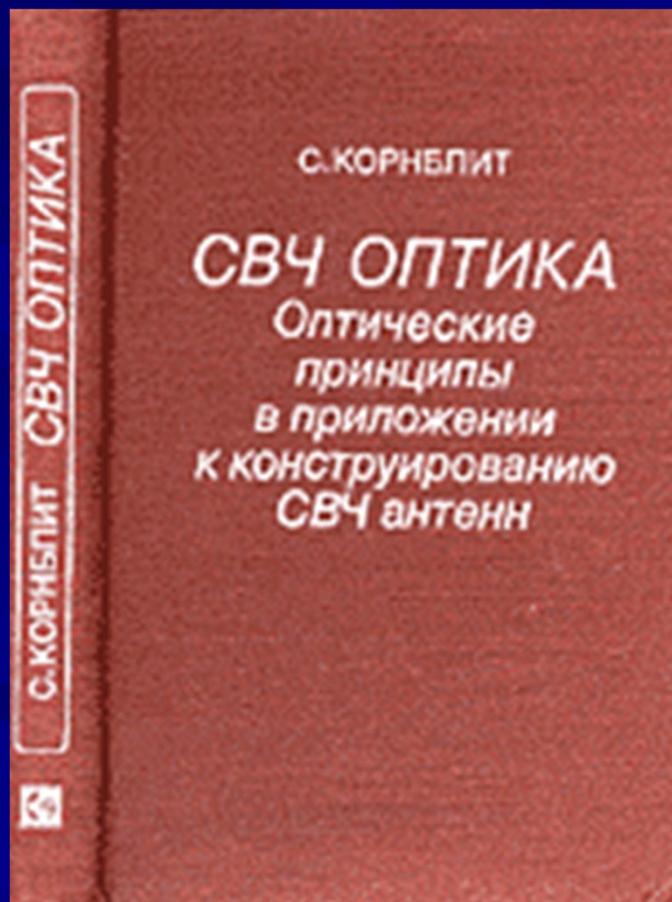
[Exhibits](#)

**Microwave Photonics (MWP)** is an inter-disciplinary field of study that concerns the interactions between microwave and optical waves for the generation, processing, control and distribution of microwave, millimeter-wave and THz-frequency signals. Microwave photonics serves as an enabling technology in a wide variety of applications such as signal generation and distribution, high-speed wireless communication networks, radar systems, sensors, and modern instrumentation. The 2013 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2013) will provide a forum for the presentation of new advances in this multi-disciplinary research area, ranging from novel devices to system field trials.

*Зверев В.А. Радиооптика. Преобразование сигналов в радио и оптике.- М.: Сов. Радио, 1975 г.*



***Корнблит С. СВЧ оптика. Оптические  
принципы в приложении к конструированию  
СВЧ антенн: Пер. с англ./Под. ред. О. П.  
Фролова.- М.: Связь, 1980.-360 с., ил.***



**Санкт-Петербургский Национальный  
Исследовательский университет  
информационных технологий, механики и  
ОПТИКИ**

**Кафедра оптики квантоворазмерных систем**

**ЛАБОРАТОРИЯ РАДИОФОТОНИКИ**

**[www.faculty.ifmo.ru/oks/radiofotonika](http://www.faculty.ifmo.ru/oks/radiofotonika)**

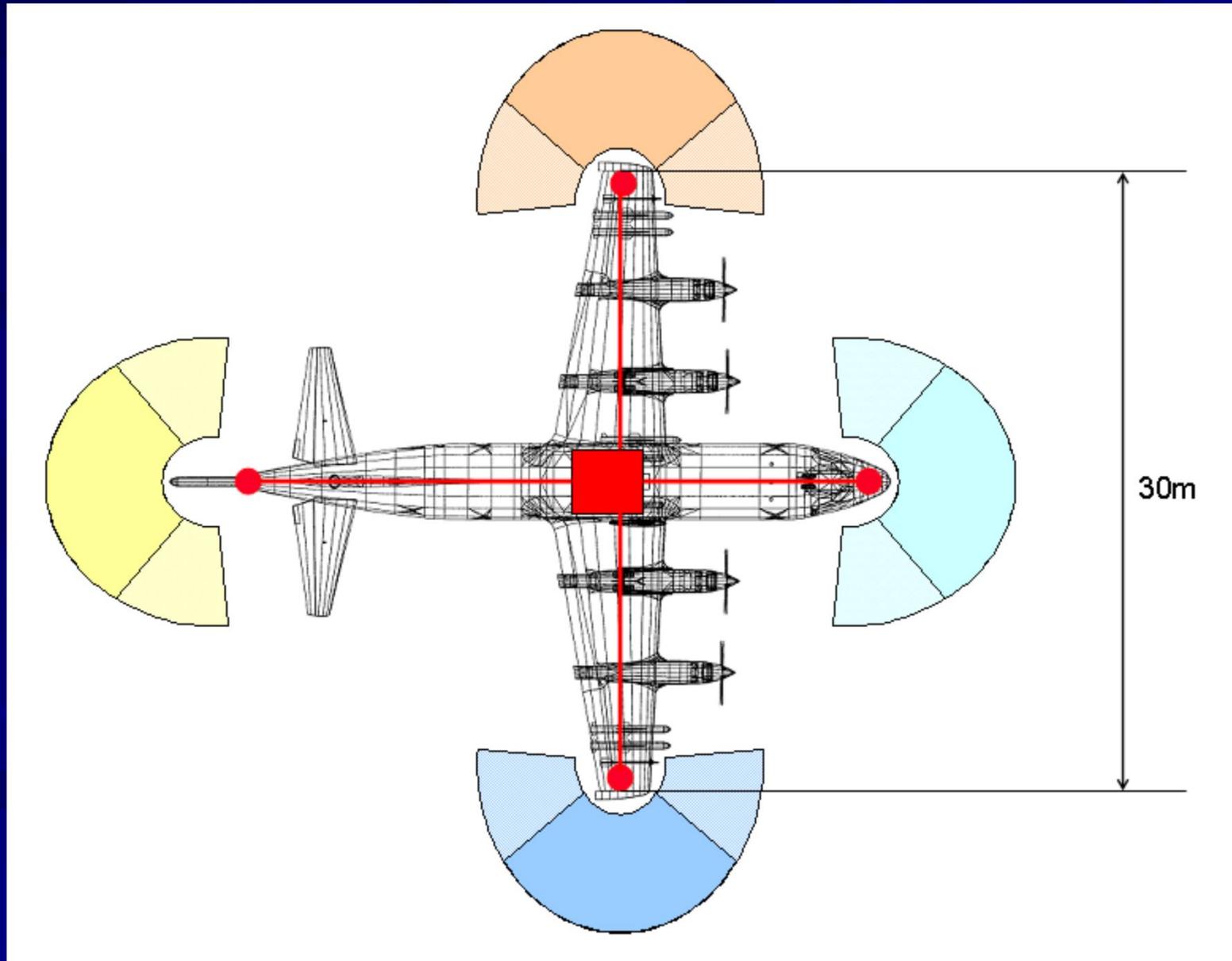
**Министерство  
промышленности и торговли РФ**

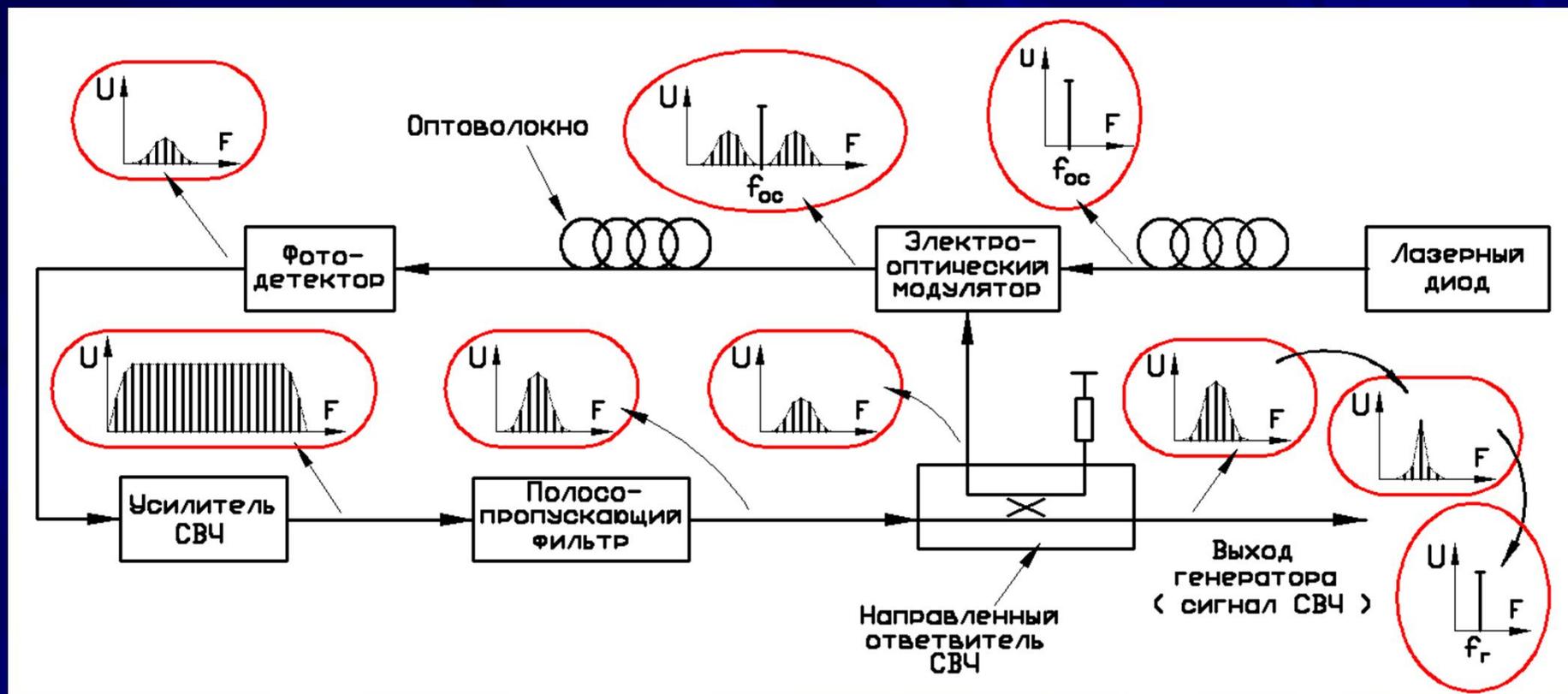
**Концепция  
программы развития радиофотоники  
на 2015 - 2020 годы**

# *Сверхширокополосная измерительная система (ОКР “Резонанс”)*



## *Размещение выносных антенных постов на “большом самолёте”*





**Схема структурная  
радиофотонного автогенератора диапазона СВЧ**

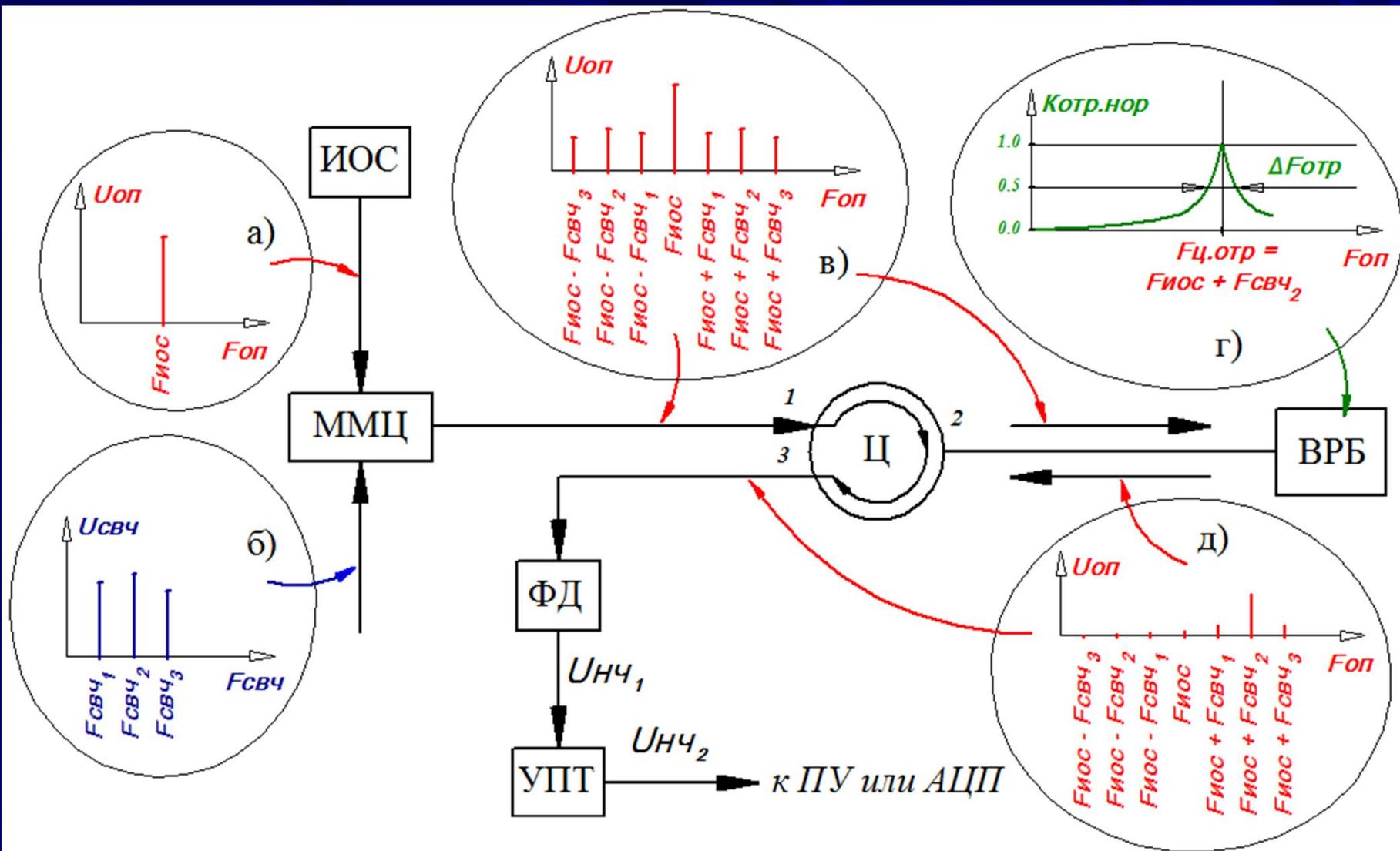


Схема простейшего одноканального радиофотонного МИЧ  
 (АЦП - аналогово-цифровой преобразователь, ВРБ - волоконная решётка Брега,  
 ИОС - источник оптического сигнала, ММЦ - модулятор Маха - Цандера,  
 ПУ - пороговое устройство, УПТ - усилитель постоянного тока,  
 ФД - фотодетектор, Ц - циркулятор)

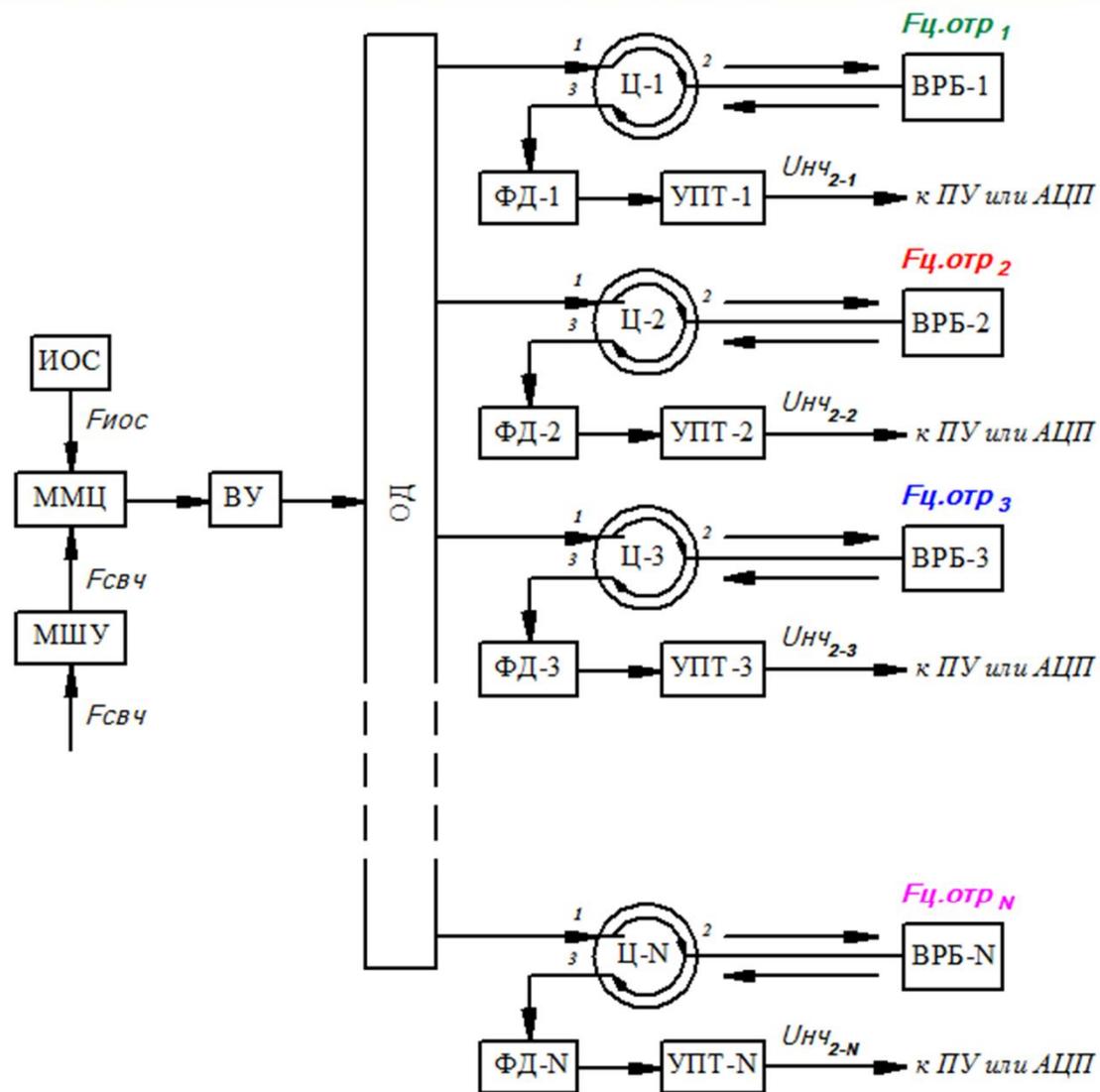
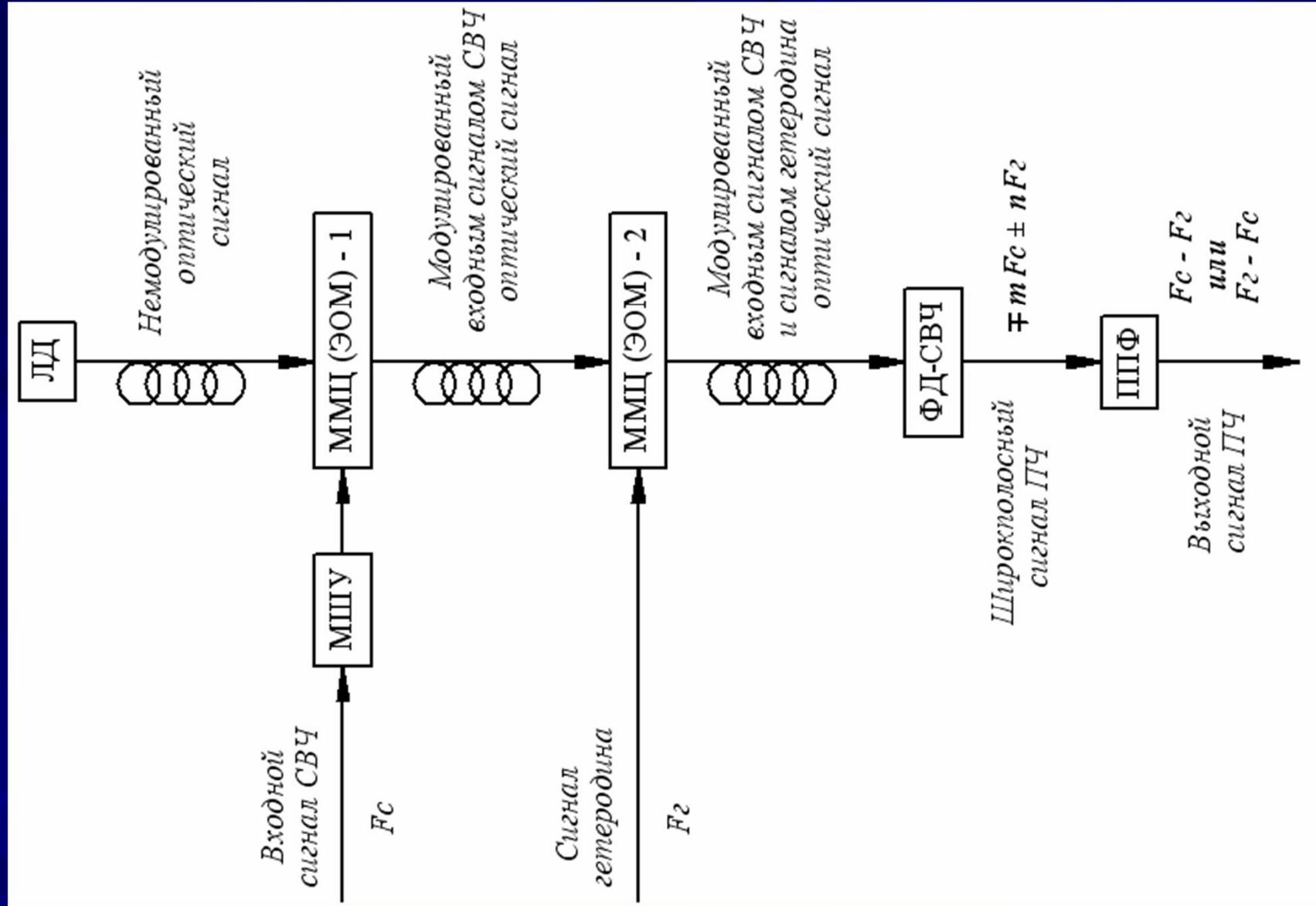
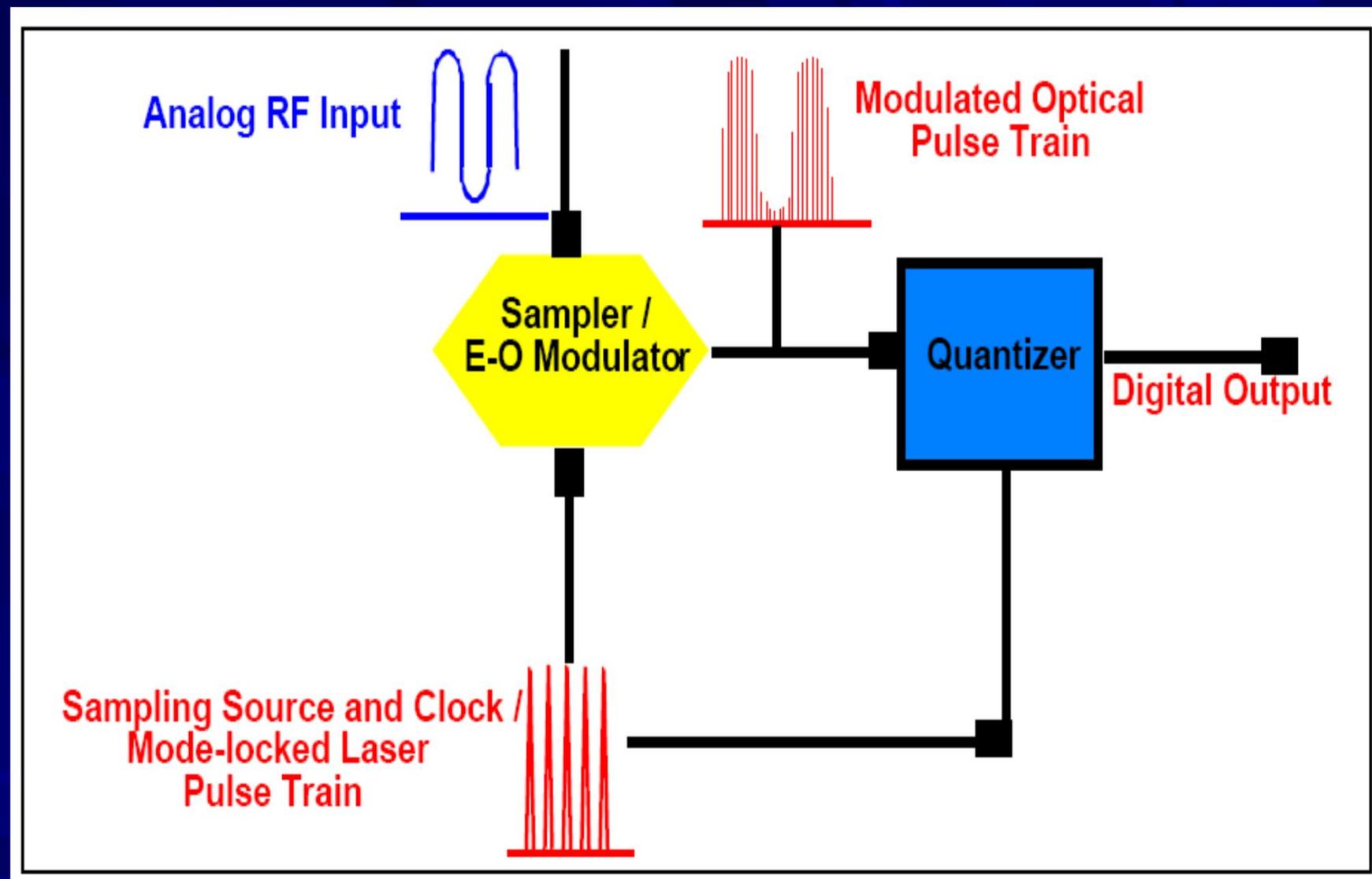


Рис.3. Схема многоканального радиофотонного МИЧ

(АЦП - аналогово-цифровой преобразователь, ВРБ-1 - ВРБ-N - волоконные решётки Брэгга, ИОС - источник оптического сигнала, ММЦ - модулятор Маха - Цандера, ОД - оптический делитель, ПУ - пороговое устройство, УПТ - усилитель постоянного тока, ФД-1 - ФД-N - фотодетекторы, Ц-1 - Ц-N - циркуляторы)



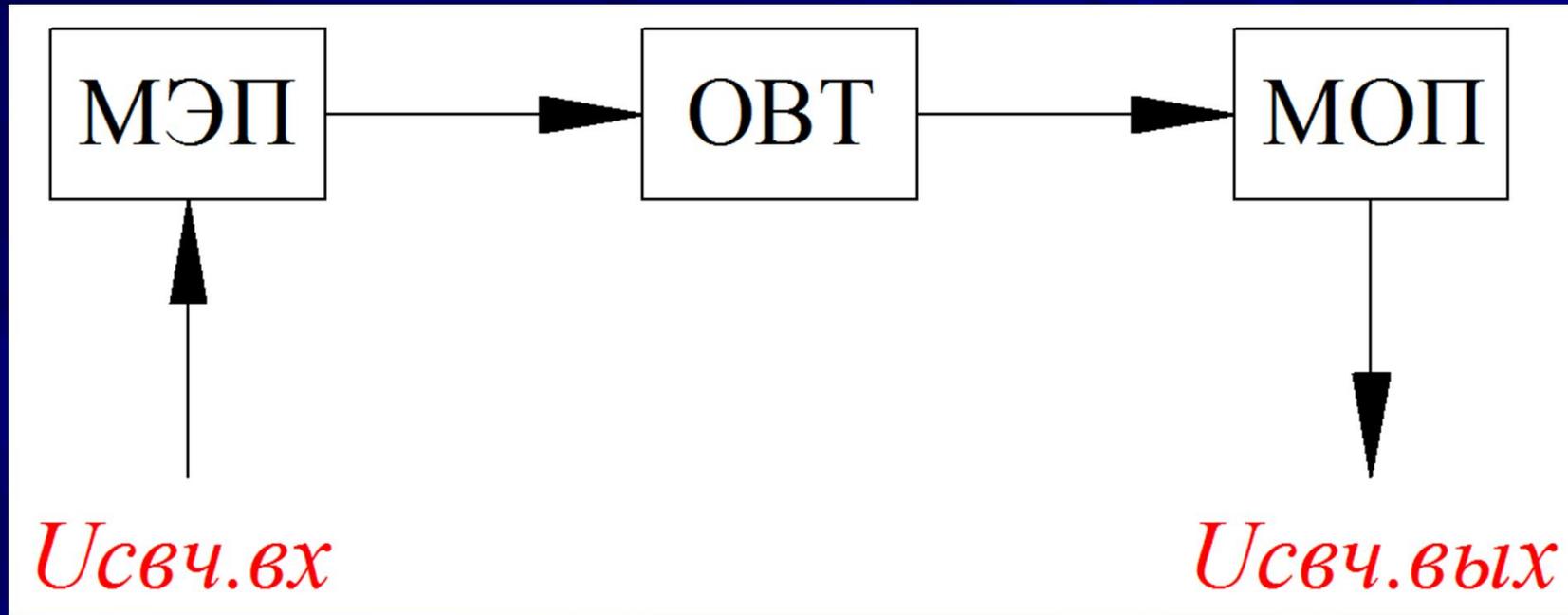
**Схема структурная радиофотонного преобразователя частоты диапазона СВЧ**



*Схема структурная радиофотонного АЦП*

*Радиофотонный тракт -  
это  
ключевой элемент  
всех радифотонных устройств*

## Укрупнённая схема аналогового РФТ СВЧ



*МЭП - модуль электро-оптического преобразования*

*ОВТ - оптоволоконный тракт*

*МОП - модуль опто-электронного преобразования*

*Выражаем благодарность сотрудникам*

*Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН*

*www.ioffe.ru*

*Пермской*

*Научно-Производственной Приборостроительной*

*Компании*

*www.ppk.perm.ru*

*Пермского государственного*

*национального исследовательского университета*

*www.psu.ru*

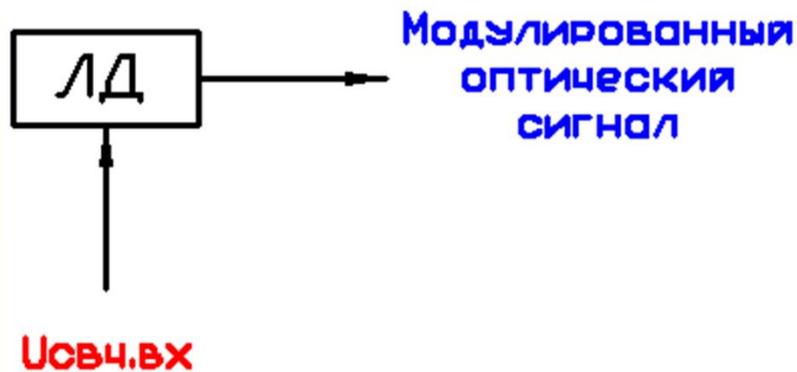
*Омского Государственного Университета*

*им. Ф.М. Достоевского*

*www.omsu.ru*

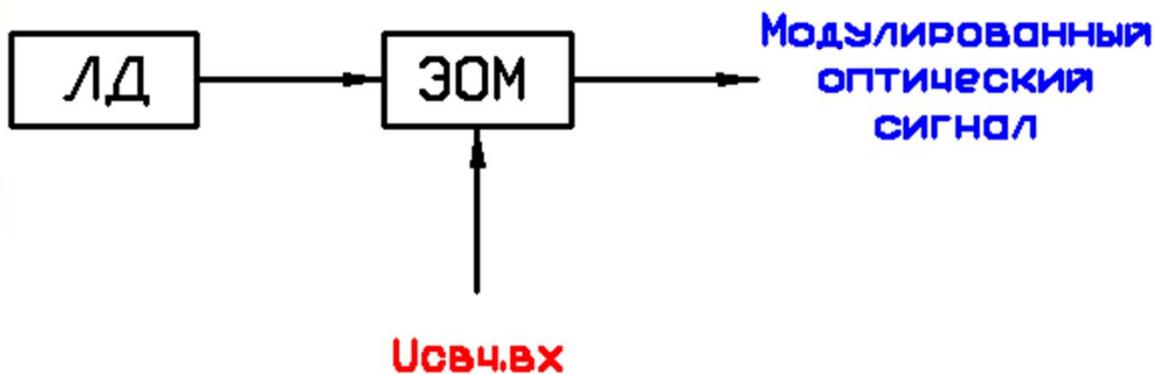
## Модули электро-оптического преобразования с прямой и внешней модуляцией

А - Прямая модуляция



ЛД - лазерный диод  
ЗОМ - электр-оптический  
модулятор

Б - Внешняя модуляция



# Типы электро-оптических модуляторов

*Электро-поглощающие модуляторы*

+

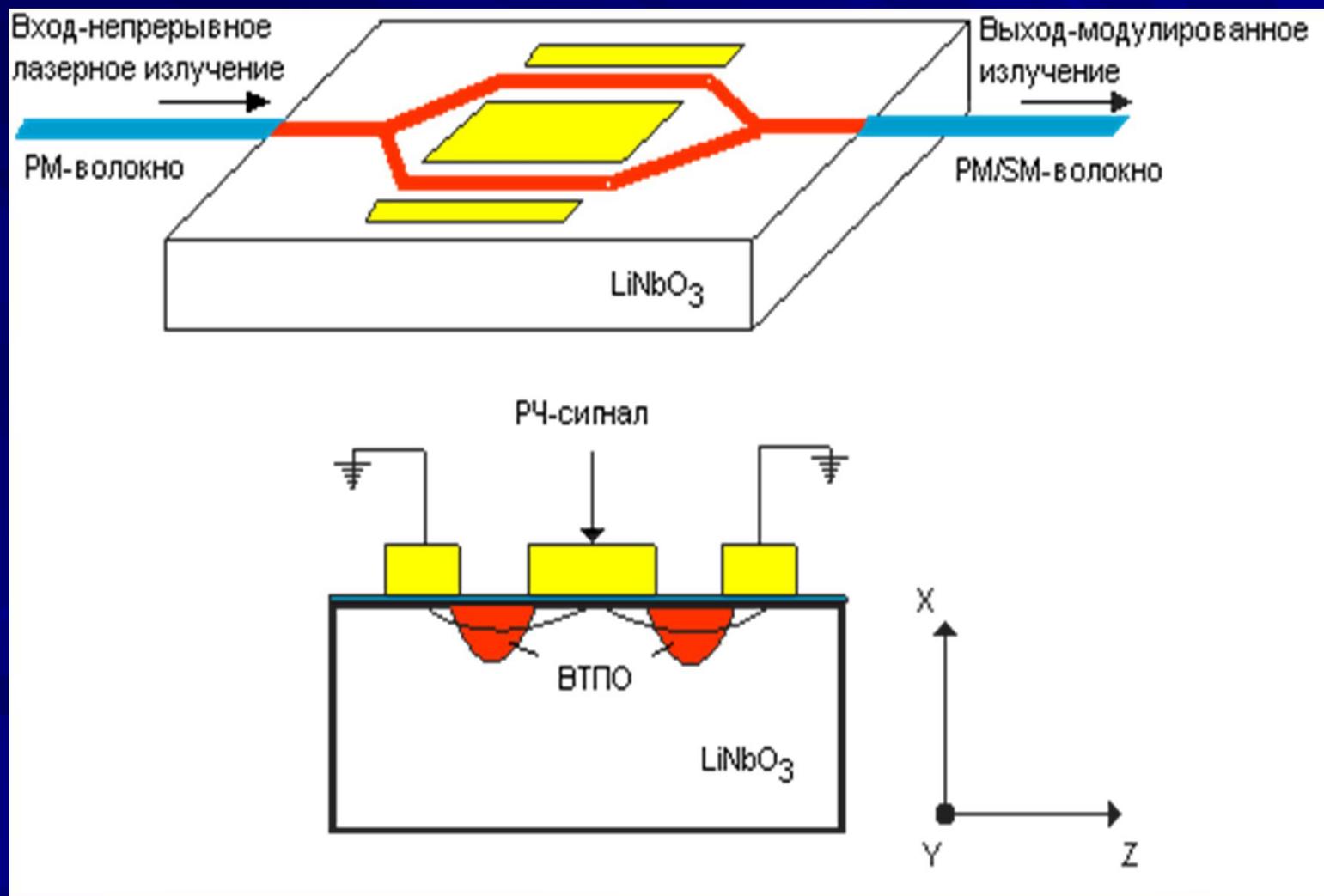
*Эффект Келдыша-Франца*

*Интерферометры Маха-Цандера*

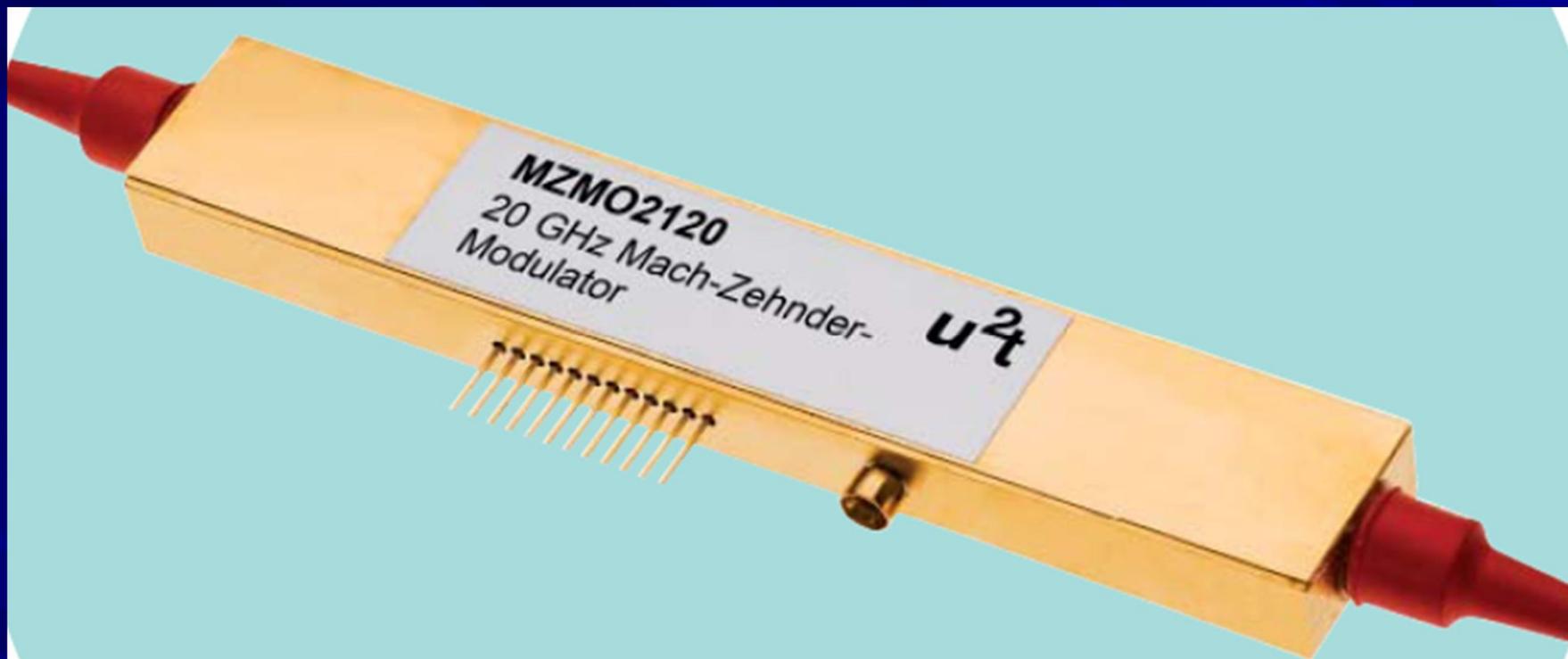
+

*Эффект Поккельса*

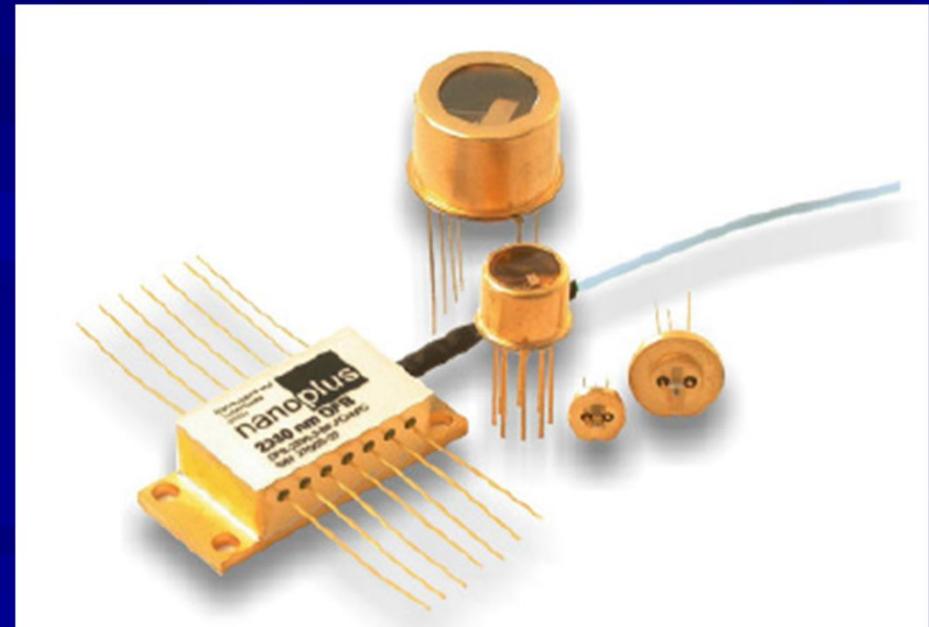
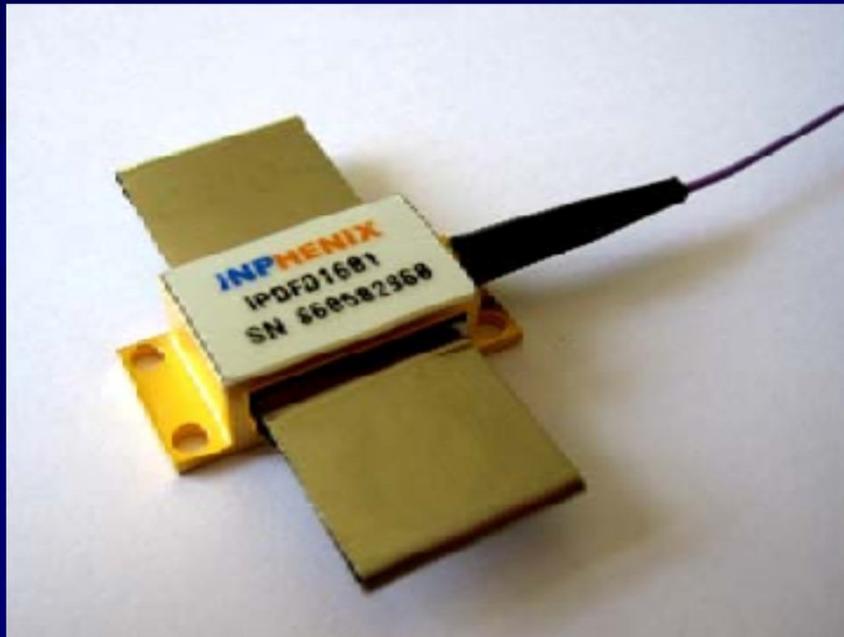
**Модулятор Маха-Цандера**  
**(Mach Zehnder modulator - MZM)**  
**в планарном исполнении**



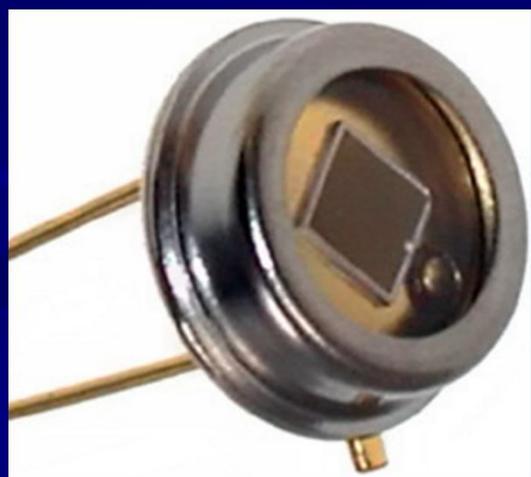
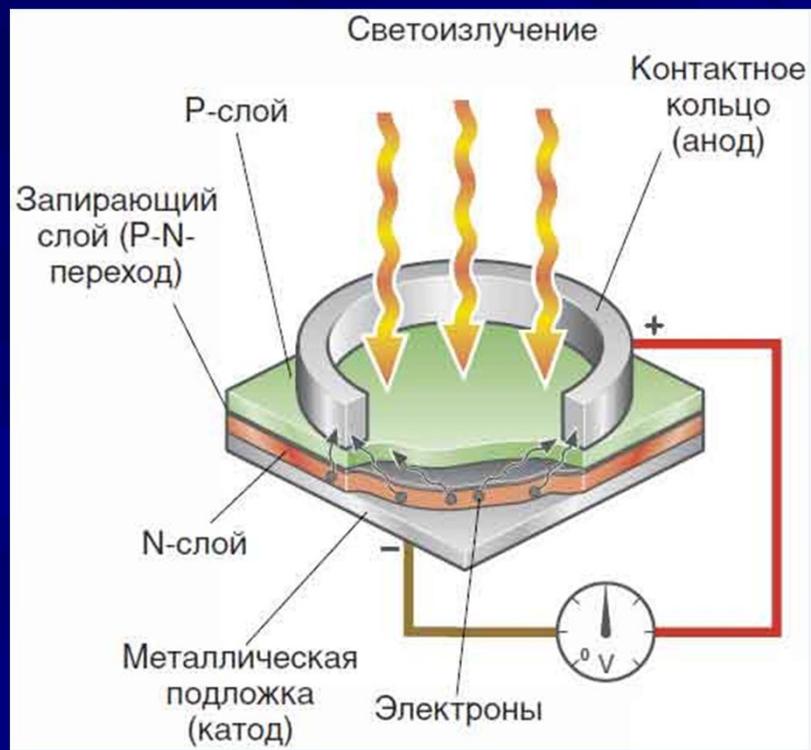
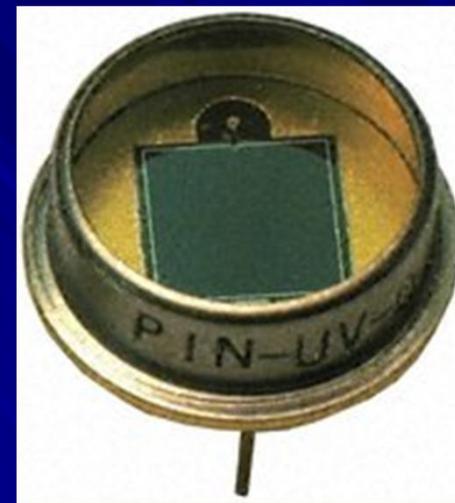
*Модулятор Маха-Цандера*  
( *Mach Zehnder modulator - MZM* )  
*в виде герметизированной гибридной интегральной схемы*  
( *технология system-on-package* )



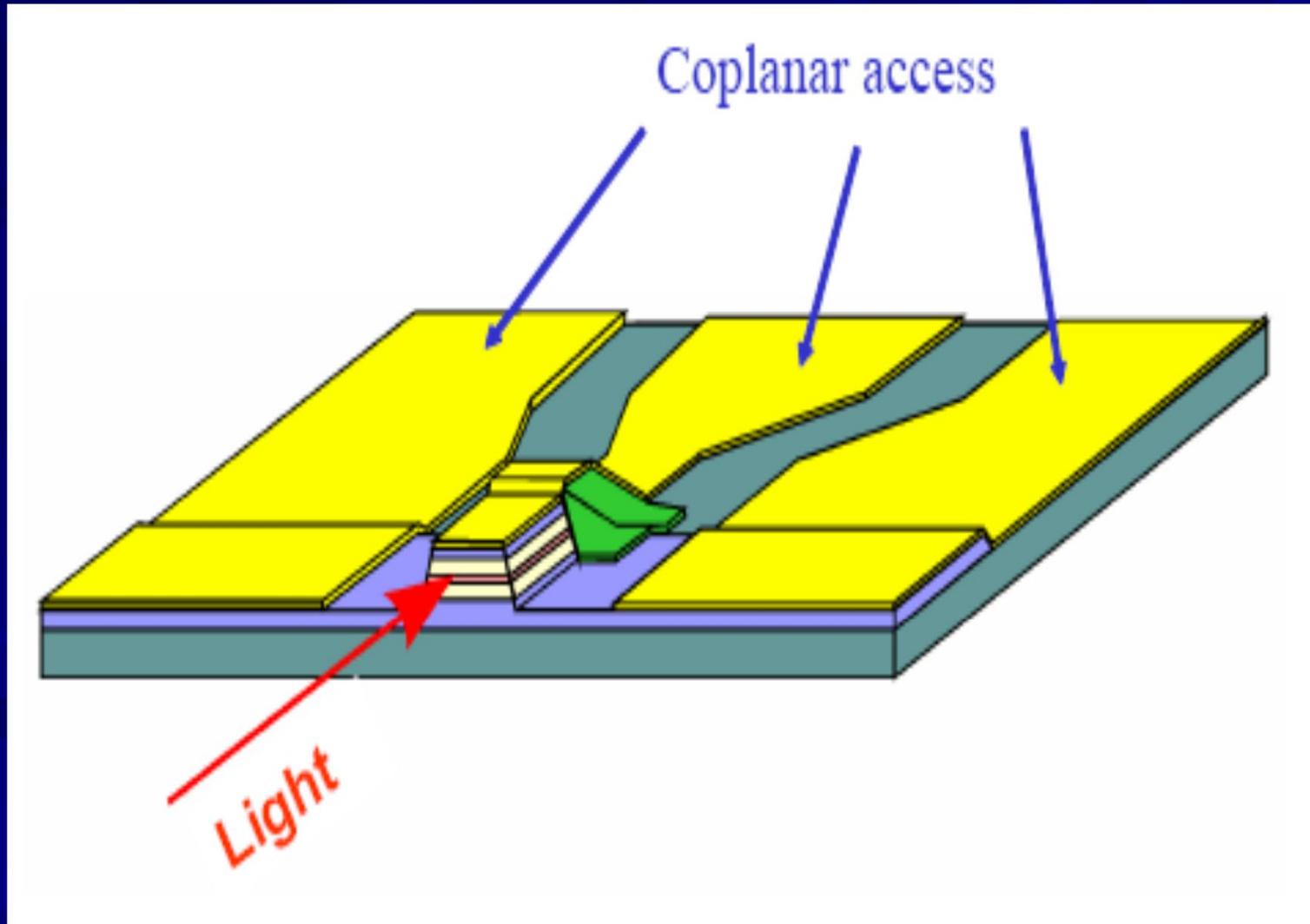
Гибридные интегральные схемы  
полупроводниковых лазеров  
( технология *system-on-package* )



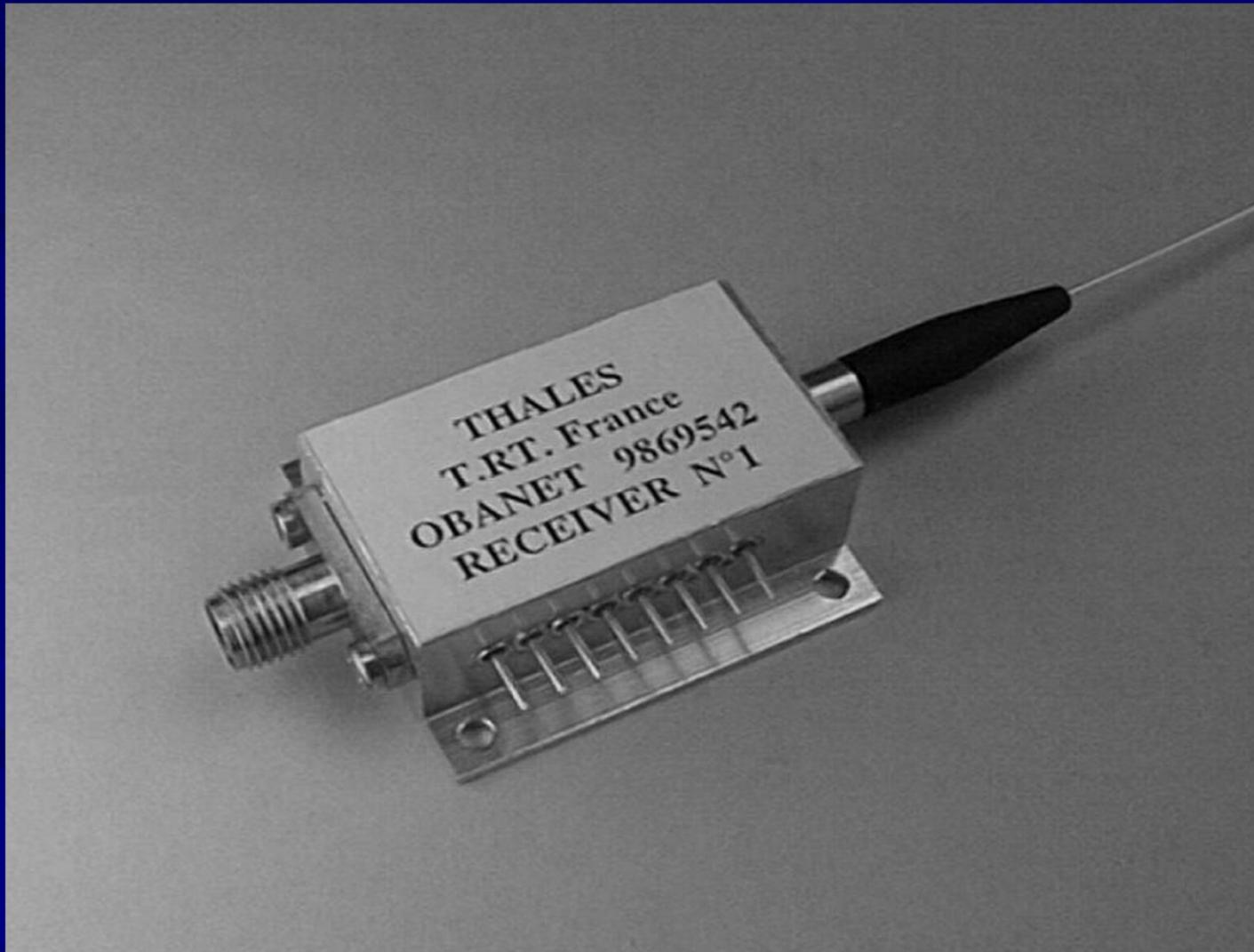
# НЧ - фотодиоды



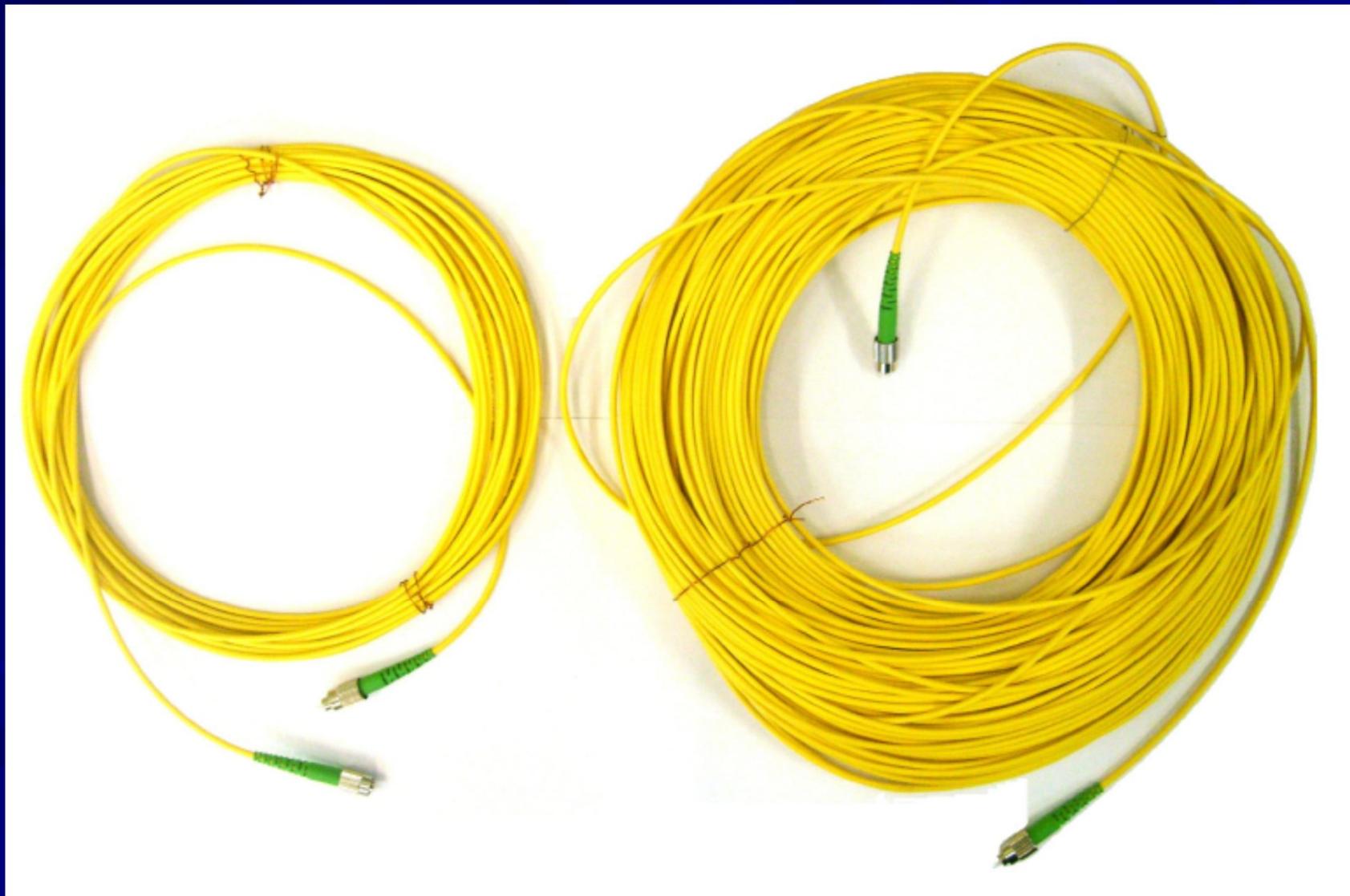
Фотодетектор в виде  
гибридной интегральной схемы с полосковым выходом  
( технология system-on-package )



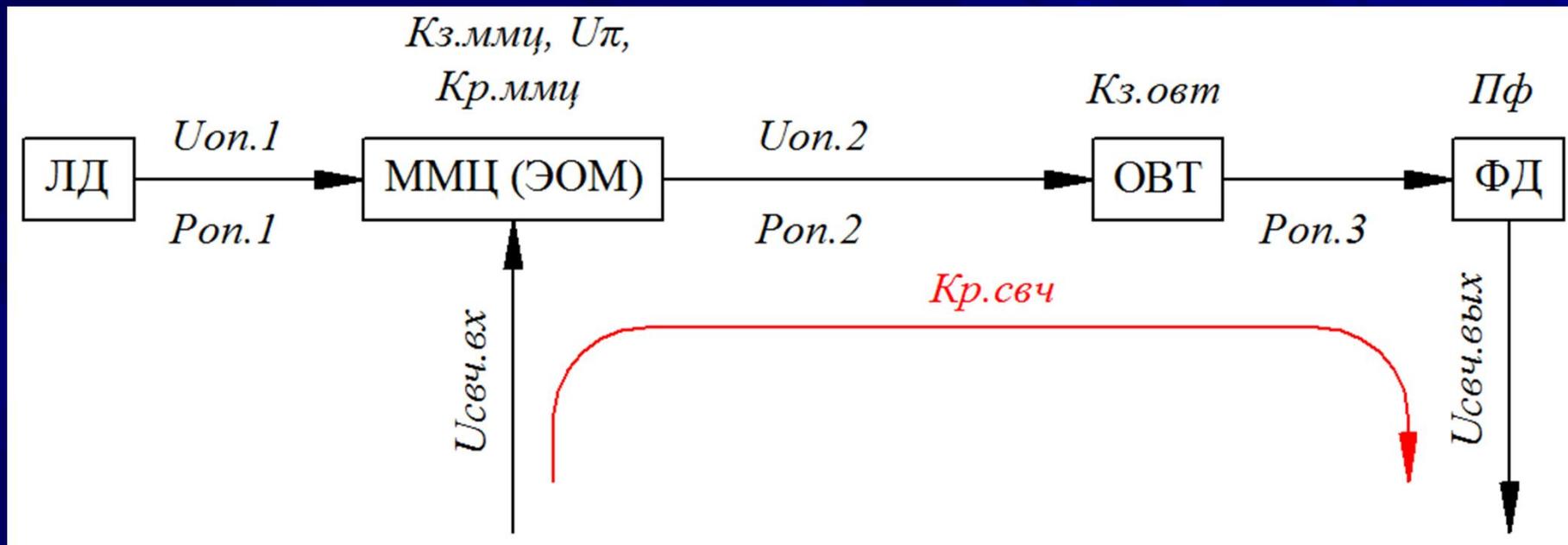
*Фотодетектор в виде  
гибридной интегральной схемы с коаксиальным выходом  
( технология system-on-package )*



# Опто-волоконный кабель



## Схема аналогового РФТ СВЧ



*ЛД - лазерный диод,*

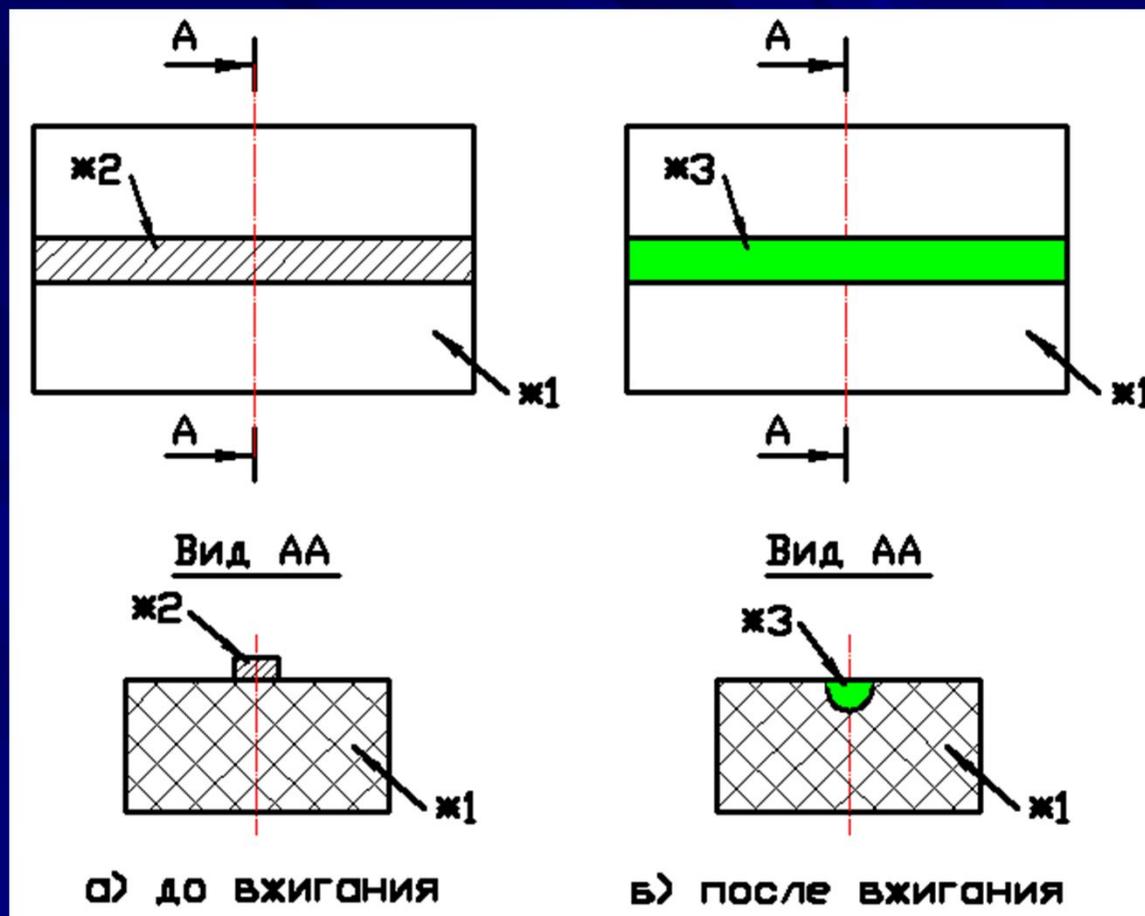
*ММЦ - модулятор Маха-Цандера,*

*ОВТ - оптоволоконный тракт,*

*ФД - фотодетектор,*

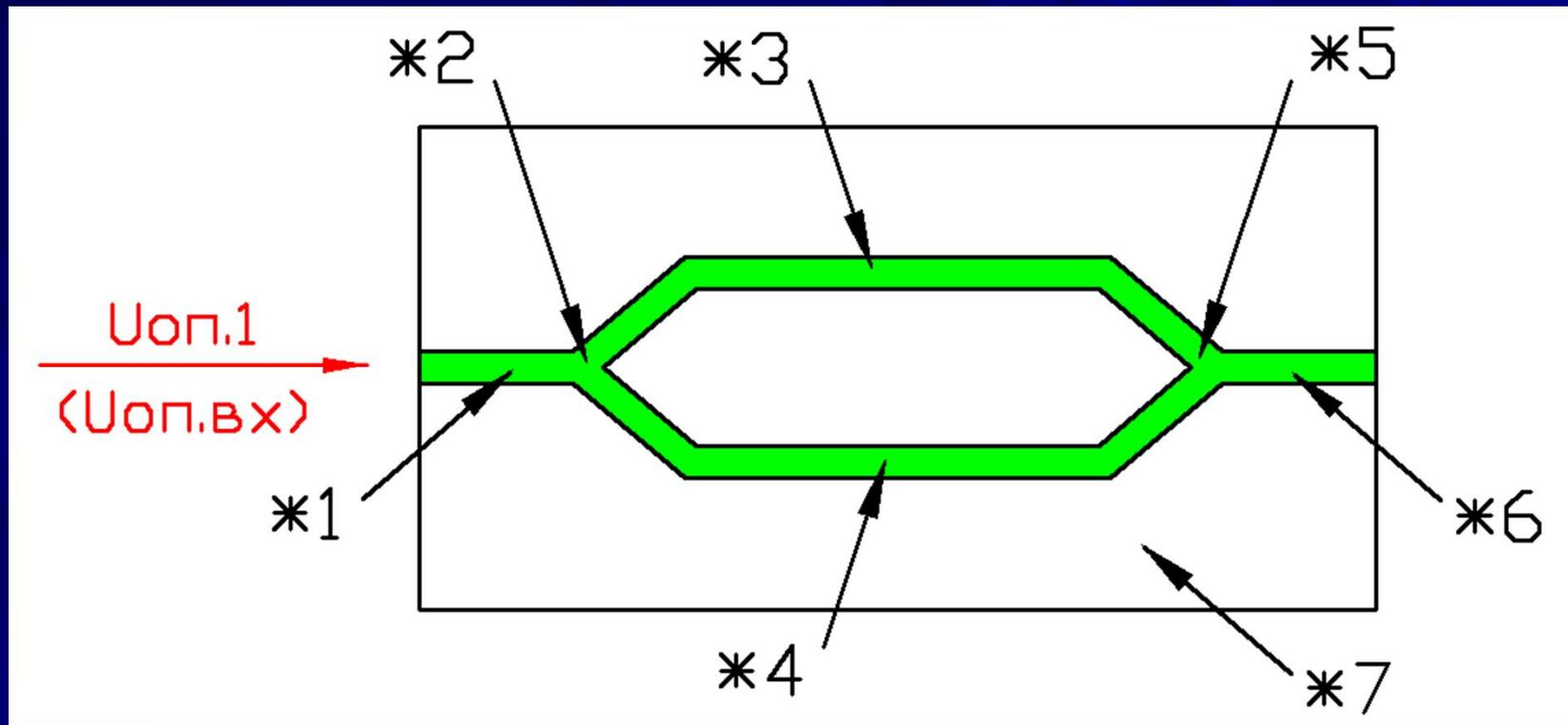
*ЭОМ - электрооптический модулятор*

## Формирование световодных каналов



*1 - пластина из ниобата лития,  
2 - напылённая полоска из титана,  
3 - световодный канал.*

## Структура световодных каналов модулятора Маха-Цандера



*\*1 - входной световодный канал*

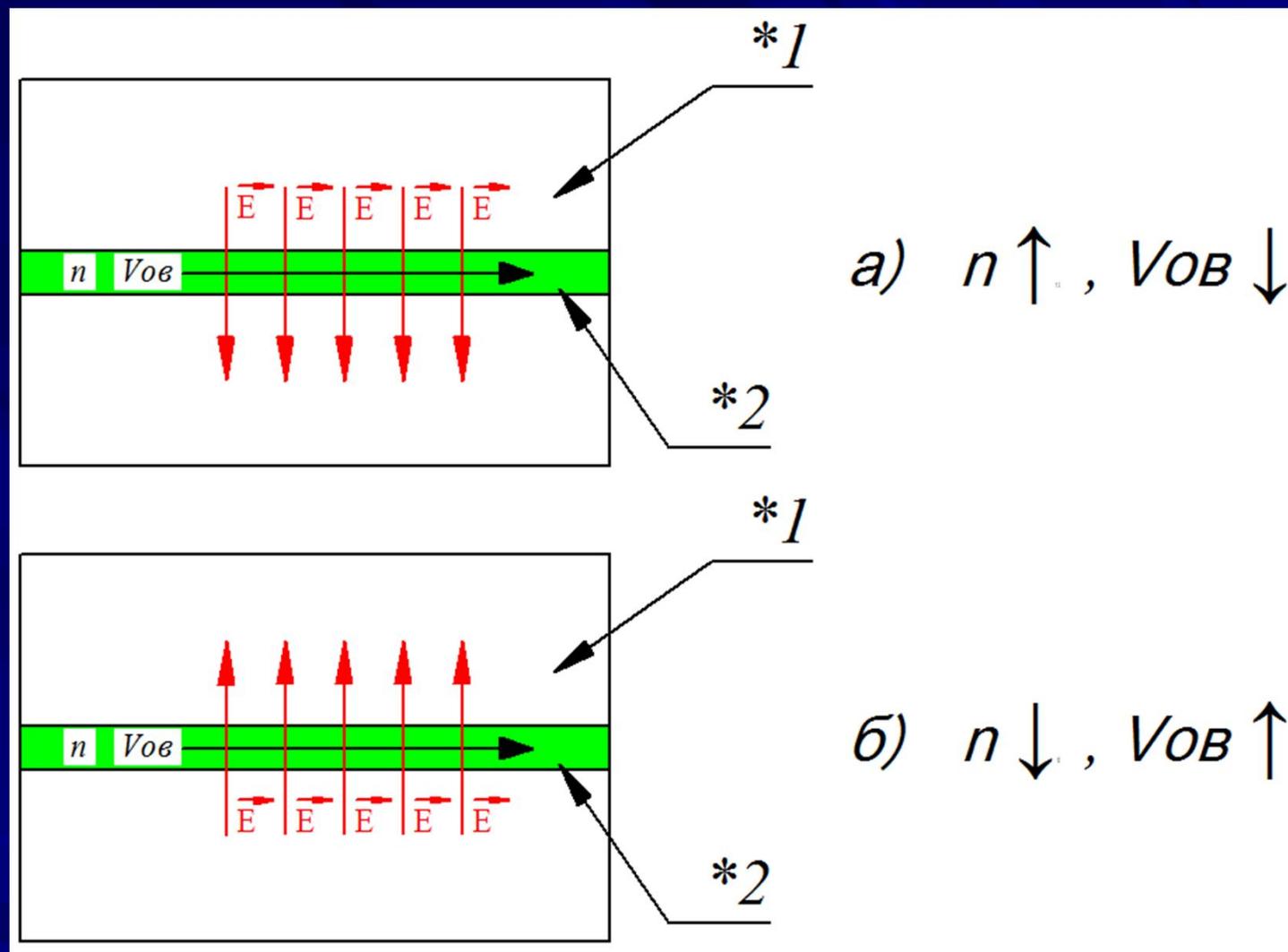
*\*2 - входной Y-разветвитель*

*\*3, \*4 - первый и второй параллельные световодные каналы*

*\*5 - выходной Y-светвитель*

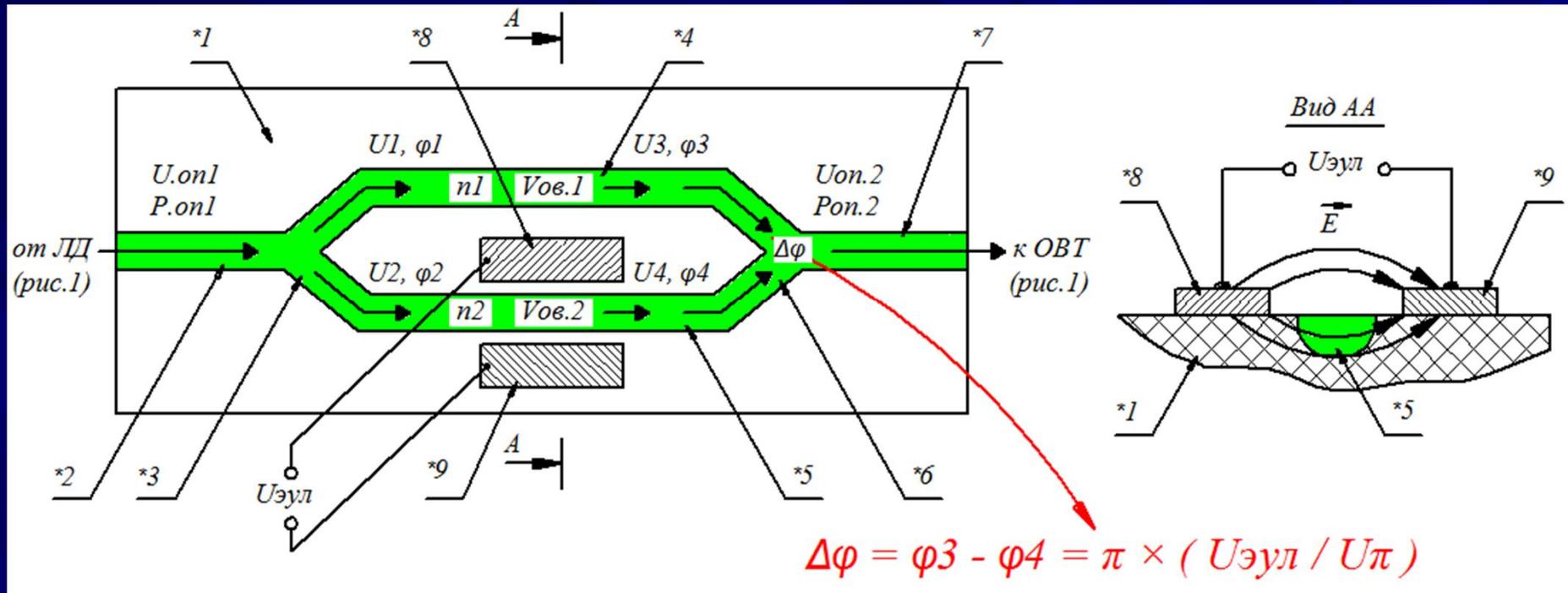
*\*6 - выходной световодный канал*

## Эффект Поккельса



- 1 - пластина из ниобата лития**
- 2 - световодный канал**

## Физическая реализация эффекта Погкельса в ММЦ



*\*1 - пластина из сегнетоэлектрика*

*\*2 - входной световодный канал*

*\*3 - входной Y-разветвитель*

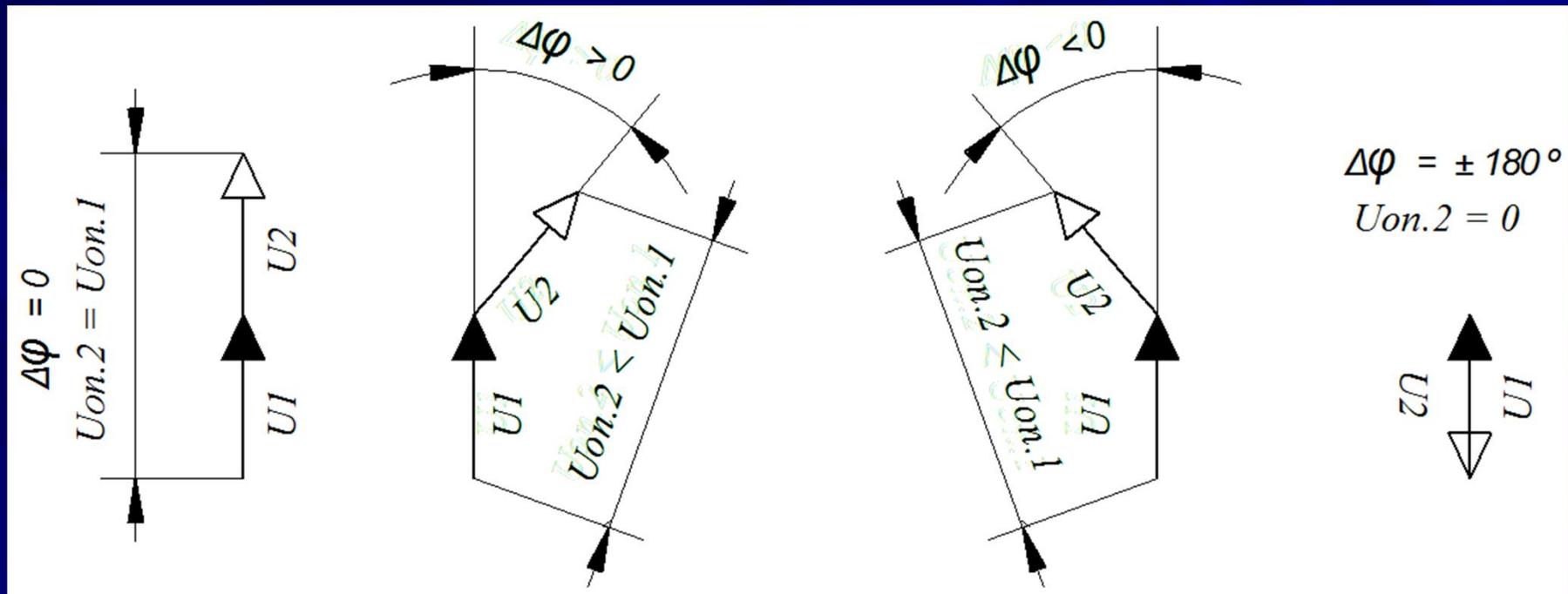
*\*4, \*5 - первый и второй параллельные световодные каналы*

*\*6 - выходной Y-светвитель*

*\*7- выходной световодный канал*

*\*8, \*9 - первый и второй электроды управляющей линии СВЧ*

Векторные диаграммы на выходе модулятора  
при  $U_{\text{эул}} = 0$  и при  $U_{\text{эул}} \neq 0$   
для случая отсутствия потерь в оптических трактах ММЦ



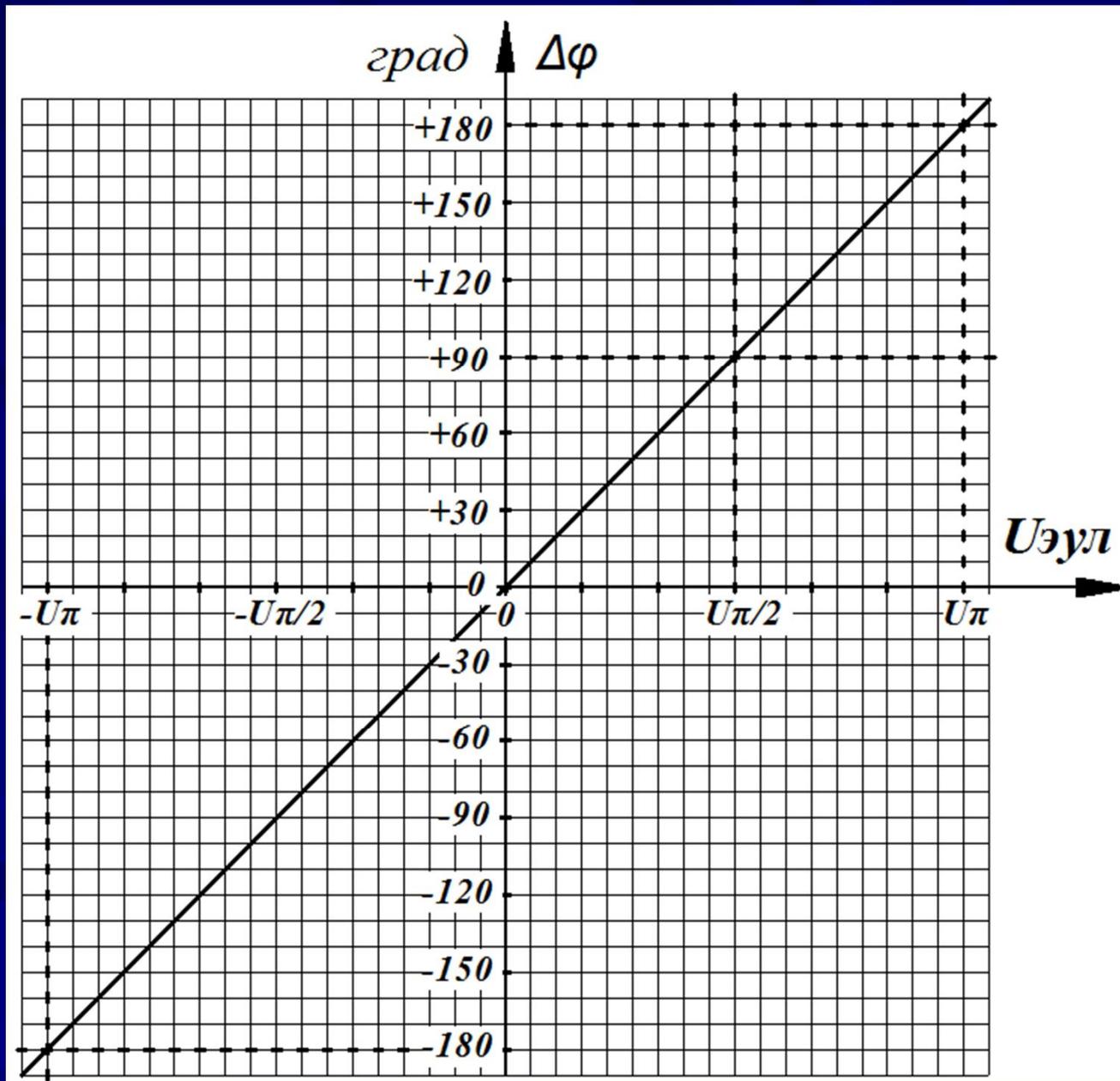
$U_{\text{эул}} = 0$

$0 < U_{\text{эул}} < U_\pi$

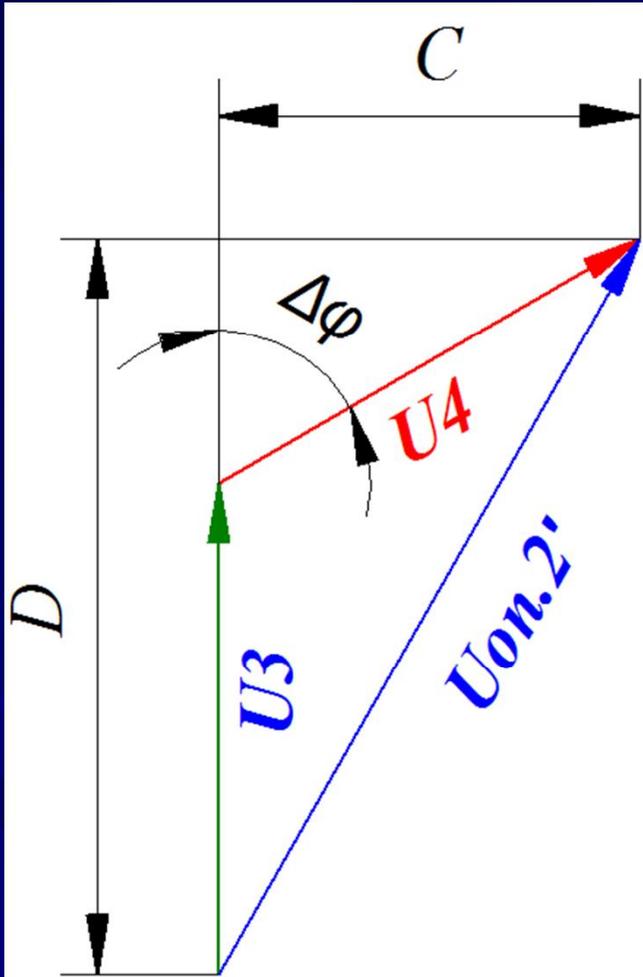
$-U_\pi < U_{\text{эул}} < 0$

$U_{\text{эул}} = \pm U_\pi$

## Зависимость $\Delta\varphi$ от $U_{\text{эул}}$



Определение зависимости  $U_{оп.2}$  от  $U_{эул}$   
для случая отсутствия потерь в оптических трактах  
ММЦ ( $U_{оп.2'}$ )



$$U_{оп.2'} = \sqrt{C^2 + D^2}$$

$$C = U_4 \times \sin(\Delta\varphi)$$

$$D = U_3 + U_4 \times \cos(\Delta\varphi)$$

$$U_3 = U_4 = \frac{U_{оп.1}}{2}$$

$$\Delta\varphi = 180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi})$$

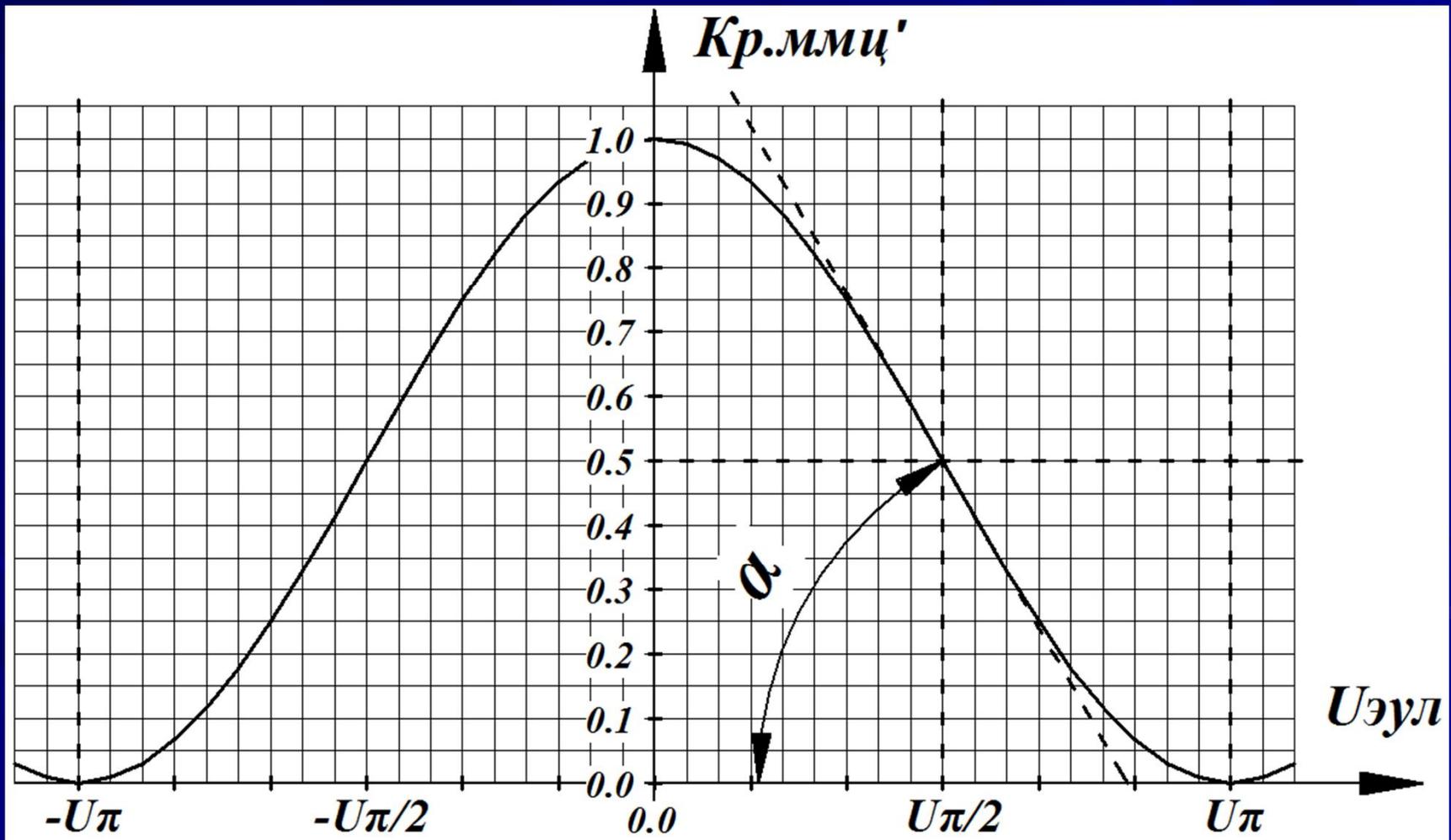
$$U_{оп.2'} = \sqrt{(U_{оп.1})^2 \times \frac{1 + \cos(180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi}))}{2}}$$

Определение зависимости  $K_{и.ммиц}$  и  $K_{р.ммиц}$  от  $U_{эул}$   
для случая отсутствия потерь в оптических трактах  
 $ММЦ$  ( $K_{и.ммиц}'$  и  $K_{р.ммиц}'$ )

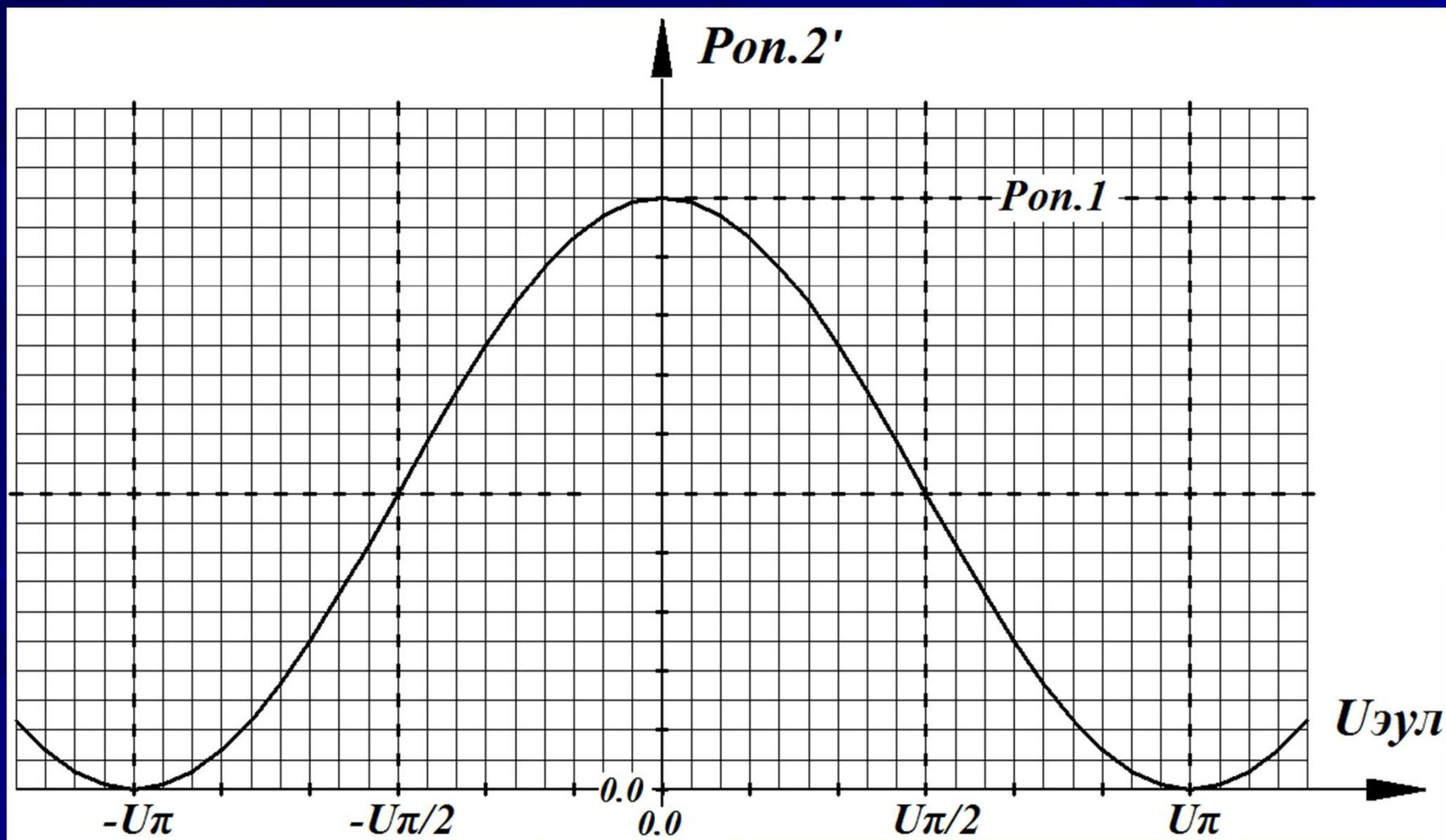
$$K_{и. ММЦ}' = \frac{U_{оп. 2'}}{U_{оп. 1}} = \sqrt{\frac{1 + \cos(180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi}))}{2}}$$

$$K_{р. ММЦ}' = (K_{и. ММЦ}')^2 = \frac{1 + \cos(180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi}))}{2}$$

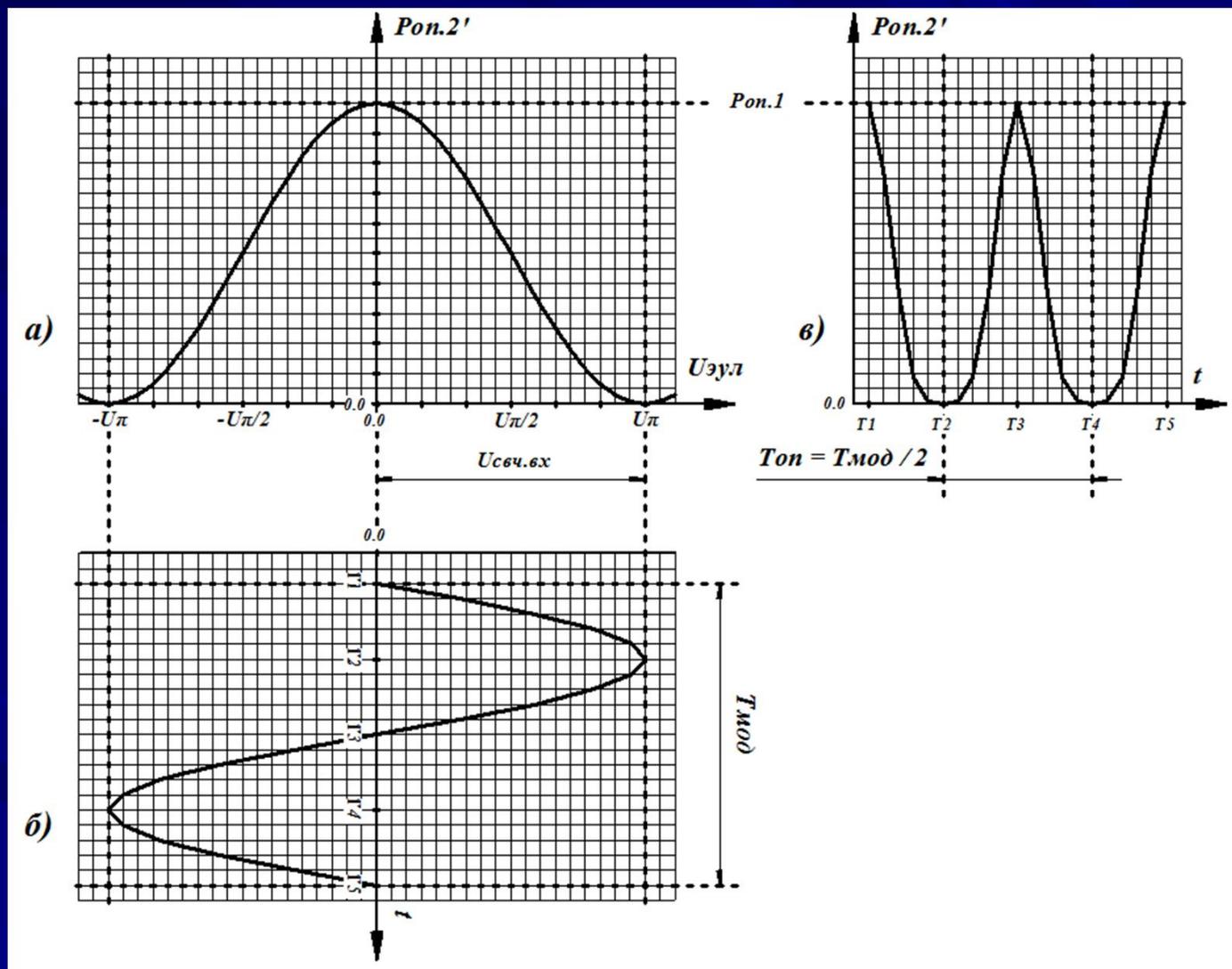
Графическая зависимость  $K_{р.ммиц}$  от  $U_{эул}$   
для случая отсутствия потерь в оптических трактах  
ММЦ ( $K_{р.ммиц}'$ )



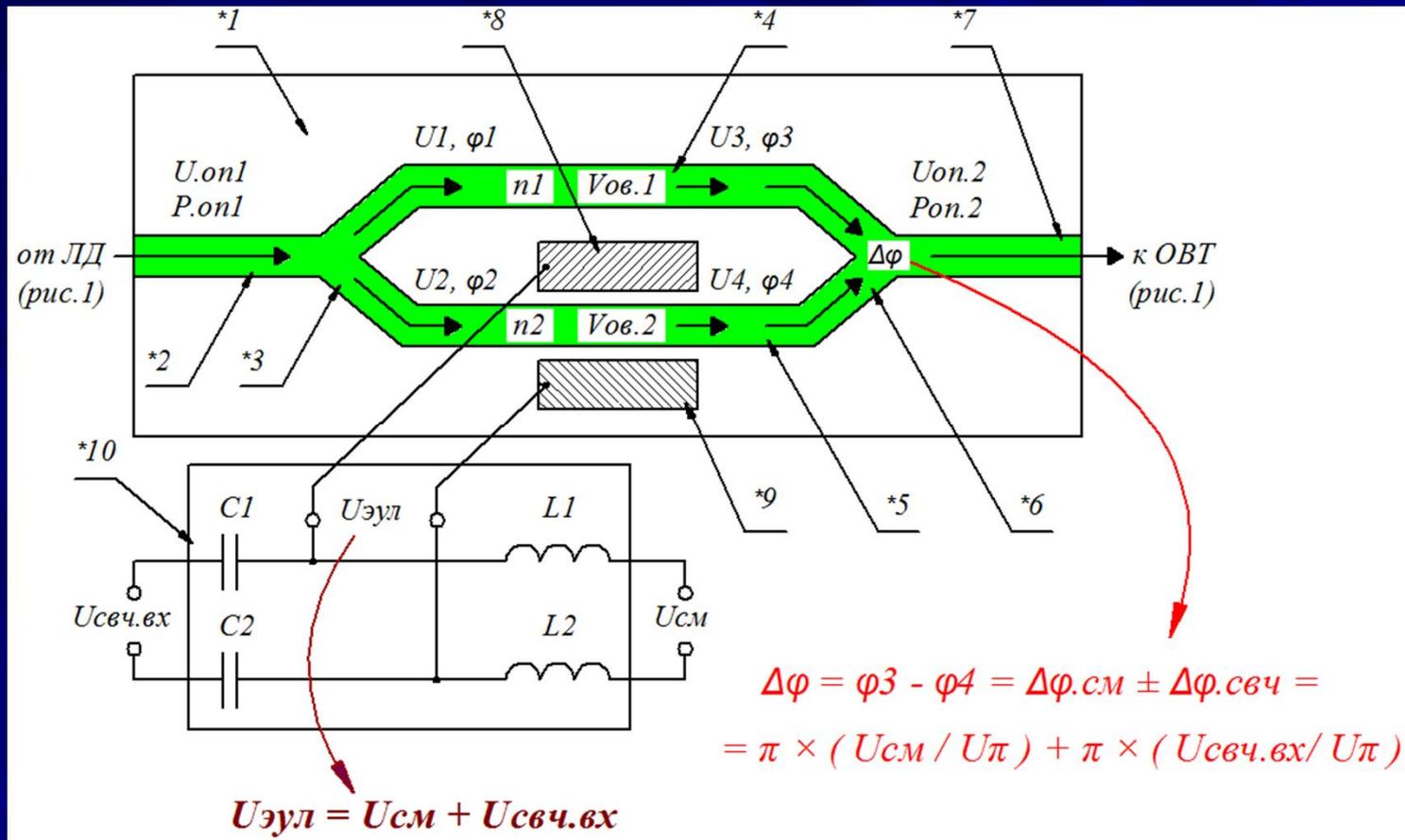
Графическая зависимость  $P_{оп.2}$  от  $U_{эул}$   
для случая отсутствия потерь в оптических трактах  
ММЦ ( $P_{оп.2}'$ )



Развёртка промодулированного оптического сигнала на выходе “идеального” ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом  $T_{\text{мод}}$  и амплитудой  $U_{\text{свч.вх}} = U_{\pi}$ .

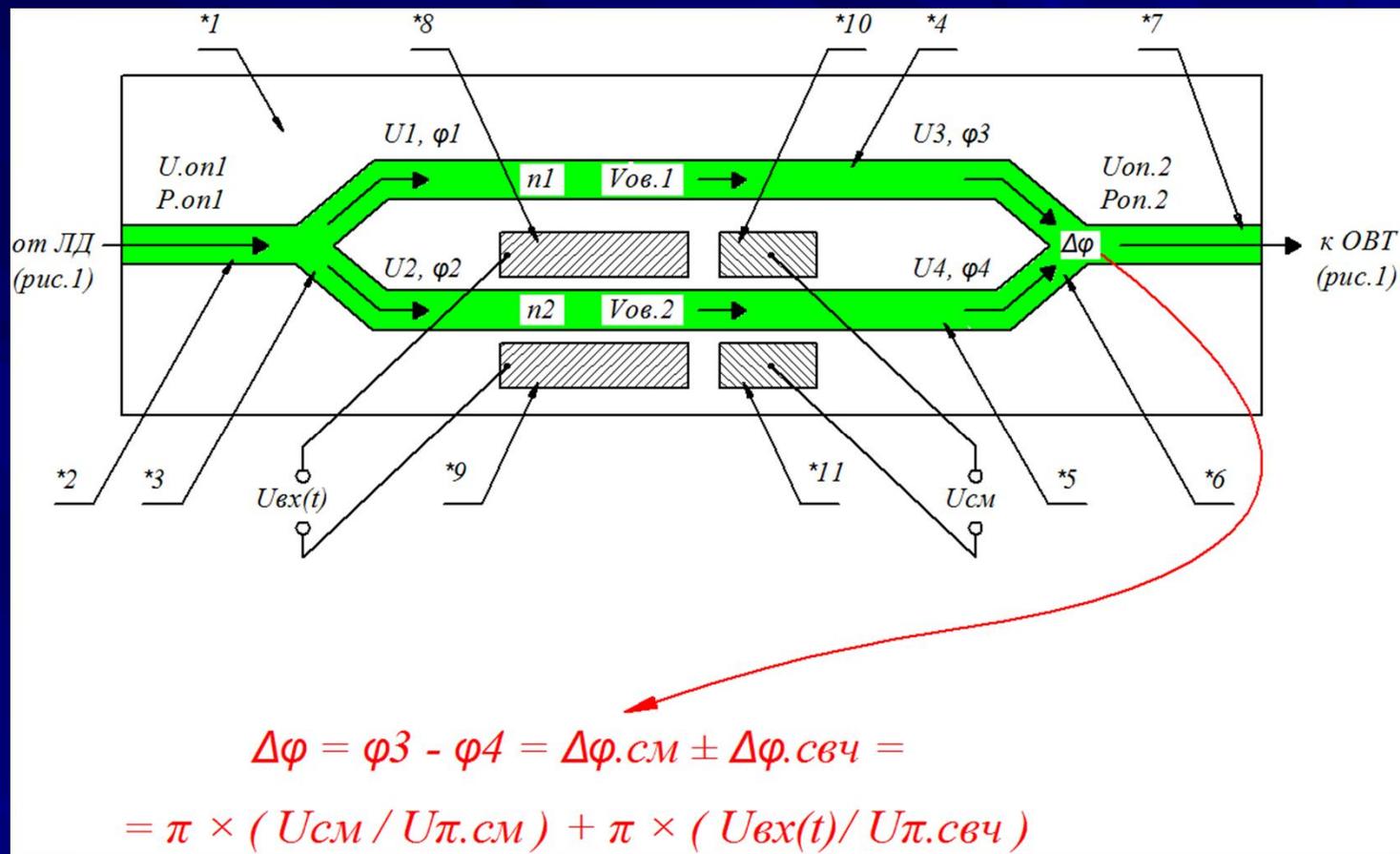


**Схематическое изображение ММЦ**  
**на пластине из сегнетоэлектрика**  
**с внешней цепью подачи напряжения смещения**



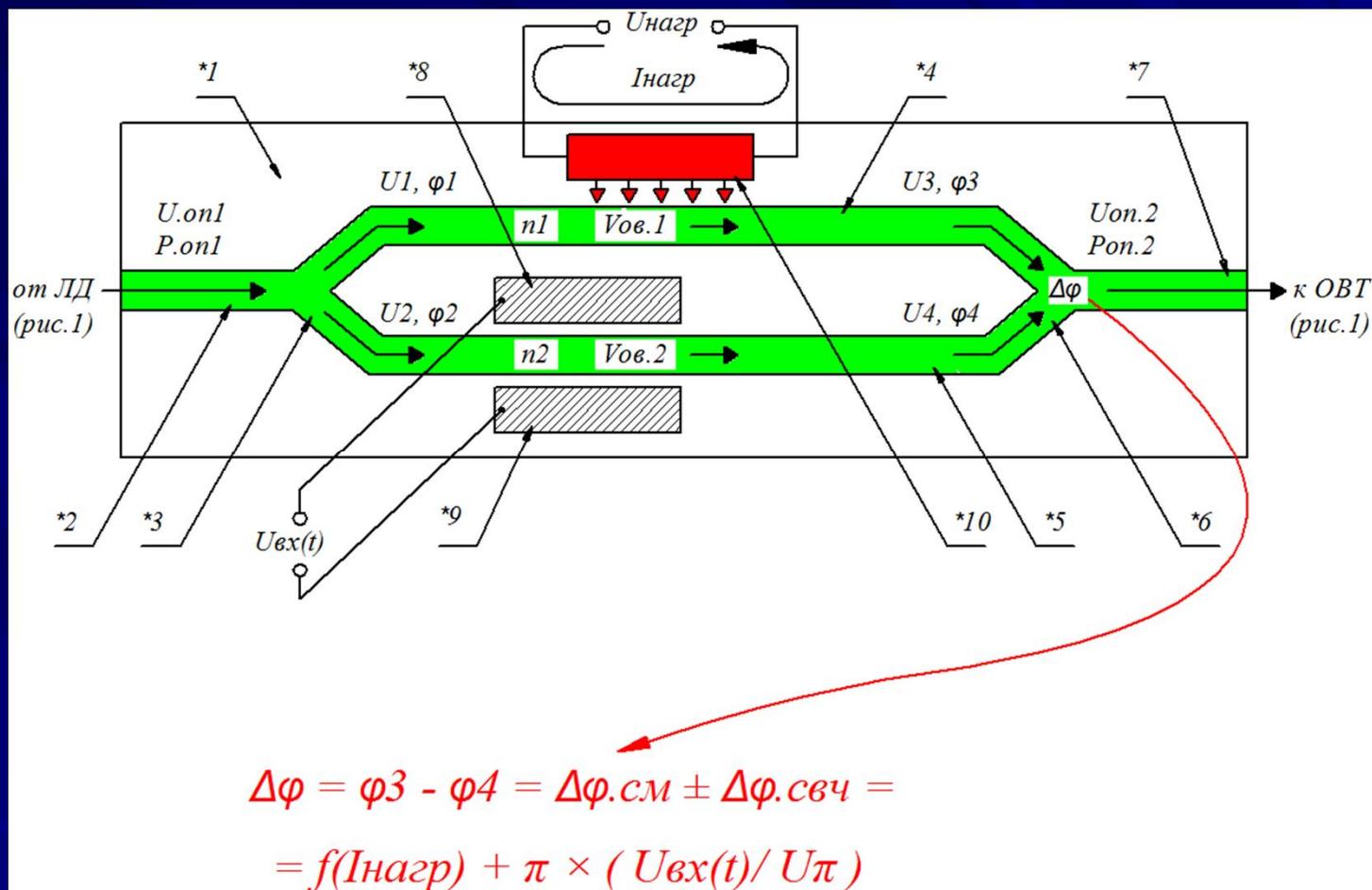
*\*1 - пластина из сегнетоэлектрика, \*2 - входной световодный канал, \*3 - входной Y-разветвитель, \*4,\*5 - первый и второй параллельные световодные каналы, \*6 - выходной Y-светвитель, \*7- выходной световодный канал, \*8,\*9 - первый и второй электроды управляющей линии СВЧ, \*10 - внешняя ЦНС*

**Схематическое изображение ММЦ**  
**на пластине из сегнетоэлектрика**  
**с собственной (внутренней) цепью подачи напряжения смещения**



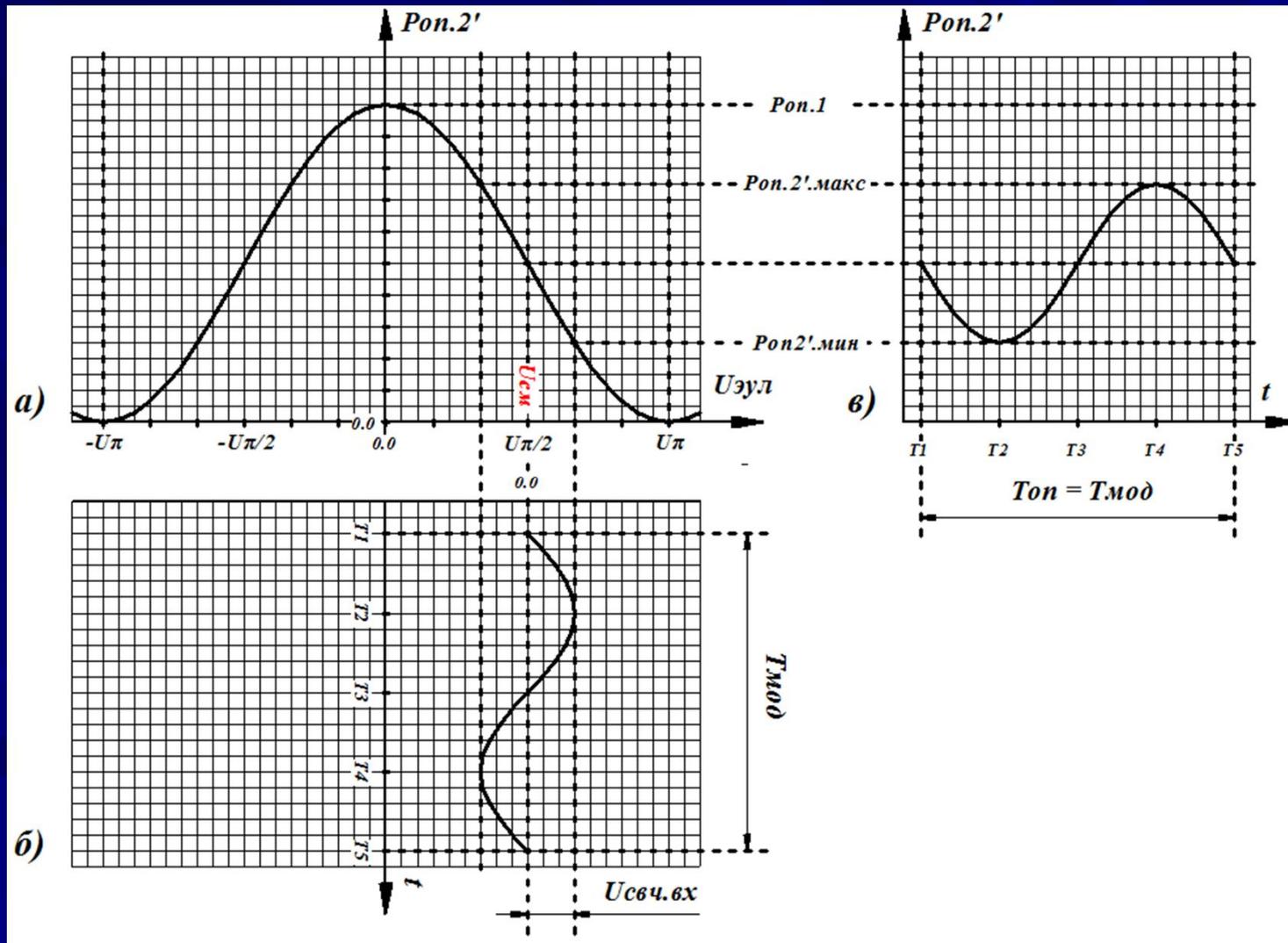
- \*1 - пластина из сегнетоэлектрика, \*2 - входной световодный канал,  
 \*3 - входной Y-разветвитель, \*4, \*5 - первый и второй параллельные световодные каналы,  
 \*6 - выходной Y-светвитель, \*7 - выходной световодный канал, \*8, \*9 - первый и второй  
 электроды управляющей линии, \*10, \*11 - первый и второй электроды цепи подачи  
 напряжения смещения

## Схематическое изображение ММЦ на электрооптическом полимере с термооптической регулировкой $\Delta\varphi$

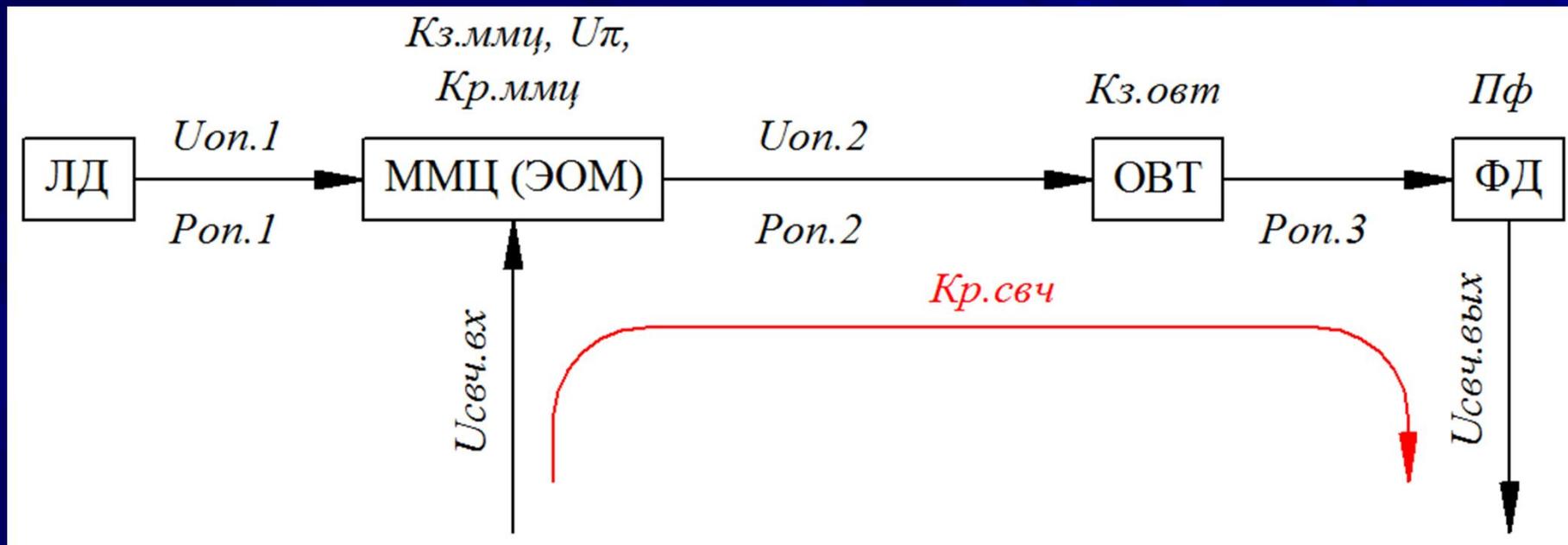


- \*1 - электрооптическая плёнка, \*2 - входной световодный канал,  
 \*3 - входной Y-разветвитель, \*4, \*5 - первый и второй параллельные световодные каналы,  
 \*6 - выходной Y-светвитель, \*7 - выходной световодный канал, \*8, \*9 - первый и второй  
 электроды управляющей линии, \*10 - термоэлектрический нагреватель

Развёртка промодулированного оптического сигнала  
на выходе “идеального” ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического  
модулирующего сигнала с периодом  $T_{\text{мод}}$  и амплитудой  $U_{\text{свч.вх}} \ll U_{\pi}$   
и напряжения смещения  $U_{\text{см}} = U_{\pi}/2$



## Схема аналогового РФТ СВЧ



*ЛД - лазерный диод,*

*ММЦ - модулятор Маха-Цандера,*

*ОВТ - оптоволоконный тракт,*

*ФД - фотодетектор,*

*ЭОМ - электрооптический модулятор*

Алгебраические выражения для максимальных и минимальных значений уровня мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом  $T_{\text{мод}}$  и амплитудой  $U_{\text{свч.вх}} \ll U_{\pi}$  и напряжения смещения  $U_{\text{см}} = U_{\pi}/2$

---

**Для случая “идеального”  $K_{\text{з.ммц}} = 0$  дБ**

$$P_{\text{оп.2'}.мин} = P_{\text{оп.1}} \times 0,5 \left( 1 + \cos \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi \times U_{\text{свч.вх}}}{U_{\pi}} \right) \right)$$

$$P_{\text{оп.2'}.макс} = P_{\text{оп.1}} \times 0,5 \left( 1 + \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi \times U_{\text{свч.вх}}}{U_{\pi}} \right) \right)$$

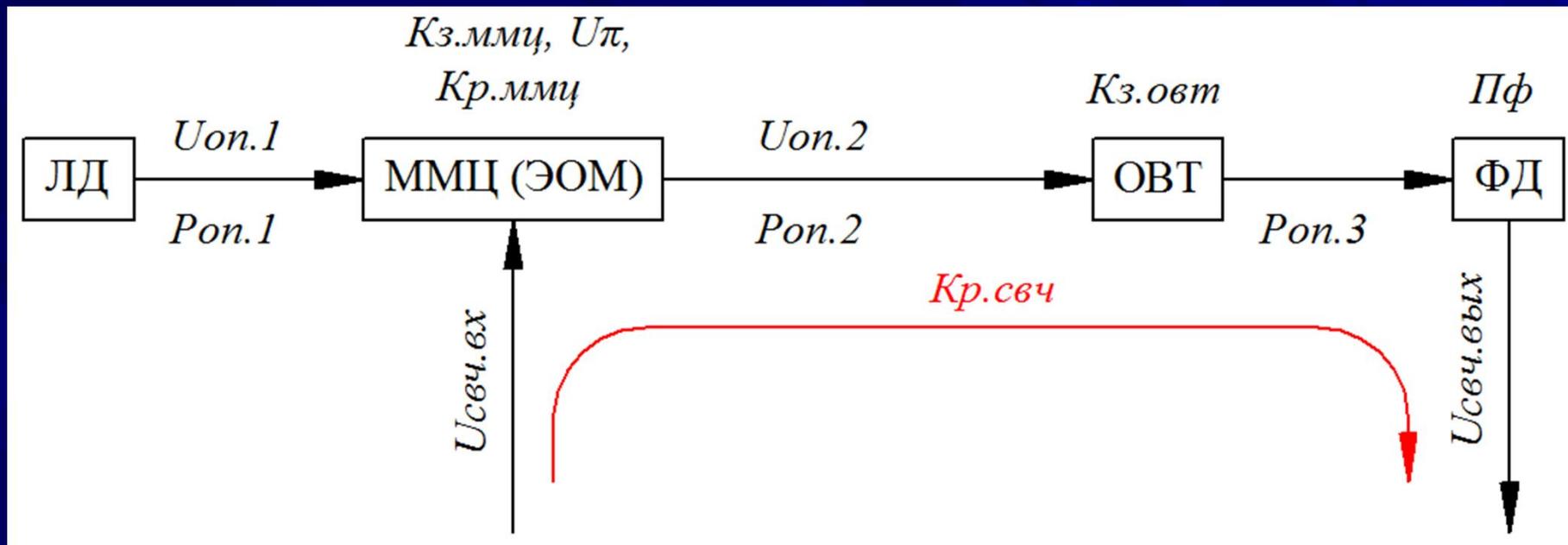
---

**Для случая реального ММЦ с  $K_{\text{з.ммц}} > 0$  дБ**

$$P_{\text{оп.2}.мин} = P_{\text{оп.2'}.мин} / K_{\text{з.ммц}}$$

$$P_{\text{оп.2}.макс} = P_{\text{оп.2'}.макс} / K_{\text{з.ммц}}$$

## Схема аналогового РФТ СВЧ



*ЛД - лазерный диод,*

*ММЦ - модулятор Маха-Цандера,*

*ОВТ - оптоволоконный тракт,*

*ФД - фотодетектор,*

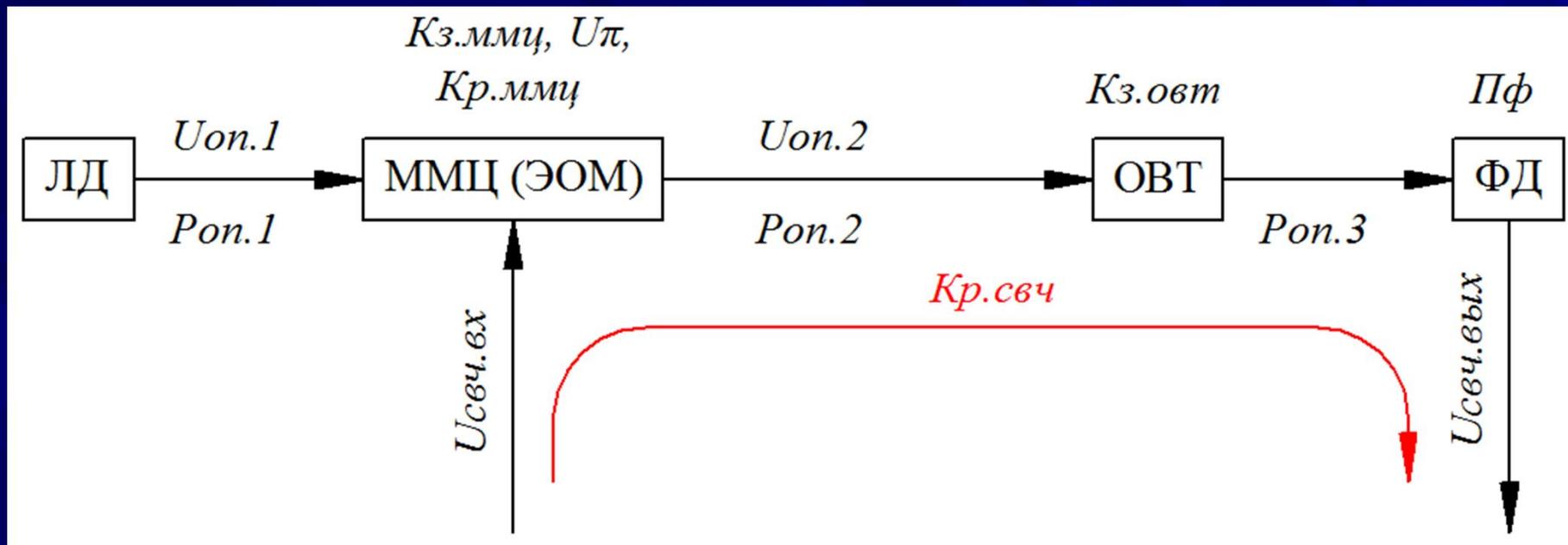
*ЭОМ - электрооптический модулятор*

Алгебраические выражения для максимальных и минимальных значений уровня мощности промодулированного оптического сигнала на входе ФД при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом  $T_{\text{мод}}$  и амплитудой  $U_{\text{свч.вх}} \ll U_{\pi}$  и напряжения смещения  $U_{\text{см}} = U_{\pi}/2$

$$P_{\text{оп.3.мин}} = P_{\text{оп.2.мин}} / K_{3.0вт}$$

$$P_{\text{оп.3.макс}} = P_{\text{оп.2.макс}} / K_{3.0вт}$$

## Схема аналогового РФТ СВЧ



*ЛД - лазерный диод,*

*ММЦ - модулятор Маха-Цандера,*

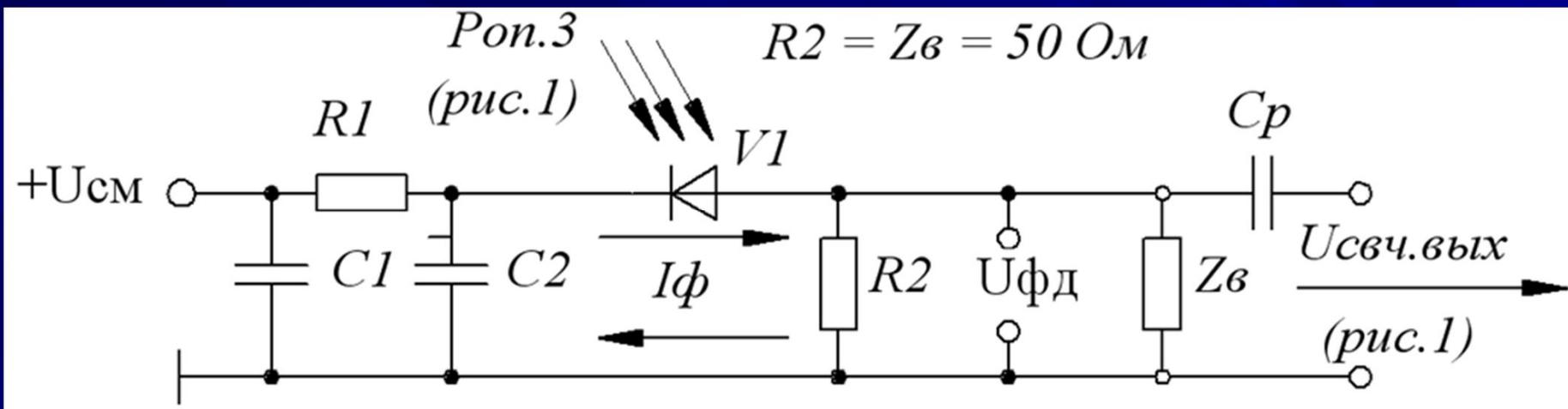
*ОВТ - оптоволоконный тракт,*

*ФД - фотодетектор,*

*ЭОМ - электрооптический модулятор*

Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ

модель XPDV3120R производства фирмы u<sup>2</sup>t Photonics



Алгебраические выражения для максимальных и минимальных значений уровня наведённого тока в ФД и выходного напряжения при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом  $T_{\text{мод}}$  и амплитудой  $U_{\text{свч.вх}} \ll U_{\pi}$  и напряжения смещения  $U_{\text{см}} = U_{\pi}/2$

$$I_{\text{ф.мин}} = P_{\text{оп.З.мин}} \times \text{Пф}$$

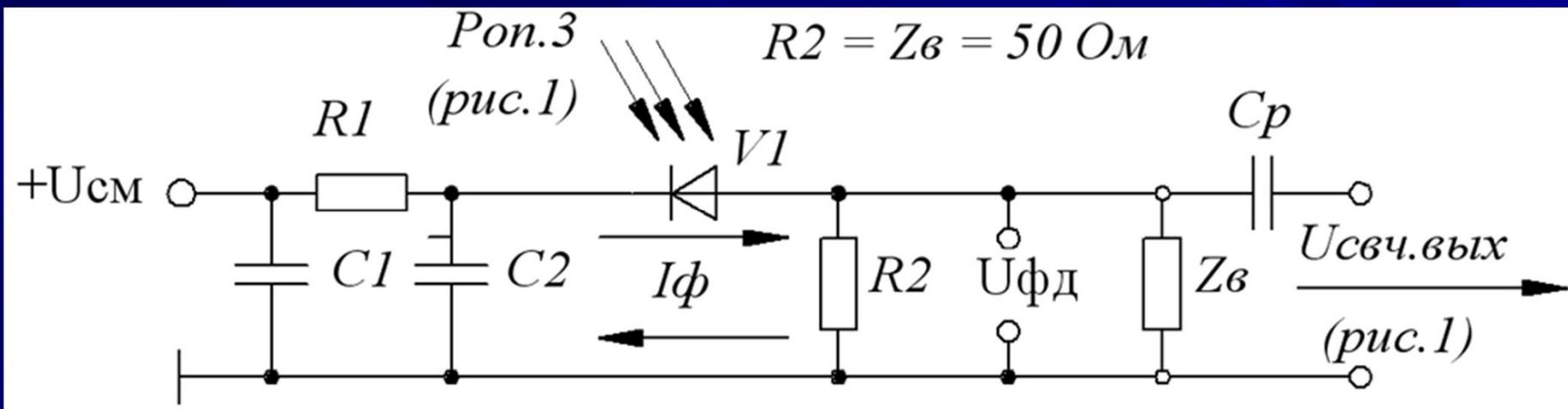
$$I_{\text{ф.макс}} = P_{\text{оп.З.макс}} \times \text{Пф}$$

$$U_{\text{фд.мин}} = I_{\text{ф.мин}} \times 250\text{Ом}$$

$$U_{\text{фд.макс}} = I_{\text{ф.макс}} \times 250\text{Ом}$$

Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ

модель XPDV3120R производства фирмы u<sup>2</sup>t Photonics

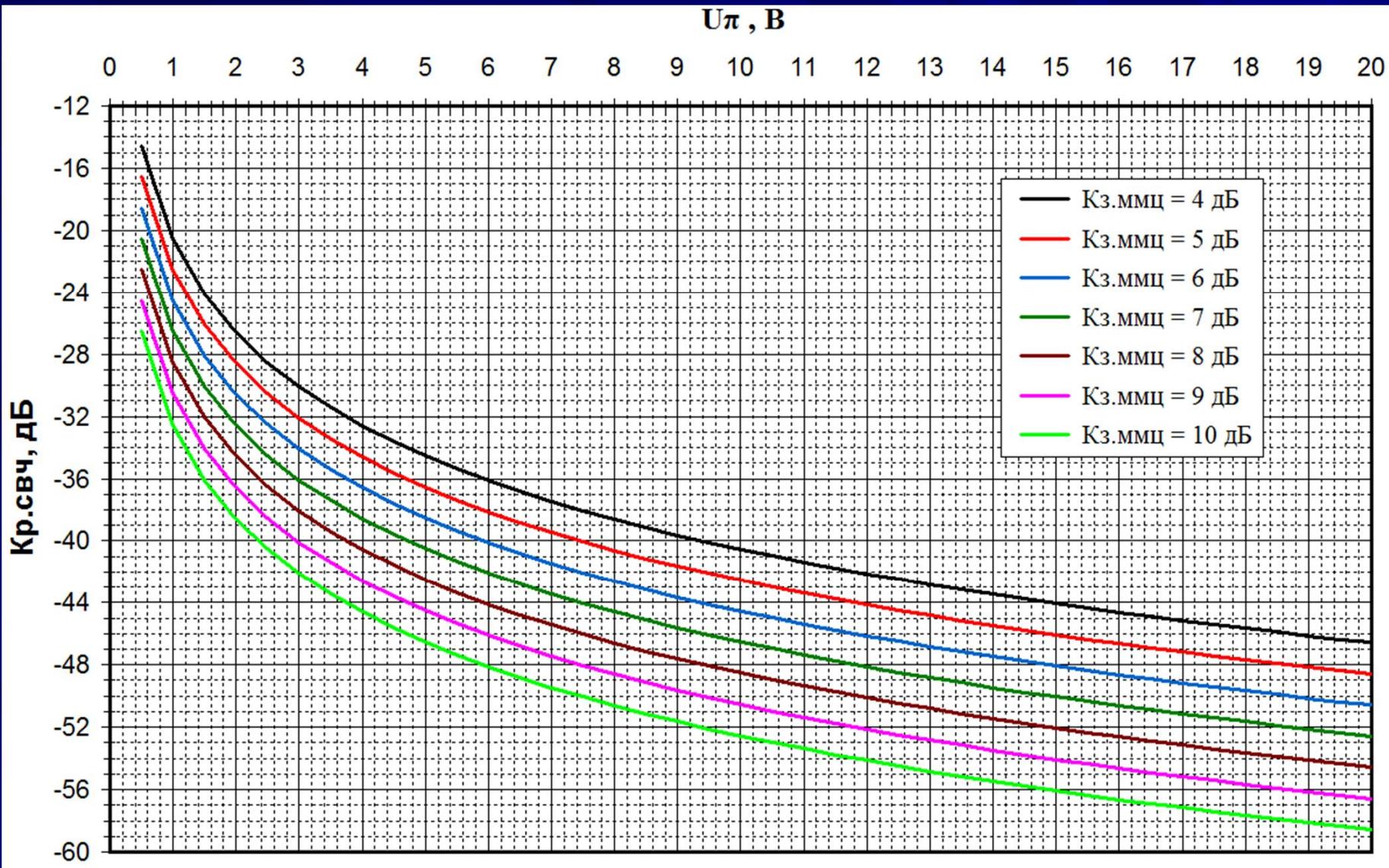


Алгебраические выражения для определения амплитуды выходного сигнала СВЧ и коэффициента передачи РФТ

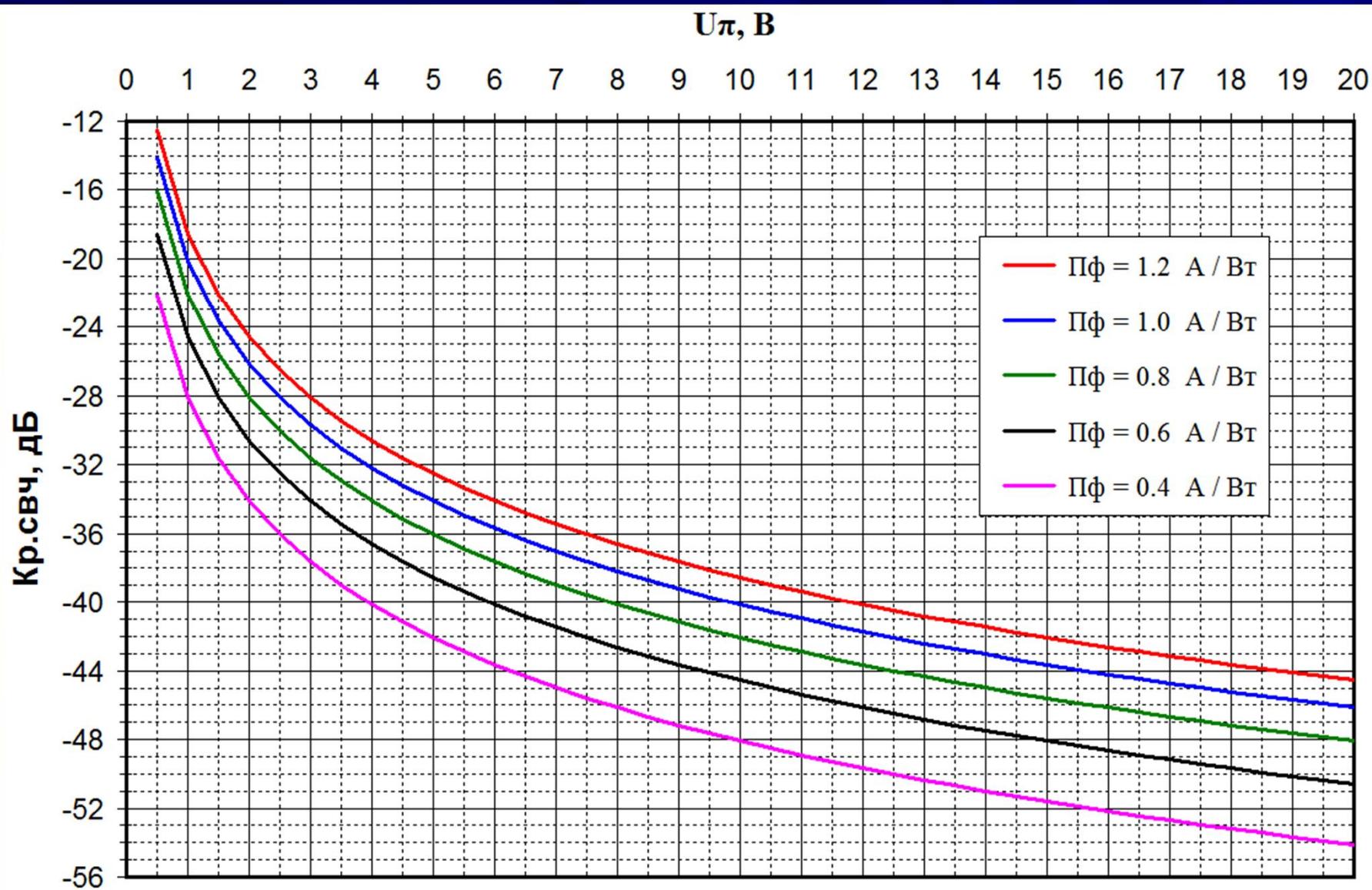
$$U_{\text{свч. вых}} = (U_{\text{фд. макс}} - U_{\text{фд. мин}}) / 2$$

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

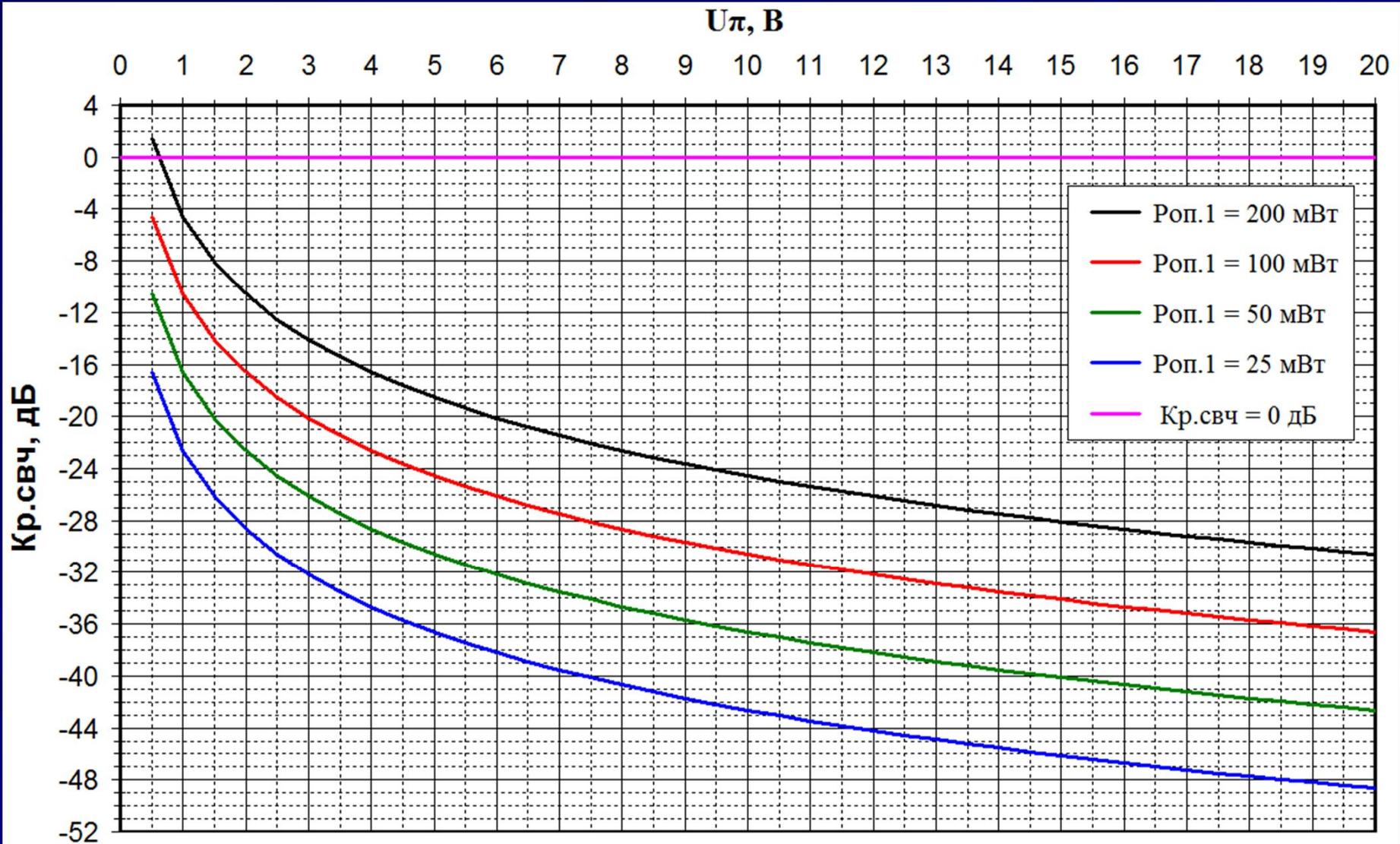
Зависимости  $K_{р.свч}$  от  $U_{\pi}$  при различных  $K_{з.ммц}$   
( $P_{оп.1} = 20$  мВт,  $U_{свч.вх} = 7$  мВ,  $\Pi\phi = 0.6$  А / Вт)



Зависимости Кр.свч от  $U_{\pi}$  при различных  $\Pi\phi$   
( $K_{з.мми} = 6$  дБ,  $U_{свч.вх} = 7$  мВ,  $P_{оп.1} = 20$  мВт)



**Зависимости Кр.свч от  $U_{\pi}$  при различных  $P_{оп.1}$**   
**( $K_{з.мми} = 6$  дБ,  $U_{свч.вх} = 7$  мВ,  $P_{ф} = 0.6$  А / Вт)**



***Спасибо  
за внимание!***

***Конструктивная критика  
принимается по адресу  
[ur-vol@yandex.ru](mailto:ur-vol@yandex.ru)***