

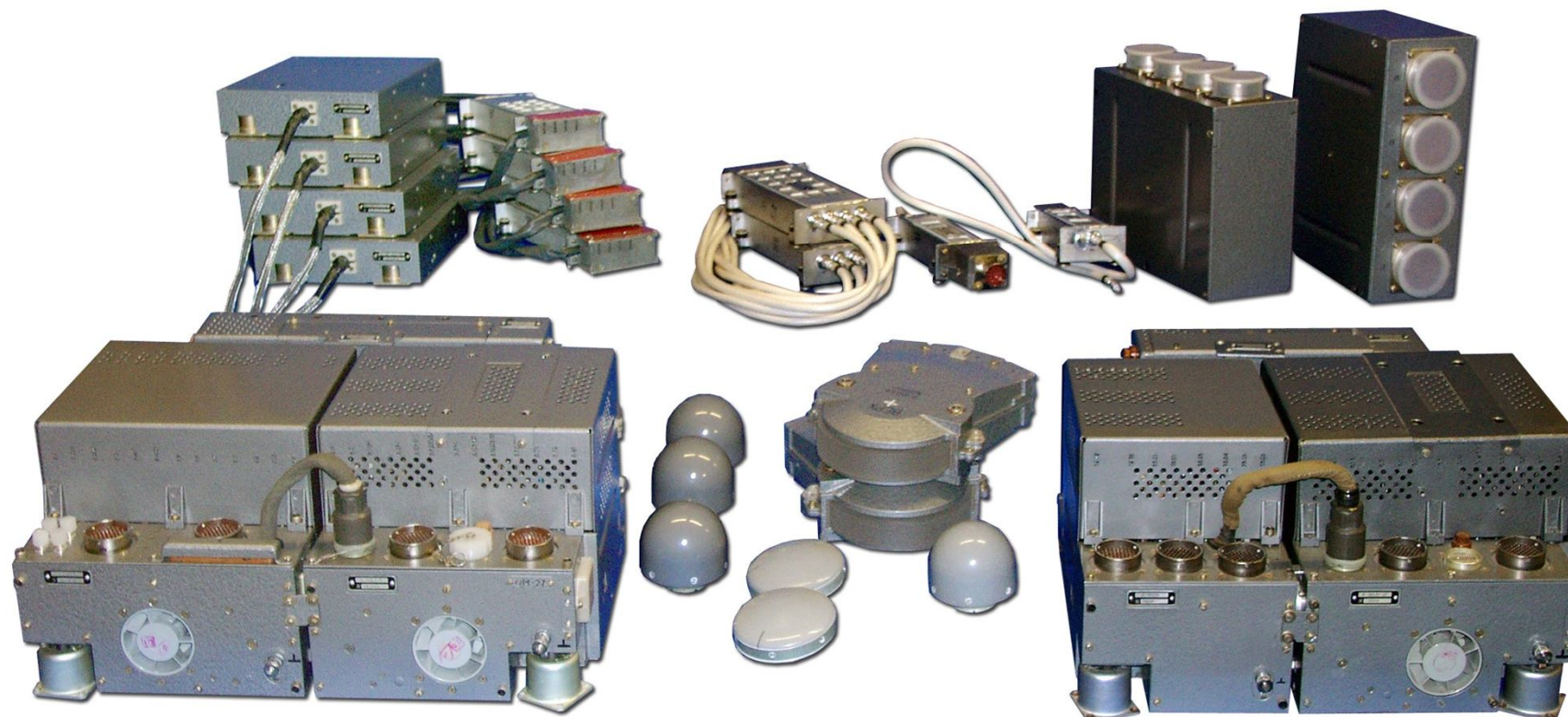


Открытое акционерное общество
«Центральное конструкторское бюро автоматики»
www.ckba.net

*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

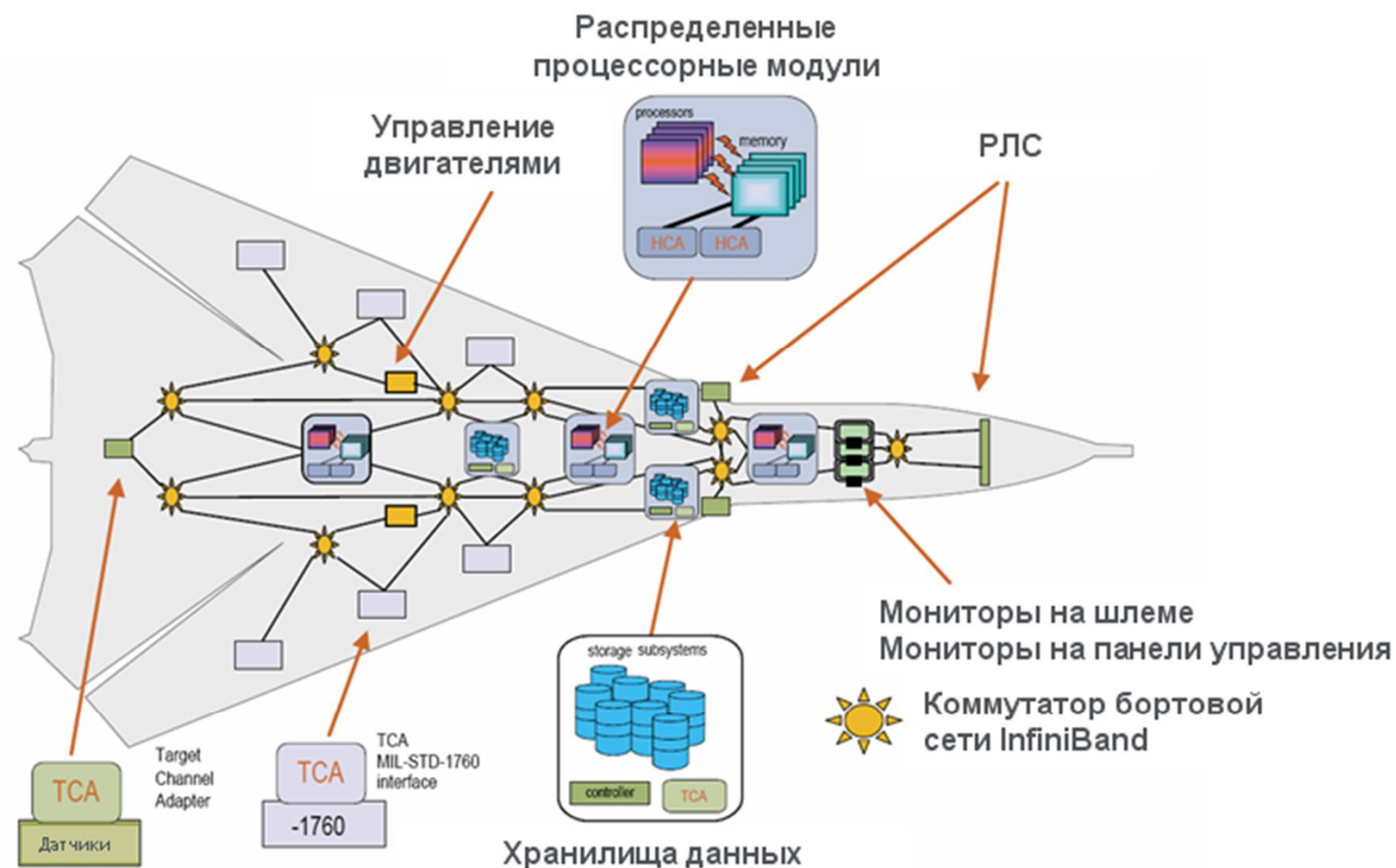
- дециметрового

- 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

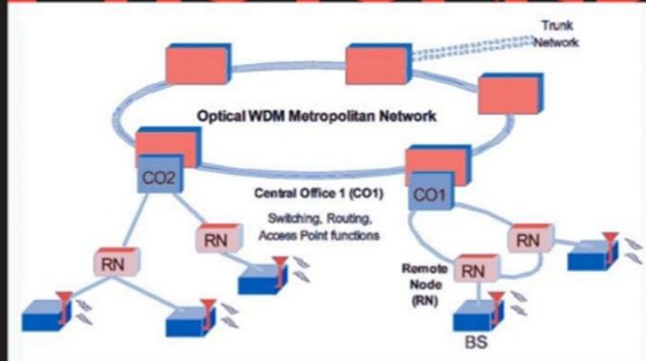
Микроволновая фотоника изучает взаимодействие

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

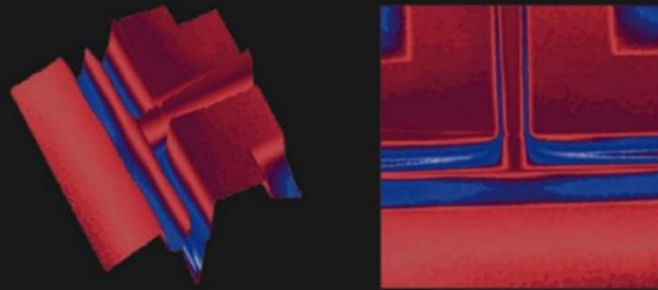
Эта область включает

- 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**

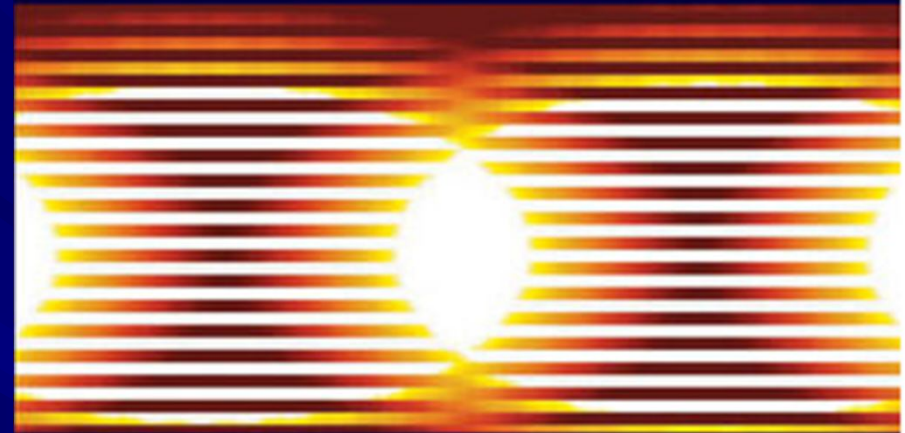
MICROWAVE PHOTONICS



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

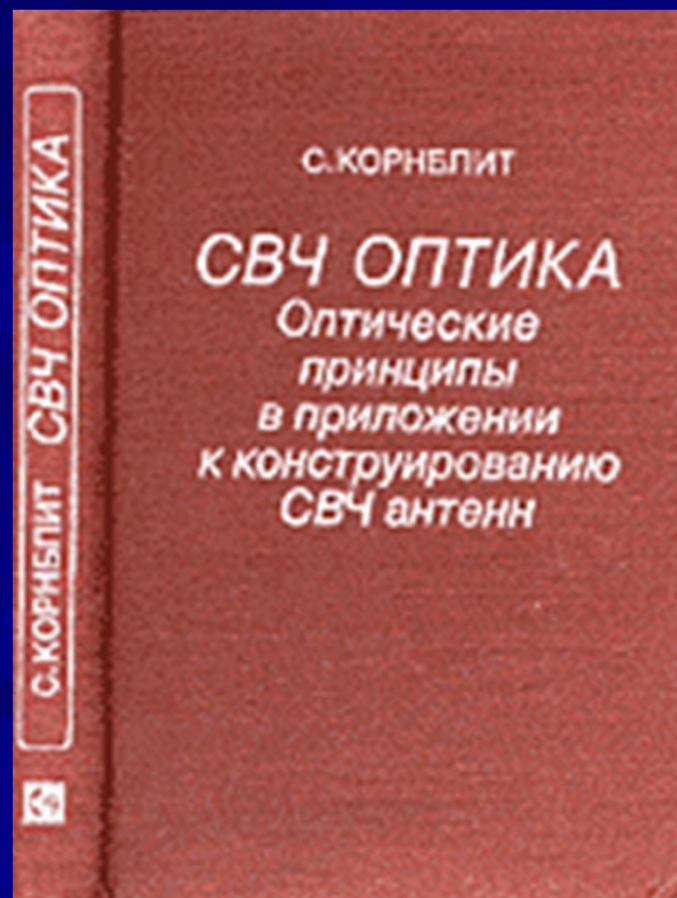
[Home](#)[Participation](#)[Program](#)[General Information / Accommodations](#)[Organizers](#)[Exhibits](#)

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

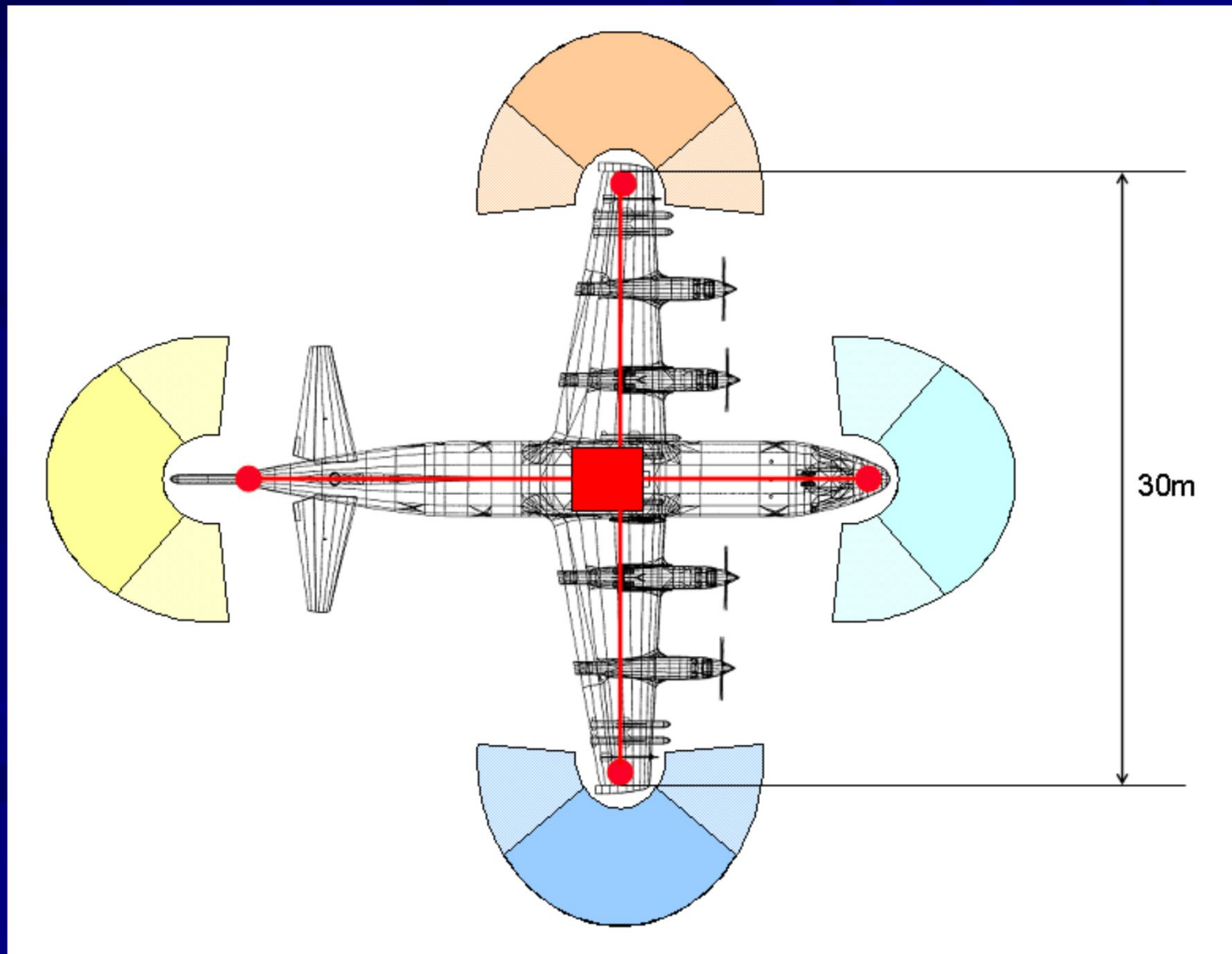
**Министерство
промышленности и торговли РФ**

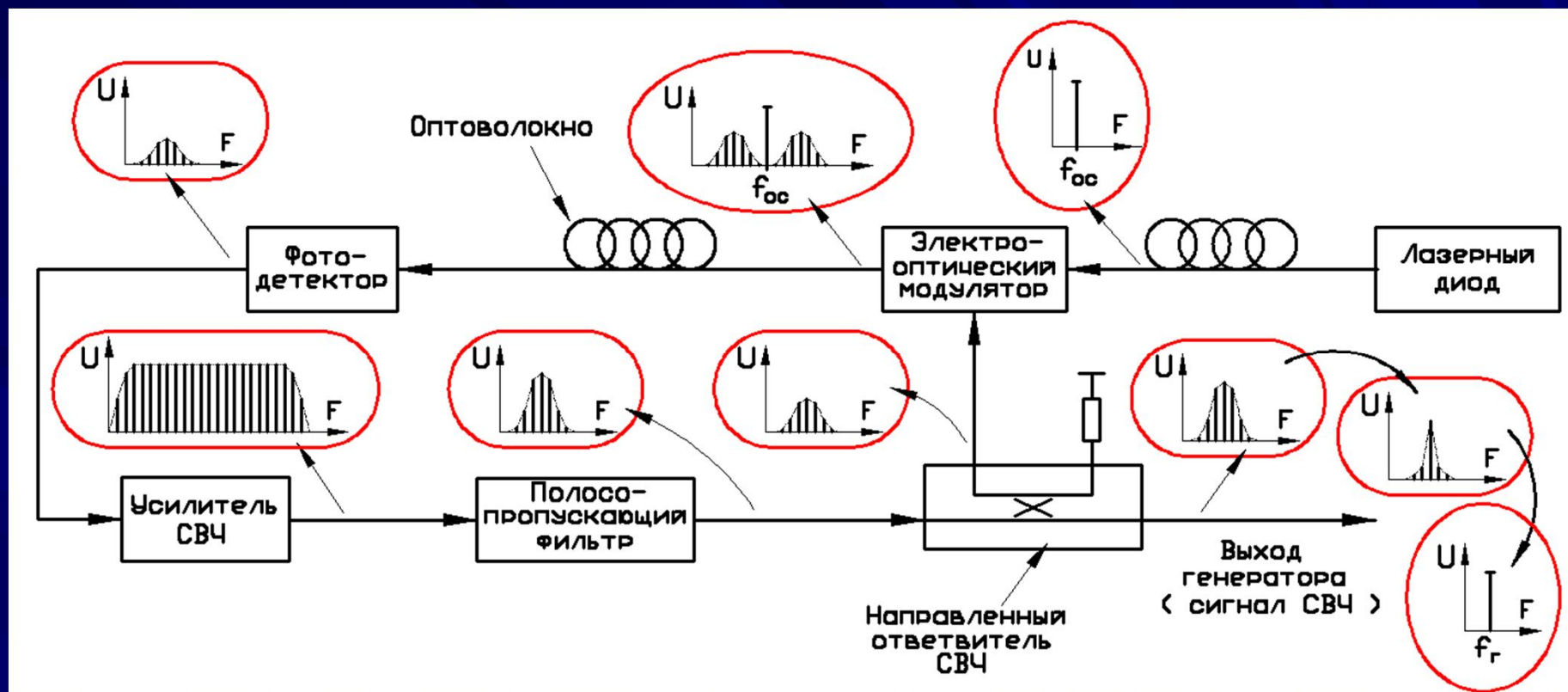
**Концепция
программы развития радиофотоники
на 2015 - 2020 годы**

Сверхширокополосная измерительная система (ОКР “Резонанс”)



Размещение выносных антенных постов на “большом самолёте”





**Схема структурная
радиофотонного автогенератора диапазона СВЧ**

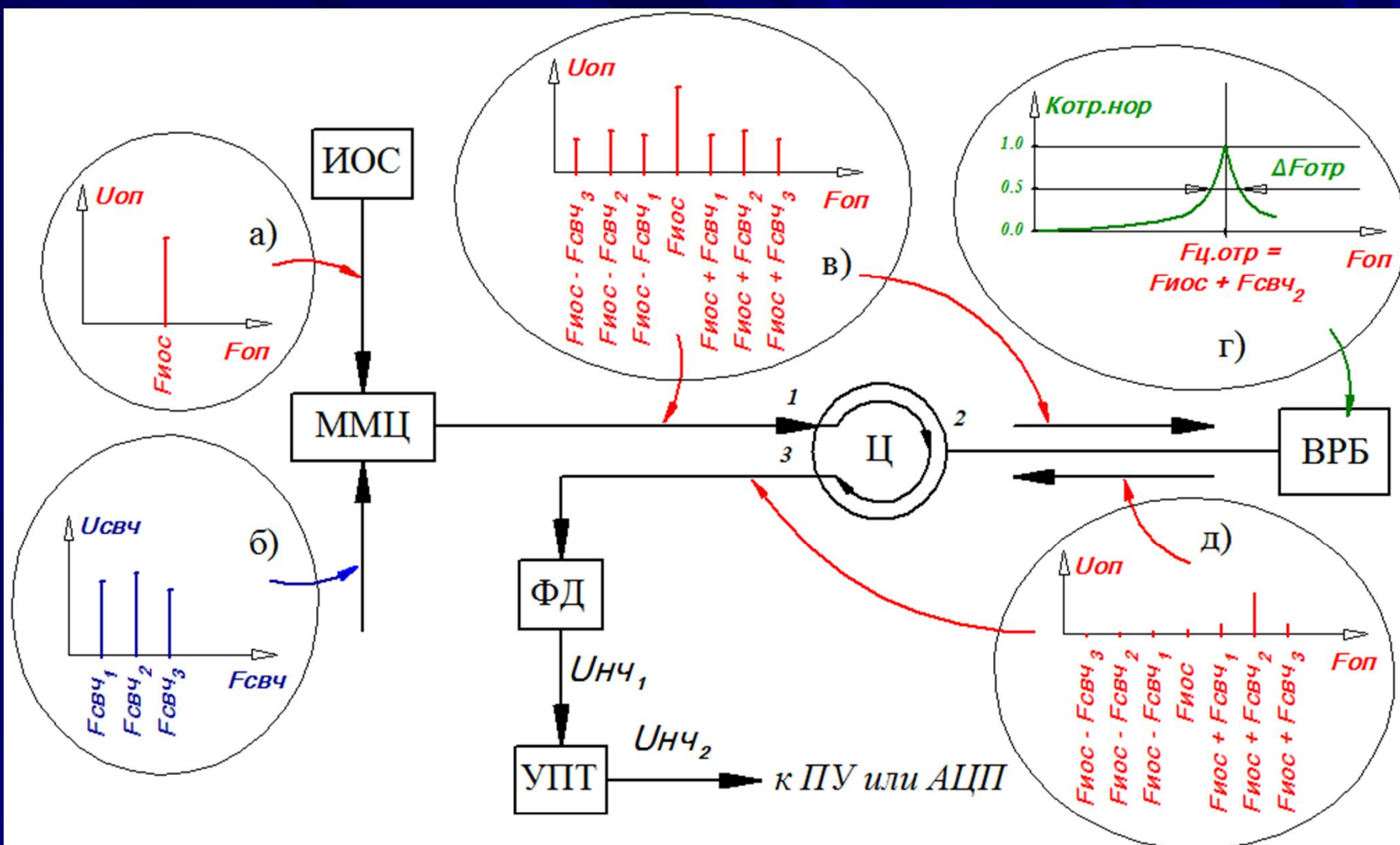


Схема простейшего одноканального радиофотонного МИЧ
 (АЦП - аналогово-цифровой преобразователь, ВРБ - волоконная решётка Брега,
 ИОС - источник оптического сигнала, ММЦ - модулятор Маха - Цандера,
 ПУ - пороговое устройство, УПТ - усилитель постоянного тока,
 ФД - фотодетектор, Ц - циркулятор)

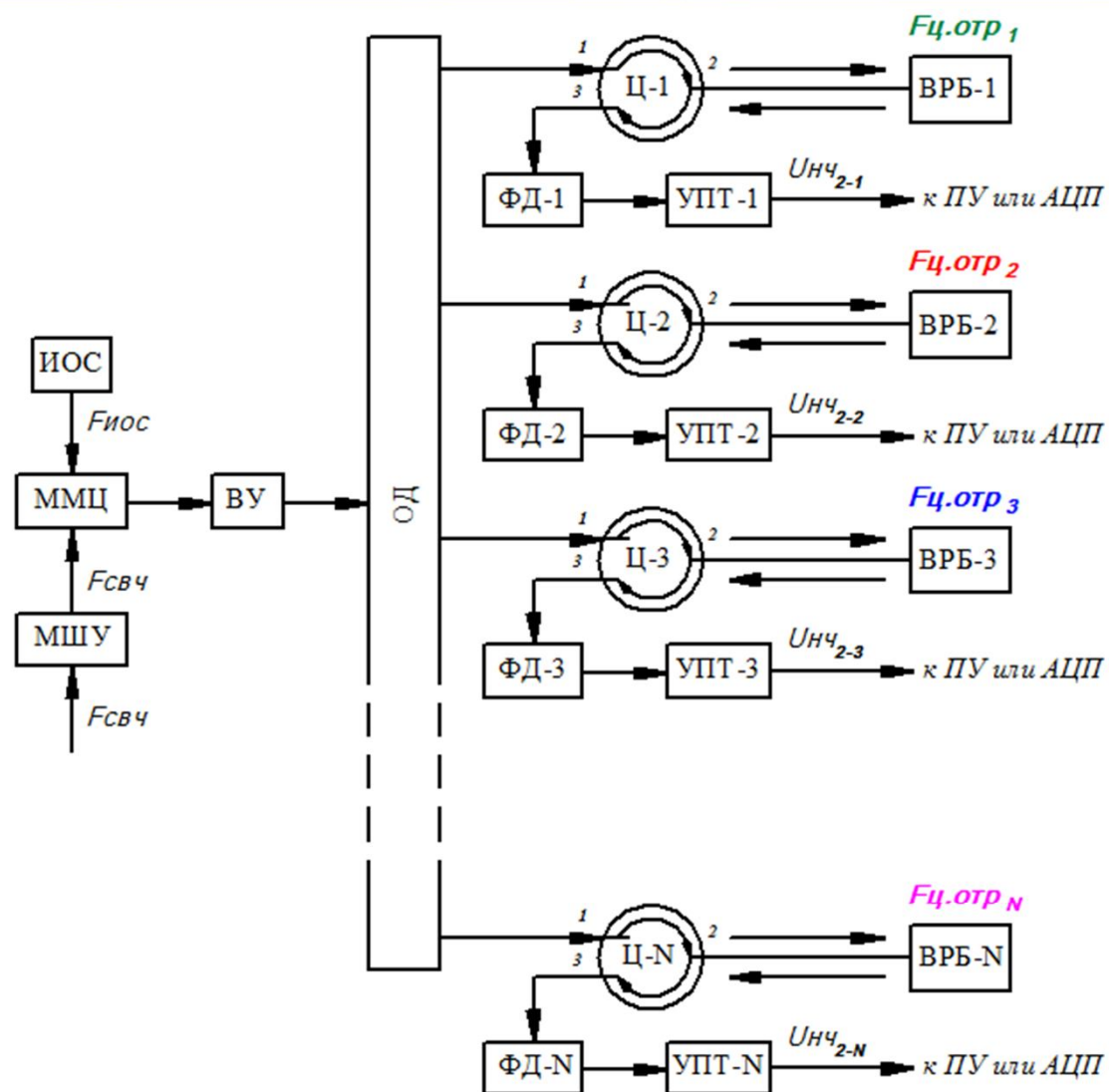


Рис.3. Схема многоканального радиофотонного МИЧ

(АЦП - аналогово-цифровой преобразователь, ВРБ-1 - ВРБ-N - волоконные решётки Брега, 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)

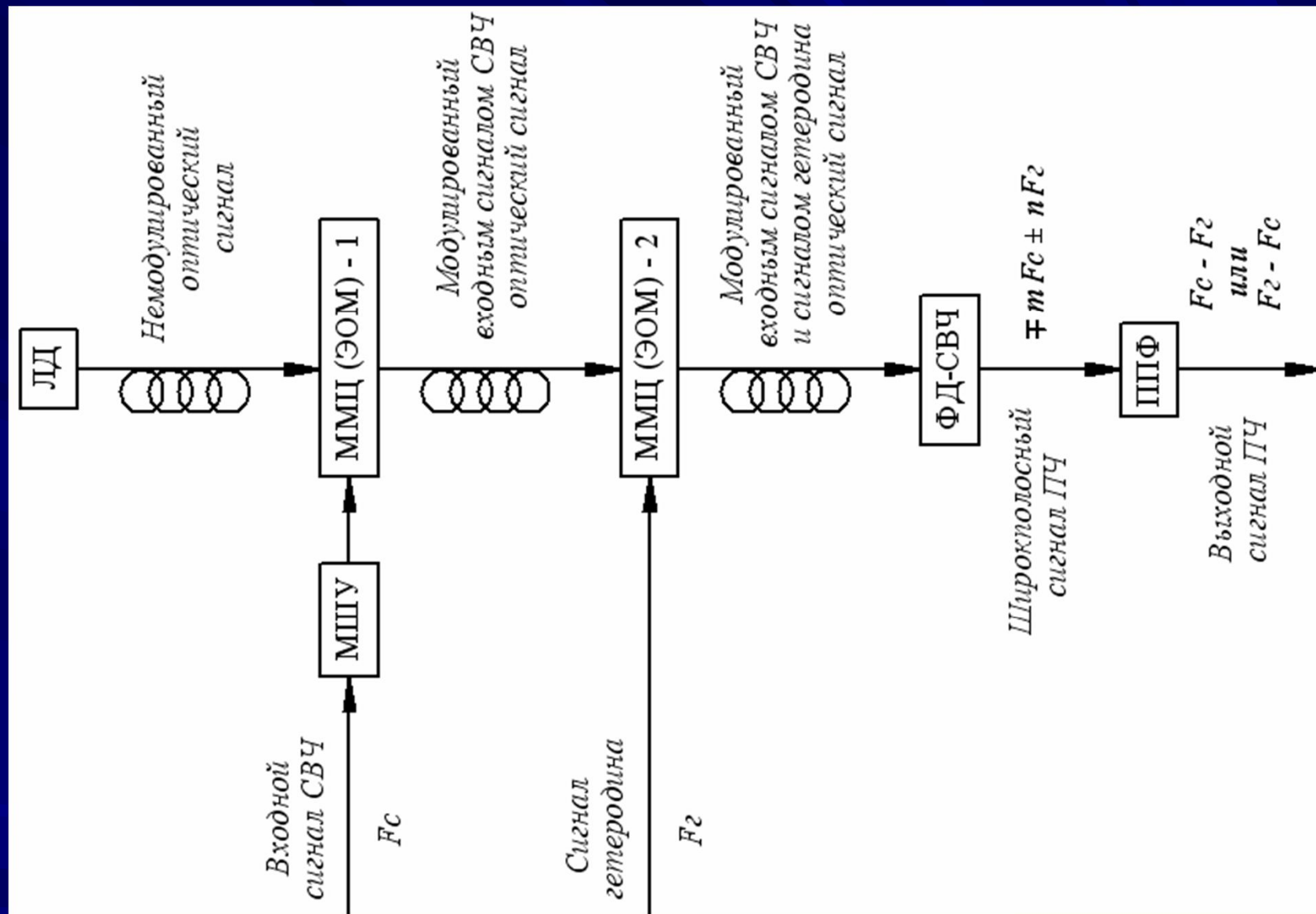


Схема структурная радиофотонного преобразователя частоты диапазона СВЧ

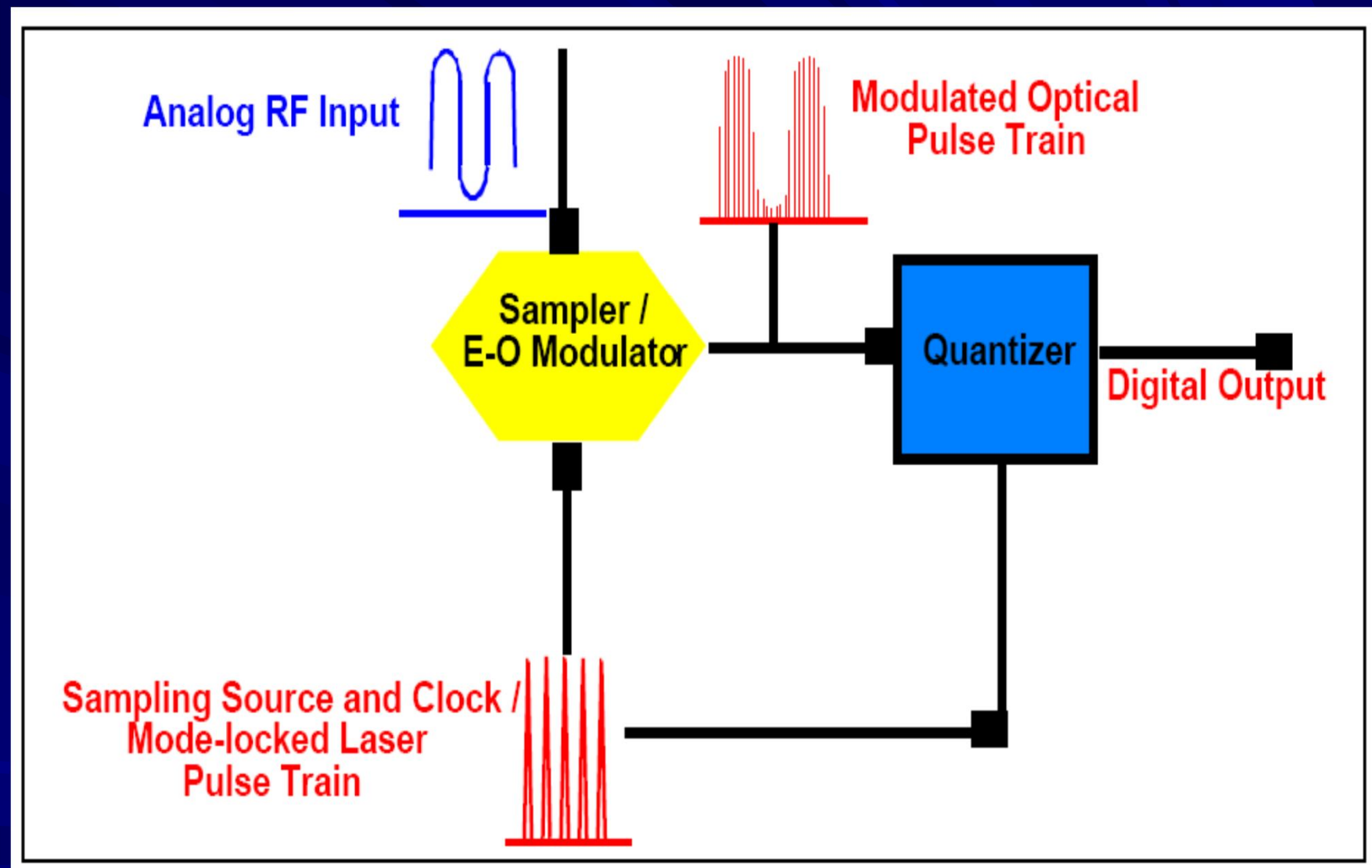
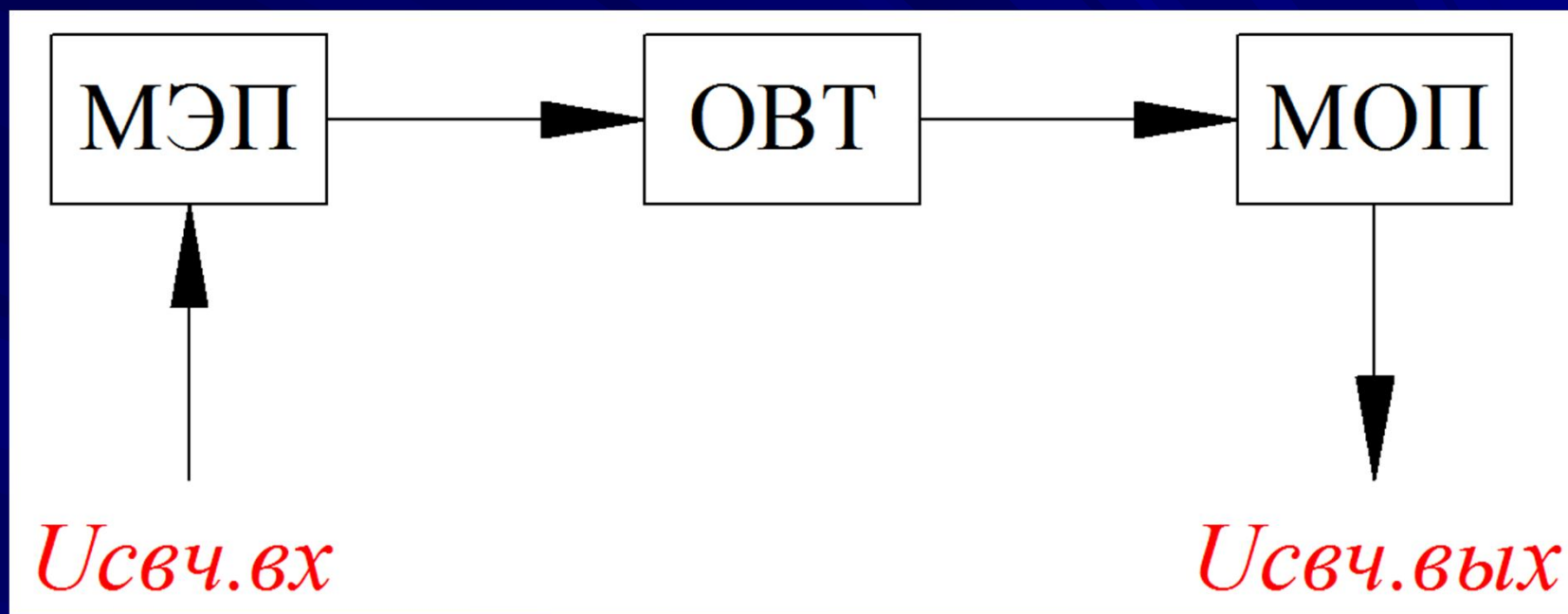


Схема структурная радиофотонного АЦП

*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

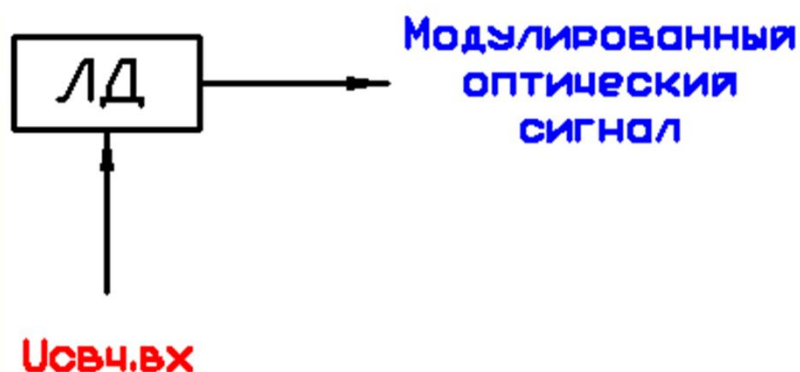
Омского Государственного Университета

им. Ф.М. Достоевского

www.omsu.ru

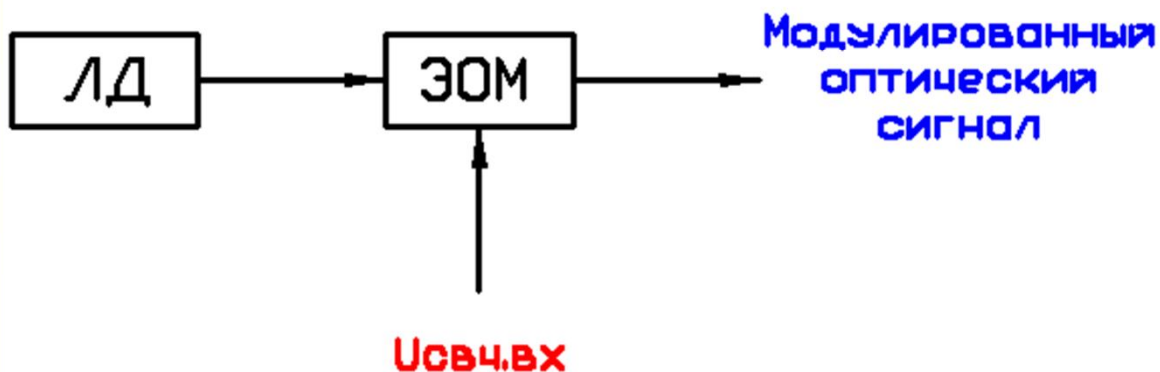
Модули электро-оптического преобразования с прямой и внешней модуляцией

А – Прямая модуляция



ЛД – лазерный диод
ЗОМ – электр-оптический
модулятор

Б – Внешняя модуляция



Типы электро-оптических модуляторов

Электро-поглощающие модуляторы

+

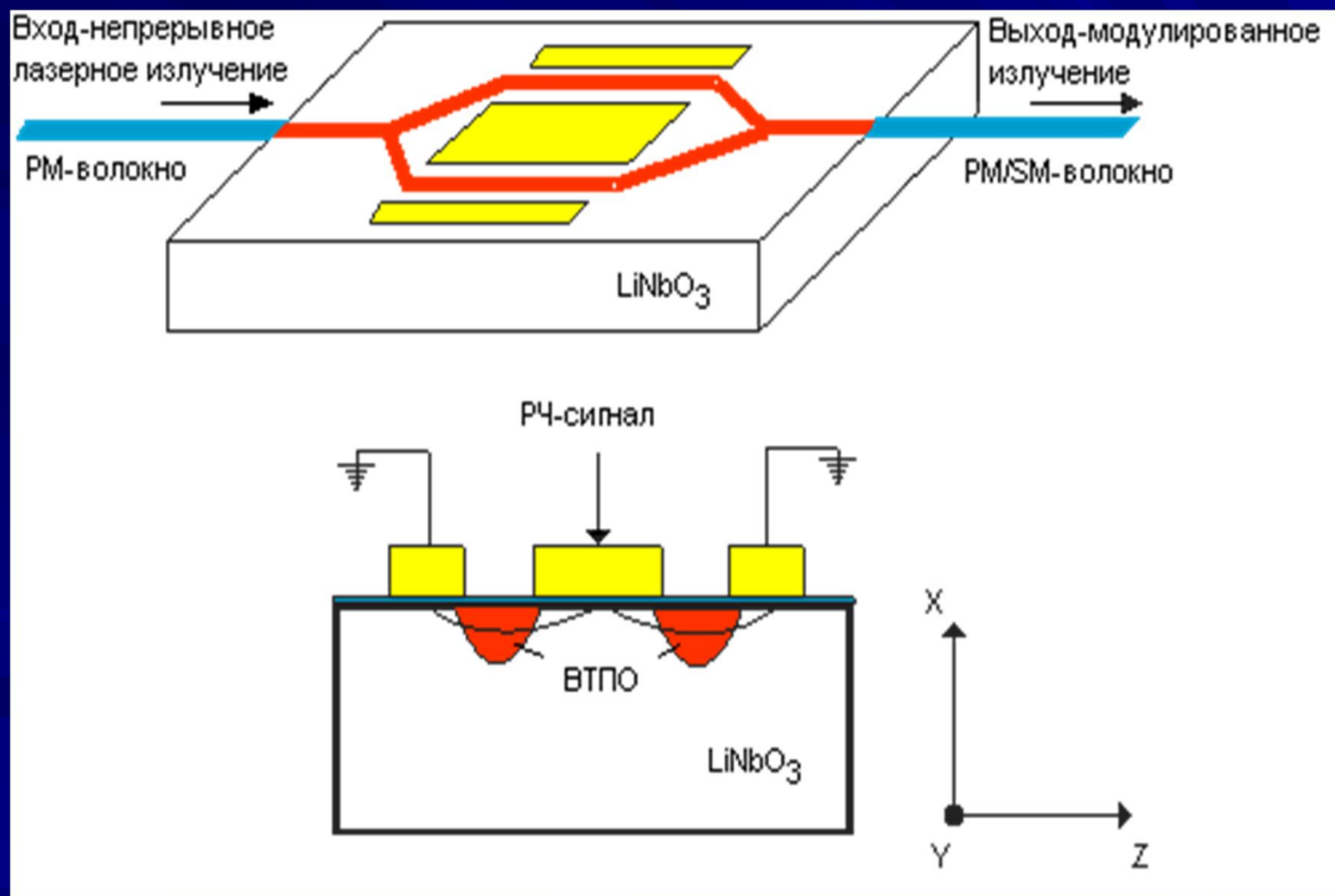
Эффект Келдыша-Франца

Интерферометры Маха-Цандера

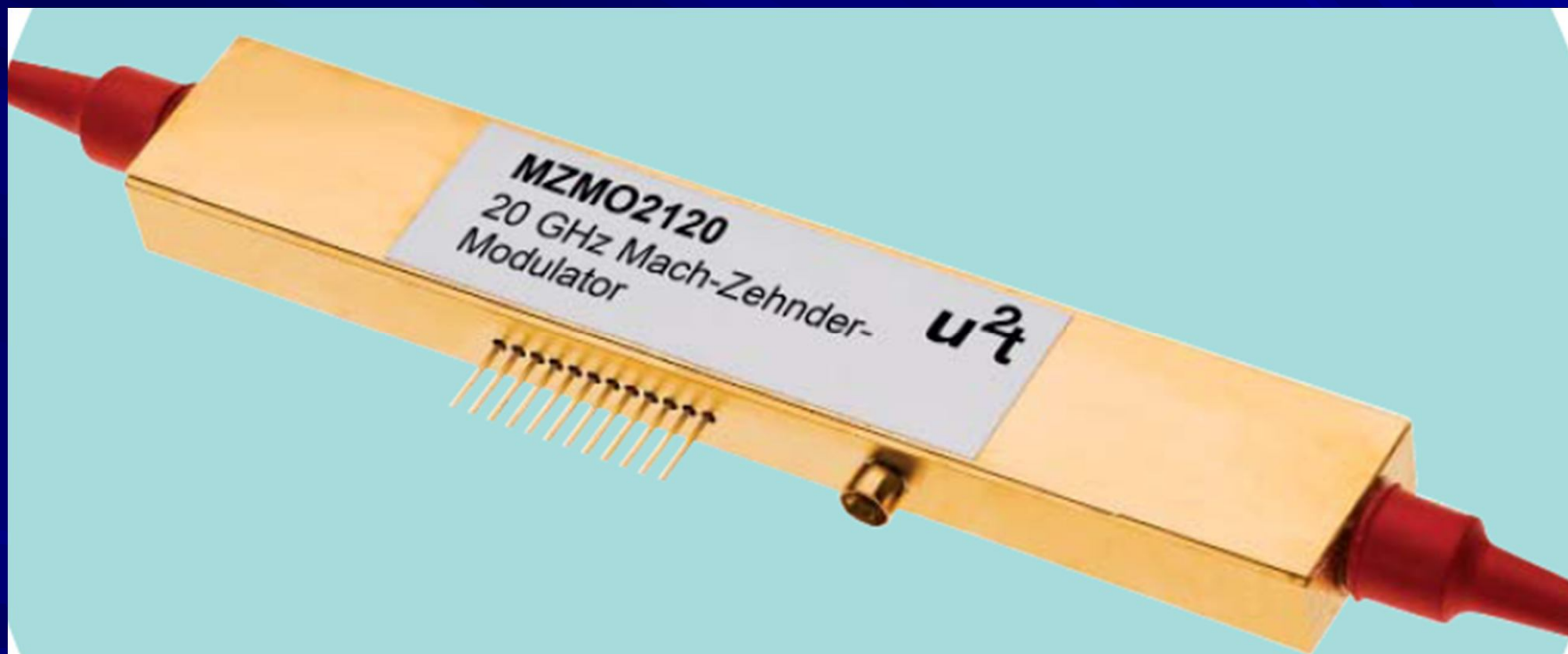
+

Эффект Поккельса

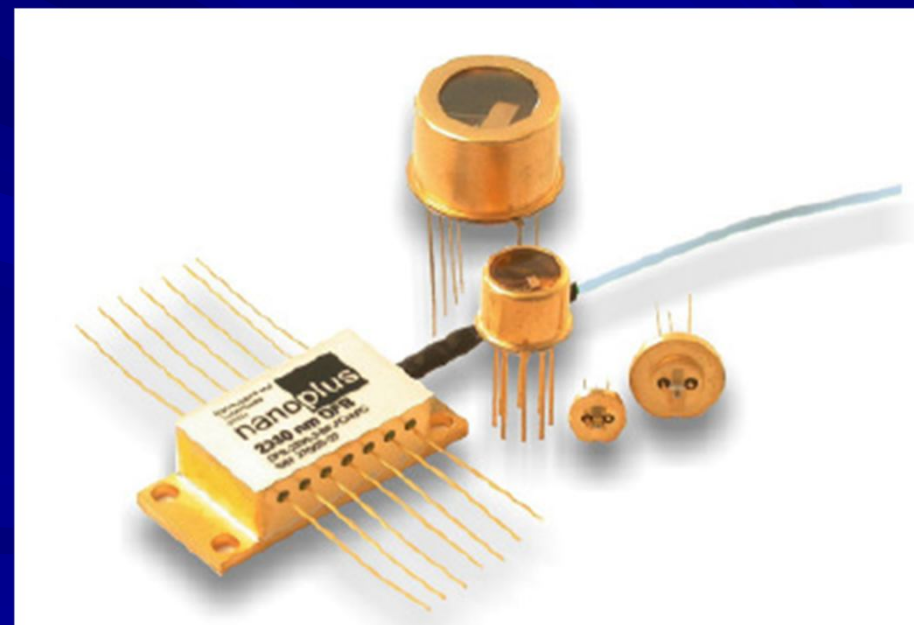
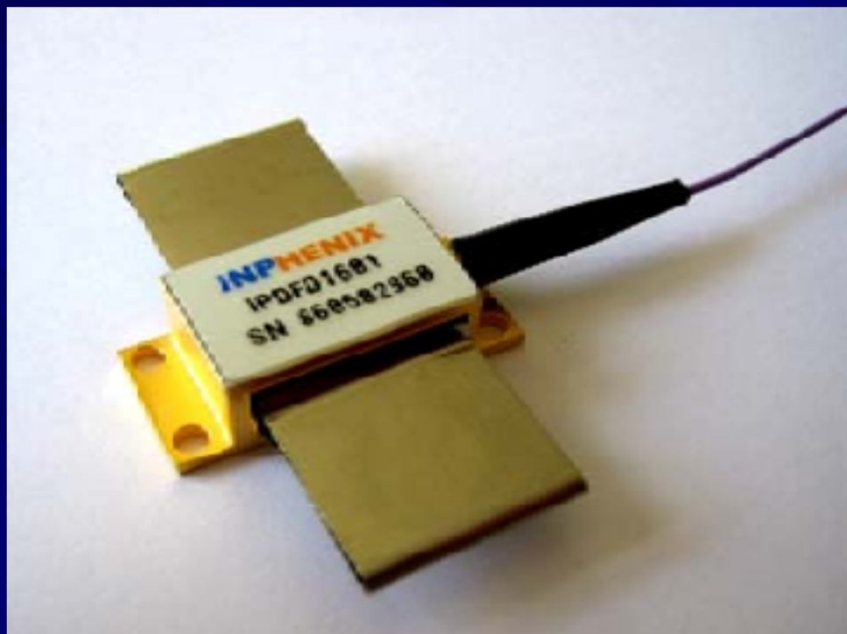
Модулятор Маха-Цандера
(Mach Zehnder modulator - MZM)
в планарном исполнении



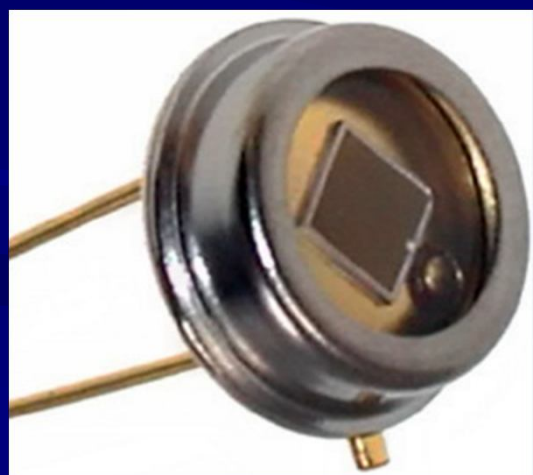
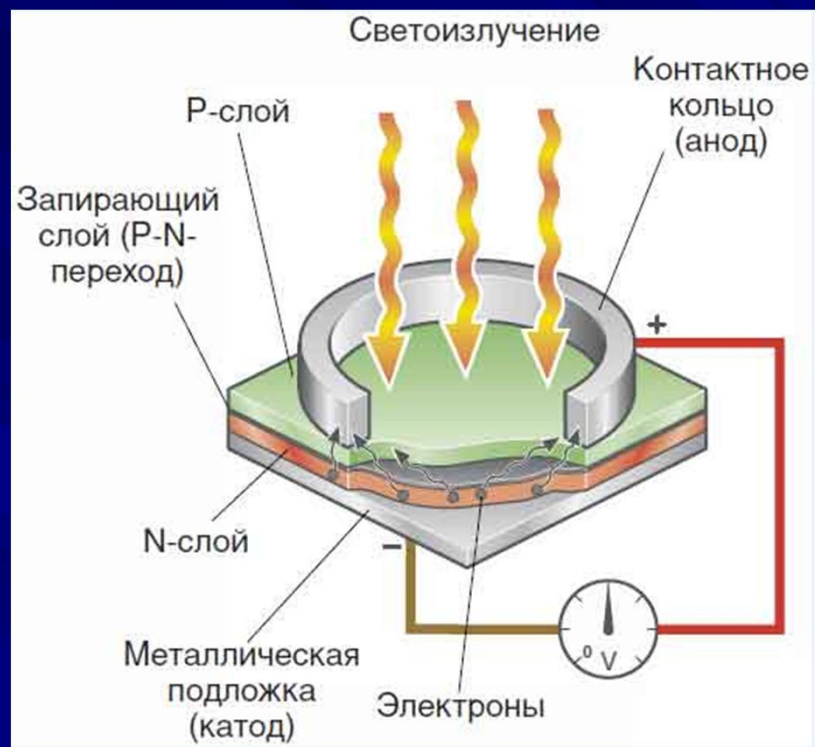
Модулятор Маха-Цандера
(*Mach Zehnder modulator - MZM*)
в виде герметизированной гибридной интегральной схемы
(*технология system-on-package*)



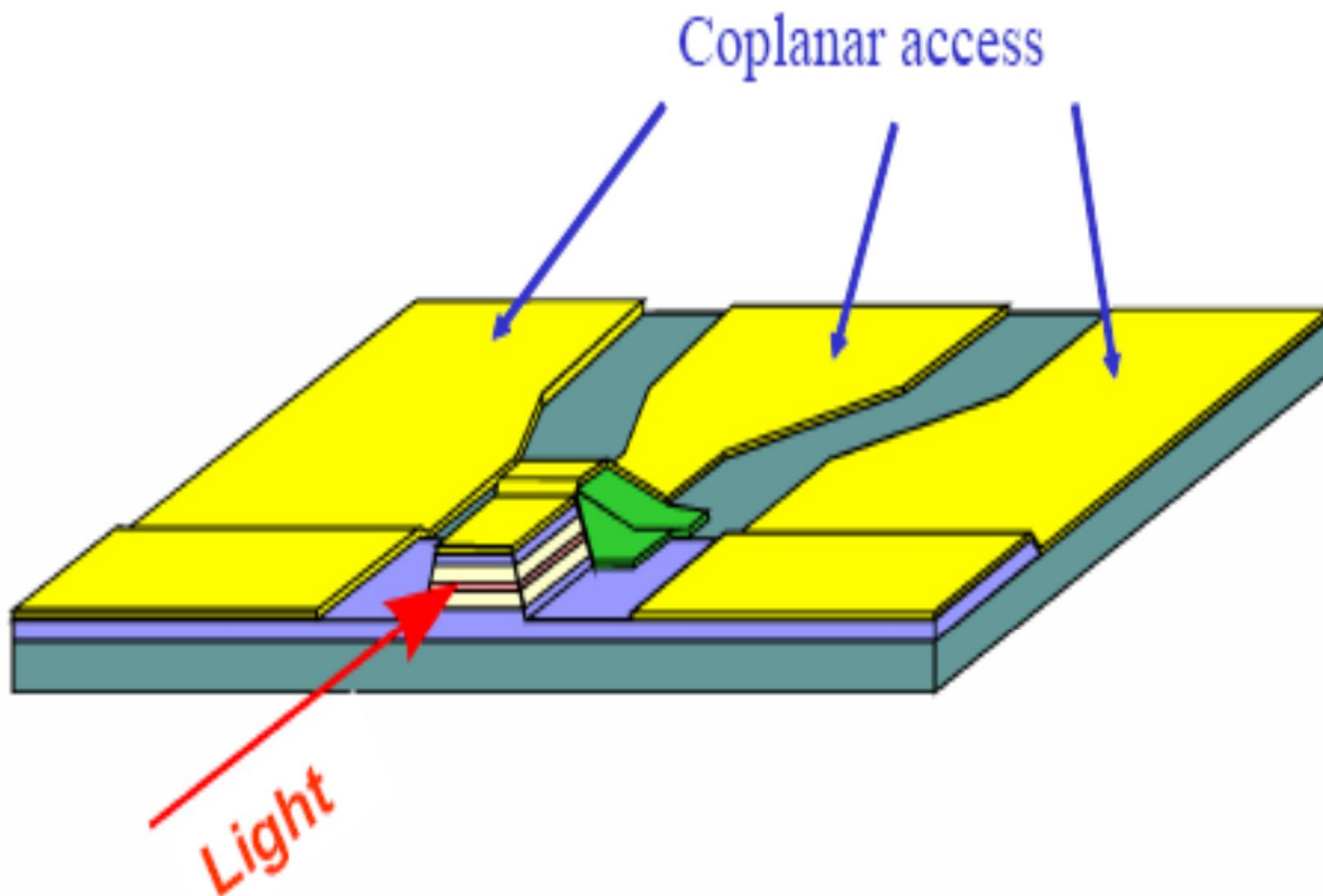
Гибридные интегральные схемы
полупроводниковых лазеров
(технология system-on-package)



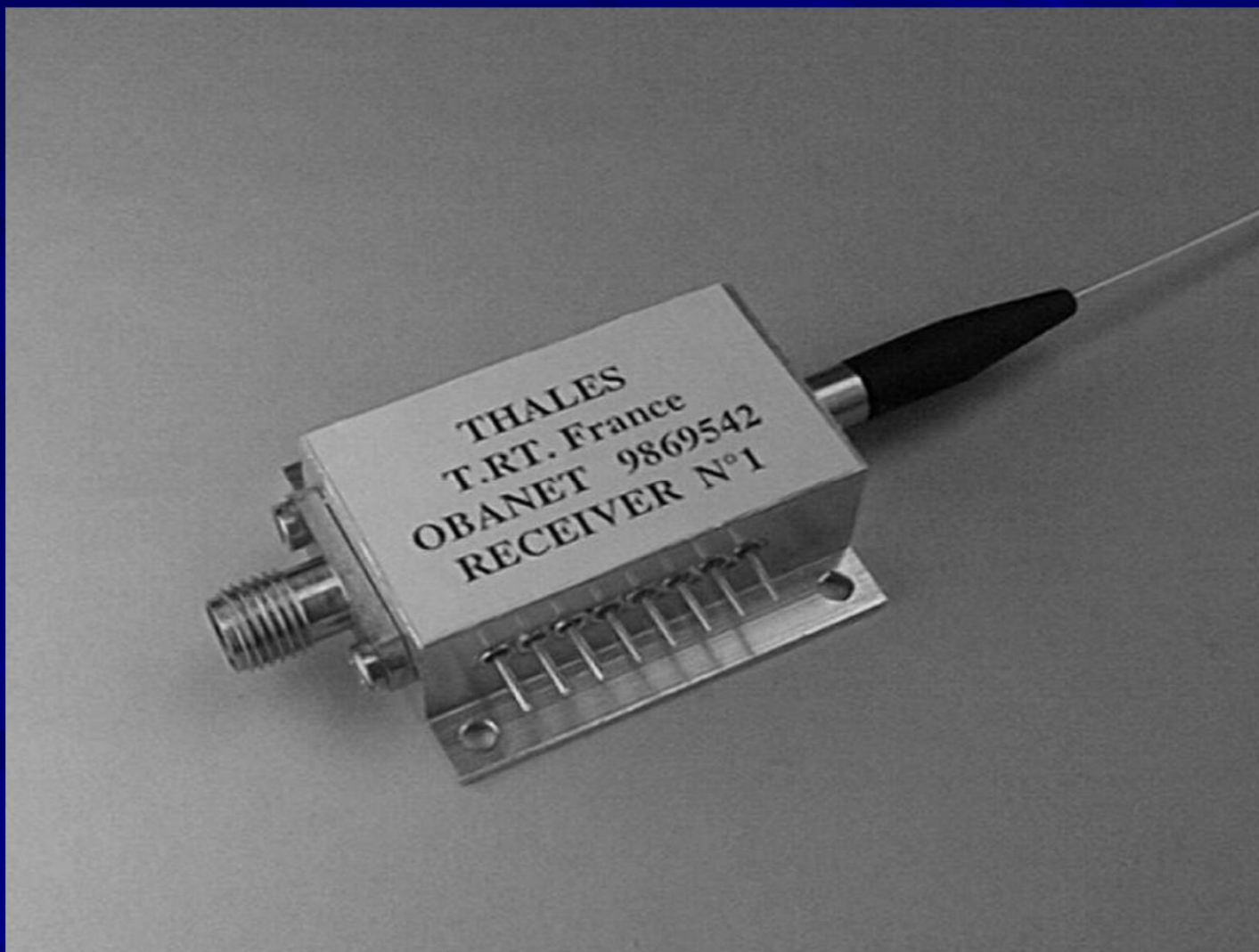
НЧ - фотодиоды



*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

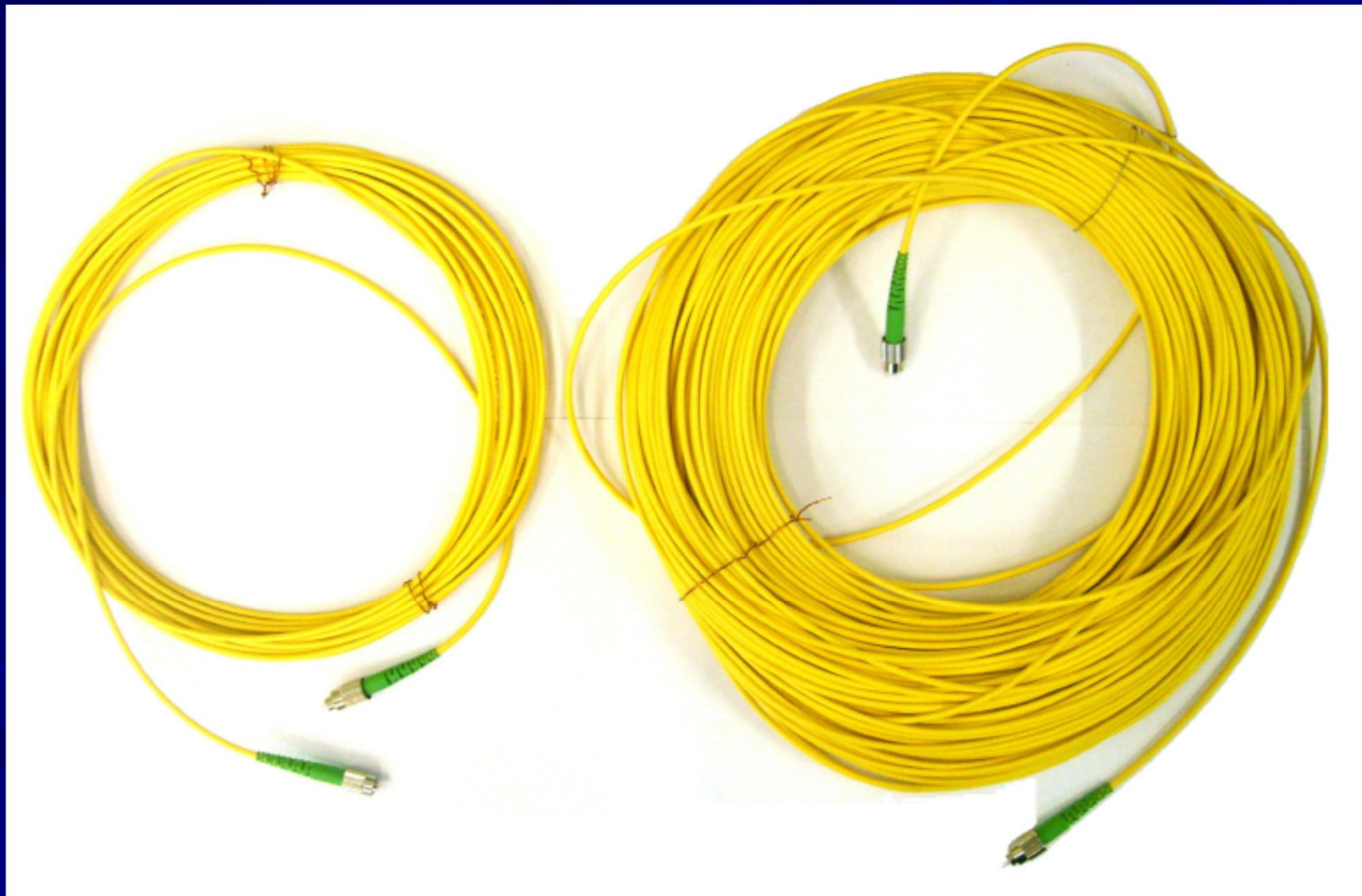
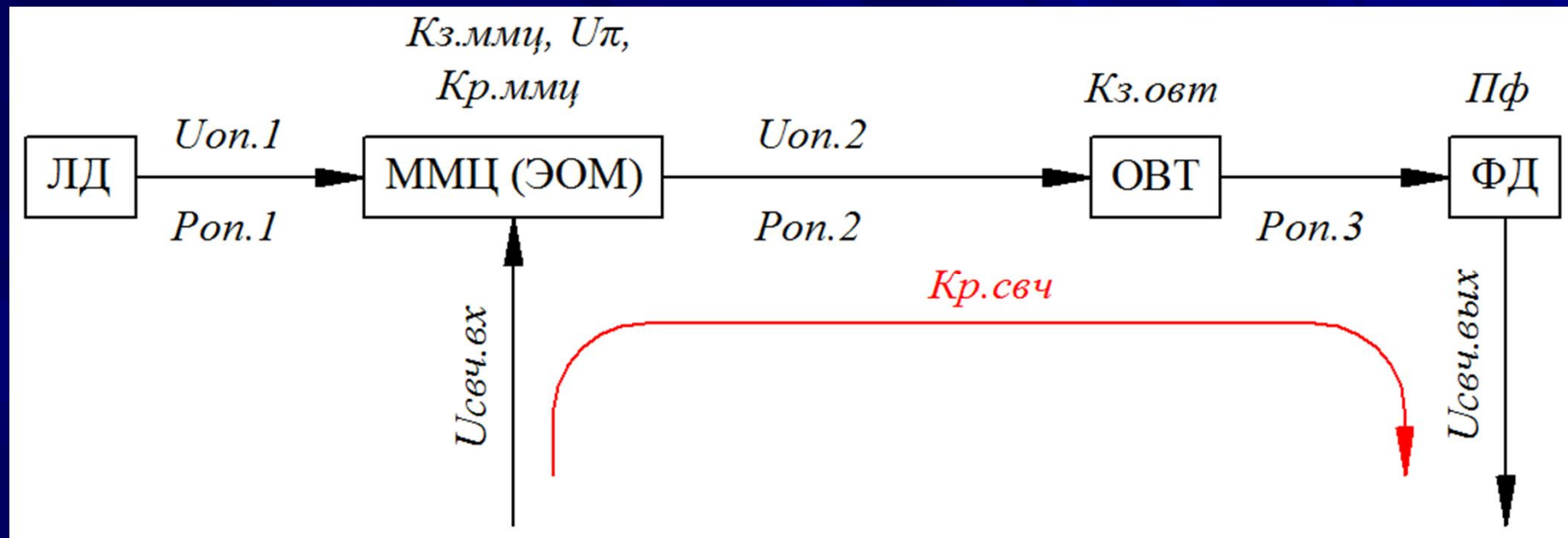


Схема аналогового РФТ СВЧ



ЛД - лазерный диод,

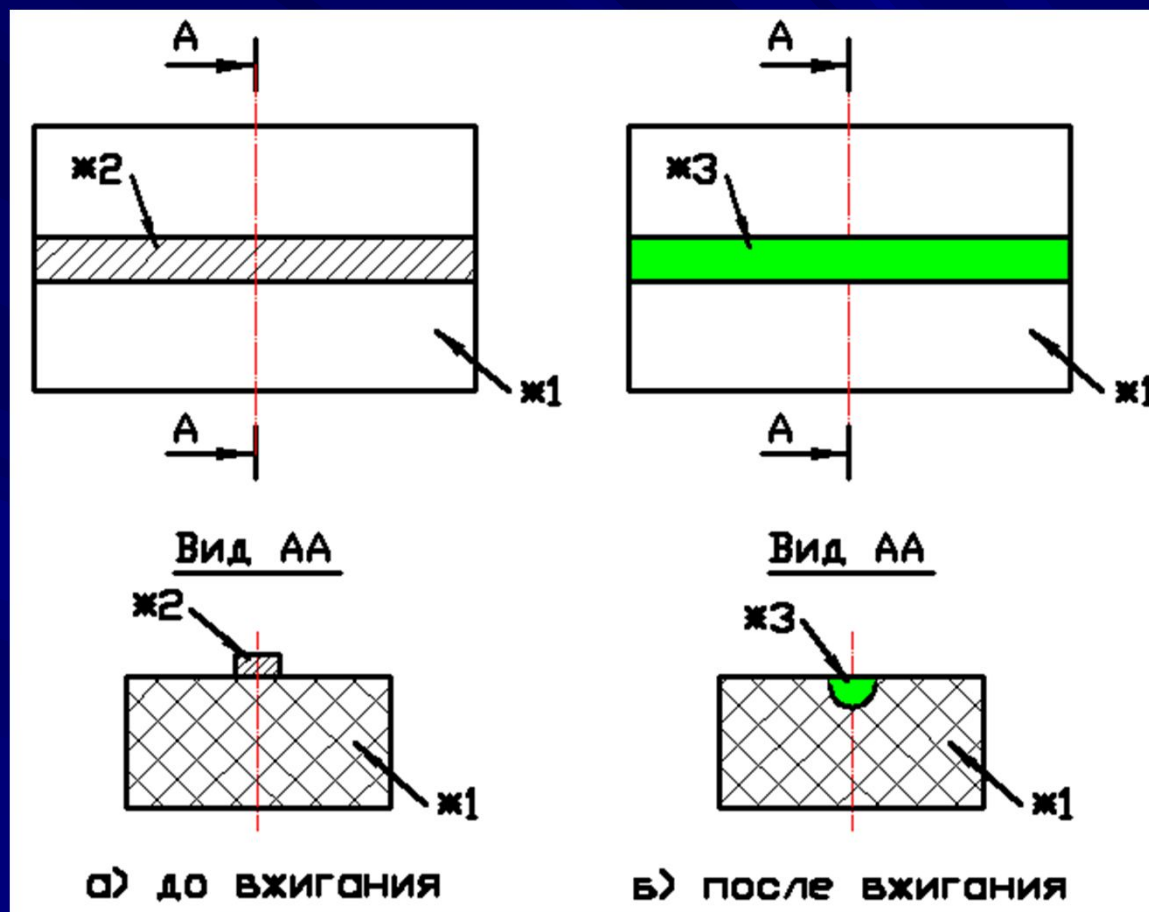
ММЦ - модулятор Маха-Цандера,

ОВТ - оптоволоконный тракт,

ФД - фотодетектор,

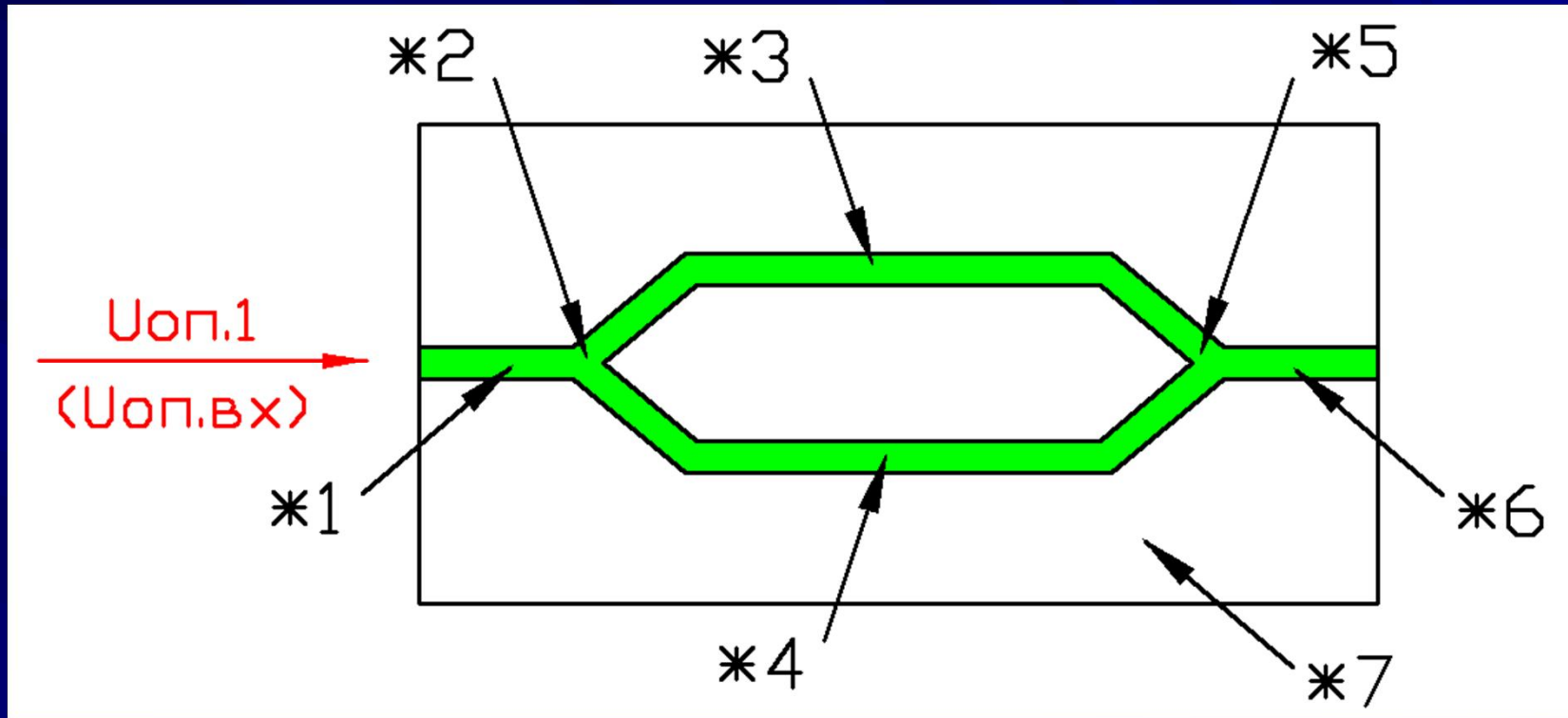
ЭОМ - электрооптический модулятор

Формирование световодных каналов



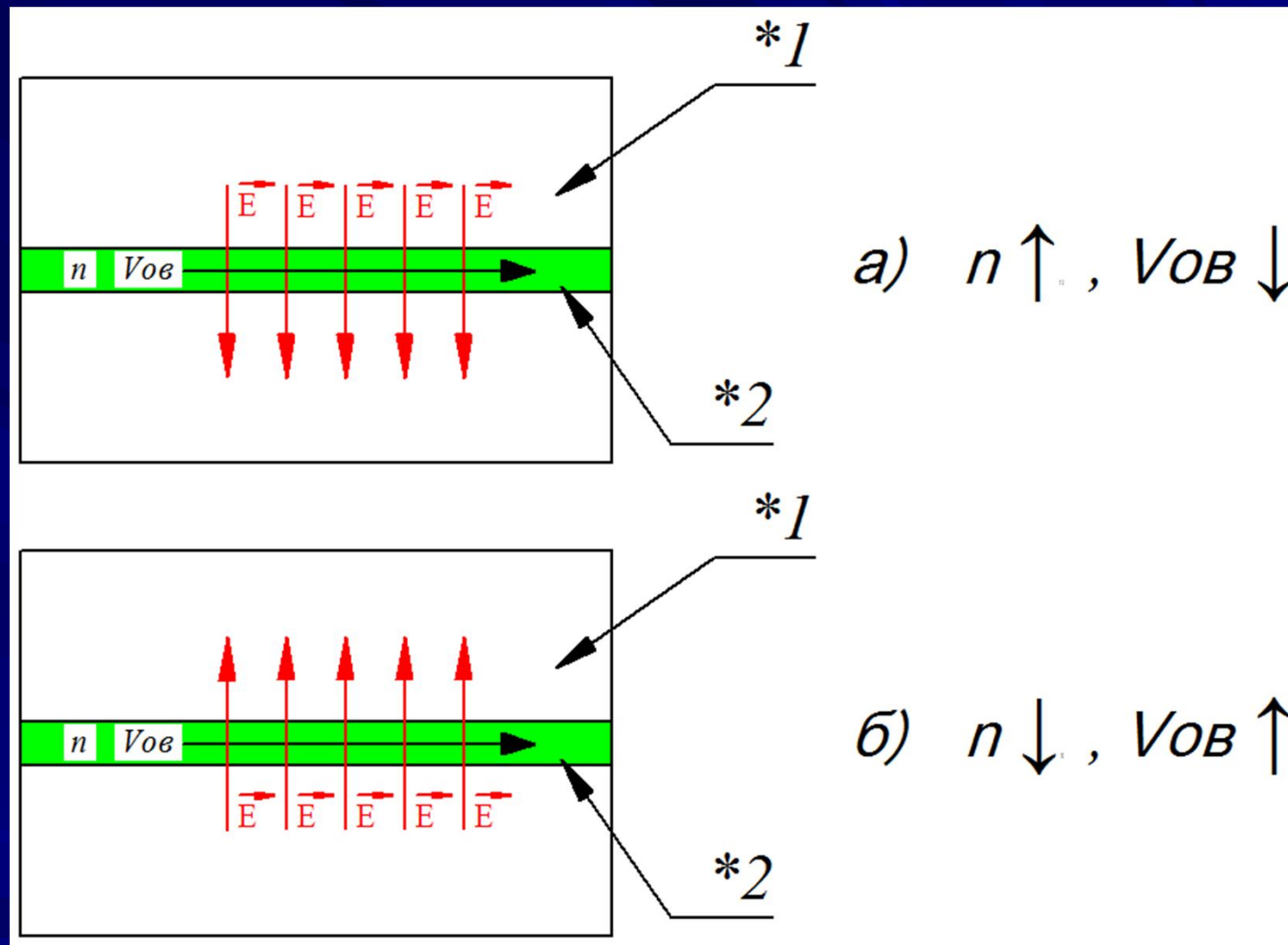
*1 - пластина из ниобата лития,
2 - напылённая полоска из титана,
3 - световодный канал.*

Структура световодных каналов модулятора Маха-Цандера



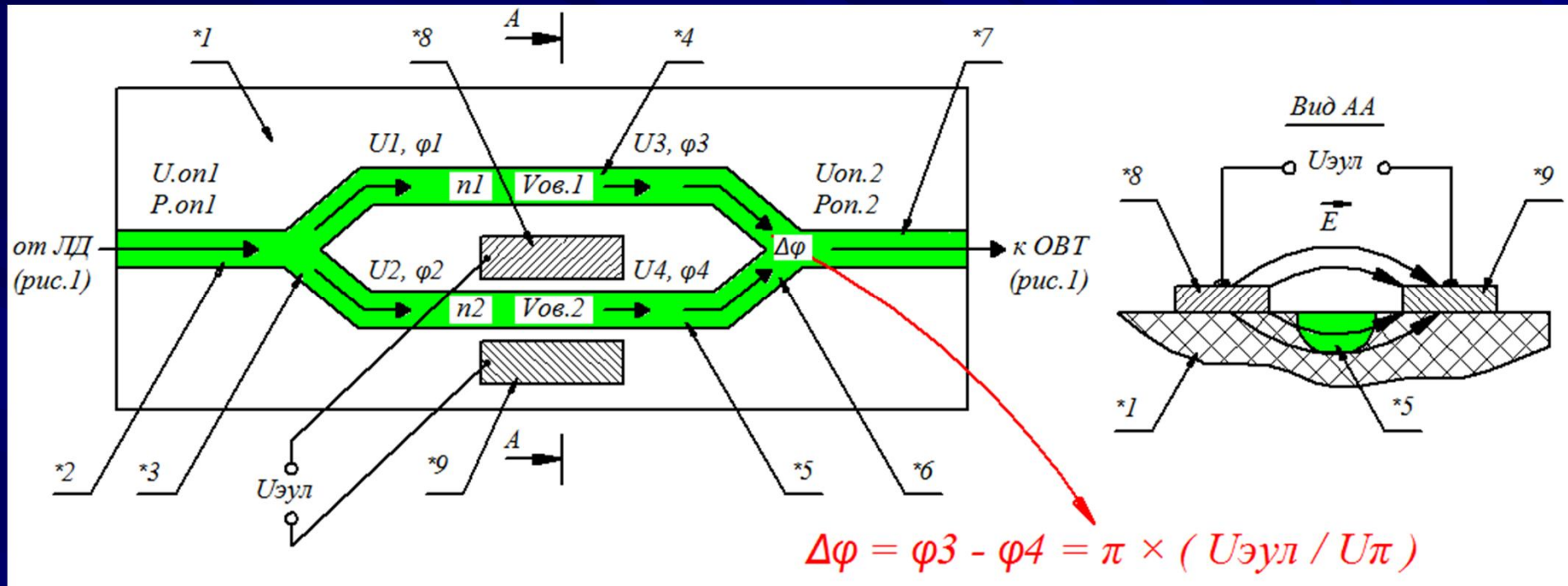
- *1 - входной световодный канал*
- *2 - входной Y - разветвитель*
- *3, *4 - первый и второй параллельные световодные каналы*
- *5 - выходной Y-световителъ*
- *6 - выходной световодный канал*

Эффект Поккельса



1 - пластина из ниобата лития
2 - световодный канал

Физическая реализация эффекта Поккельса в ММЦ



*1 - пластина из сегнетоэлектрика

*2 - входной световодный канал

*3 - входной Y-разветвитель

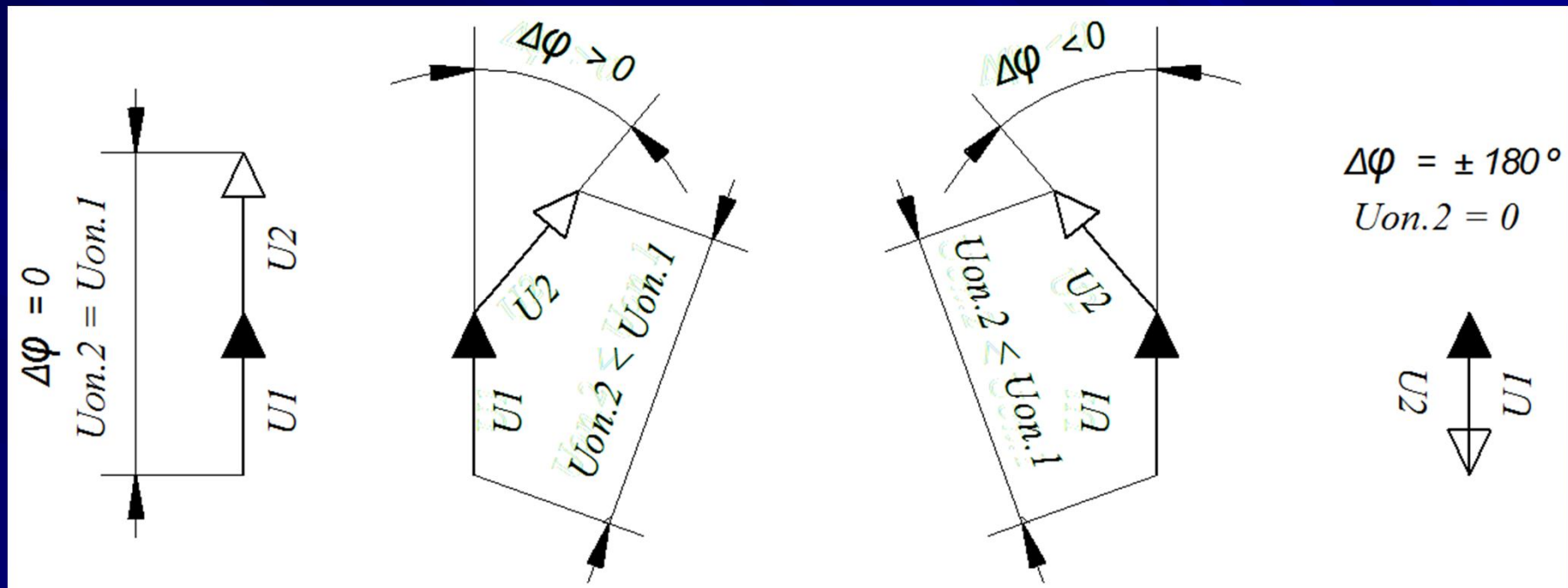
*4, *5 - первый и второй параллельные световодные каналы

*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



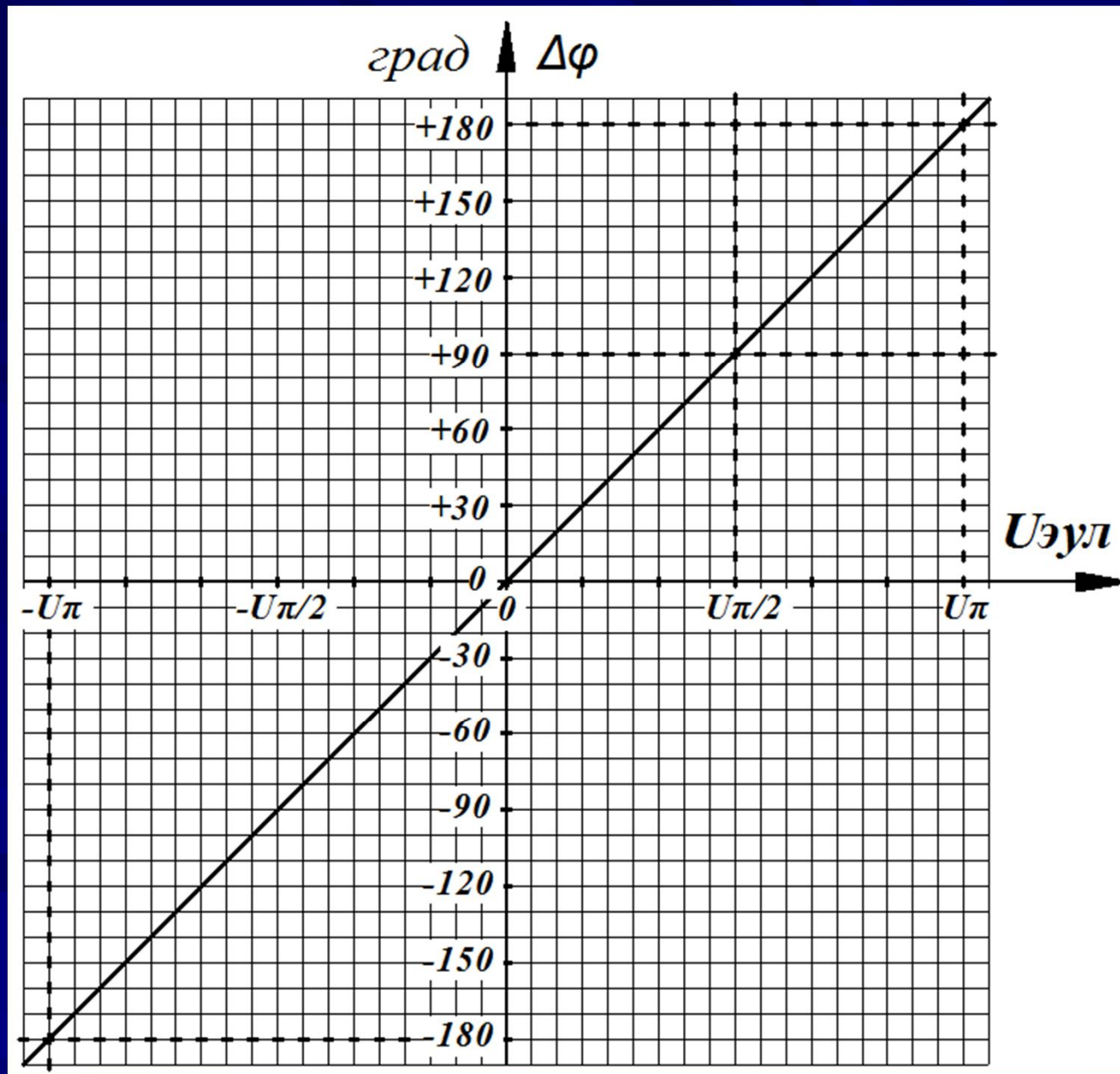
$$U_{\text{эул}} = 0$$

$$0 < U_{\text{эул}} < U\pi$$

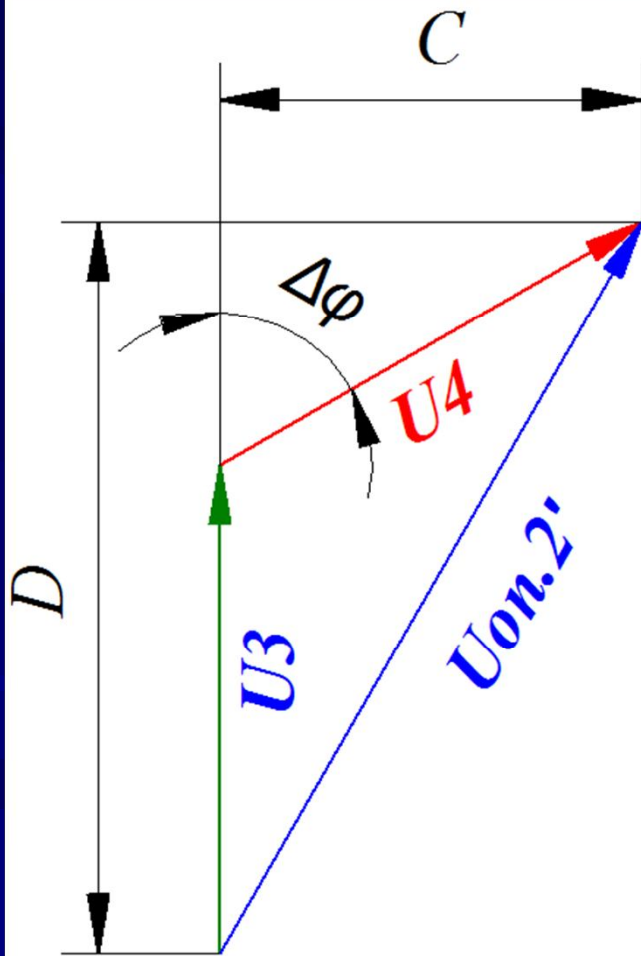
$$-U\pi < U_{\text{эул}} < 0$$

$$U_{\text{эул}} = \pm U\pi$$

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



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



$$U_{оп.2'} = \sqrt{C^2 + D^2}$$

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

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

$$U_3 = U_4 = \frac{U_{оп.1}}{2}$$

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

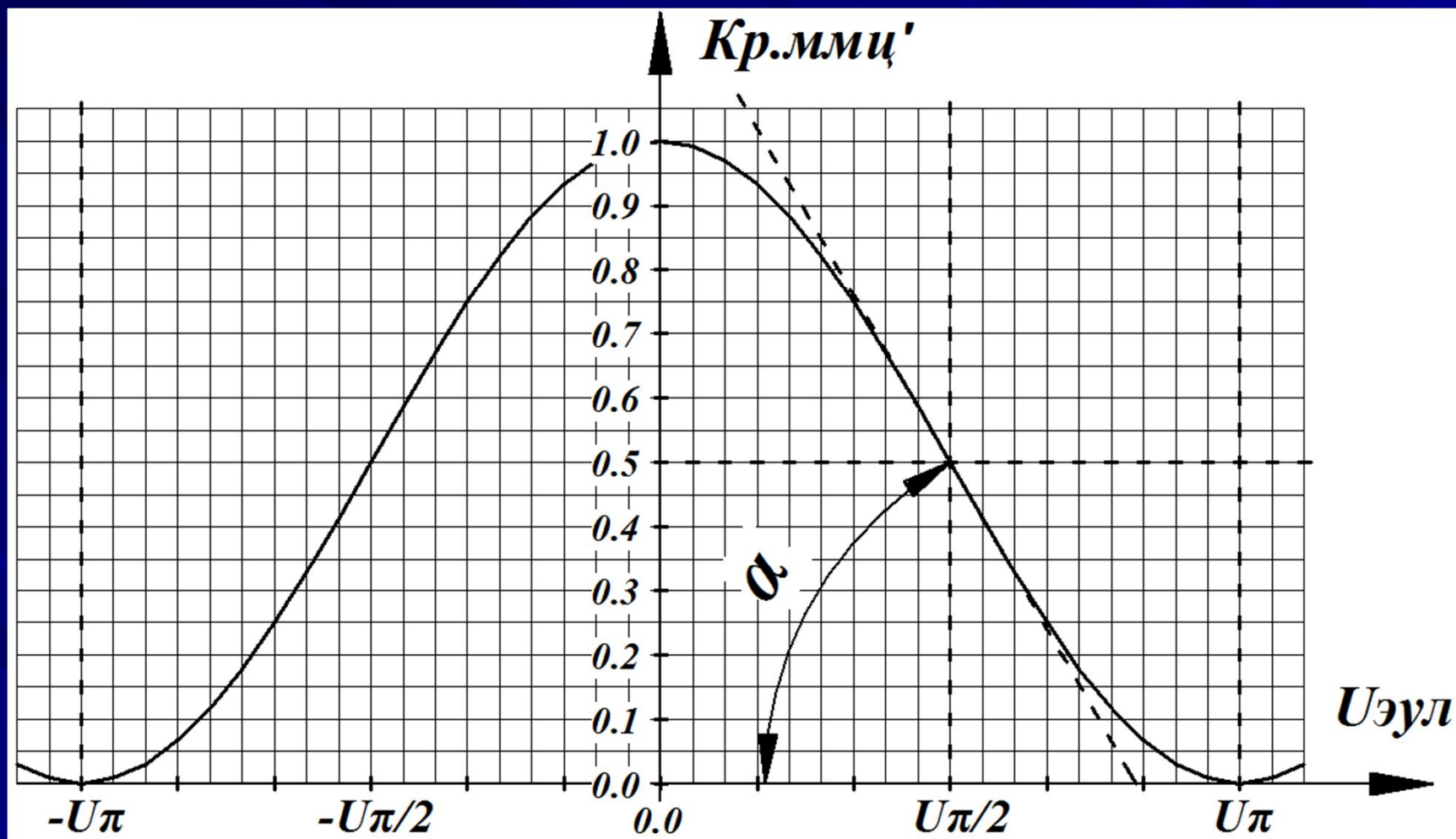
$$U_{оп.2'} = \sqrt{(U_{оп.1})^2 \times \frac{1 + \cos(180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi}))}{2}}$$

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

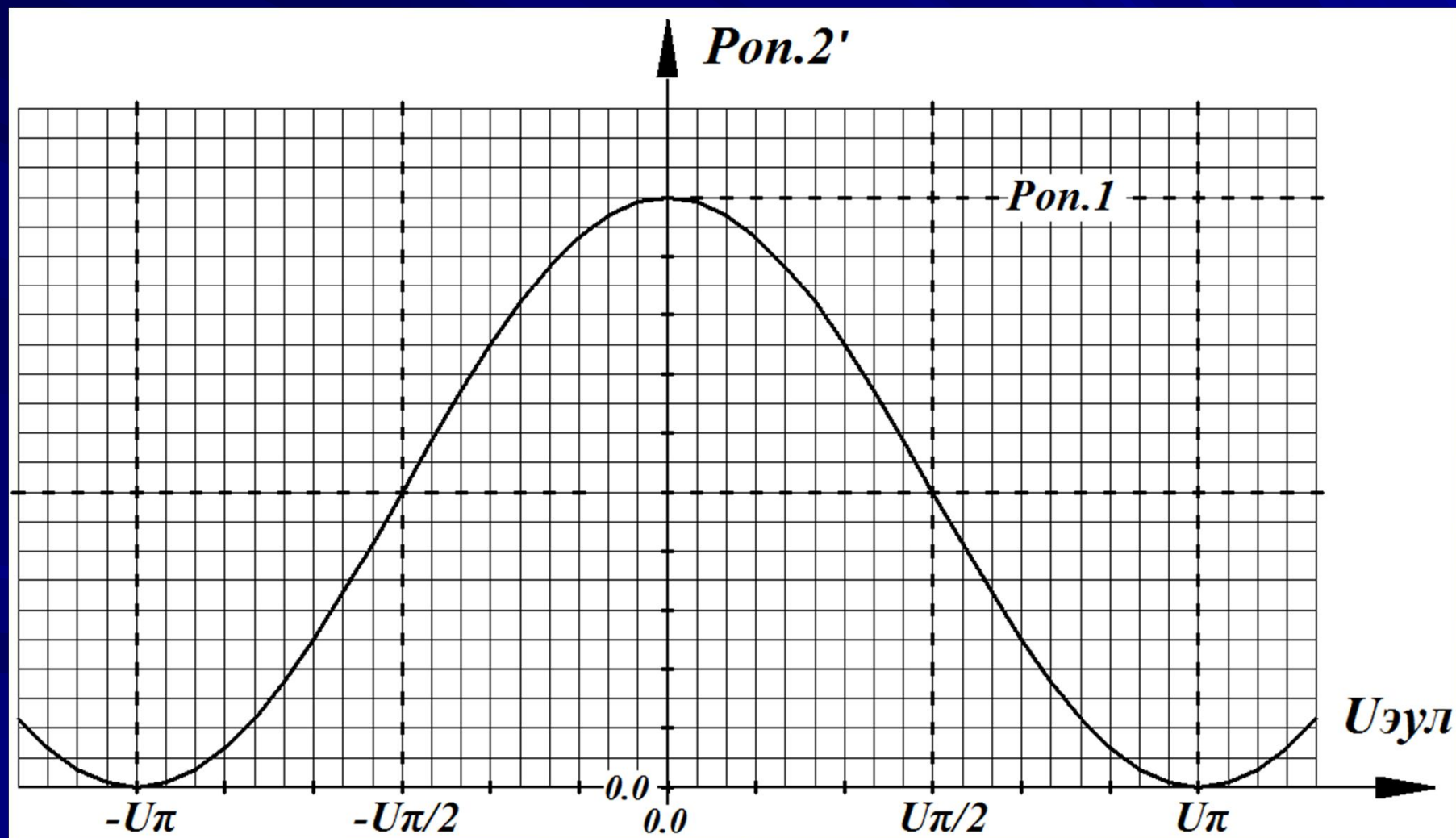
$$K_{и. ММЦ}' = \frac{U_{оп. 2'}}{U_{оп. 1}} = \sqrt{\frac{1 + \cos(180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi}))}{2}}$$

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

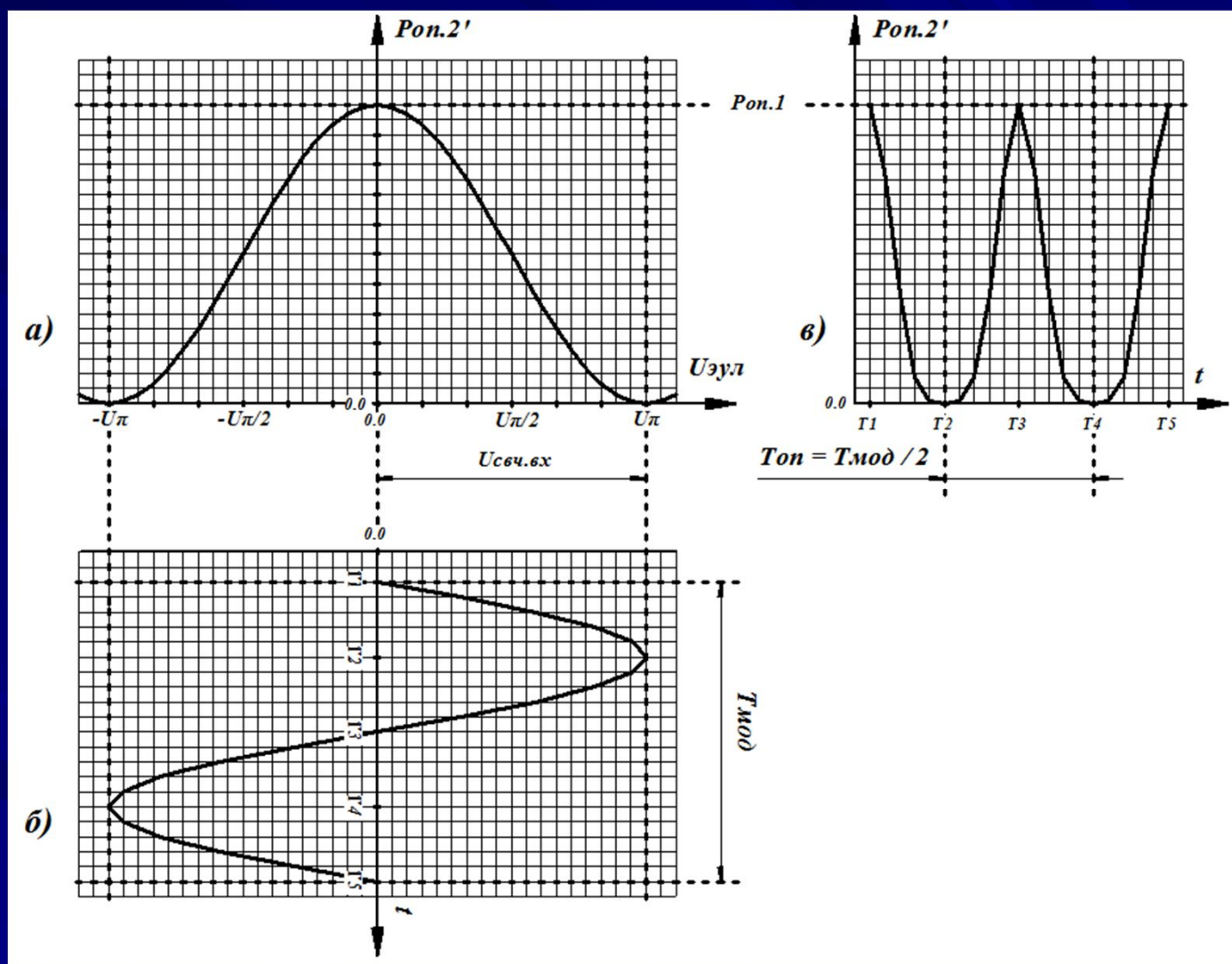
Графическая зависимость $K_{р.мми}$ от $U_{эул}$
для случая отсутствия потерь в оптических трактах
ММЦ ($K_{р.мми}'$)



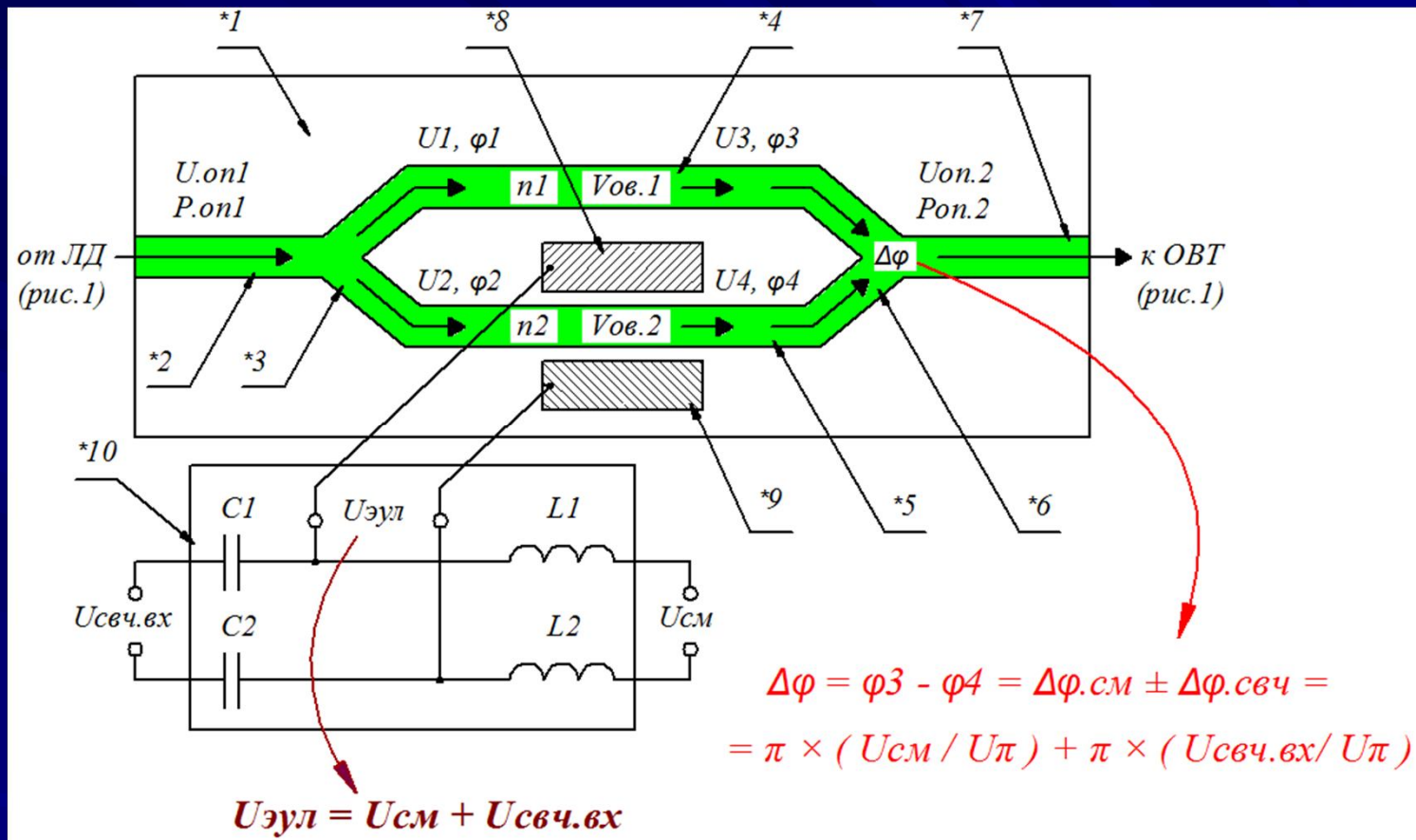
Графическая зависимость $P_{оп.2}$ от $U_{эул}$
для случая отсутствия потерь в оптических трактах
ММЦ ($P_{оп.2'}$)



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

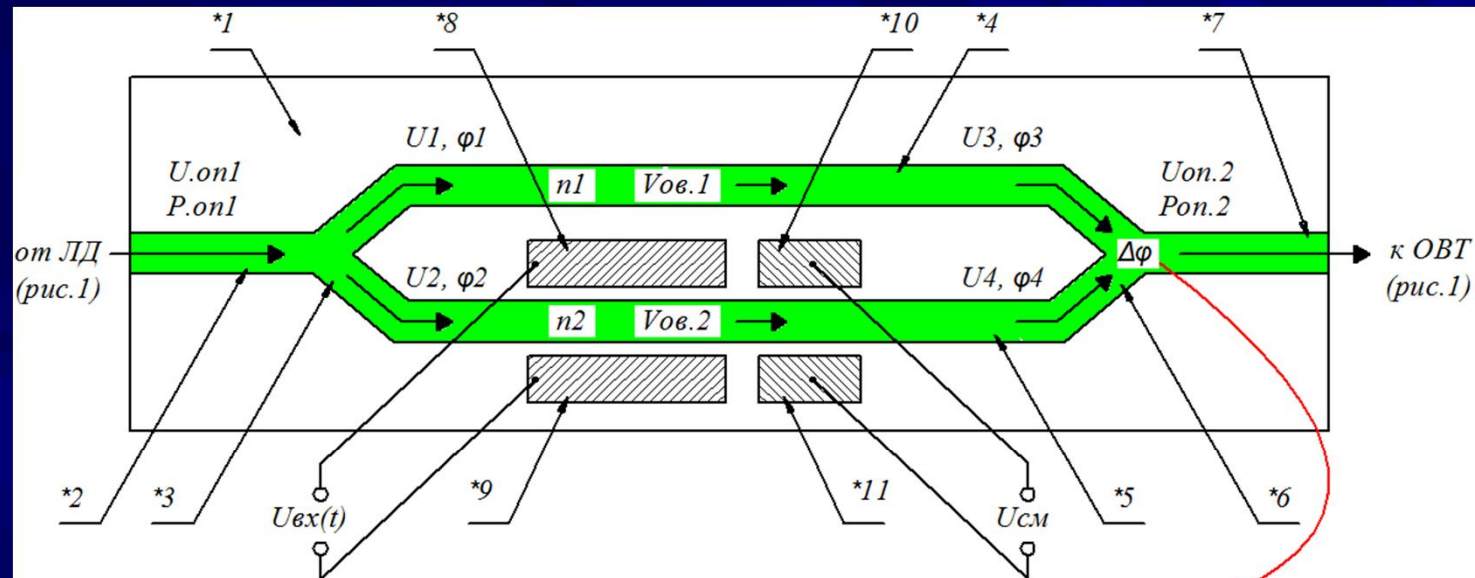


Схематическое изображение ММЦ **на пластине из сегнетоэлектрика** **с внешней цепью подачи напряжения смещения**



*1 - пластина из сегнетоэлектрика, *2 - входной световодный канал, *3 - входной Y-разветвитель, *4,*5 - первый и второй параллельные световодные каналы, *6 - выходной Y-световитель, *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

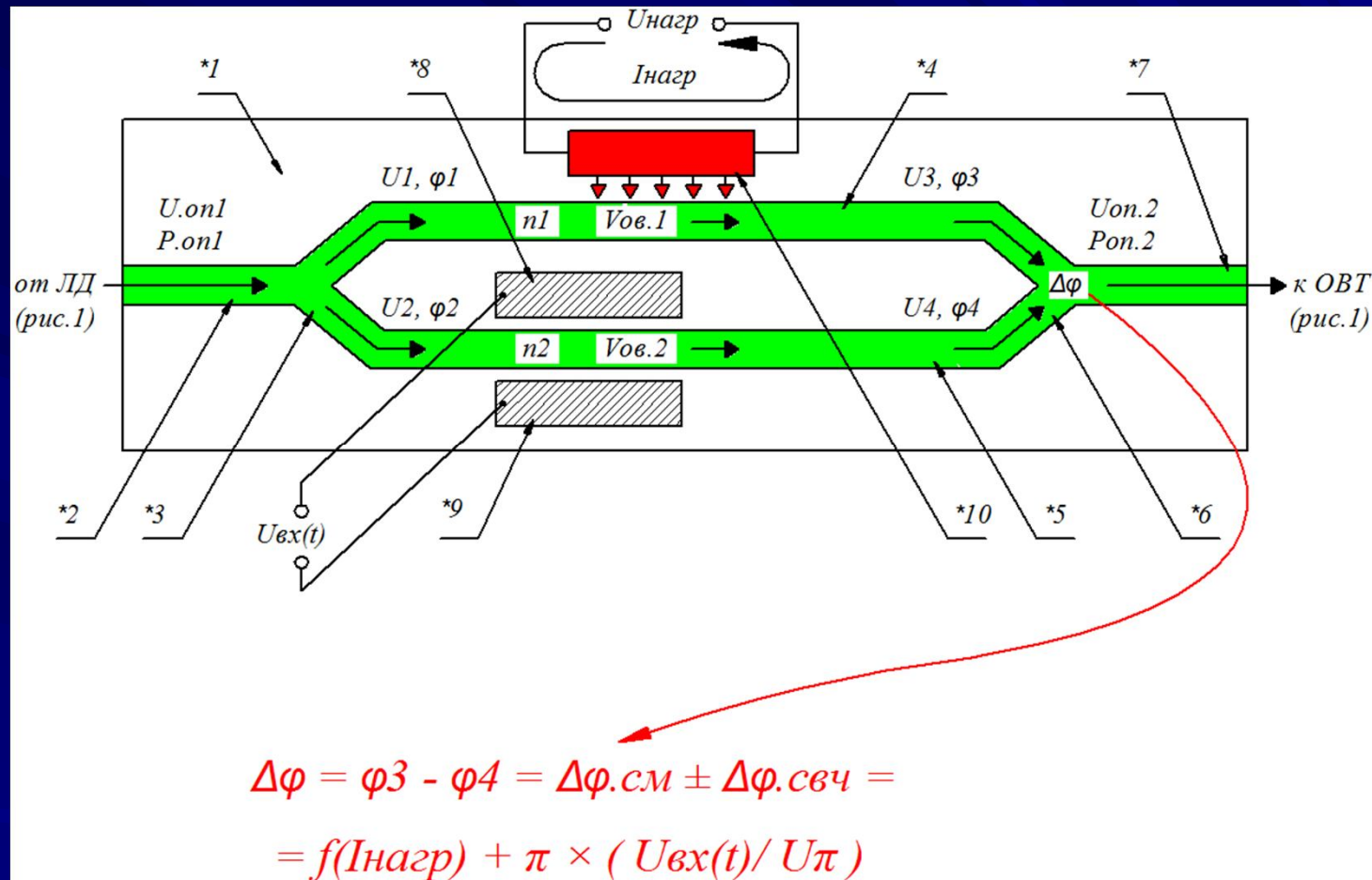


$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_4 = \Delta\varphi_{\text{см}} \pm \Delta\varphi_{\text{свч}} =$$

$$= \pi \times (U_{\text{см}} / U_{\pi.\text{см}}) + \pi \times (U_{\text{вх}}(t) / U_{\pi.\text{свч}})$$

- *1 - пластина из сегнетоэлектрика, *2 - входной световодный канал,
 *3 - входной Y-разветвитель, *4,*5 - первый и второй параллельные световодные каналы,
 *6 - выходной Y-световител, *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 $\Delta\phi$ см



*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 $U_{\text{см}} = U_{\pi}/2$

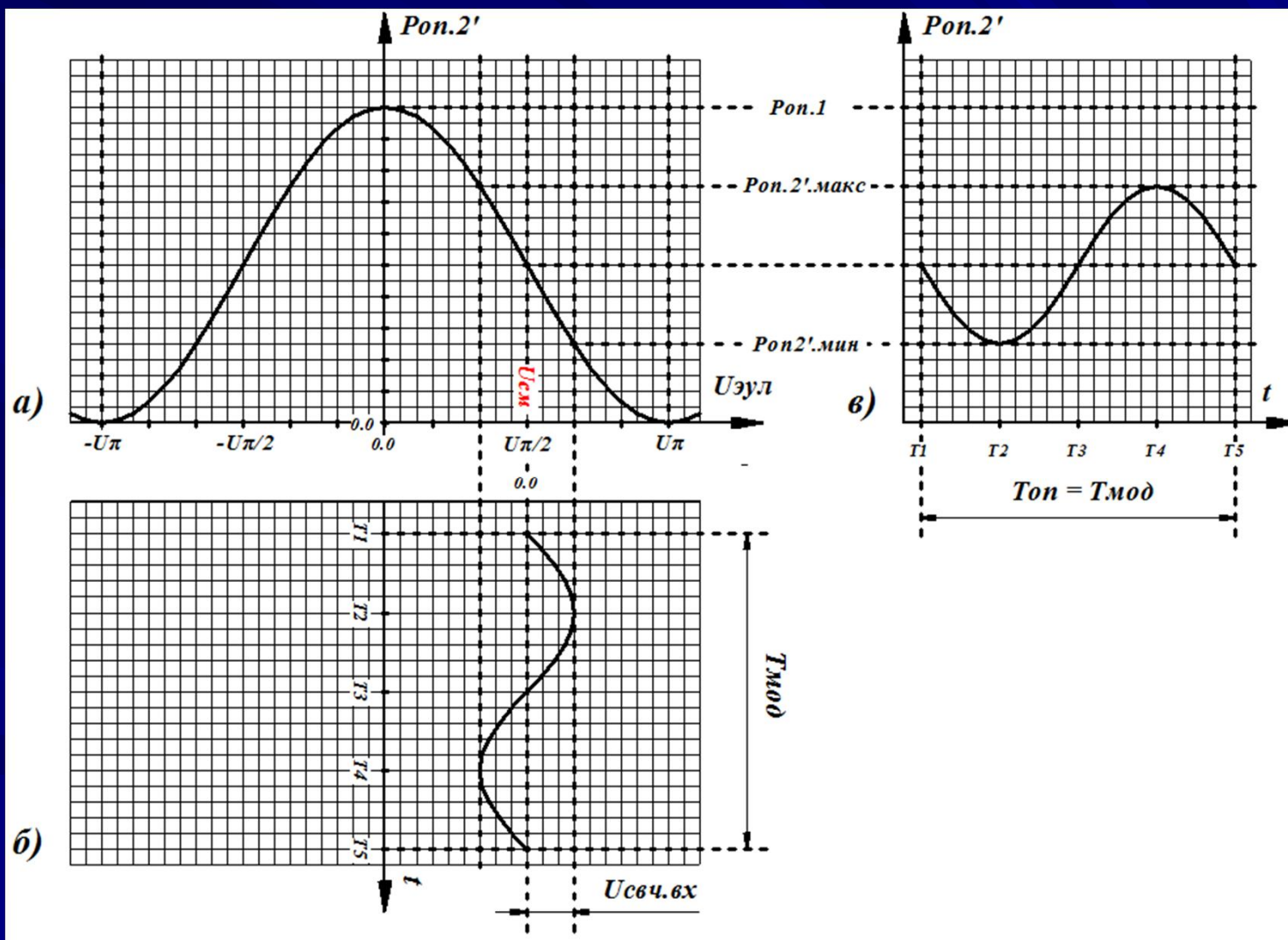
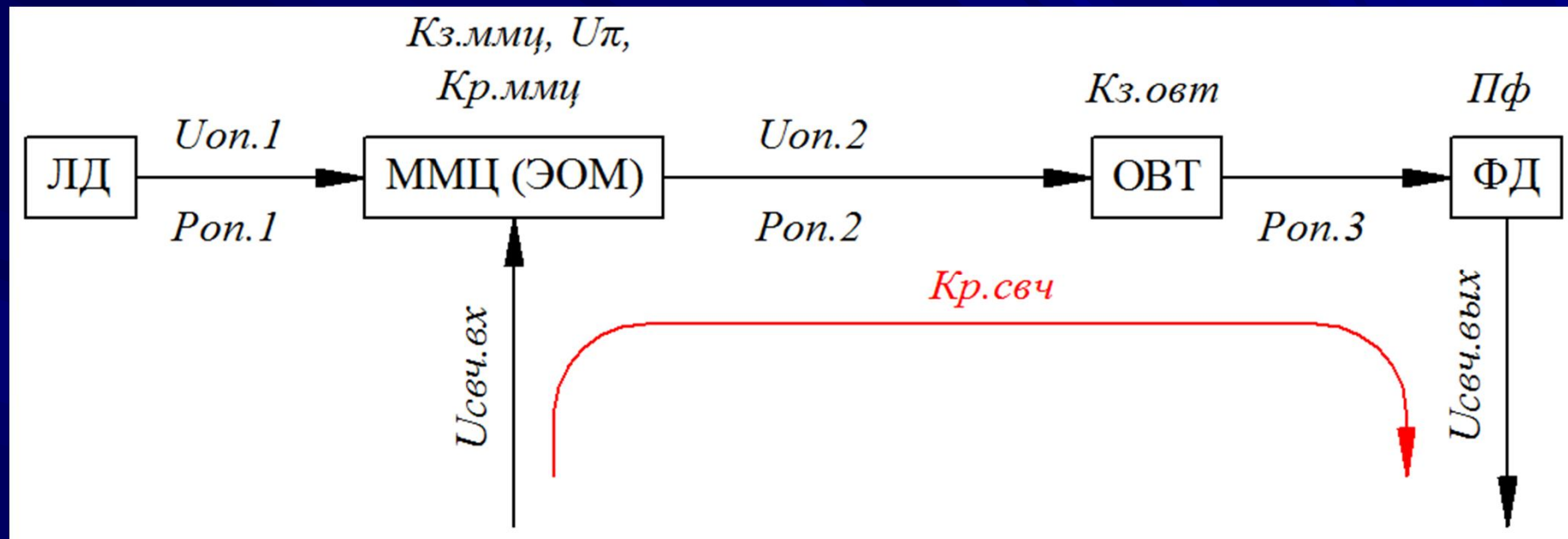


Схема аналогового РФТ СВЧ



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

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

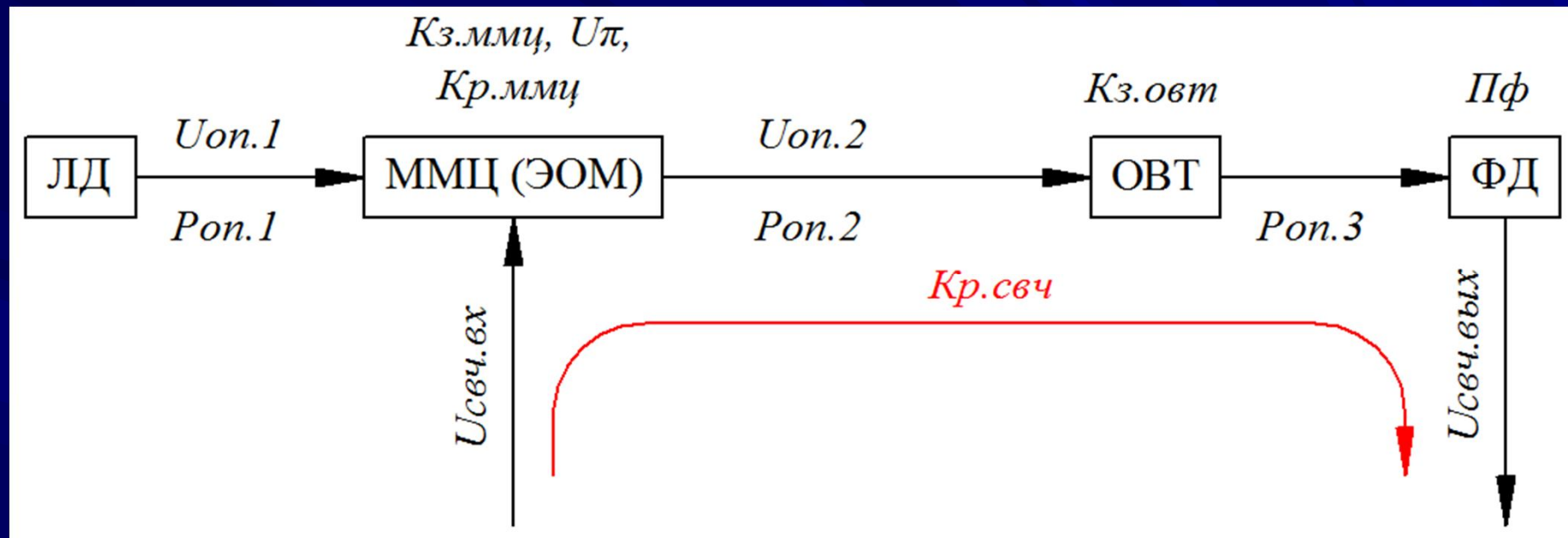
$$P_{\text{оп.2'}.макс} = P_{\text{оп.1}} \times 0,5 \left(1 + \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi \times U_{\text{свч.вх}}}{U_{\pi}} \right) \right)$$

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,

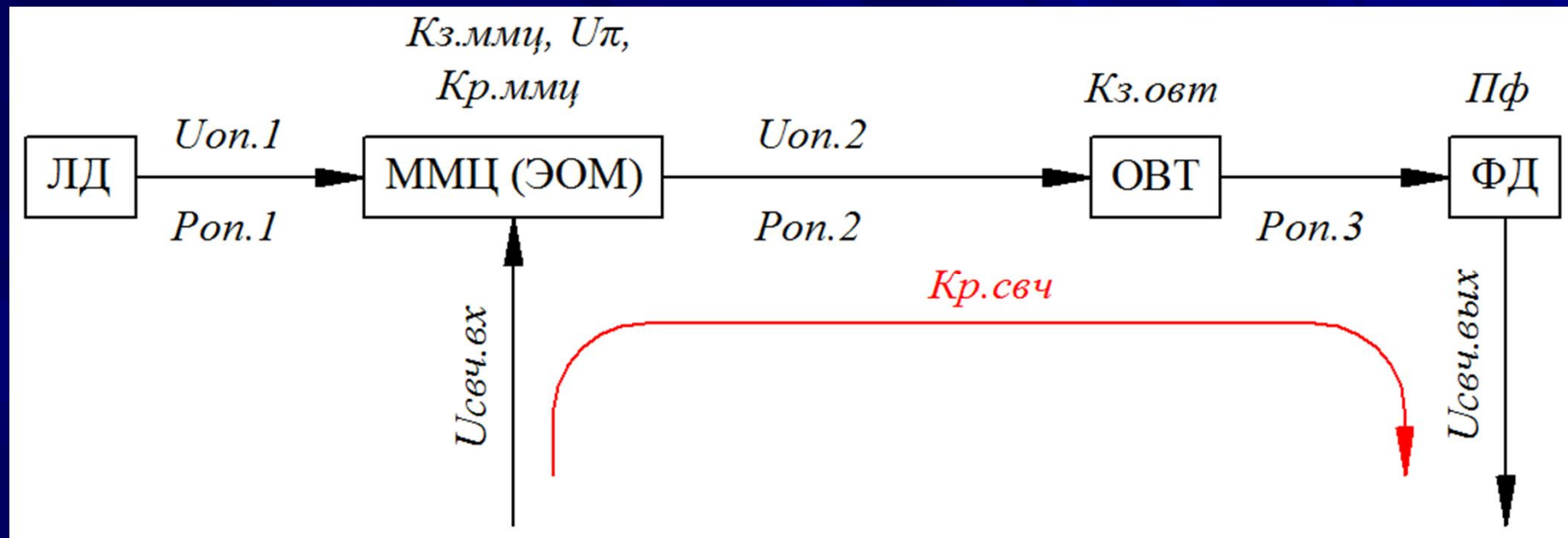
ЭОМ - электрооптический модулятор

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,

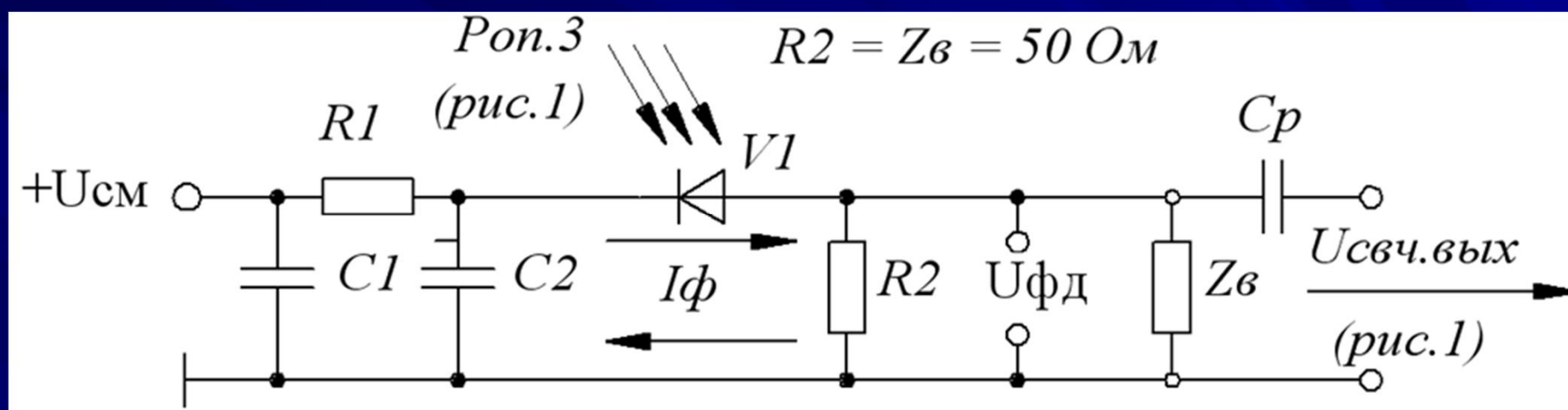
ММЦ - модулятор Маха-Цандера,

ОВТ - оптоволоконный тракт,

ФД - фотодетектор,

ЭОМ - электрооптический модулятор

Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ
модель XPDV3120R производства фирмы u²t 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 $U_{\text{см}} = U_{\pi}/2$

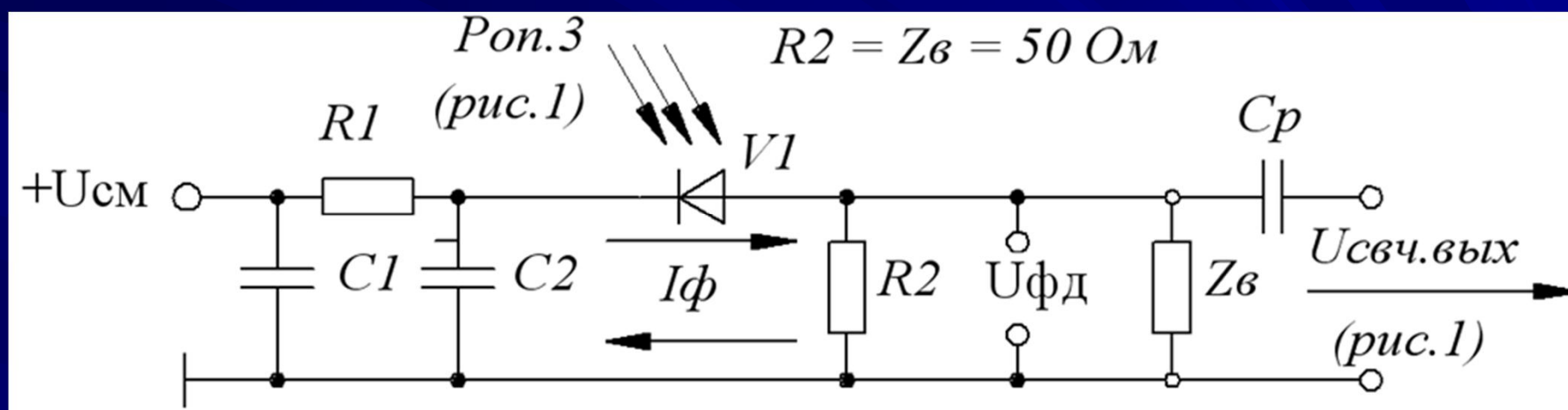
$$I_{\text{ф.мин}} = R_{\text{оп.3.мин}} \times P_{\text{ф}}$$

$$I_{\text{ф.макс}} = R_{\text{оп.3.макс}} \times P_{\text{ф}}$$

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

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

Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ
модель XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics

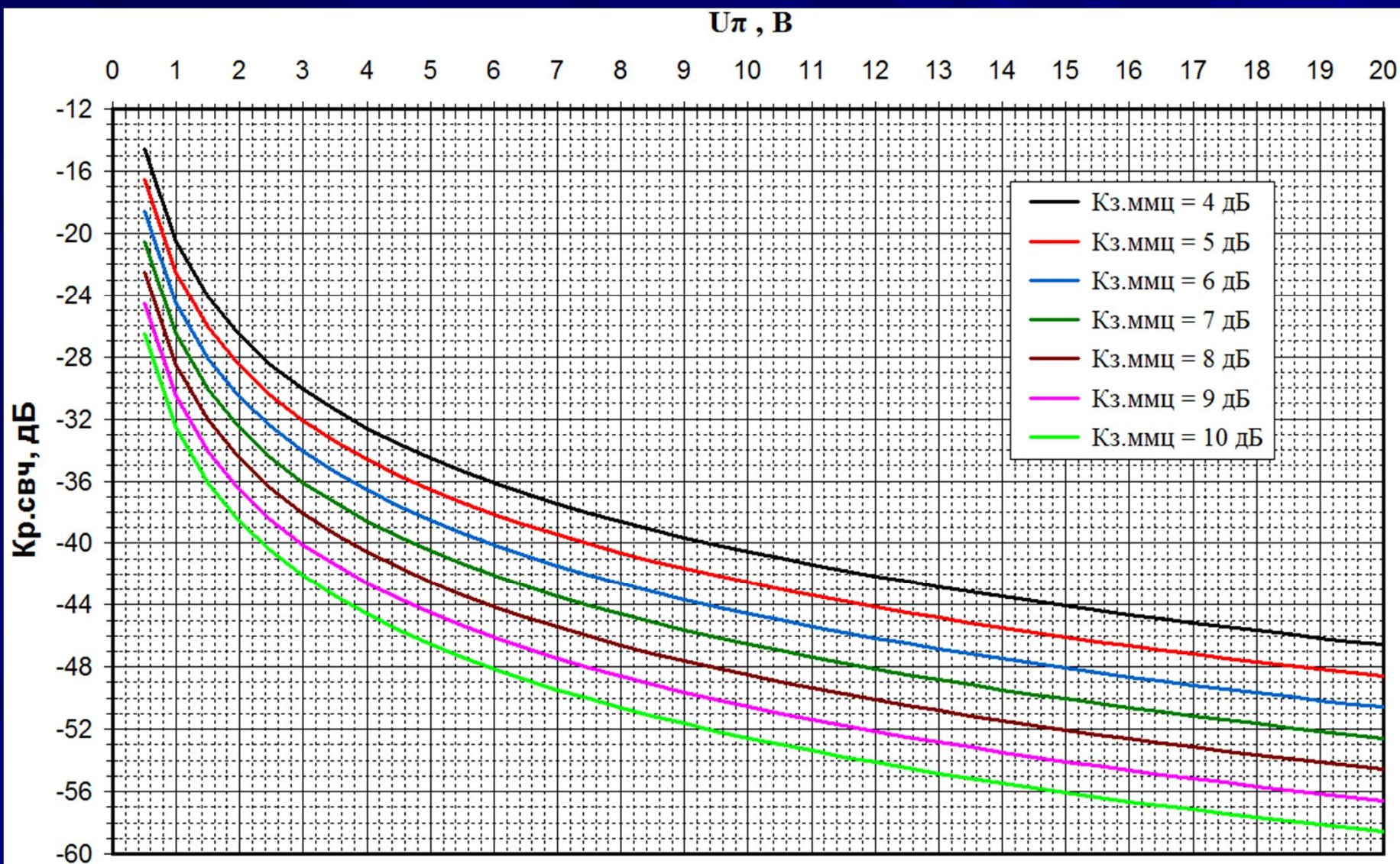


Алгебраические выражения для определения амплитуды выходного сигнала СВЧ и коэффициента передачи РФТ

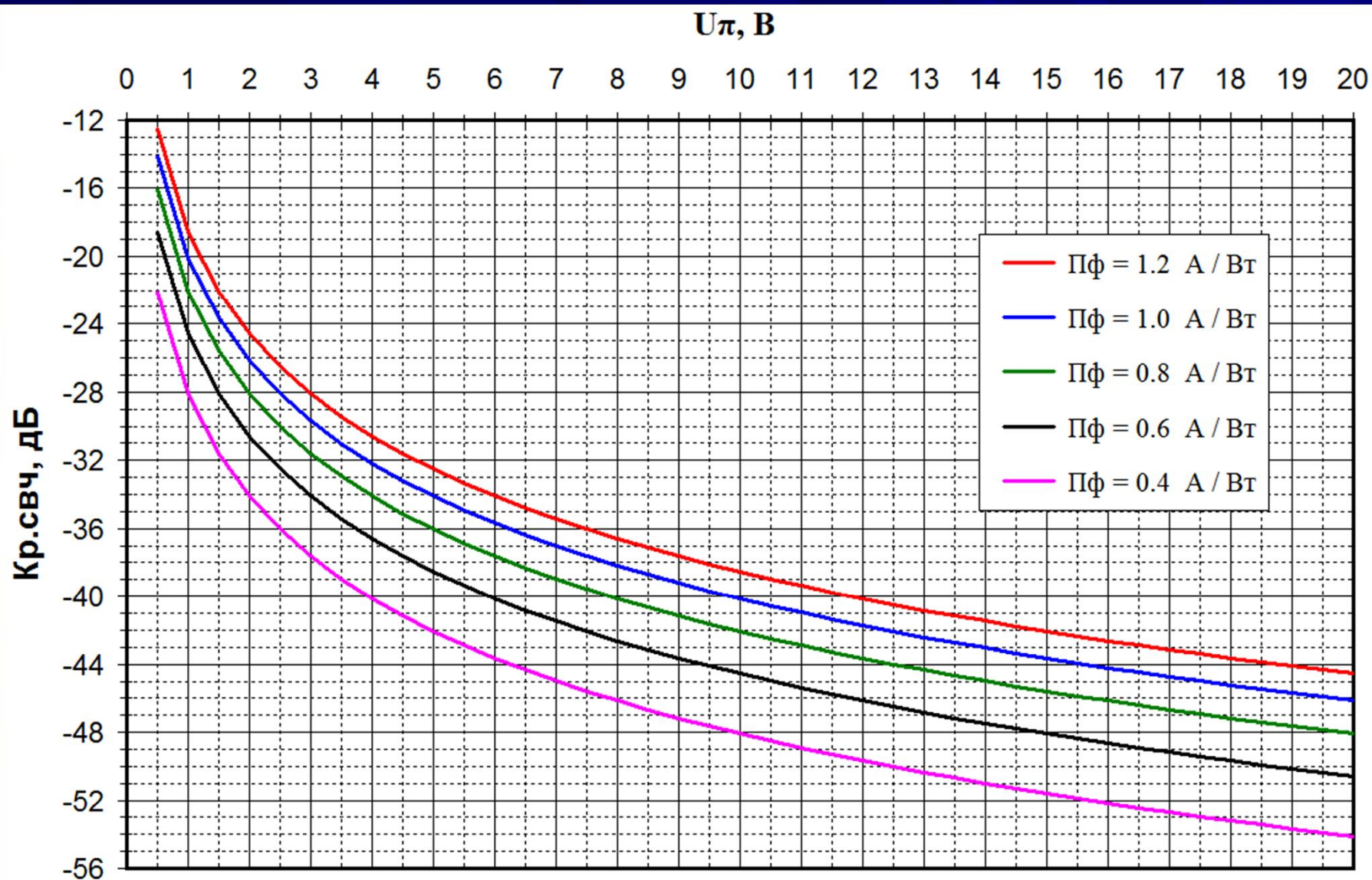
$$U_{\text{свч. вых}} = (U_{\text{фд. макс}} - U_{\text{фд. мин}}) / 2$$

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

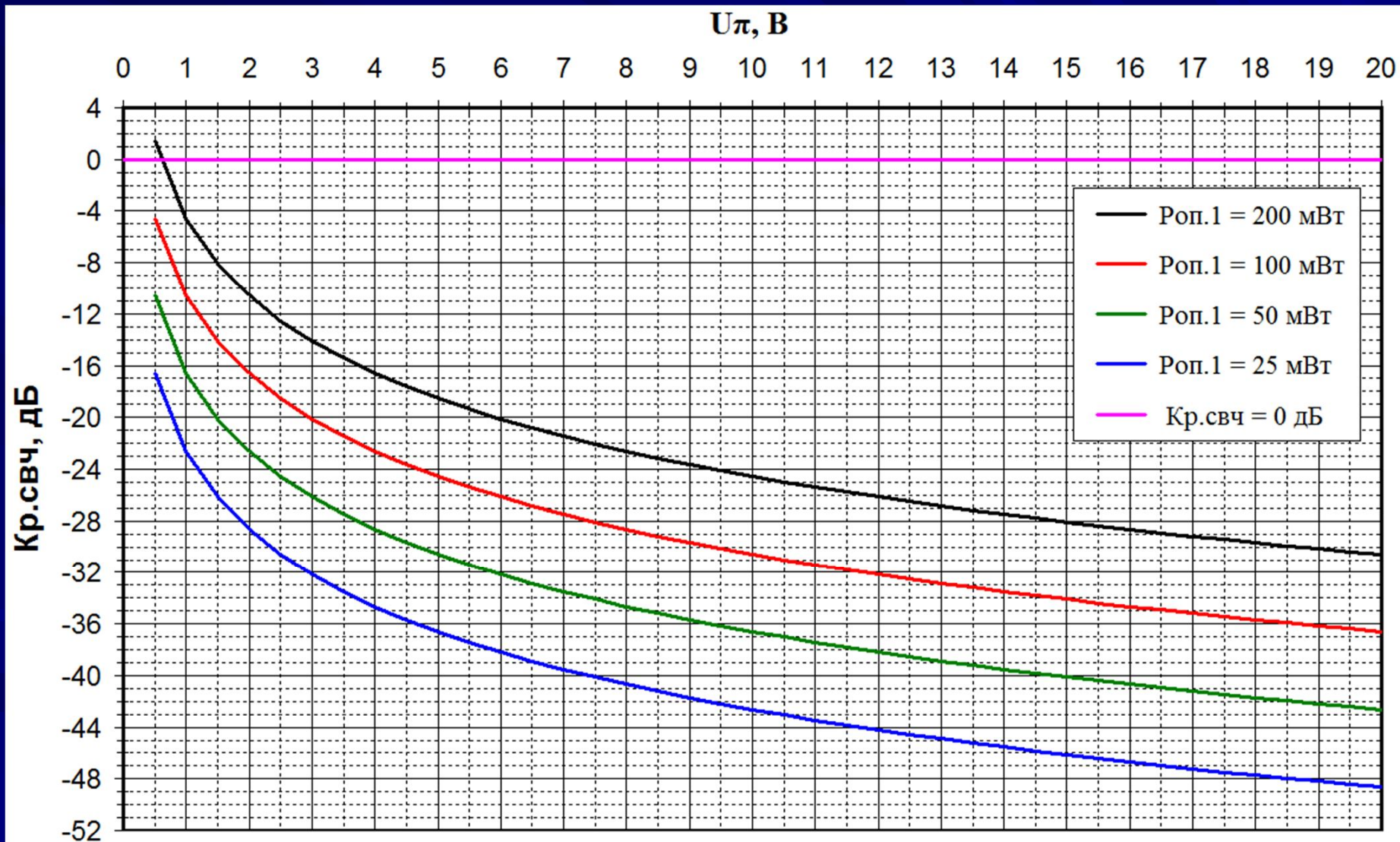
Зависимости $K_{р.свч}$ от U_{π} при различных $K_{з.ммц}$
($P_{оп.1} = 20$ мВт, $U_{свч.вх} = 7$ мВ, $\Pi\phi = 0.6$ А / Вт)



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



Зависимости $K_{р.свч}$ от $U_{п}$ 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***