



**Открытое акционерное общество  
«Центральное конструкторское бюро автоматики»**

## **Микроволновая фотоника**

### ***Аналоговые ВОЛС СВЧ с положительными коэффициентами передачи***

**Ведущий инженер ОАО «ЦКБА» Ю.Н. Вольхин  
Студентка ОмГТУ А.В. Гамиловская**

**Докладчик: А.В. Гамиловская**

**ЦКБА - 2013**

**ВОЛС**

***это***

***волоконно-оптическая***

***линия***

***связи***

## Тематика доклада

- расчёт параметров аналоговых ВОЛС СВЧ по параметрам комплектующих элементов;
- определение требований к параметрам комплектующих элементов и определение оптимальных энергетических режимов эксплуатации этих элементов, при которых аналоговая ВОЛС СВЧ будет иметь положительный коэффициент передачи.

# Проблема

**аналоговая ВОЛС СВЧ**



**усилитель СВЧ**

**При каких условиях ????????????**

**Выражаем благодарность сотрудникам**

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

**[www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru)**

**Пермской**

**Научно-Производственной Приборостроительной**

**Компании**

**[www.ppk.perm.ru](http://www.ppk.perm.ru)**

**Пермского государственного**

**национального исследовательского университета**

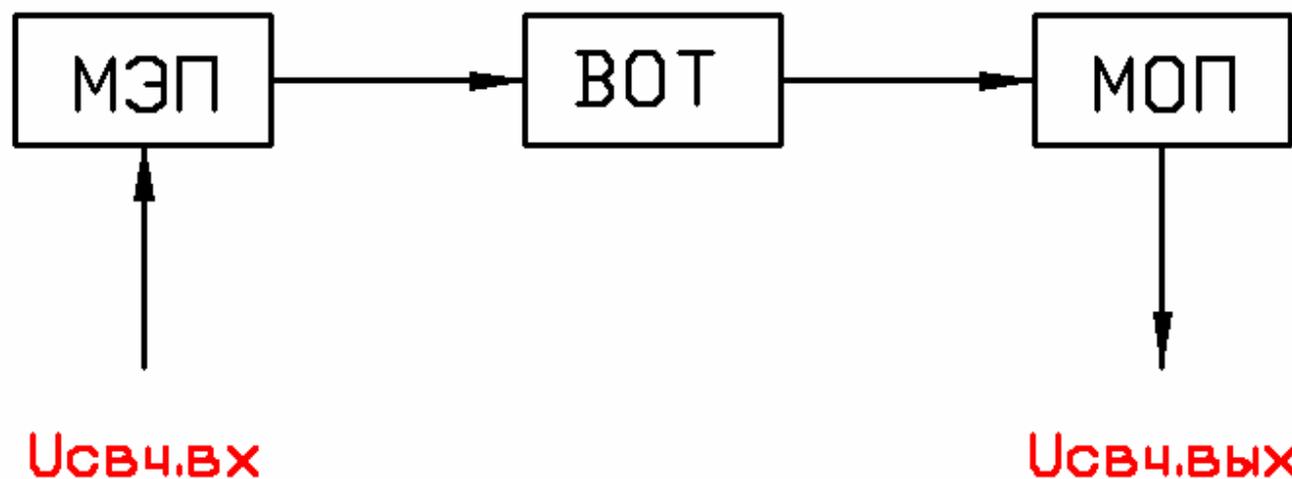
**[www.psu.ru](http://www.psu.ru)**

**Омского Государственного Университета**

**им. Ф.М. Достоевского**

**[www.omsu.ru](http://www.omsu.ru)**

## Укрупнённая схема аналоговой ВОЛС СВЧ



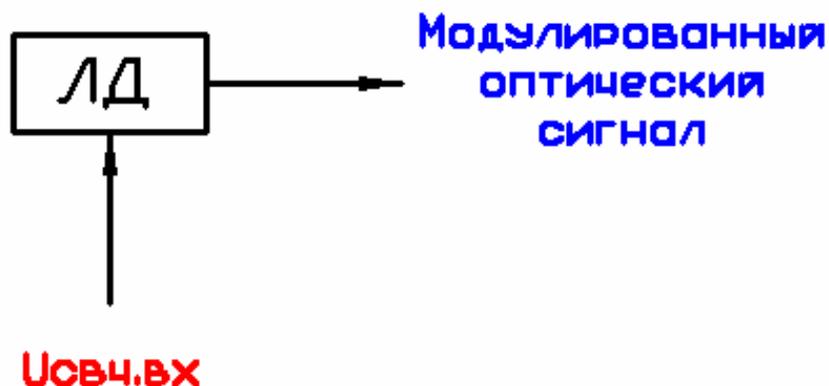
МЭП – модуль электро-оптического преобразования

МОП – модуль опто-электронного преобразования

ВОТ – волоконно-оптический тракт

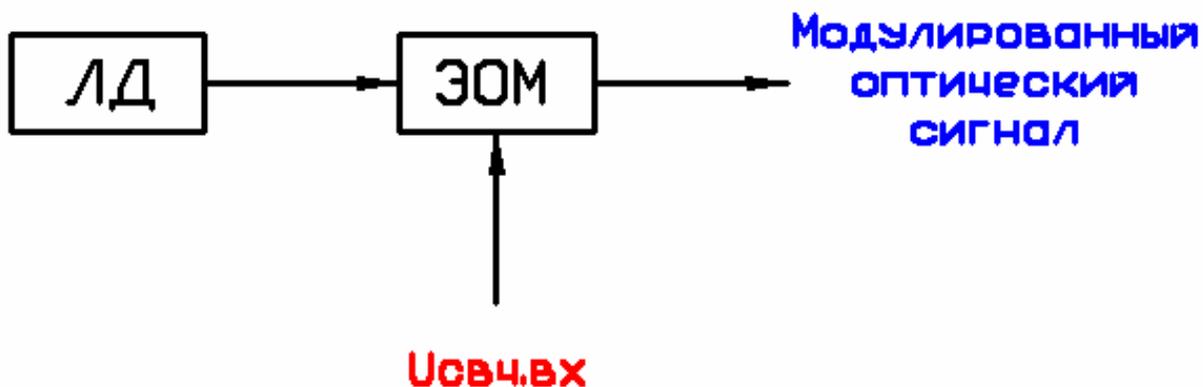
# Модули электро-оптического преобразования с прямой и внешней модуляцией

А - Прямая модуляция



ЛД - лазерный диод  
ЭОМ - электр-оптический  
модулятор

Б - Внешняя модуляция



# Типы электро-оптических модуляторов

**Электро-поглощающие модуляторы**

**+**

**Эффект Келдыша-Франца**

**Интерферометры Маха-Цандера**

**+**

**Эффект Поккельса**

***MWP***

***MicroWave Photonic***

***Микроволновая фотоника***

***Радиофотоника***

***Волноводная фотоника***

***Радиооптика***

***www.radioseminar.omsu.ru***

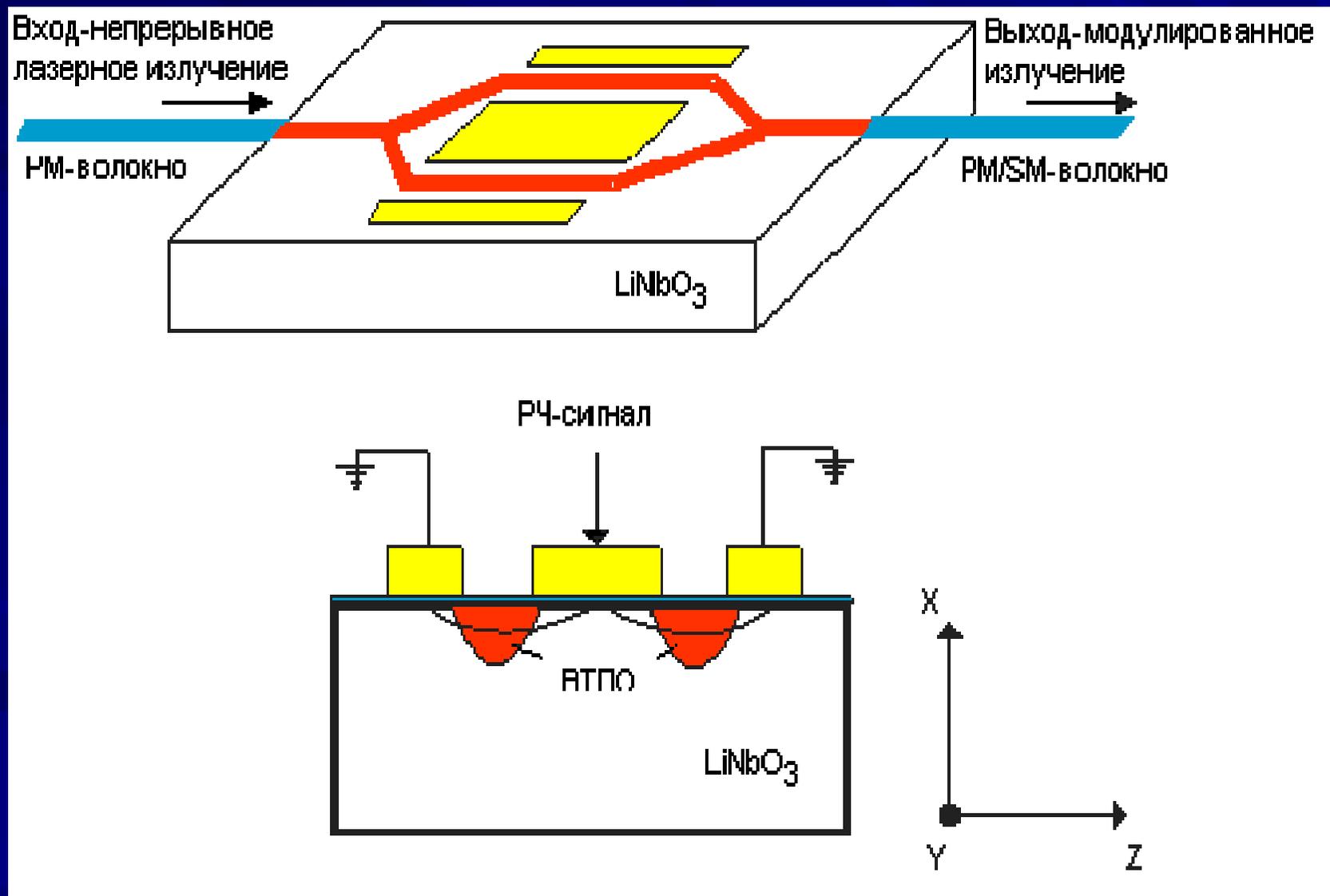
***Омский***

***Научный семинар***

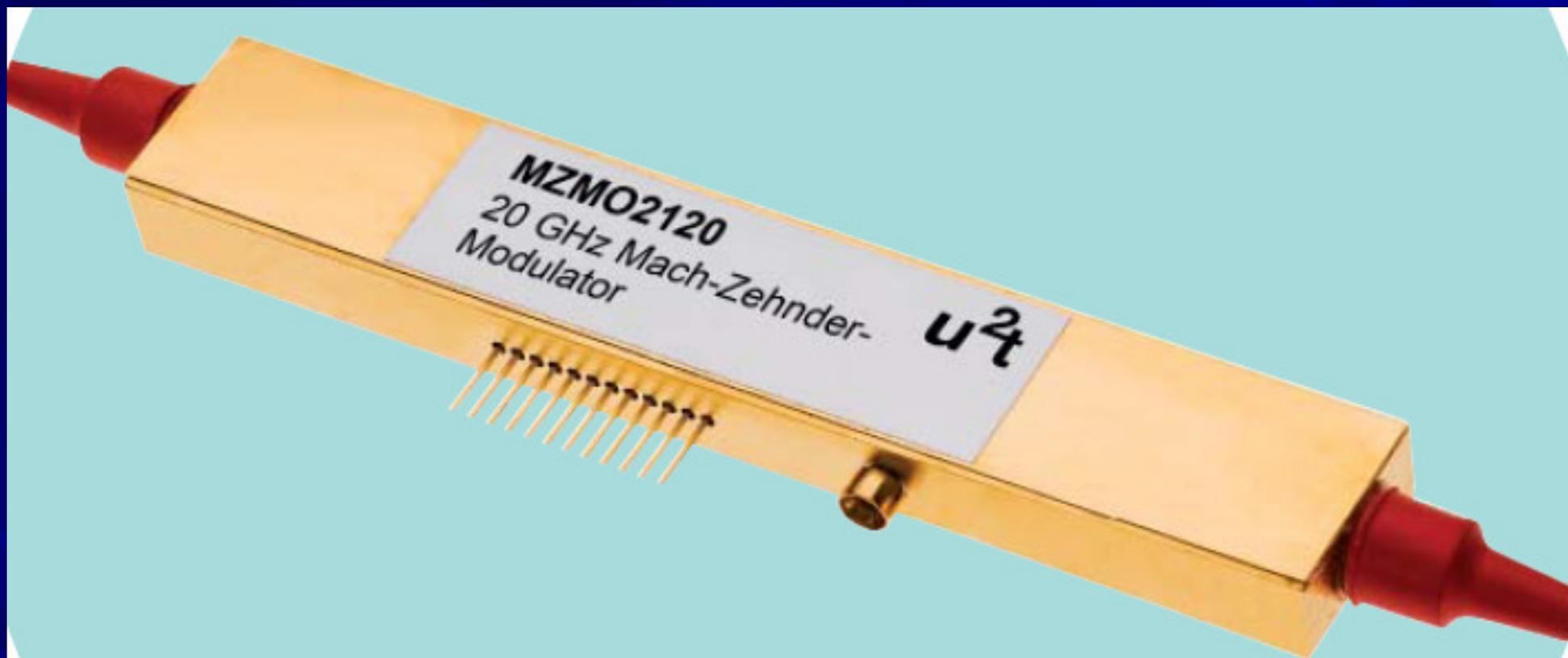
***«Современные проблемы  
радиофизики и радиотехники»***

***Кафедра экспериментальной физики и радиофизики  
Омского государственного Университета  
им. Ф.М. Достоевского***

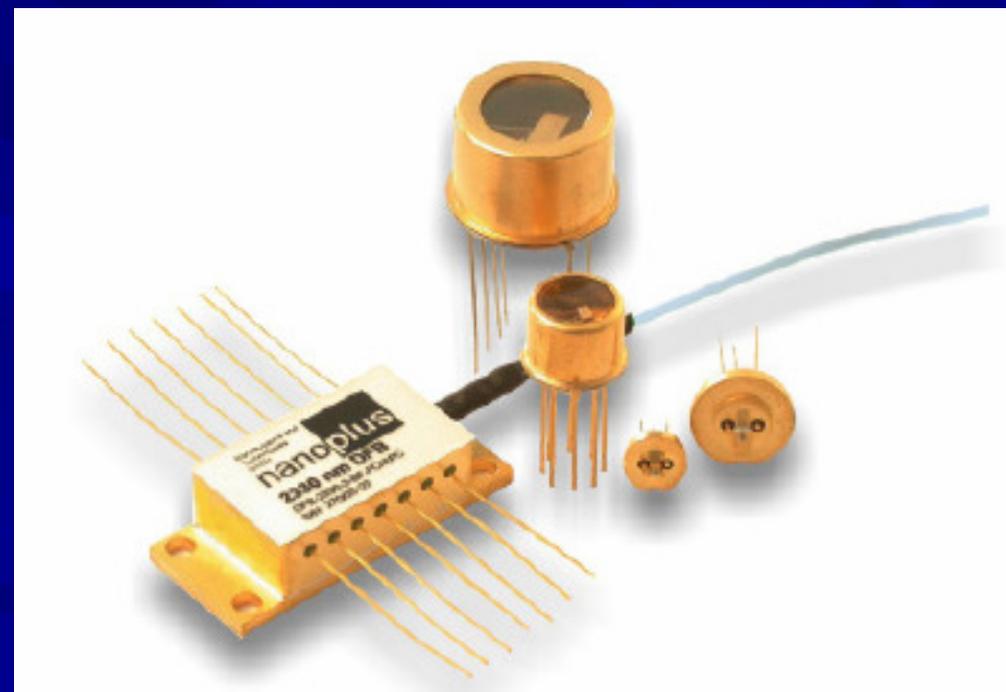
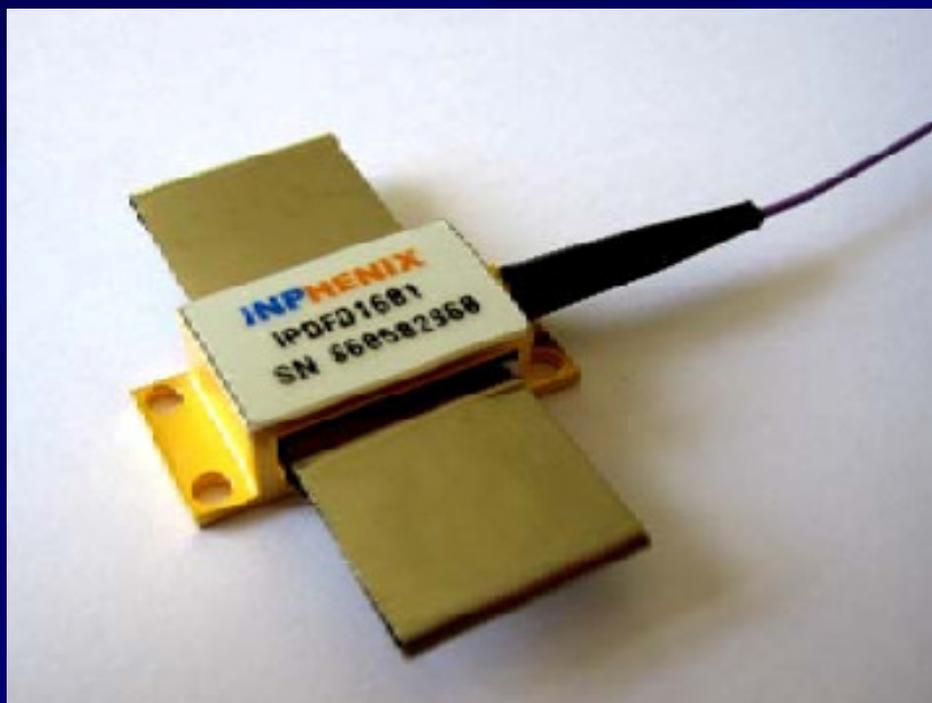
# Модулятор Маха-Цандера (Mach Zehnder modulator - MZM) в планарном исполнении



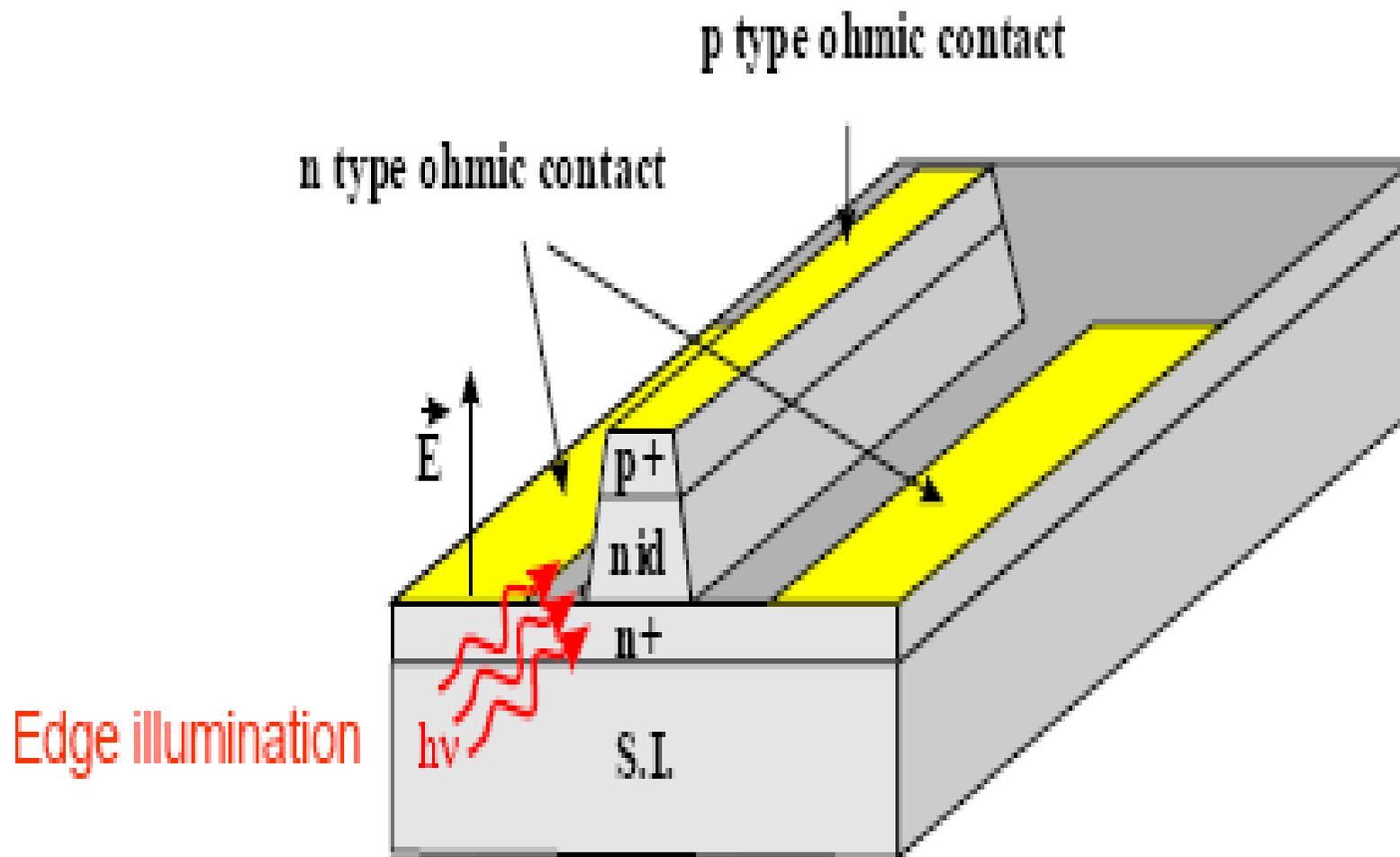
*Модулятор Маха-Цандера  
( Mach Zehnder modulator - MZM )  
в виде герметизированной гибридной интегральной схемы  
( технология system-on-package )*



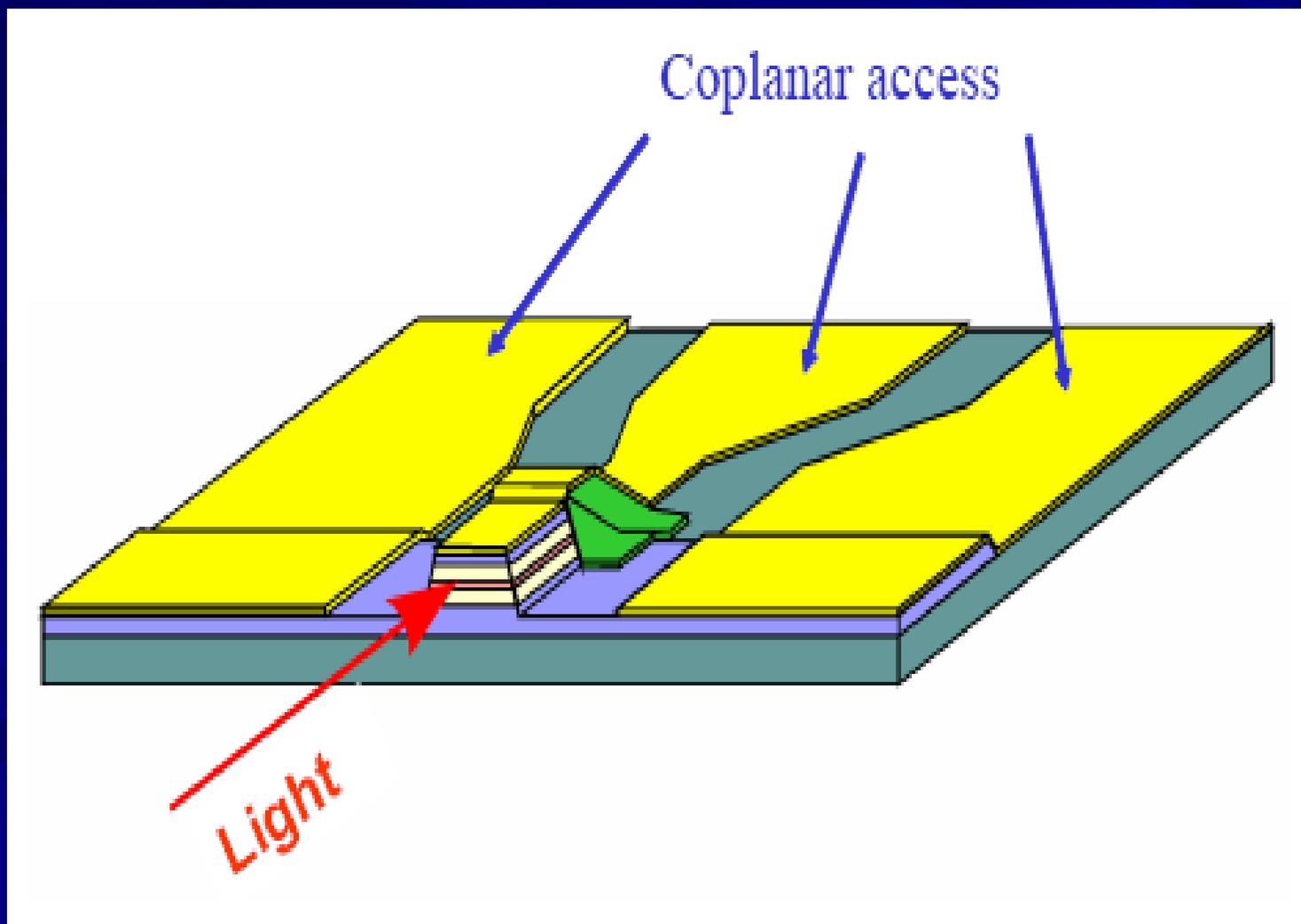
# Гибридные интегральные схемы полупроводниковых лазеров ( технология system-on-package )



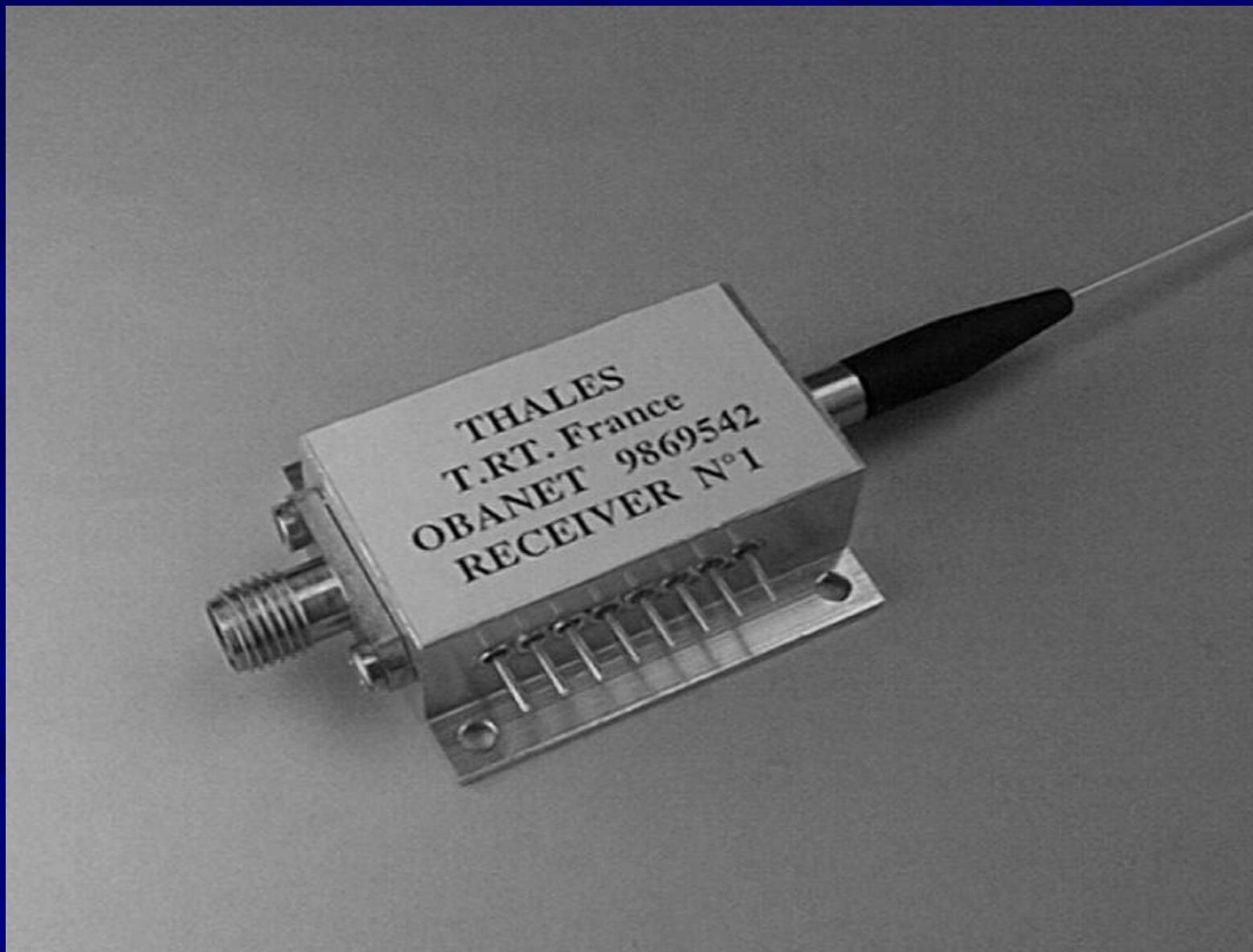
# Фотодетектор в виде монокристаллической интегральной схемы



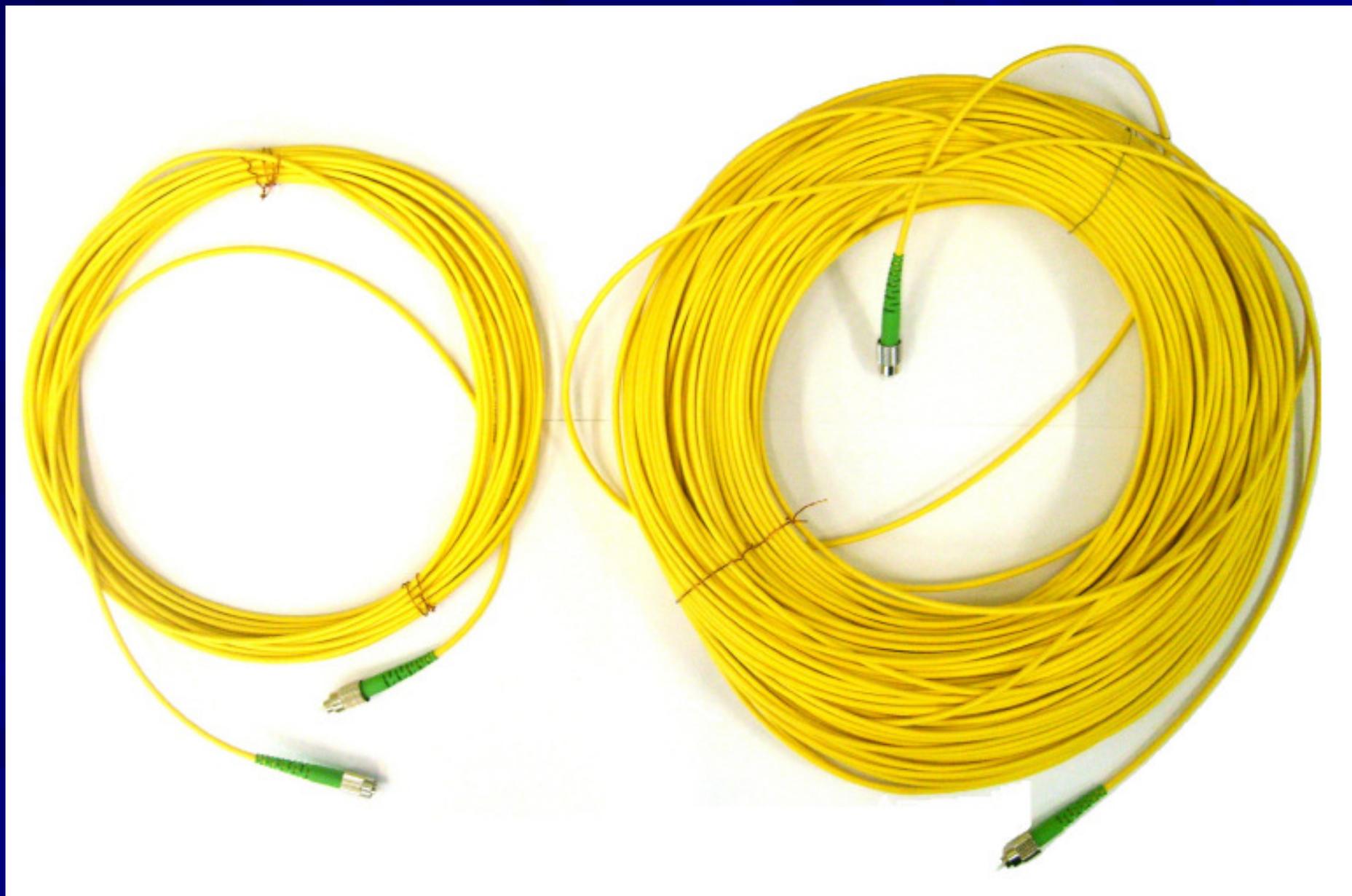
*Фотодетектор в виде  
планарной гибридной интегральной схем  
( технология system-on-package )*



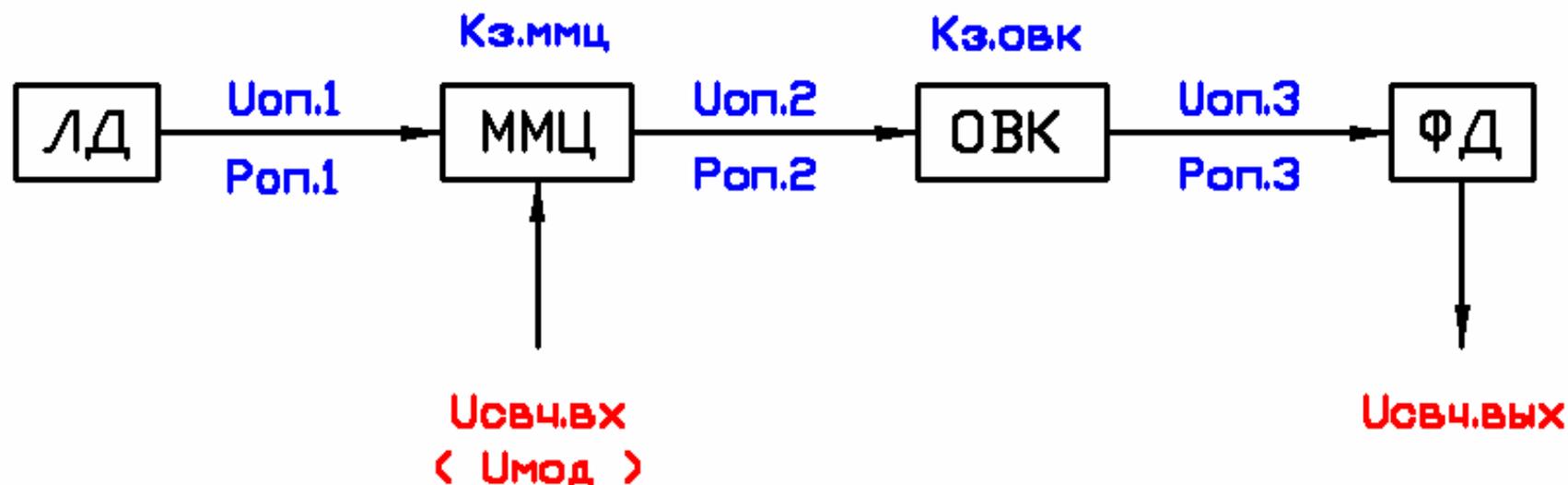
*Фотодетектор в виде  
гибридной интегральной схемы  
( технология system-on-package )*



# *Оптоволоконный кабель*



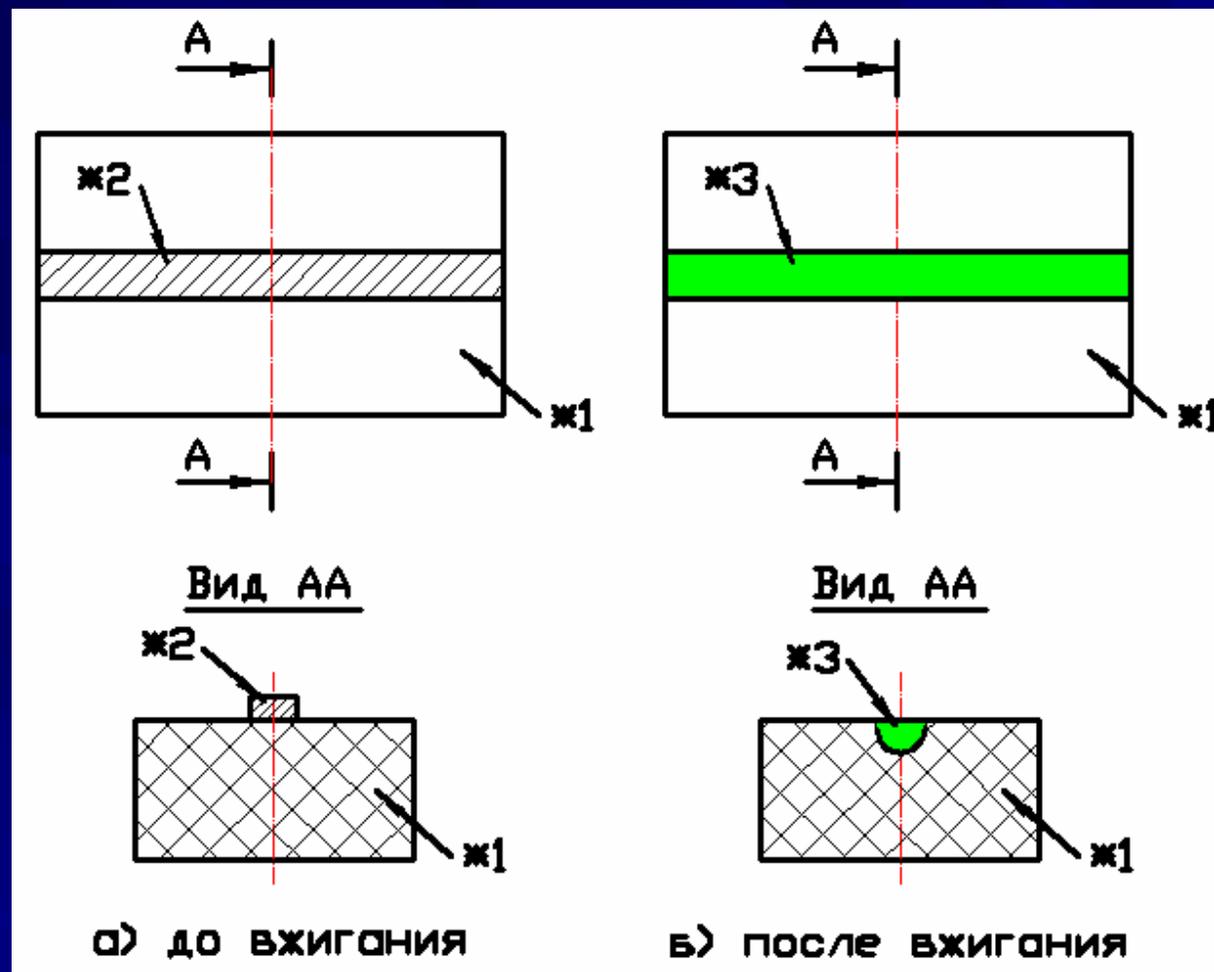
## Схема аналоговой ВОЛС СВЧ



ЛД - лазерный диод;  
ММЦ - модулятор Маха-Цандера;  
ОВК - опто-волоконная кабель;  
ФД - фотодетектор;

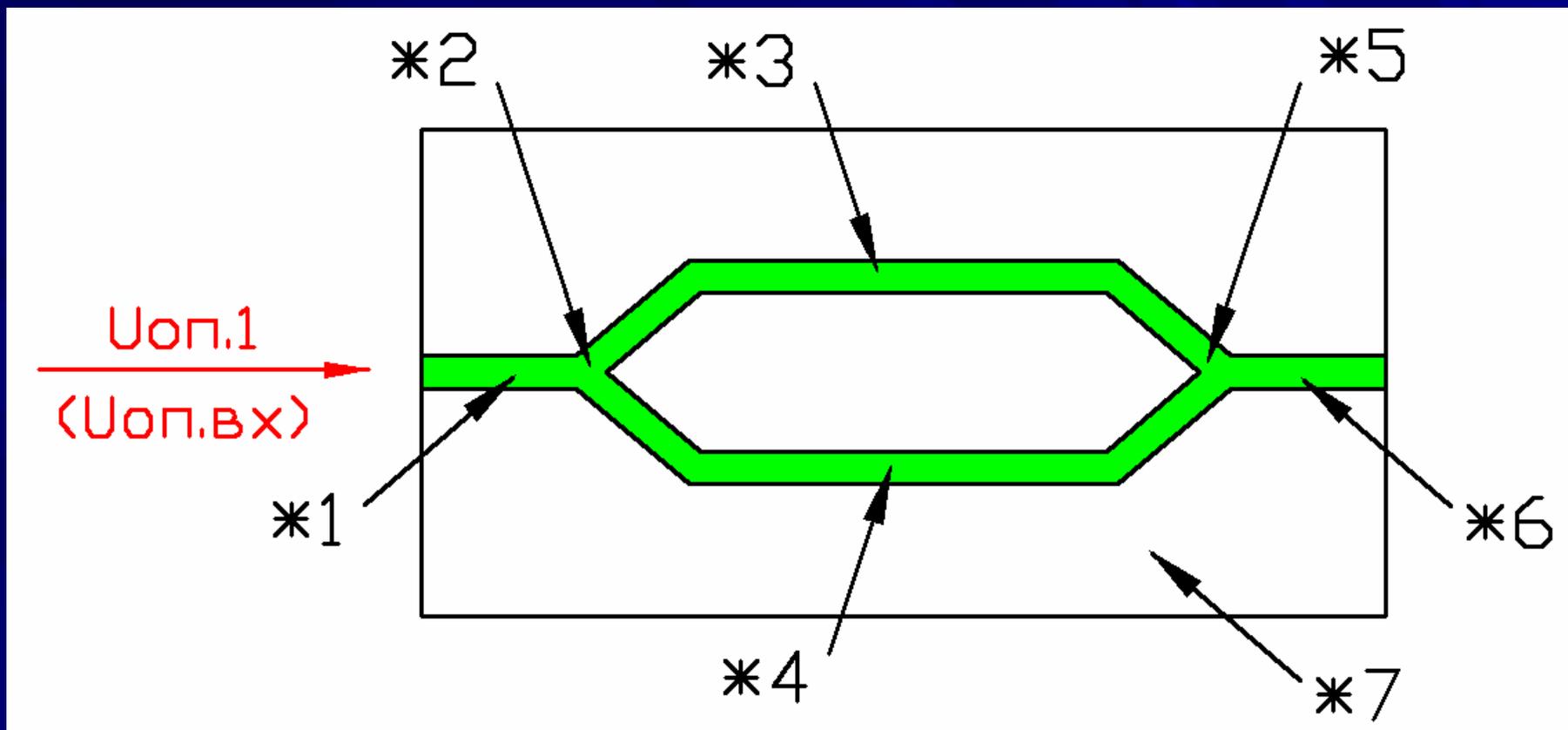
$$K_{п.свч} = 20Lg(U_{свч.вых}/U_{свч.вх}) = ???$$

# Формирование световодных каналов



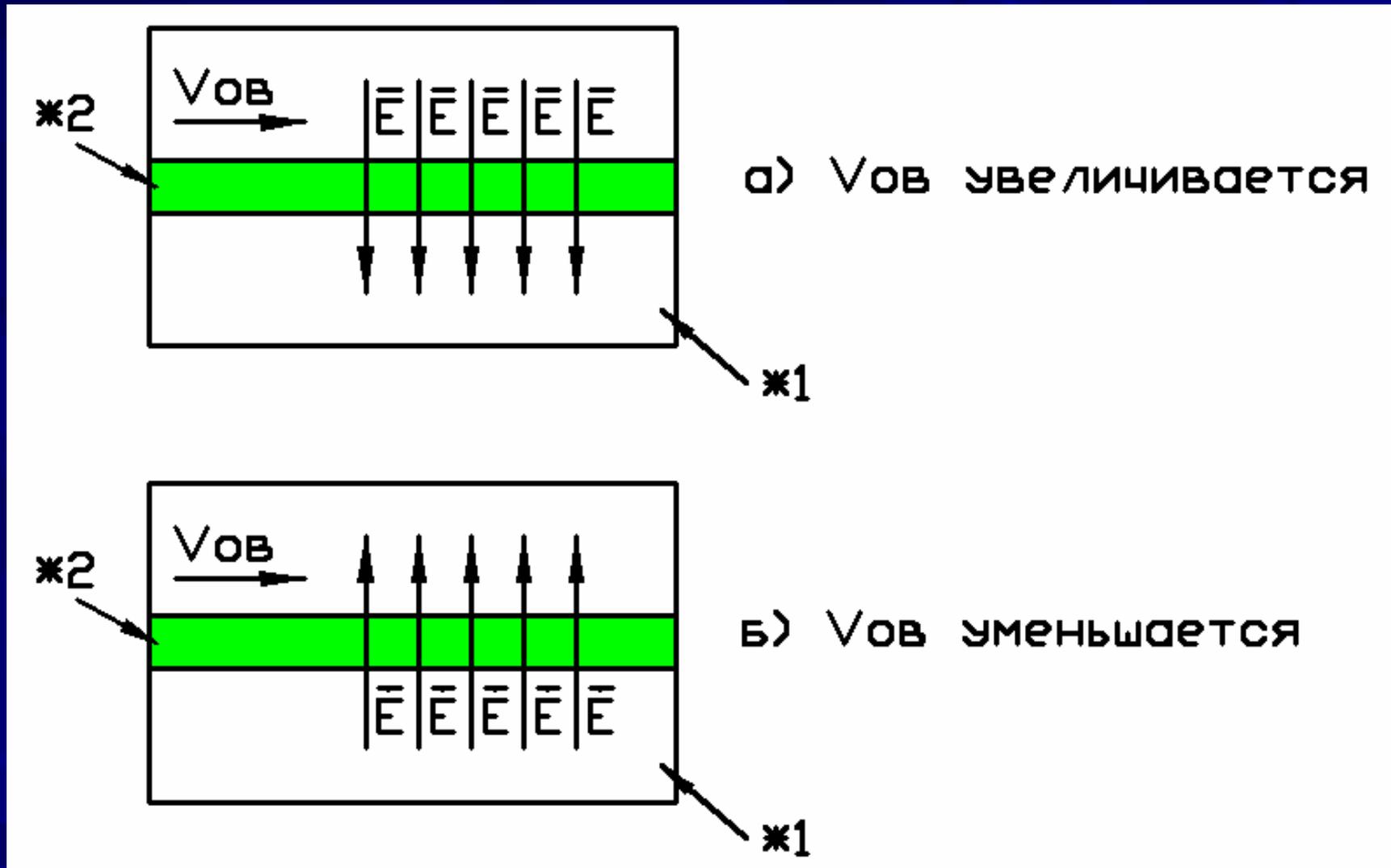
*1 - пластина из ниобата лития,  
2 - напылённая полоска из титана,  
3 - световодный канал.*

## Структура световодных каналов модулятора Маха-Цандера



- 1 - входной световодный канал;**
- 2 - входной Y - разветвитель;**
- 3,4 - параллельные идентичные световодные каналы;**
- 5 - выходной Y – светвитель;**
- 6 - выходной световодный канал**

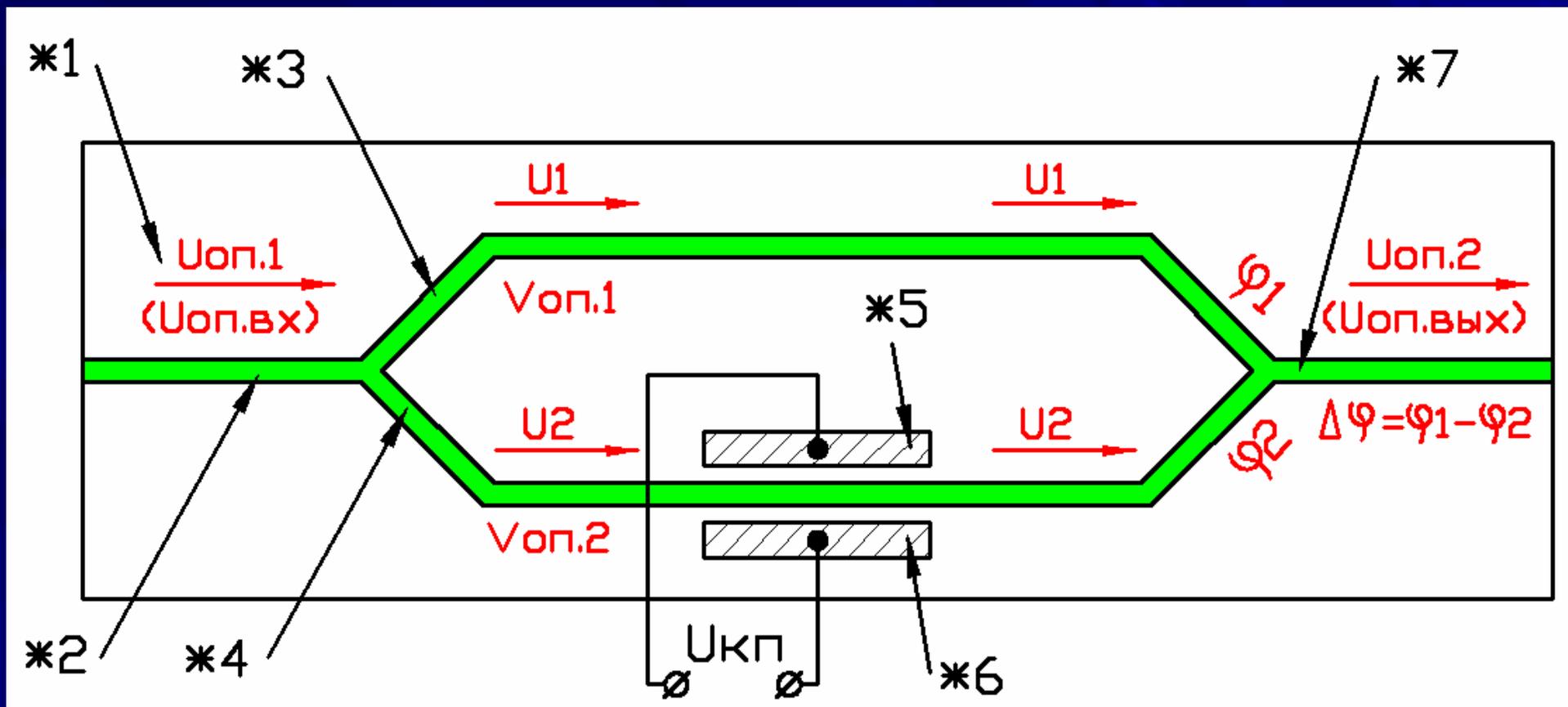
# Эффект Поккельса



1 - пластина из ниобата лития;  
2 - световодный канал

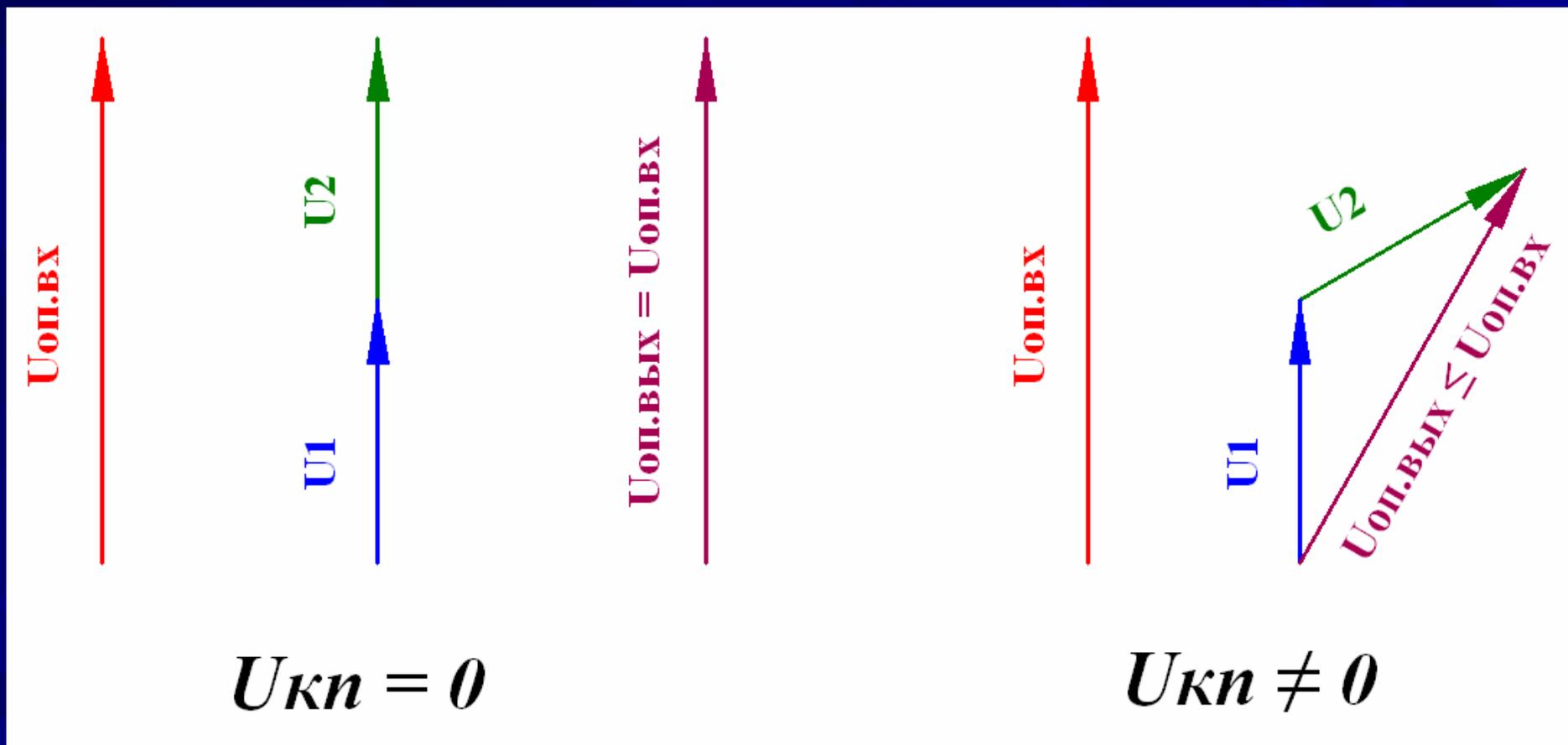


# Принцип действия модулятора Маха-Цандера

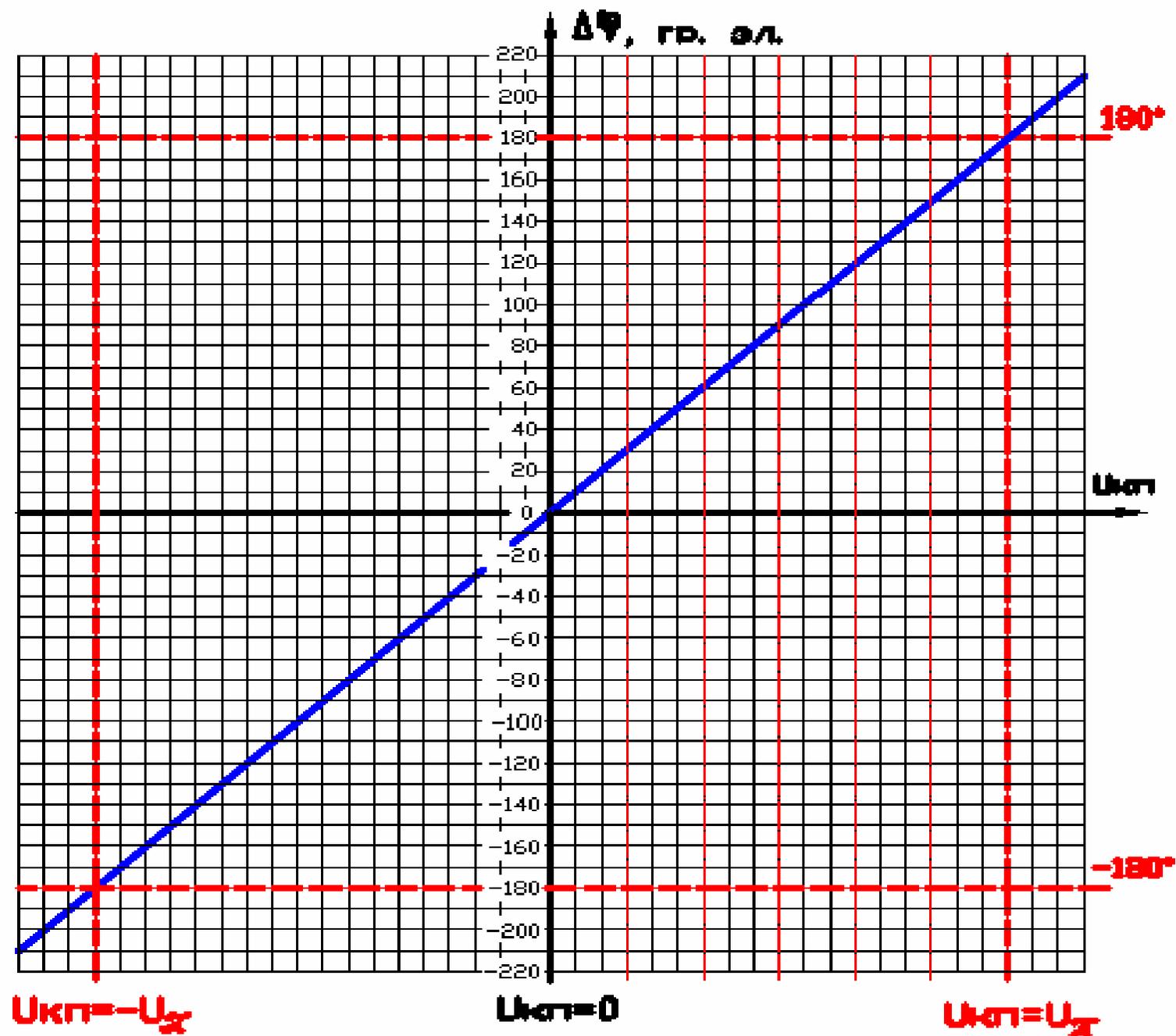


- 1 - пластина из ниобата лития,
- 2 - входной световодный канал;
- 3, 4 - идентичные световодные каналы;
- 5, 6 - контактные площадки (управляющие электроды);
- 7 - выходной световодный канал

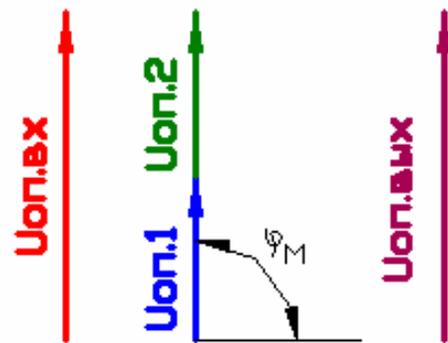
# Векторные диаграммы на выходе модулятора при $U_{кп} = 0$ и при $U_{кп} \neq 0$



# Зависимость $\Delta\varphi$ от $U_{кп}$

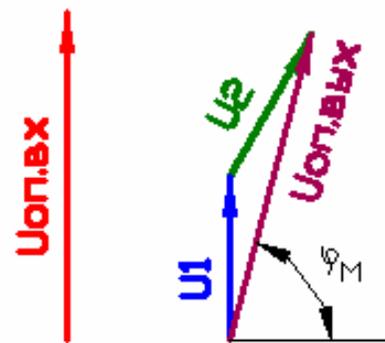


# Векторные диаграммы на выходе модулятора при различных $U_{кп}$



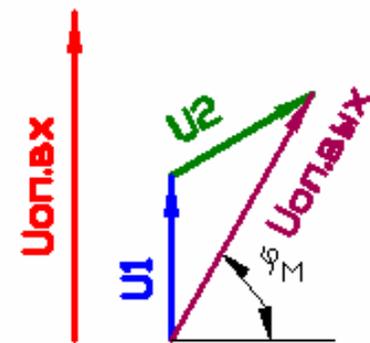
а)  $U_{кп}=0$   

$$\frac{U_{оп.вых}}{U_{оп.вх}} = 1.000$$



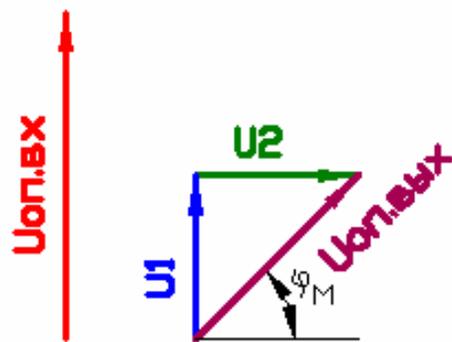
б)  $U_{кп}=3/18U_{\pi}$   

$$\frac{U_{оп.вых}}{U_{оп.вх}} = 0.966$$



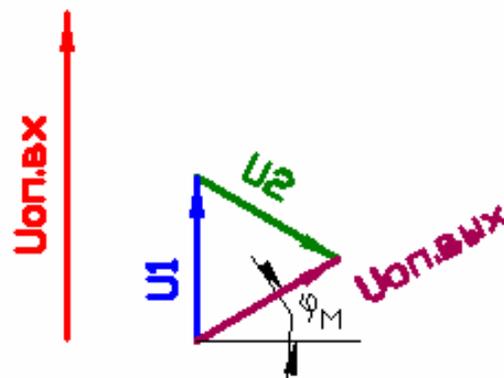
в)  $U_{кп}=6/18U_{\pi}$   

$$\frac{U_{оп.вых}}{U_{оп.вх}} = 0.866$$



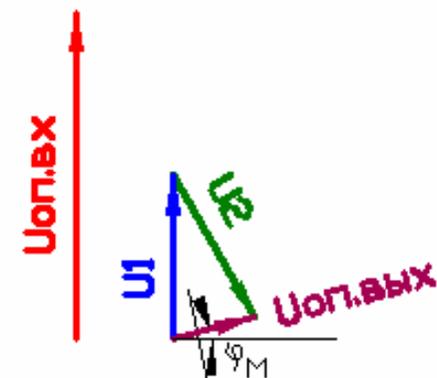
г)  $U_{кп}=9/18U_{\pi}$   

$$\frac{U_{оп.вых}}{U_{оп.вх}} = 0.707$$



д)  $U_{кп}=12/18U_{\pi}$   

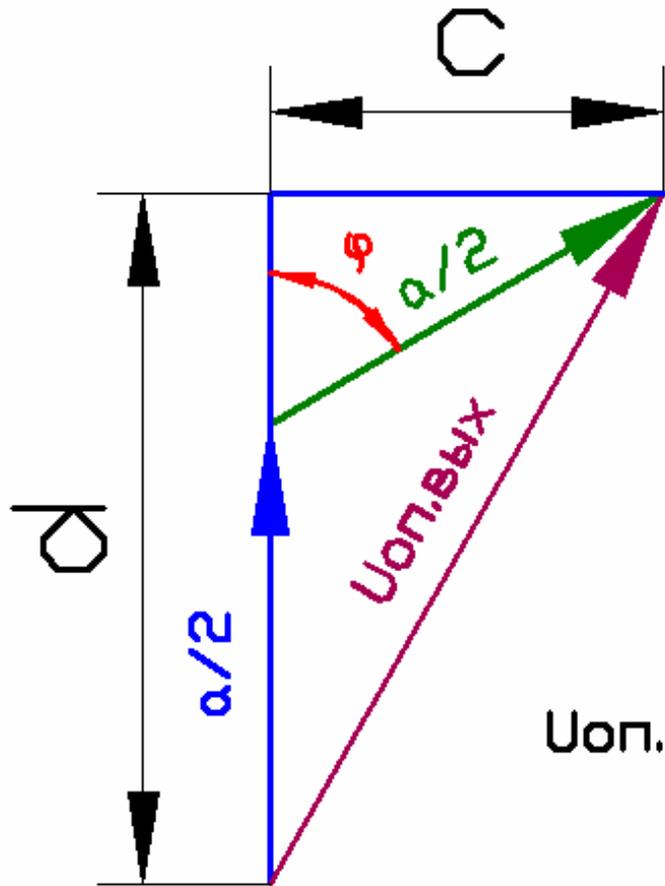
$$\frac{U_{оп.вых}}{U_{оп.вх}} = 0.500$$



е)  $U_{кп}=15/18U_{\pi}$   

$$\frac{U_{оп.вых}}{U_{оп.вх}} = 0.259$$

## Определение зависимости $K_{и.оп}$ от $U_{кп}$



$$U_{оп.вых} = \sqrt{c^2 + d^2}$$

$$c = (a/2)\sin\varphi$$

$$d = (a/2) + (a/2)\cos\varphi$$

$$a = U_{оп.вх}$$

$$\varphi = (U_{кп}/U_{\pi})180^\circ$$

$$U_{оп.вых} = \sqrt{0.5(1 + \cos(U_{кп}/U_{\pi})180^\circ)(U_{оп.вх})^2}$$

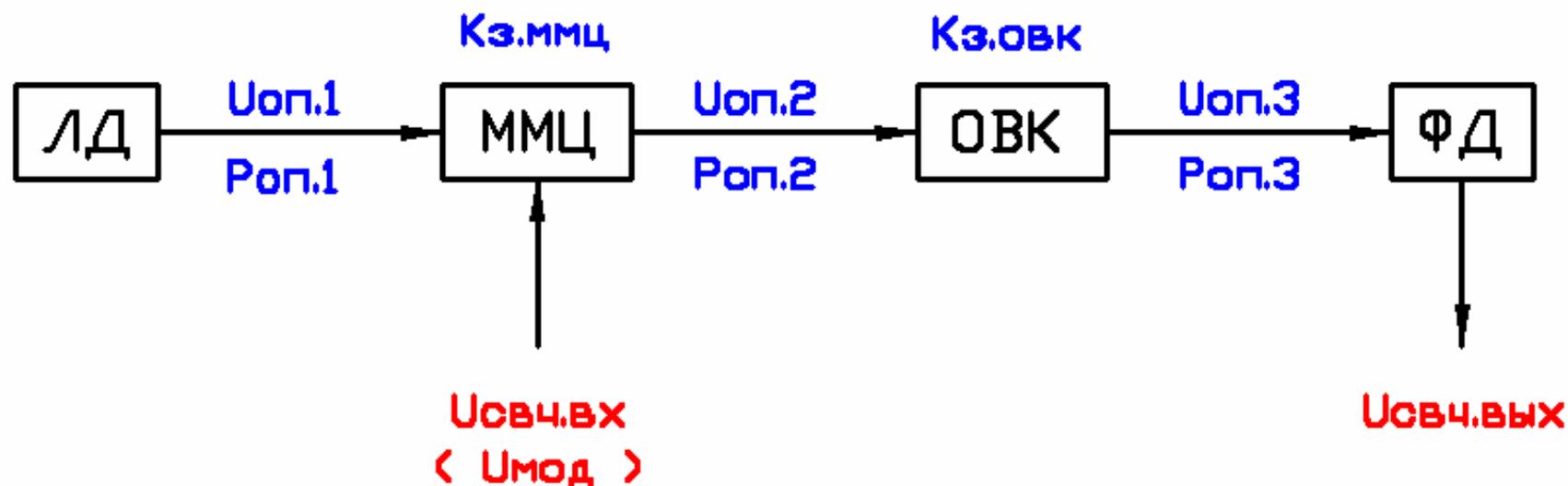
$$K_{и.оп} = U_{оп.вых}/U_{оп.вх} = \sqrt{0.5(1 + \cos(U_{кп}/U_{\pi})180^\circ)}$$

**Определение зависимости  $K_{р.оп}$  от  $U_{кп}$   
без учёта затухания  
в оптическом тракте модулятора Маха-Цандера**

$$K_{р.оп} = P_{оп.вых}/P_{оп.вх} = K_{и.оп}^2 =$$

$$(U_{оп.вых}/U_{оп.вх})^2 = 0.5(1 + \cos(\langle U_{кп}/U_{\pi} \rangle 180^\circ))$$

## Схема аналоговой ВОЛС СВЧ



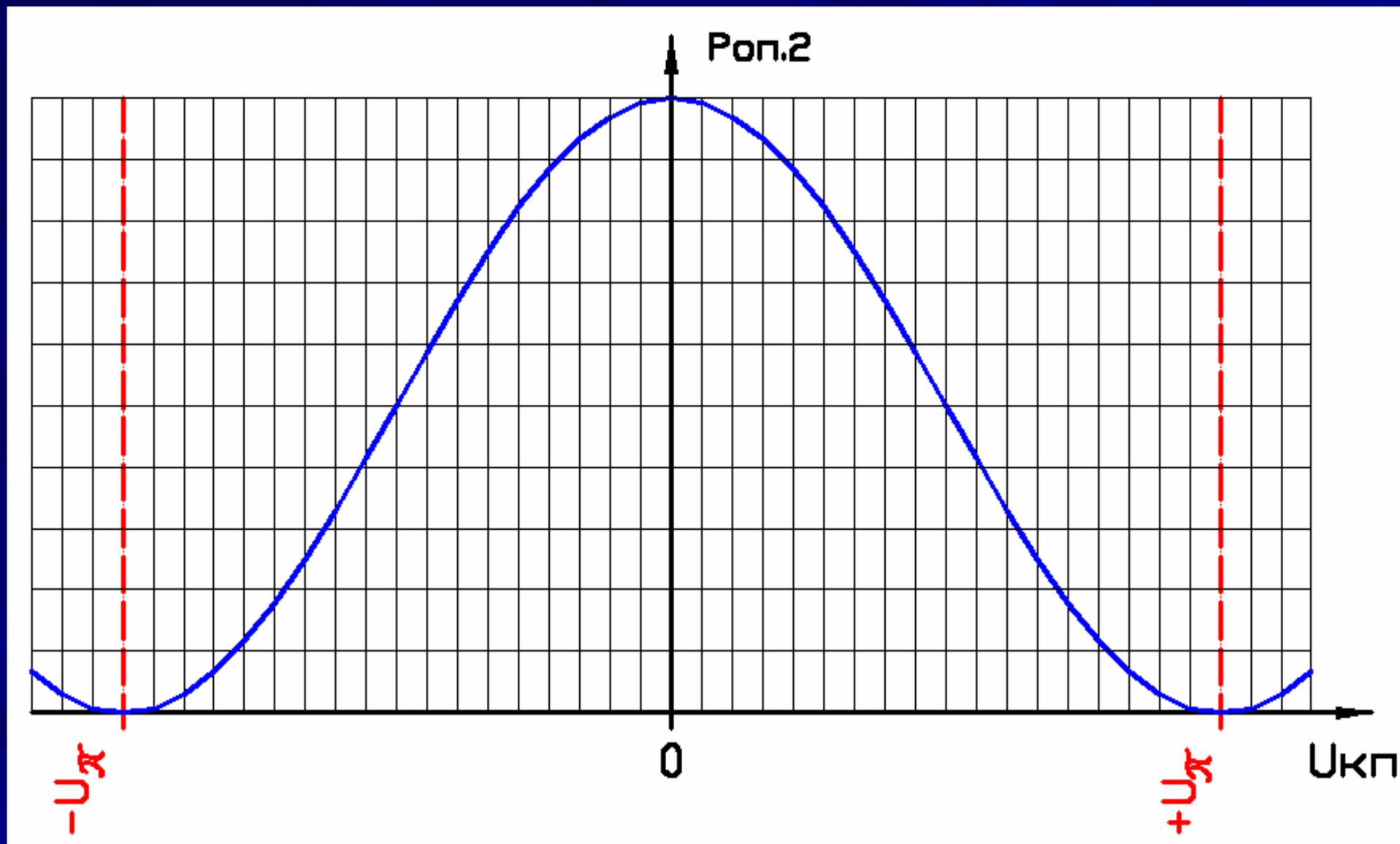
ЛД - лазерный диод;  
ММЦ - модулятор Маха-Цандера;  
ОВК - опто-волоконная кабель;  
ФД - фотодетектор;

$$K_{п.свч} = 20Lg(U_{свч.вых}/U_{свч.вх}) = ???$$

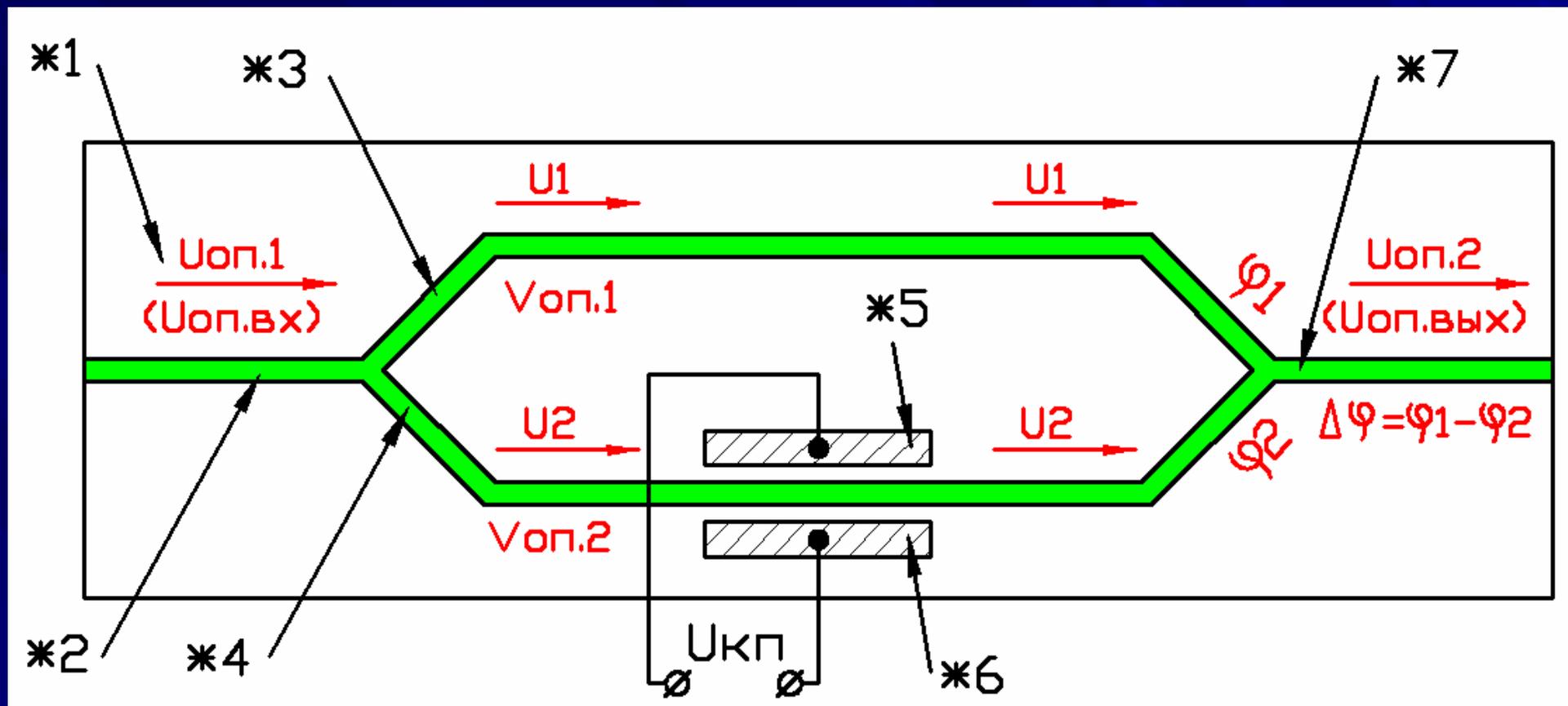
## Формула зависимости $P_{оп.2}$ от $U_{кп}$

$$\begin{aligned} P_{оп.2} &= P_{оп.1} \times K_{р.оп} = \\ &= P_{оп.1} \times [0.5(1 + \cos((U_{кп}/U_{\pi})180^\circ)]/K_{з.ммц} \end{aligned}$$

## График зависимости $P_{оп.2}$ от $U_{кп}$

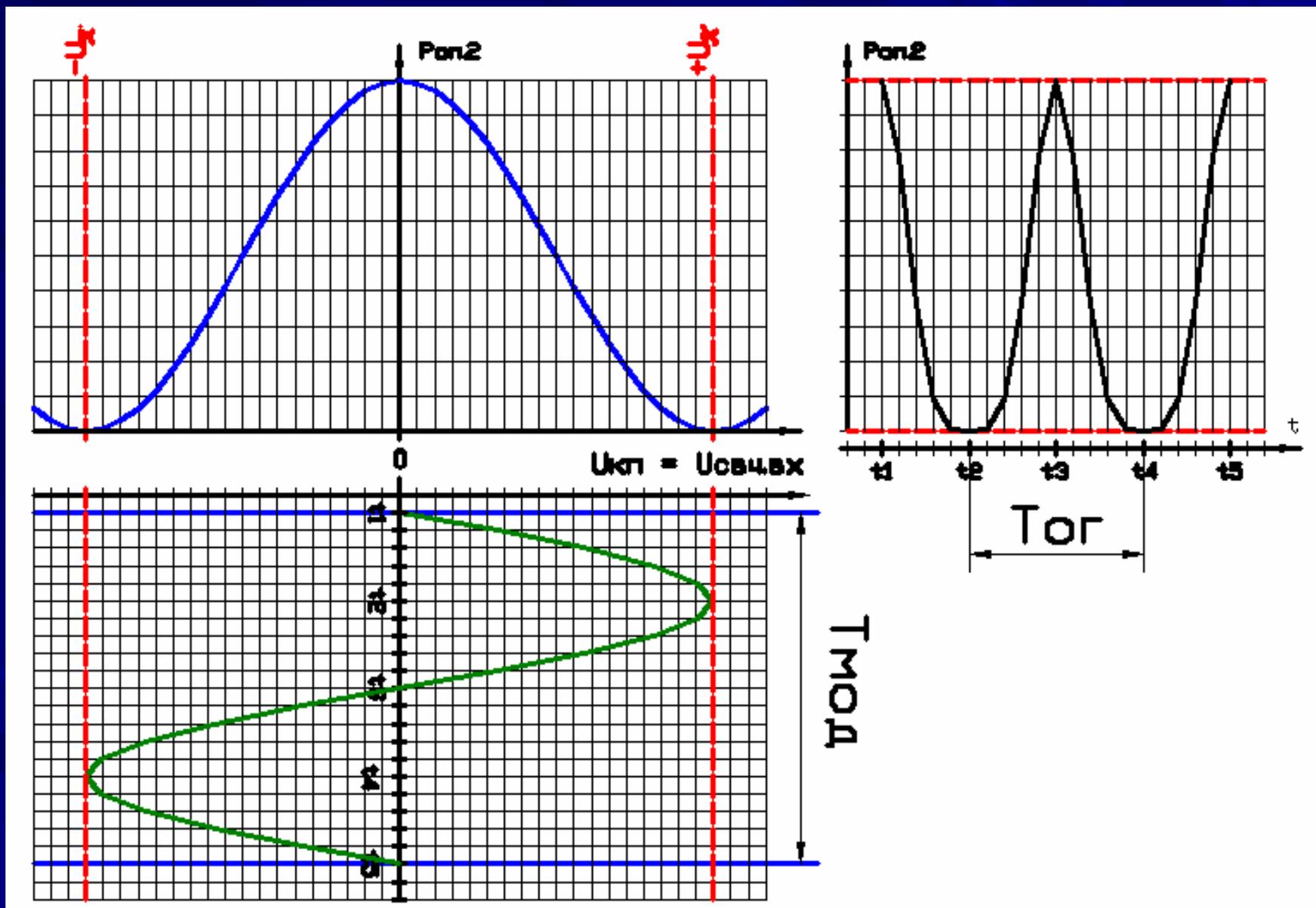


# Принцип действия модулятора Маха-Цандера

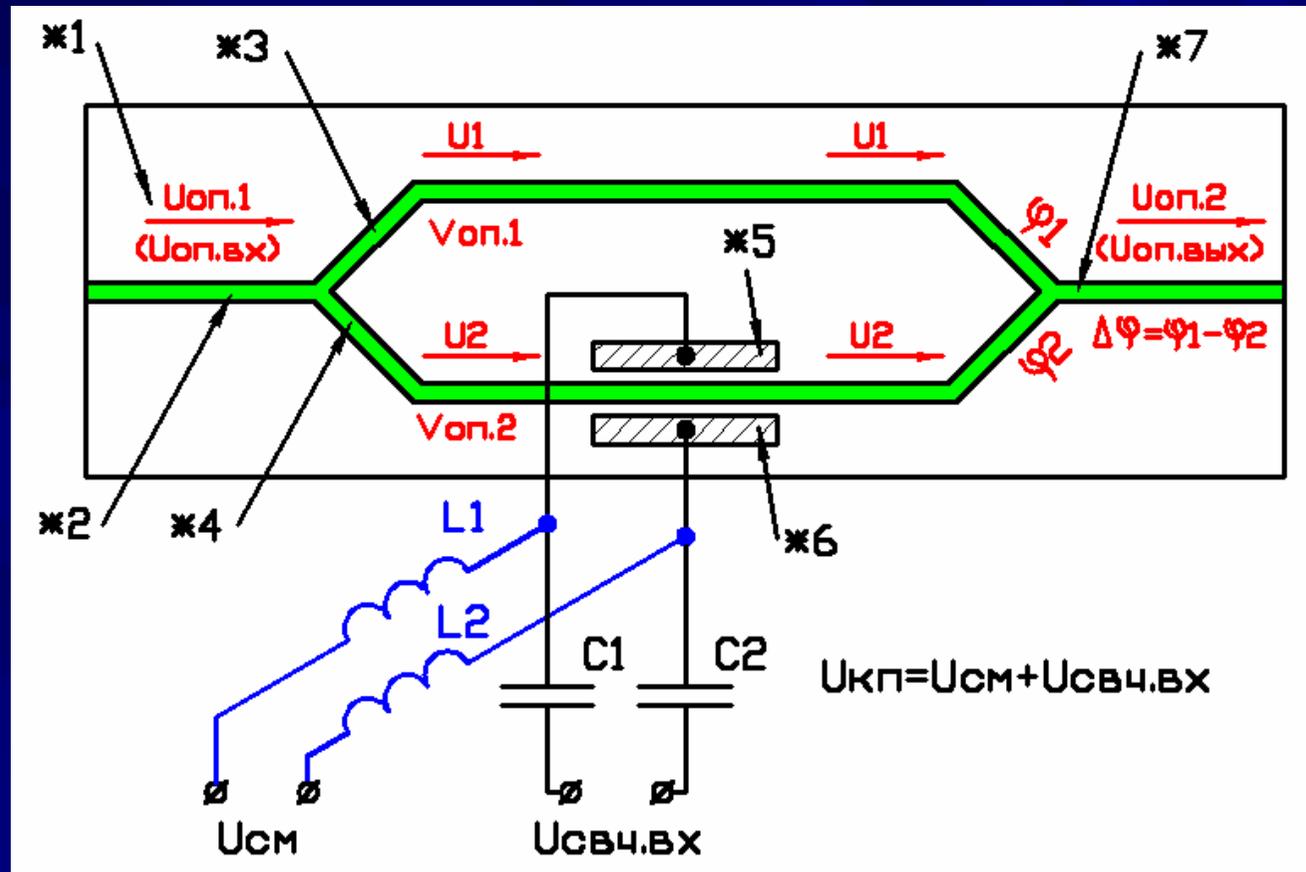


- 1 - пластина из ниобата лития,
- 2 - входной световодный канал;
- 3, 4 - идентичные световодные каналы;
- 5, 6 - контактные площадки (управляющие электроды);
- 7 - выходной световодный канал

# Модуляция оптического сигнала без подачи напряжения смещения на контактные площадки.

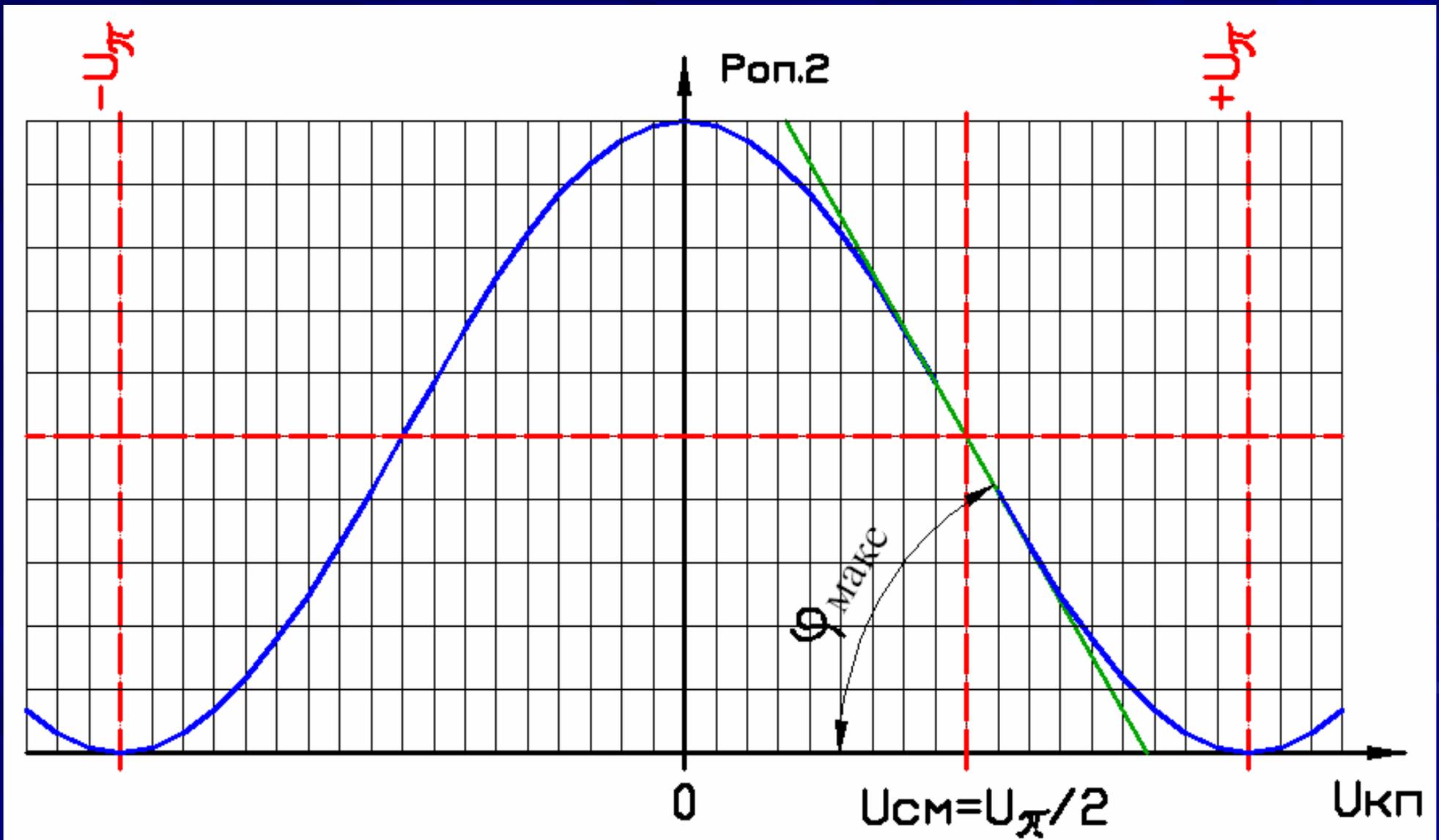


# Схема подачи напряжения смещения



- 1 - пластина из ниобата лития,
- 2 - входной световодный канал;
- 3, 4 - идентичные световодные каналы;
- 5, 6 - контактные площадки (управляющие электроды);
- 7 - выходной световодный канал

## Оптимальная рабочая точка



## Коррекция формулы зависимости $P_{оп.2}$ от $U_{кп}$

$$P_{оп.2} = P_{оп.1} \times [0.5(1 + \cos((U_{кп}/U_{\pi})180^{\circ}))]/K_{з.ммц}$$

$$U_{кп} = U_{см} + U_{свч.вх} \times \cos(\omega t)$$

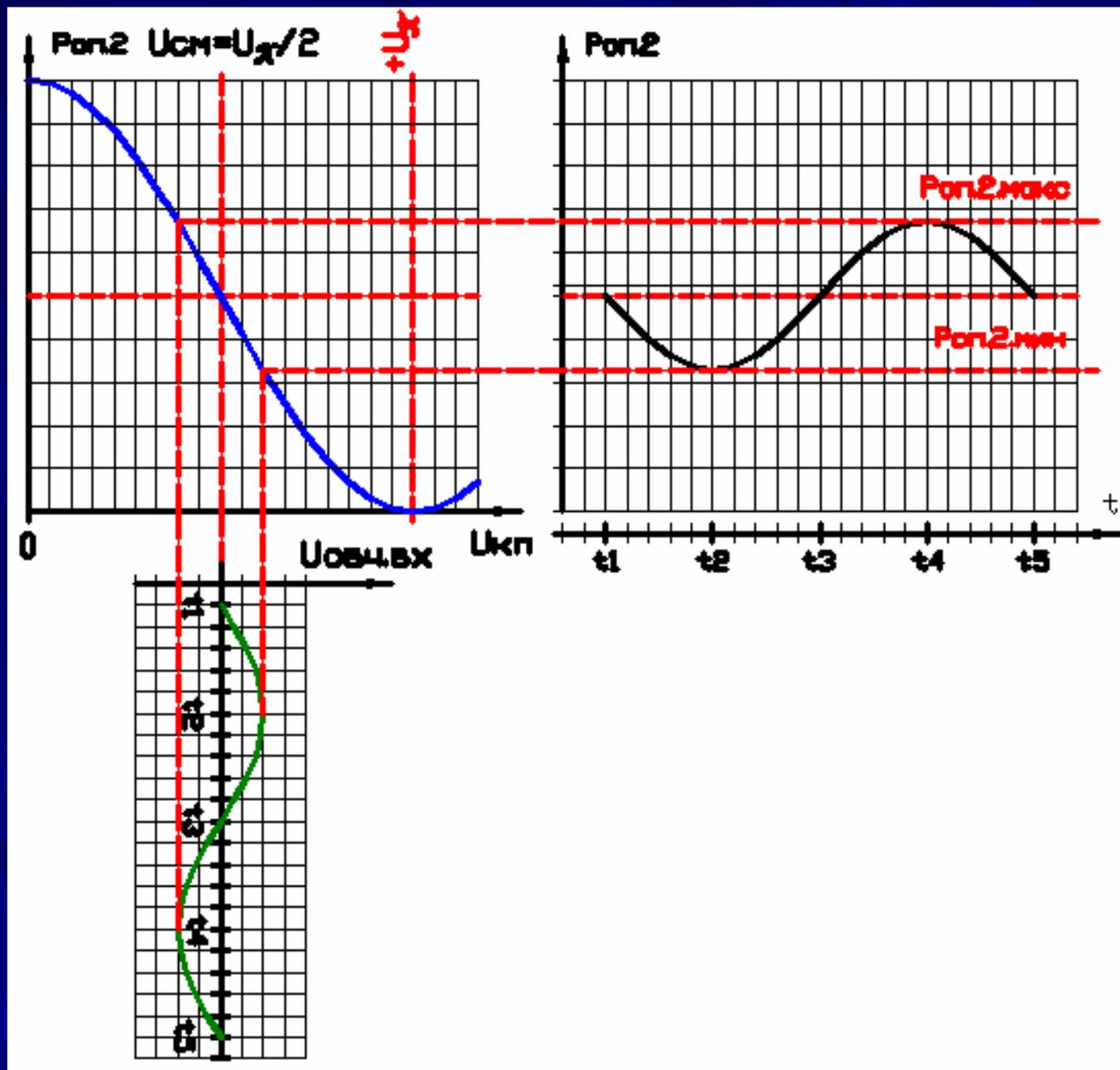
$$P_{оп.2} = P_{оп.1} \times [0.5(1 + \cos((U_{см} + U_{свч.вх} \times \cos(\omega t))/U_{\pi})180^{\circ}))]/K_{з.ммц}$$

Рекомендуемые значения  $U_{см}$  и  $U_{свч.вх}$

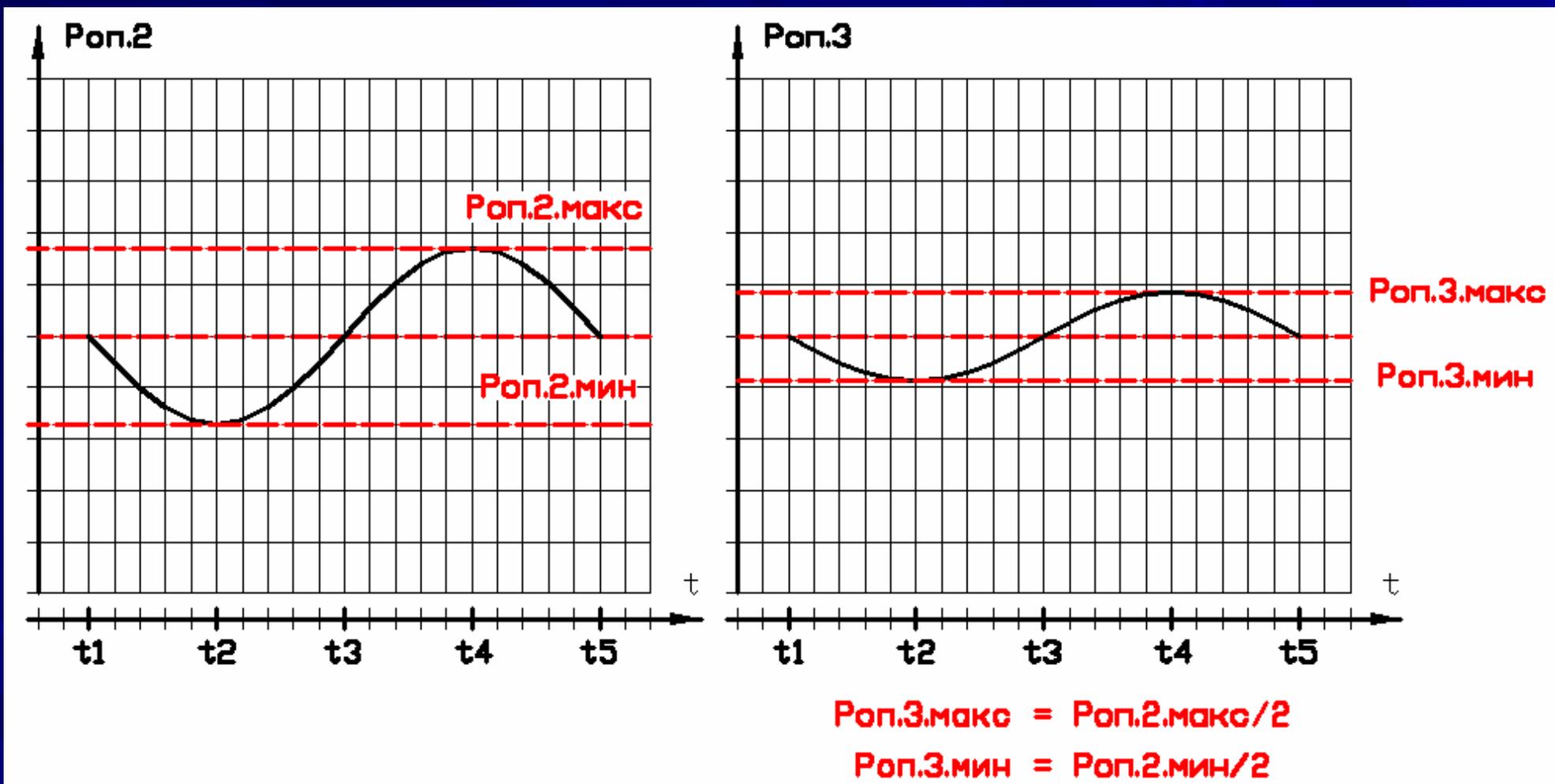
$$U_{см} = U_{\pi}/2$$

$$U_{свч.вх} = U_{\pi}/10$$

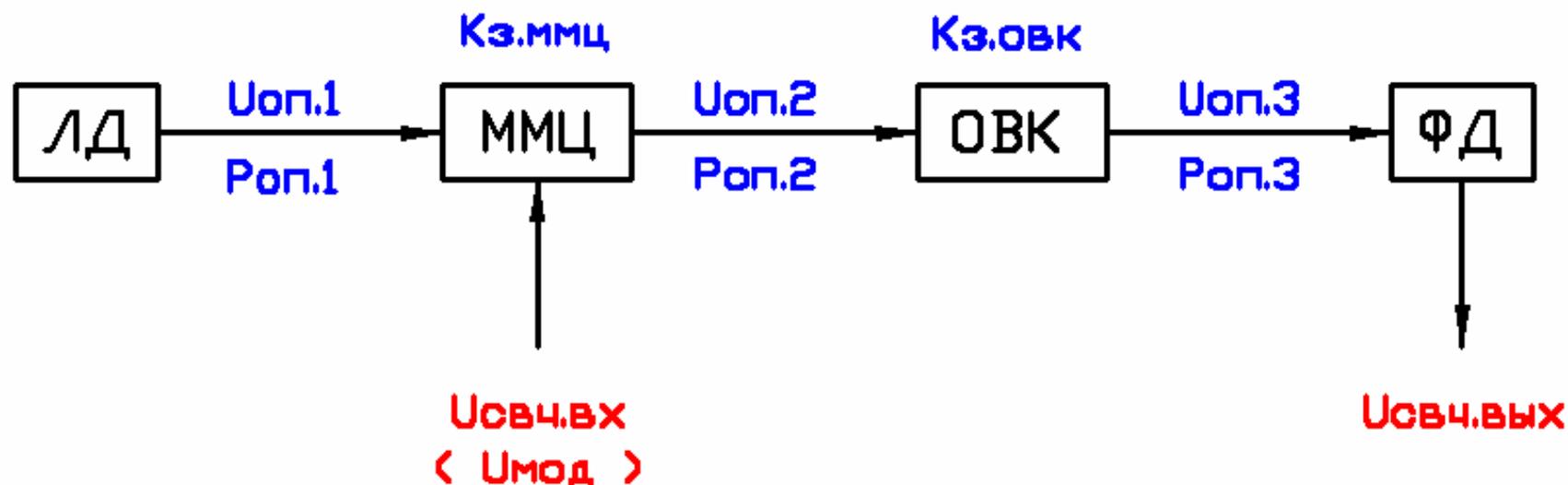
# Модуляция оптического сигнала с подачей напряжения смещения на контактные площадки.



## Временные развёртки Роп.2 и Роп.3



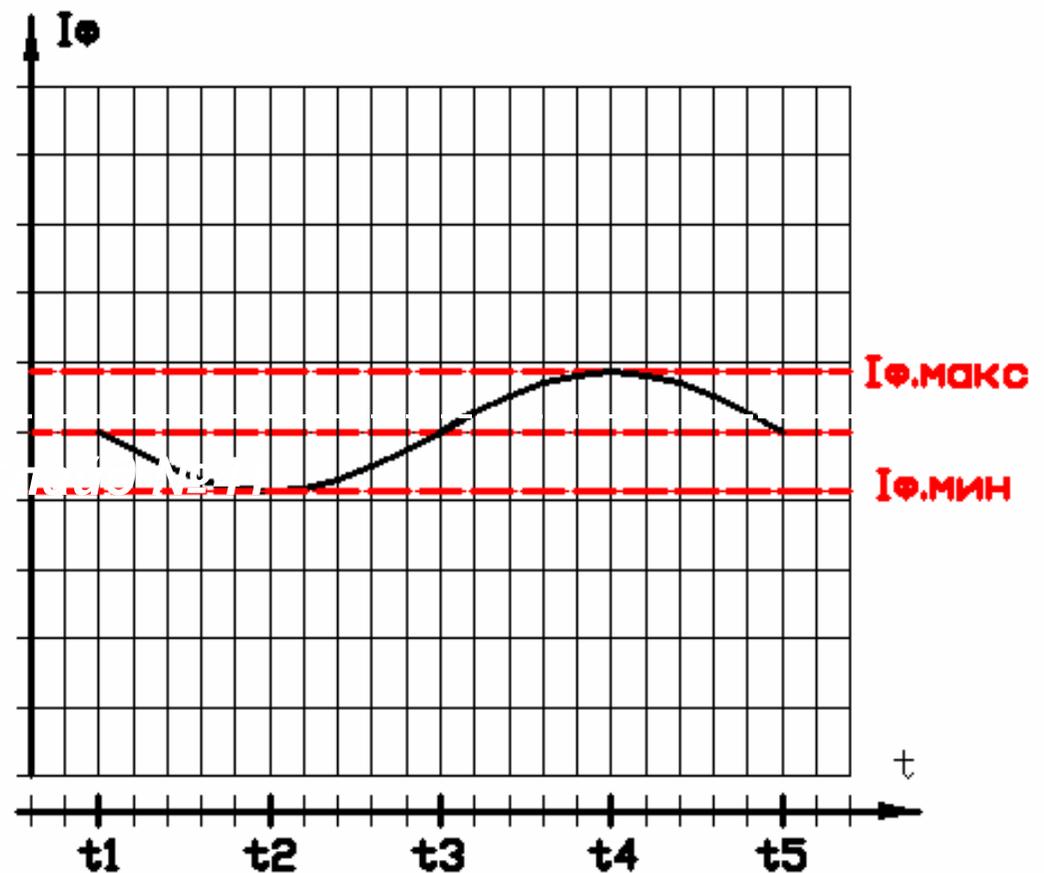
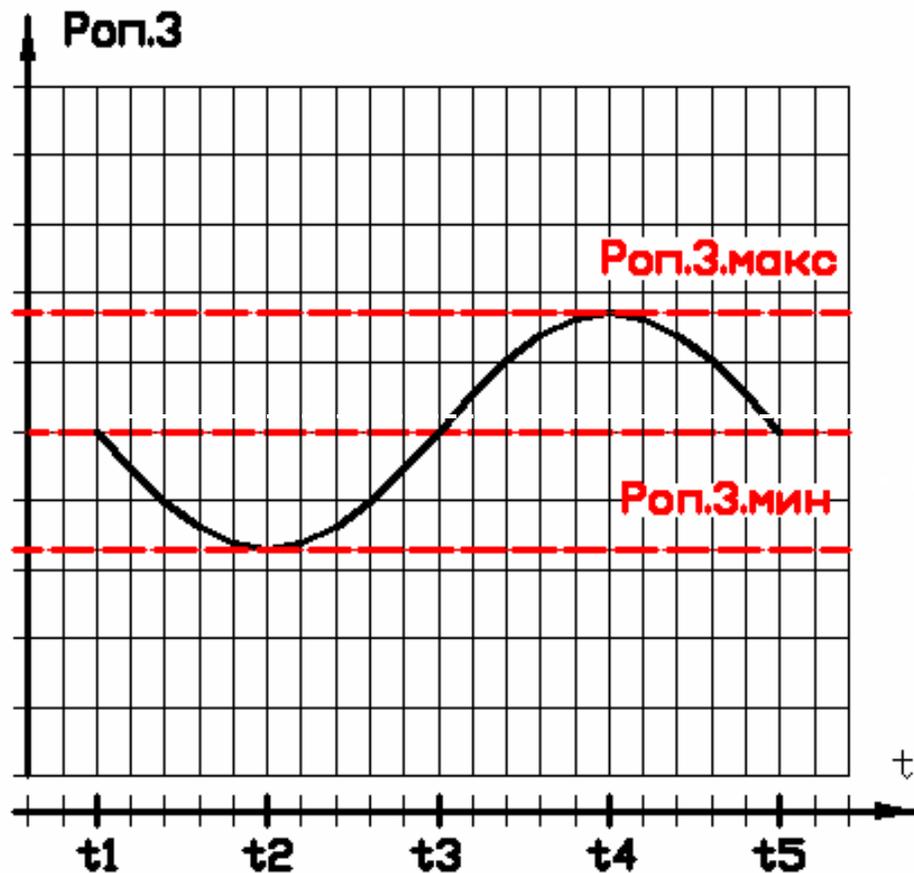
## Схема аналоговой ВОЛС СВЧ



ЛД - лазерный диод;  
ММЦ - модулятор Маха-Цандера;  
ОВК - опто-волоконная кабель;  
ФД - фотодетектор;

$$K_{п.свч} = 20Lg(U_{свч.вых}/U_{свч.вх}) = ???$$

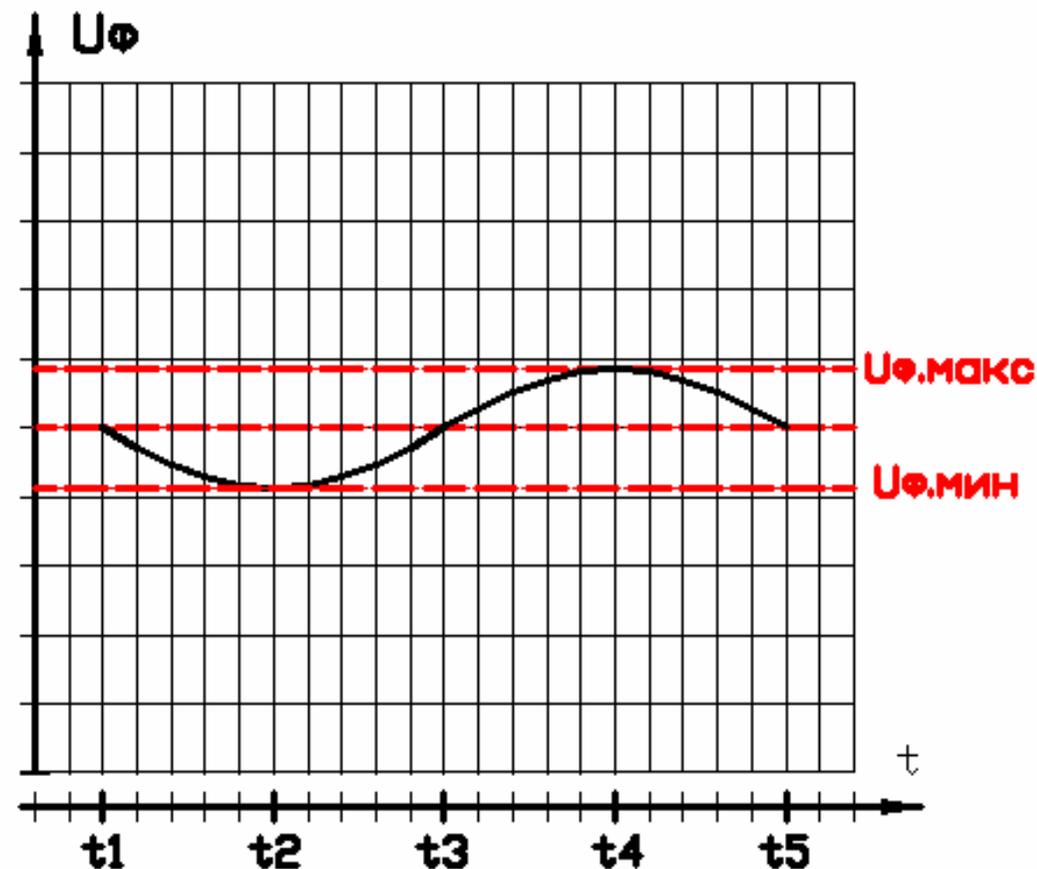
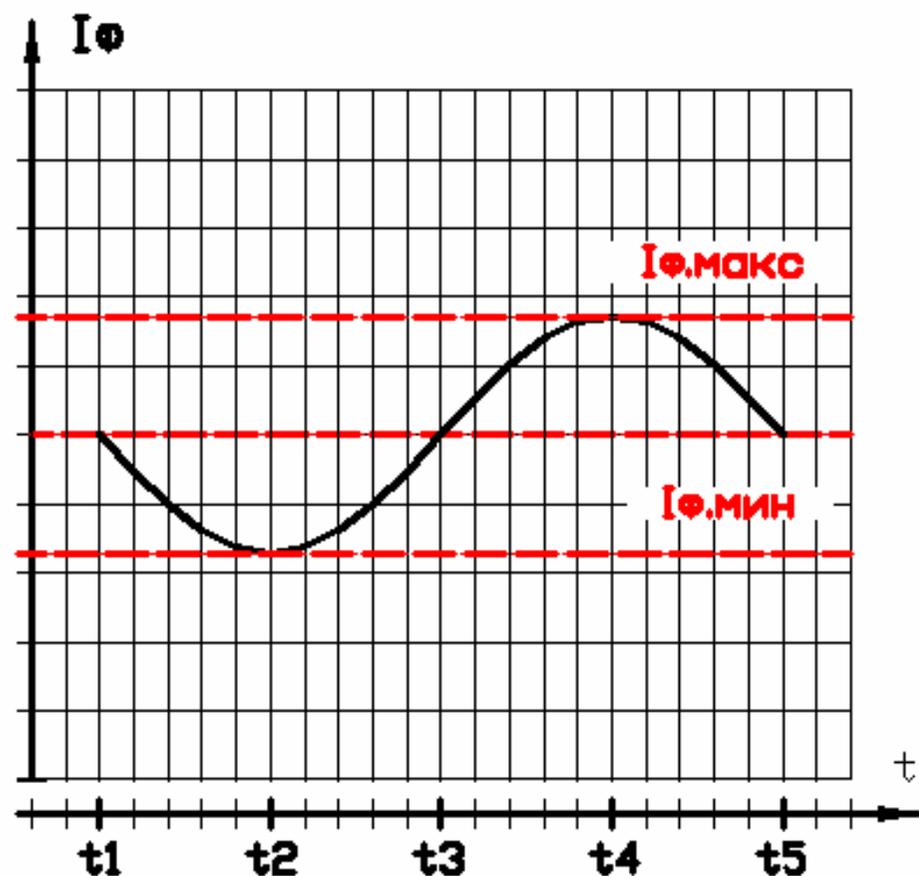
## Временные развёртки $P_{оп.3}$ и $I_{\phi}$



$$I_{\phi.макс} = P_{оп.3.макс} \times \text{Пф}$$

$$I_{\phi.мин} = P_{оп.3.мин} \times \text{Пф}$$

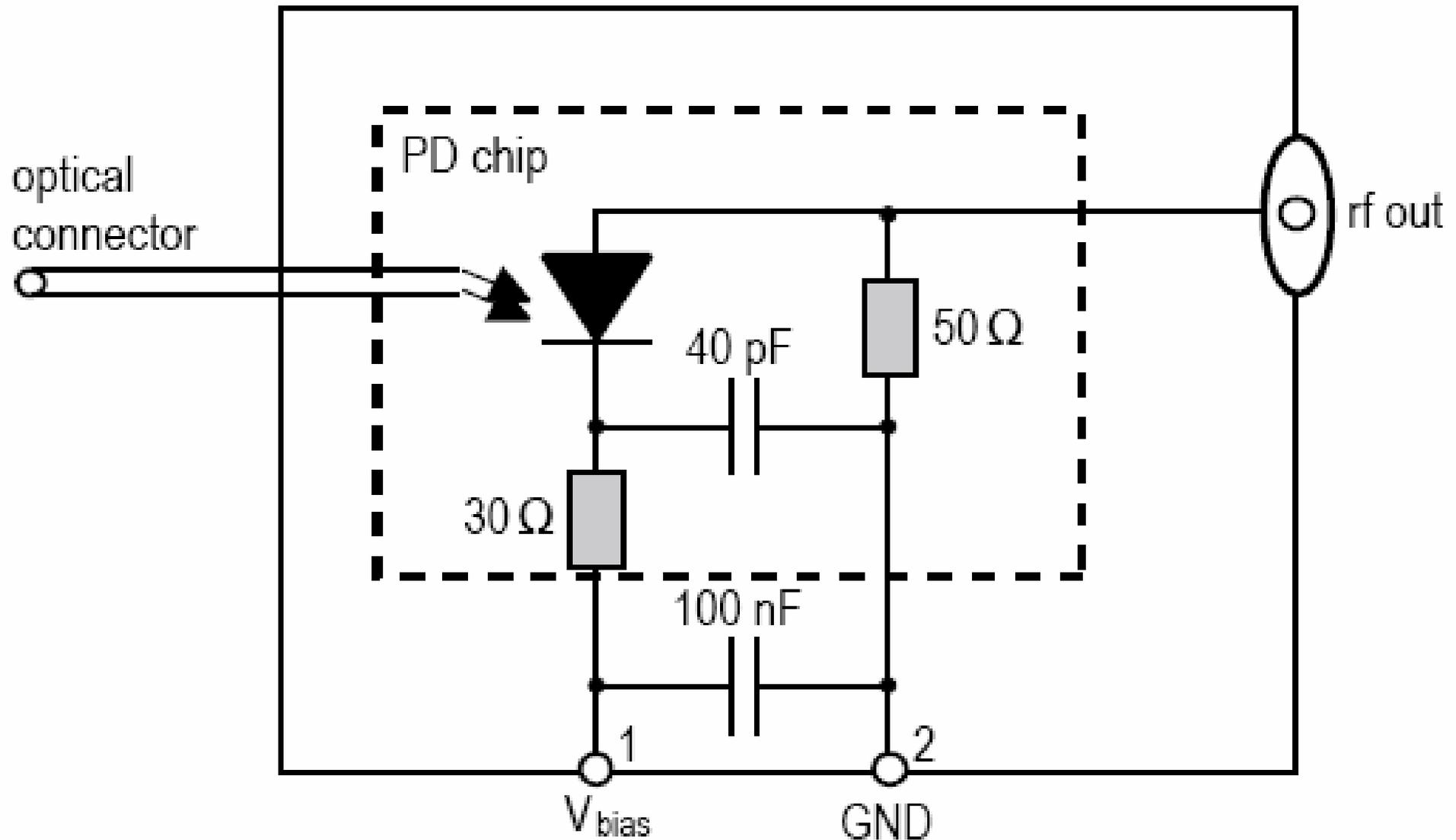
## Временные развёртки $I_{\phi}$ и $U_{\phi}$



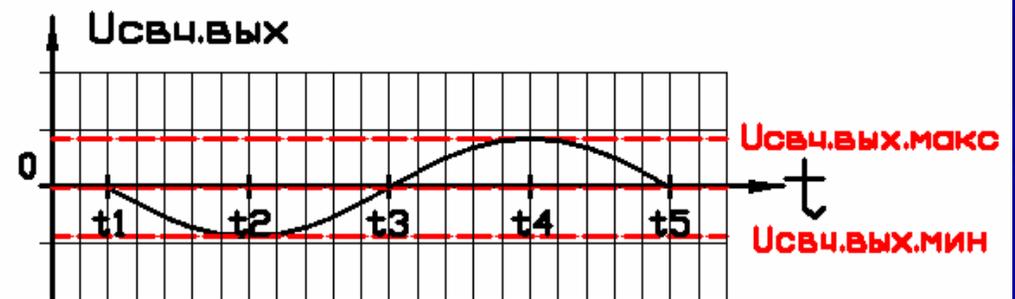
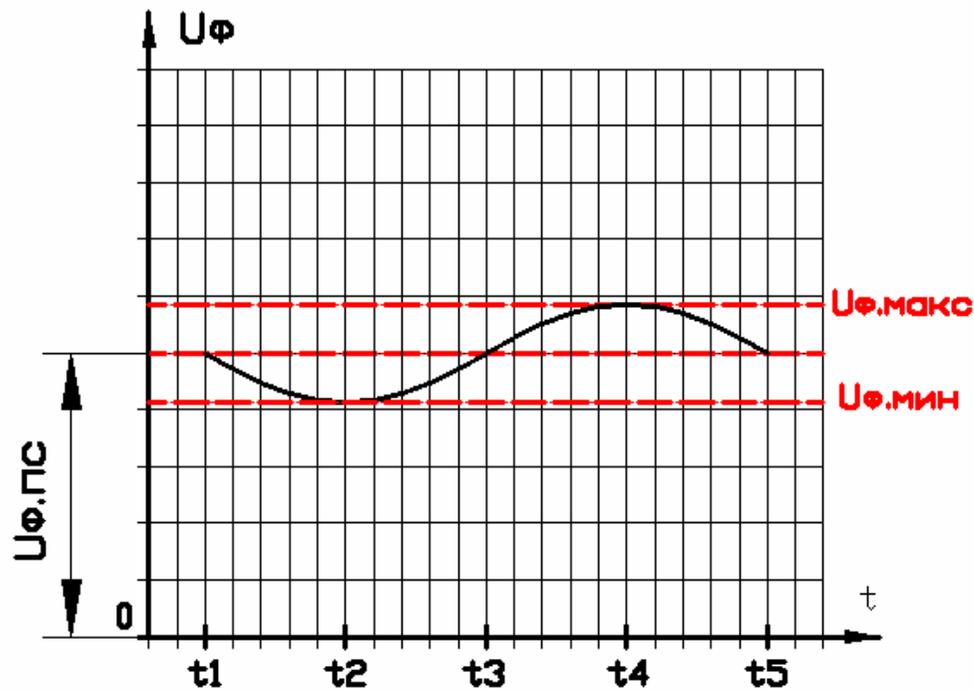
$$U_{\phi.макс} = I_{\phi.макс} \times 25 \text{ Ом}$$

$$U_{\phi.мин} = I_{\phi.мин} \times 25 \text{ Ом}$$

# Типичная схема сверхширокополосного СВЧ р-і-п фотодетектора



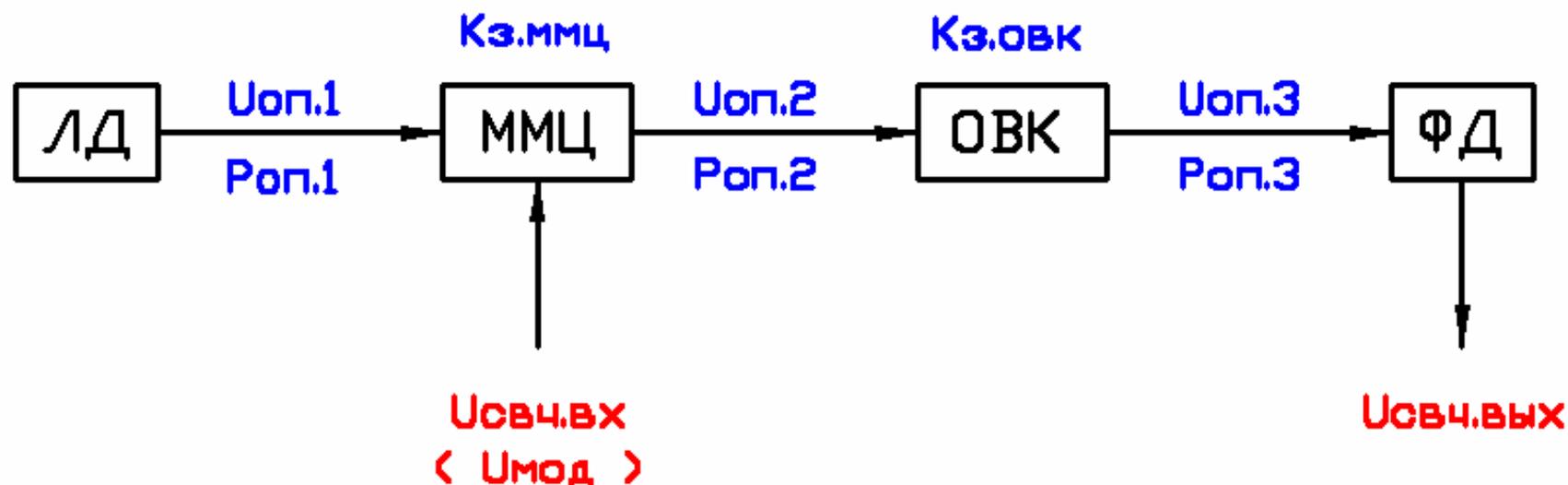
# Временные развёртки $U_{\phi}$ и $U_{\text{свч.вых}}$



$$U_{\text{свч.вых.макс}} - U_{\text{свч.вых.мин}} = U_{\phi.макс} - U_{\phi.мин}$$

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

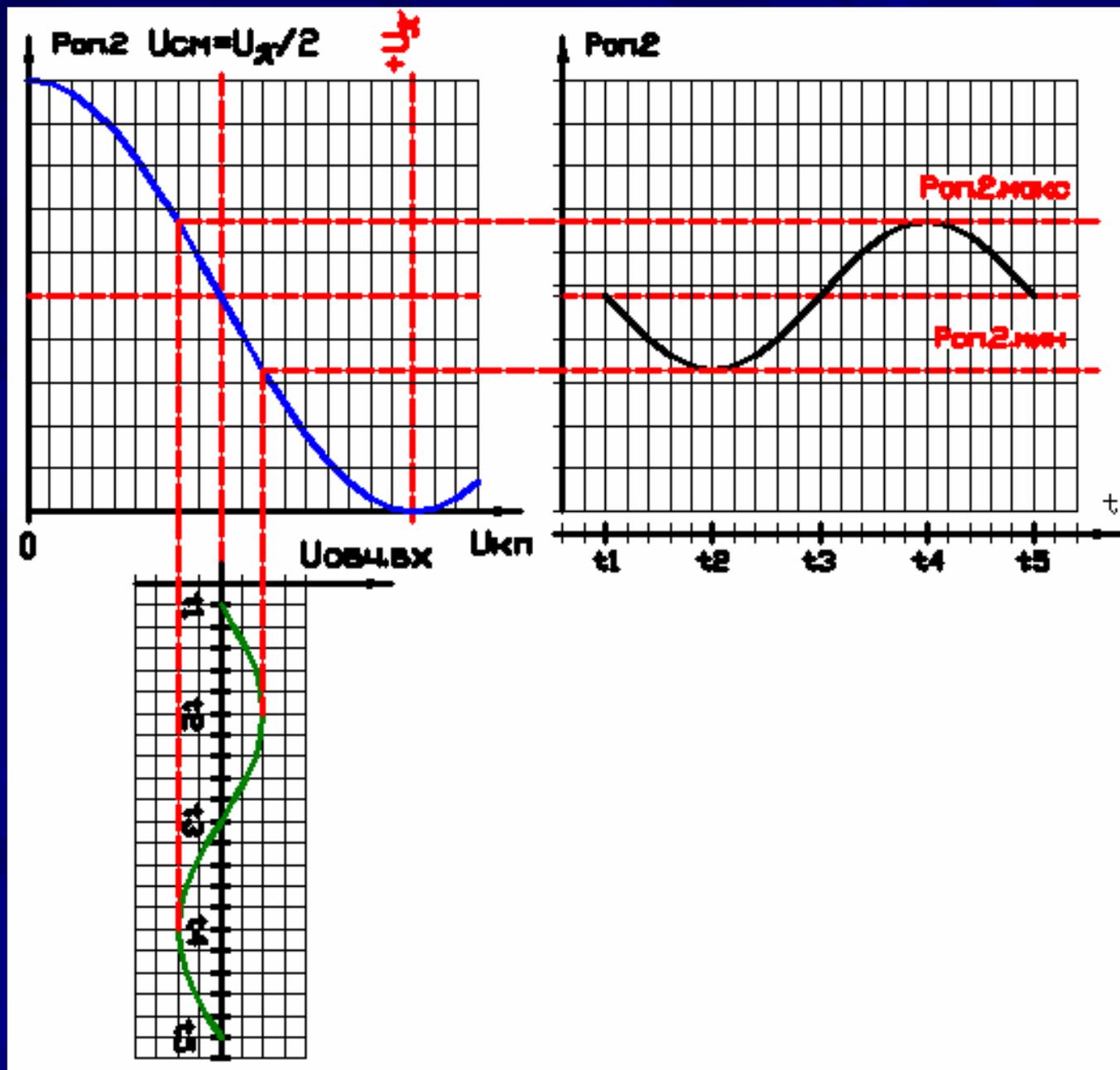
## Схема аналоговой ВОЛС СВЧ



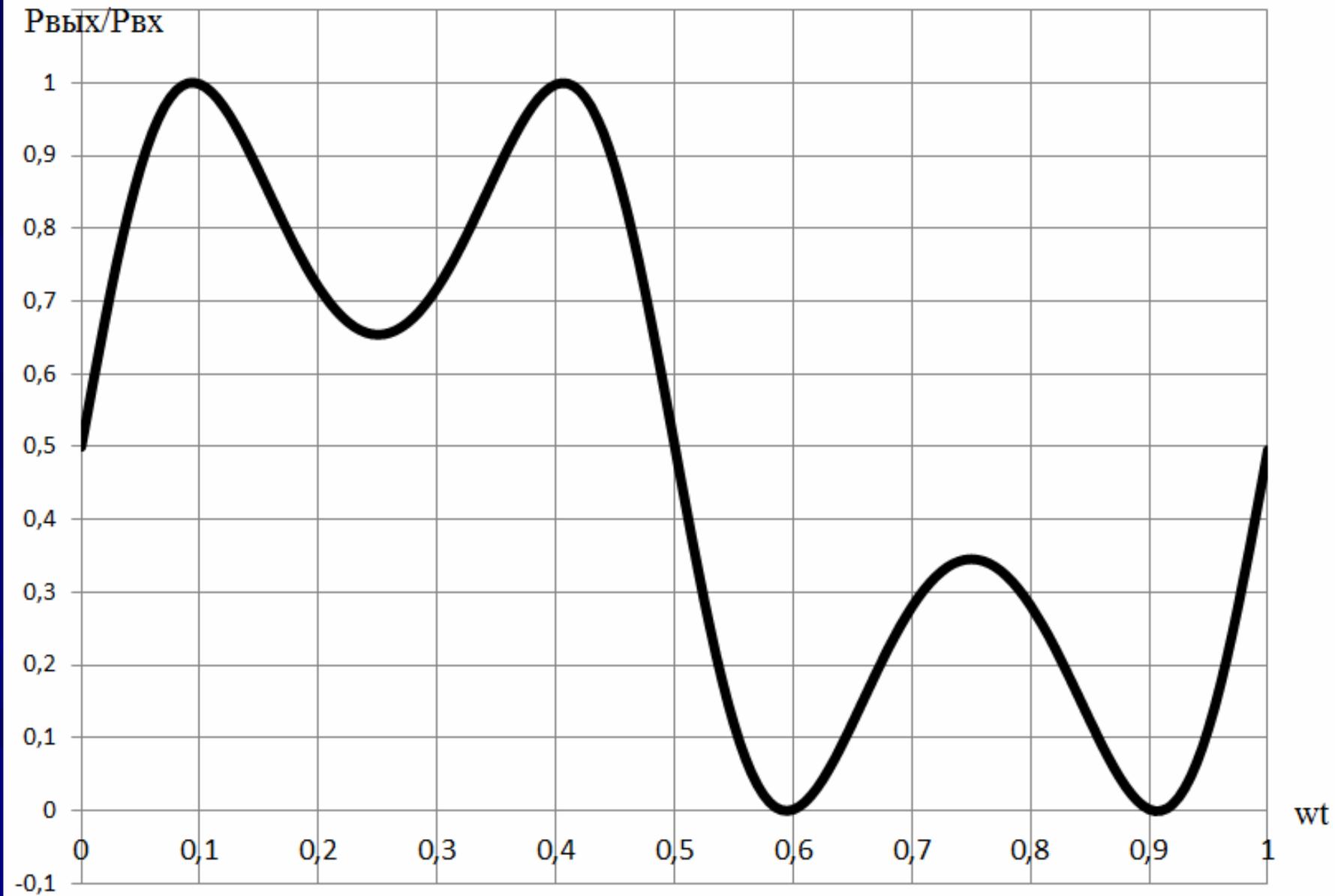
ЛД - лазерный диод;  
ММЦ - модулятор Маха-Цандера;  
ОВК - опто-волоконная кабель;  
ФД - фотодетектор;

$$K_{п.свч} = 20Lg(U_{свч.вых}/U_{свч.вх}) = ???$$

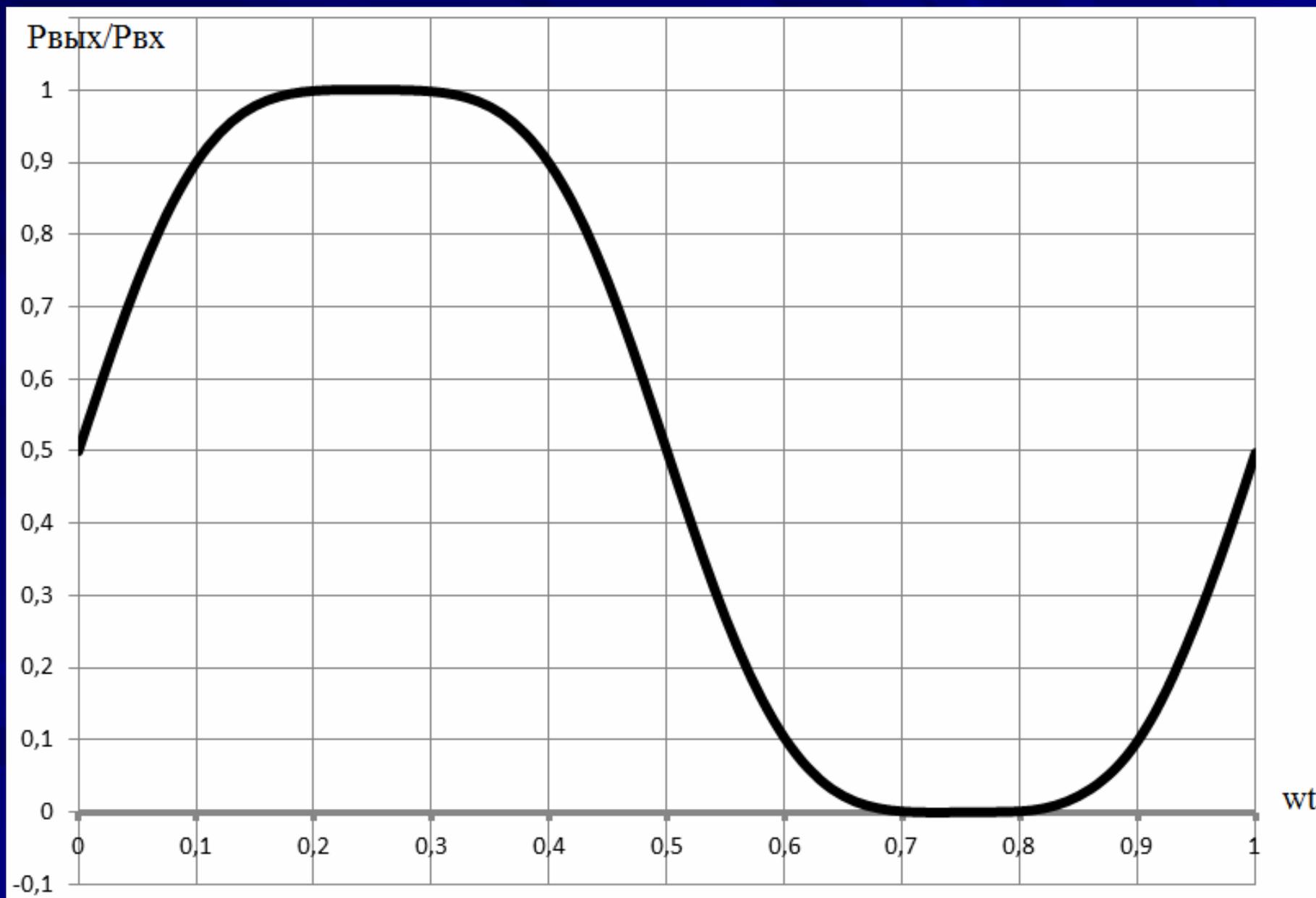
# Модуляция оптического сигнала с подачей напряжения смещения на контактные площадки.



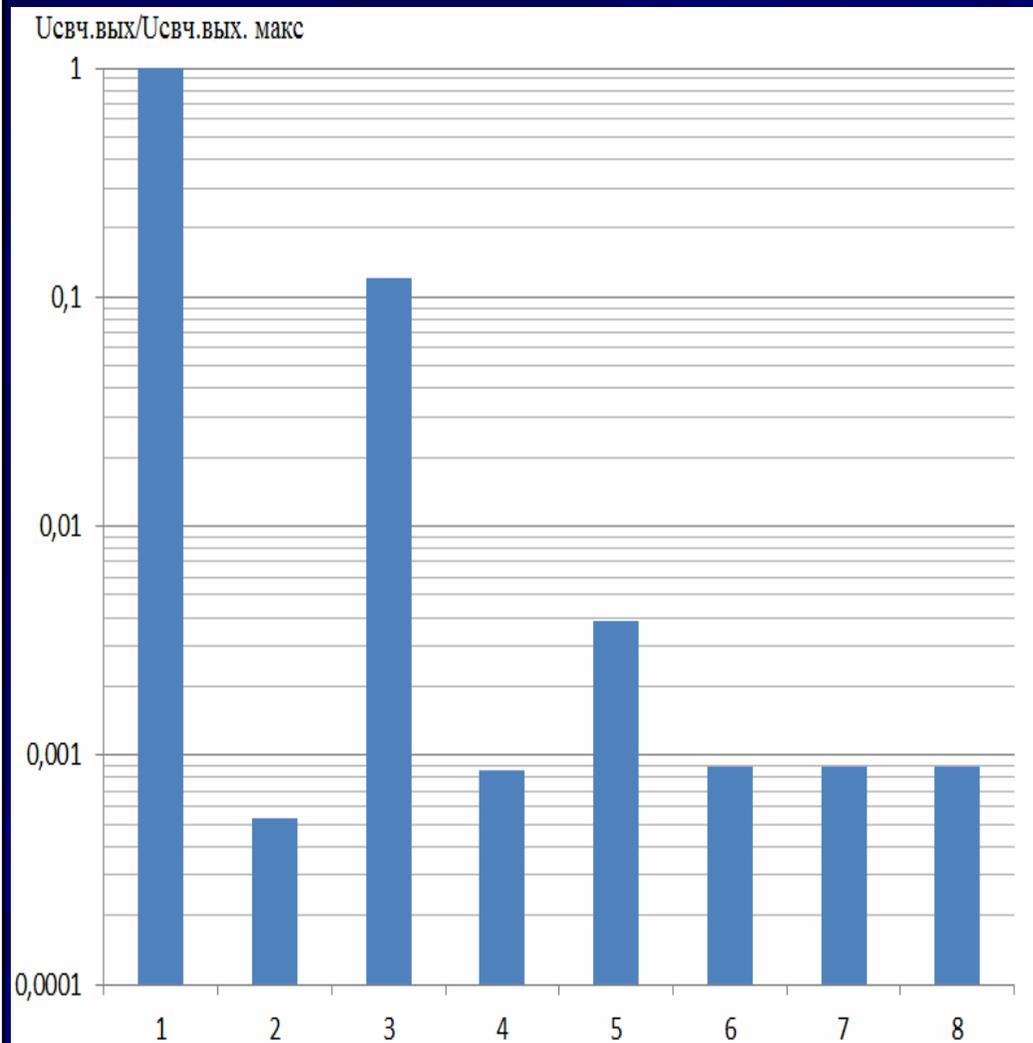
# Огибающая с $U_{\text{свч.вх}} > U_{\text{пт}}/2$



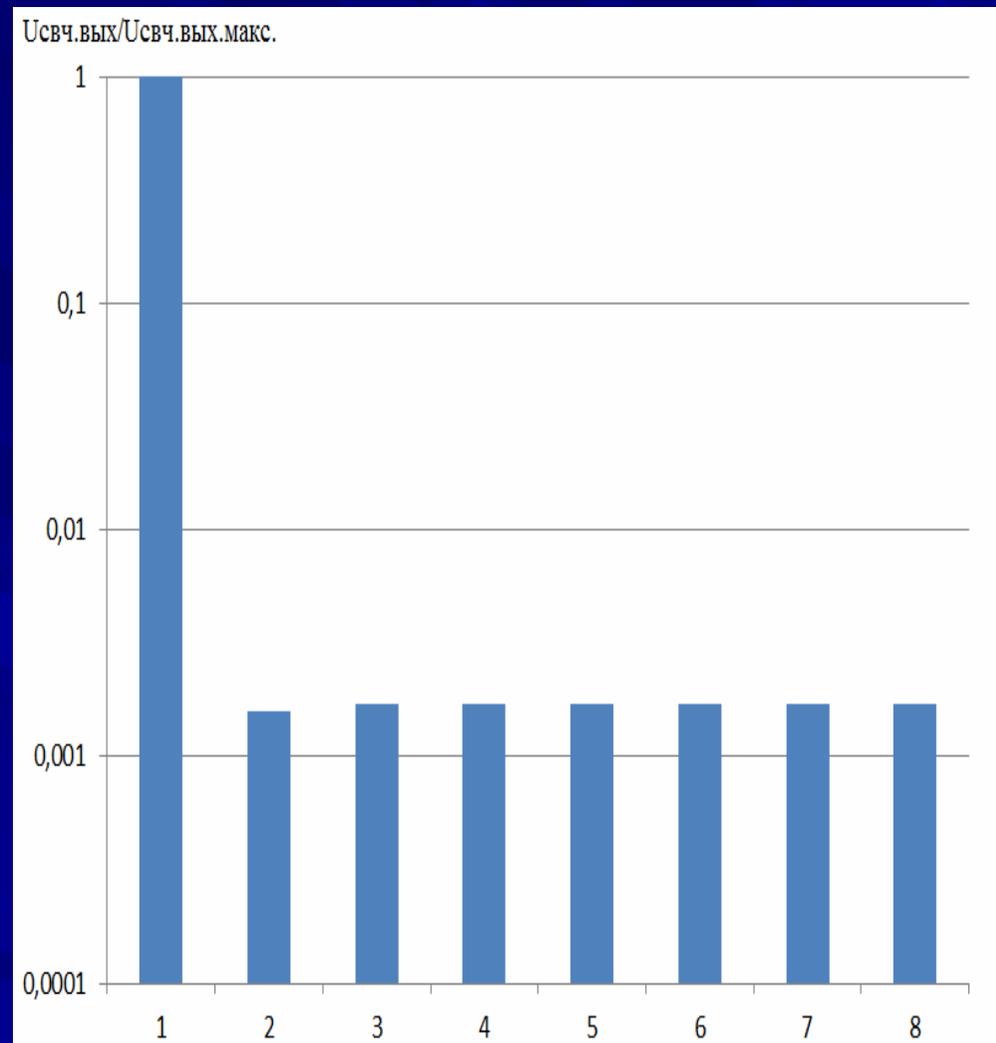
# Огибающая с $U_{\text{свч.вх}} = U_{\pi/2}$



# Нормированные спектры огибающих при $U_{\text{свч.вх}} = U_{\pi/2}$ и $U_{\text{свч.вх}} = U_{\pi/5}$

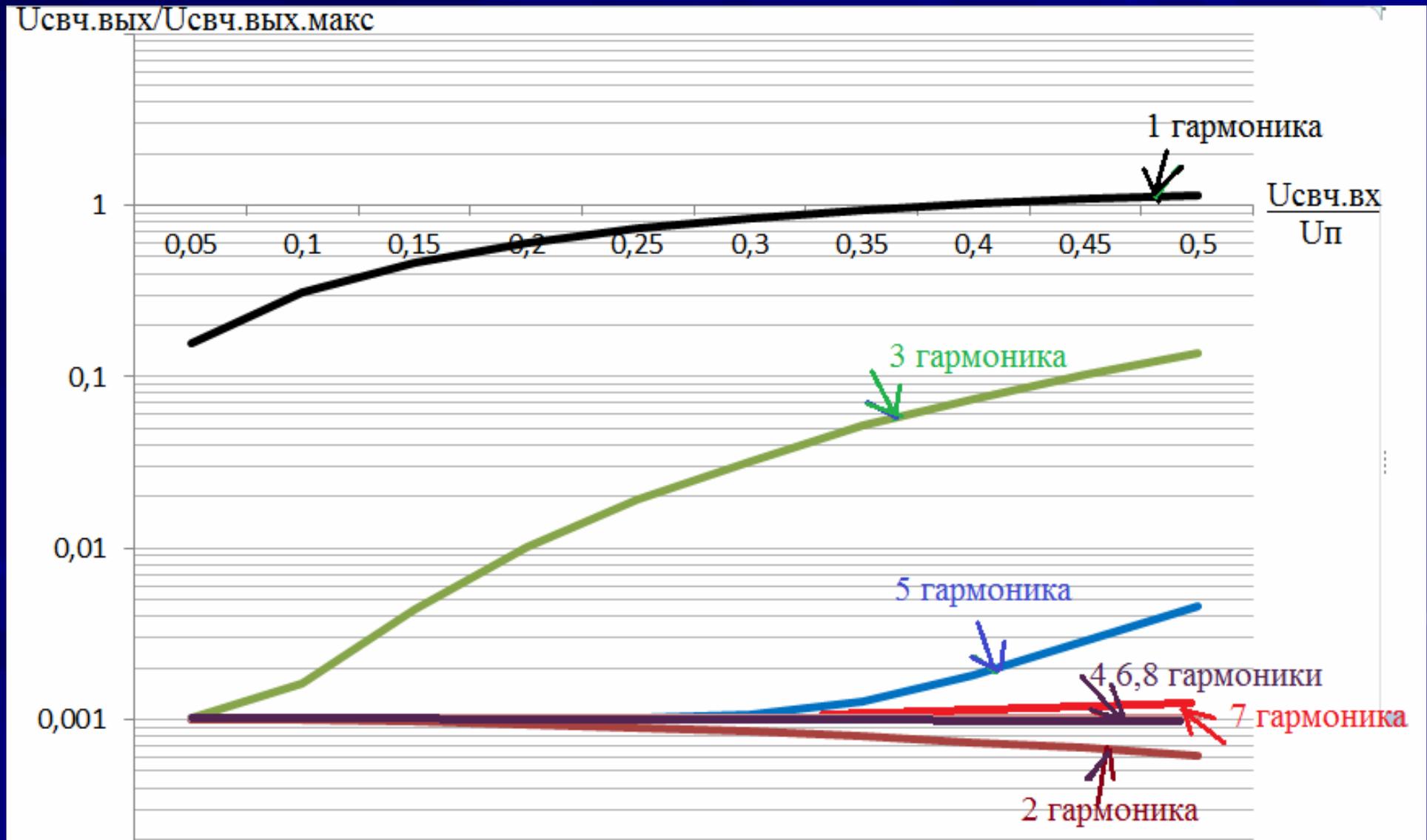


$U_{\text{свч.вх}} = U_{\pi/2}$



$U_{\text{свч.вх}} = U_{\pi/5}$

# Зависимости амплитуд гармоник от величины соотношения $U_{свч.вх} / U_{п}$



# Формула расчёта нелинейных искажений

$$\text{КНИ} := \frac{\sqrt{(U_2)^2 + (U_3)^2 + (U_4)^2 + \dots + (U_n)^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

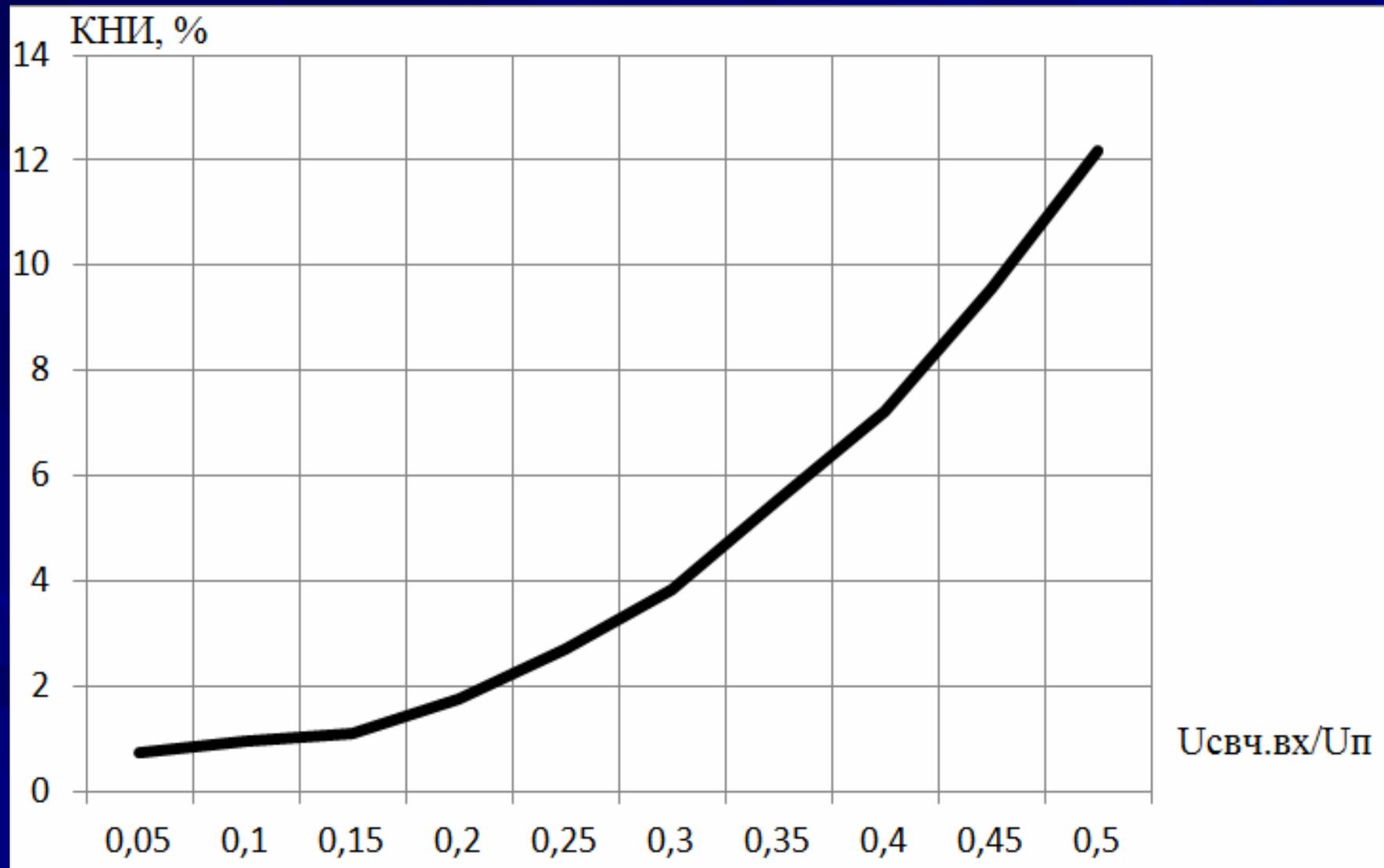
$$\text{КНИ} := \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n (U_i)^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

где:

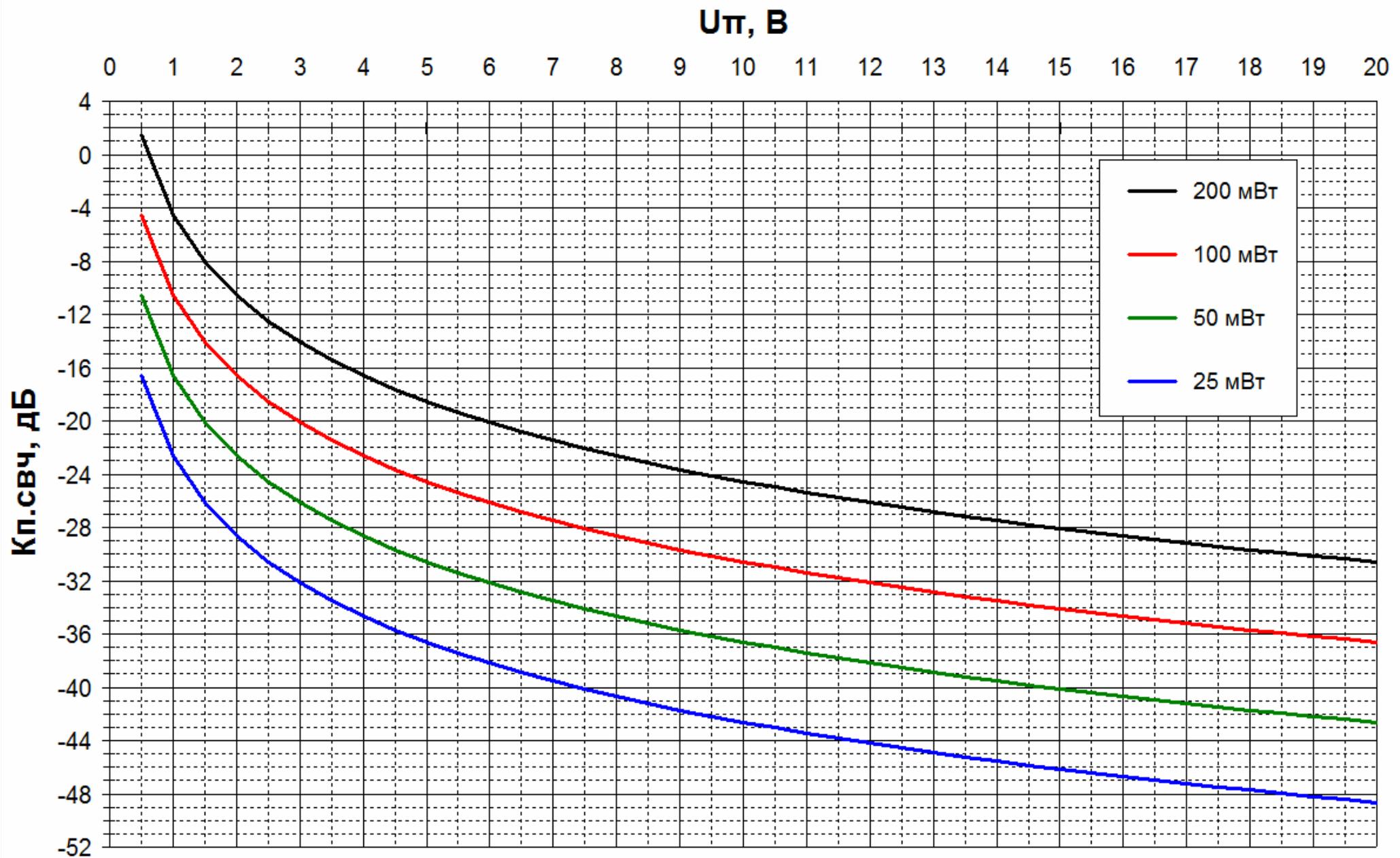
$U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$  - амплитуды 2, 3, 4, ..., n гармоник соответственно

$U_1$  - амплитуда первой гармоники

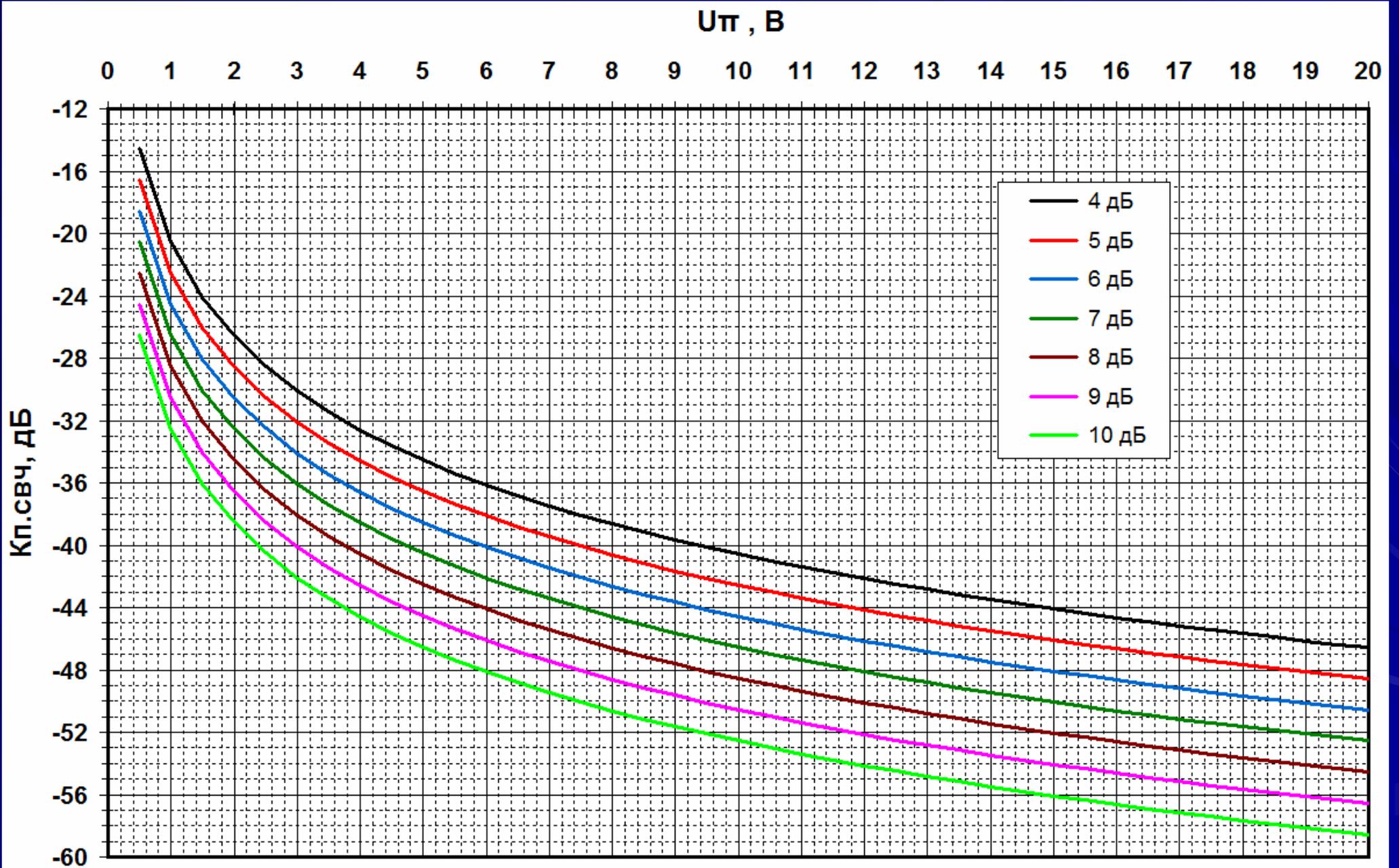
# Зависимость нелинейных искажений от соотношения $U_{свч.вх} / U_{п}$



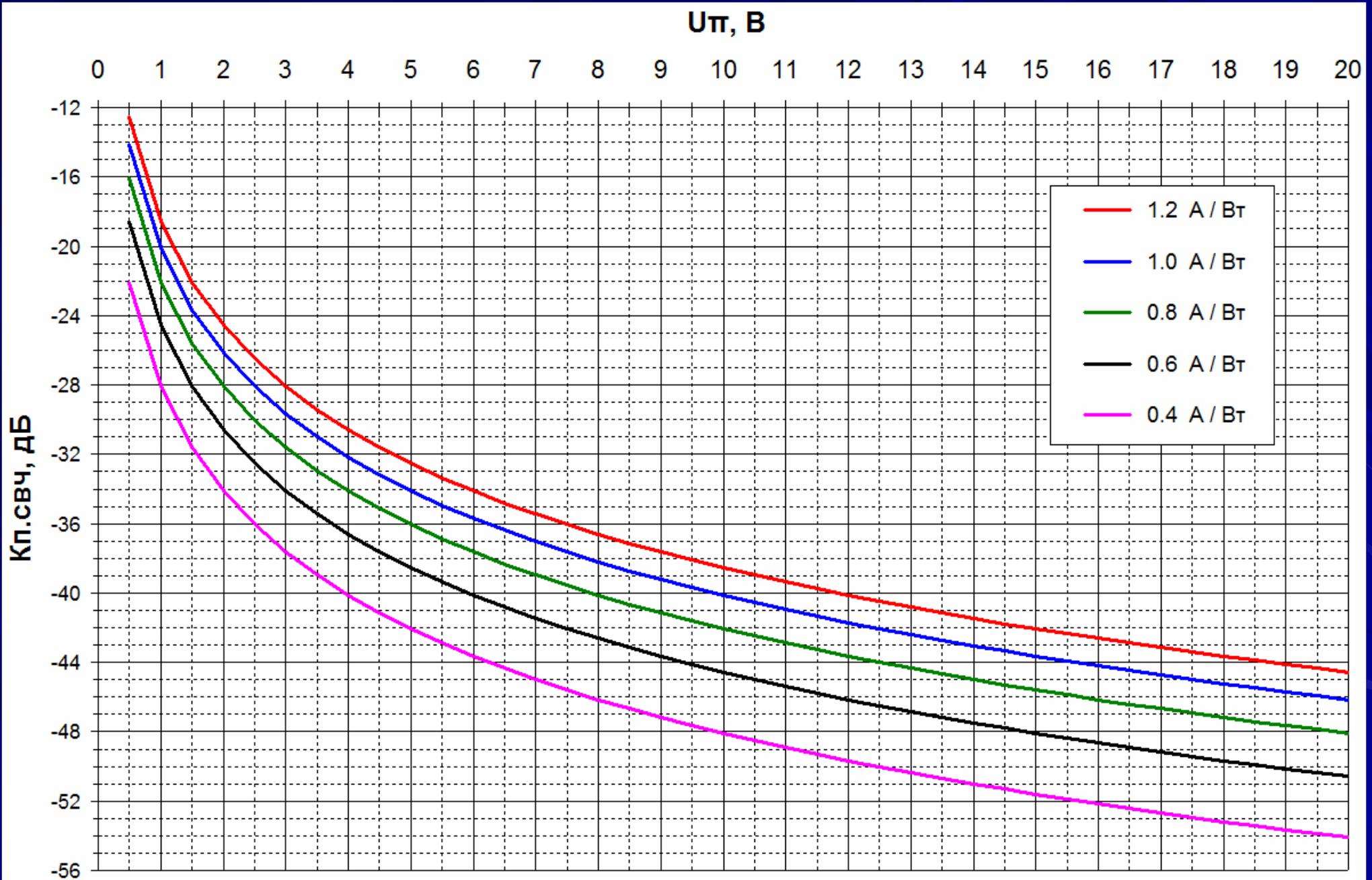
# Зависимости $K_{п.свч}$ от $U_{п}$ при различных $P_{оп.1}$ ( $K_{з.ммц} = 6$ дБ, $U_{свч.вх} = 7$ мВ, $P_{ф} = 0.6$ А / Вт)



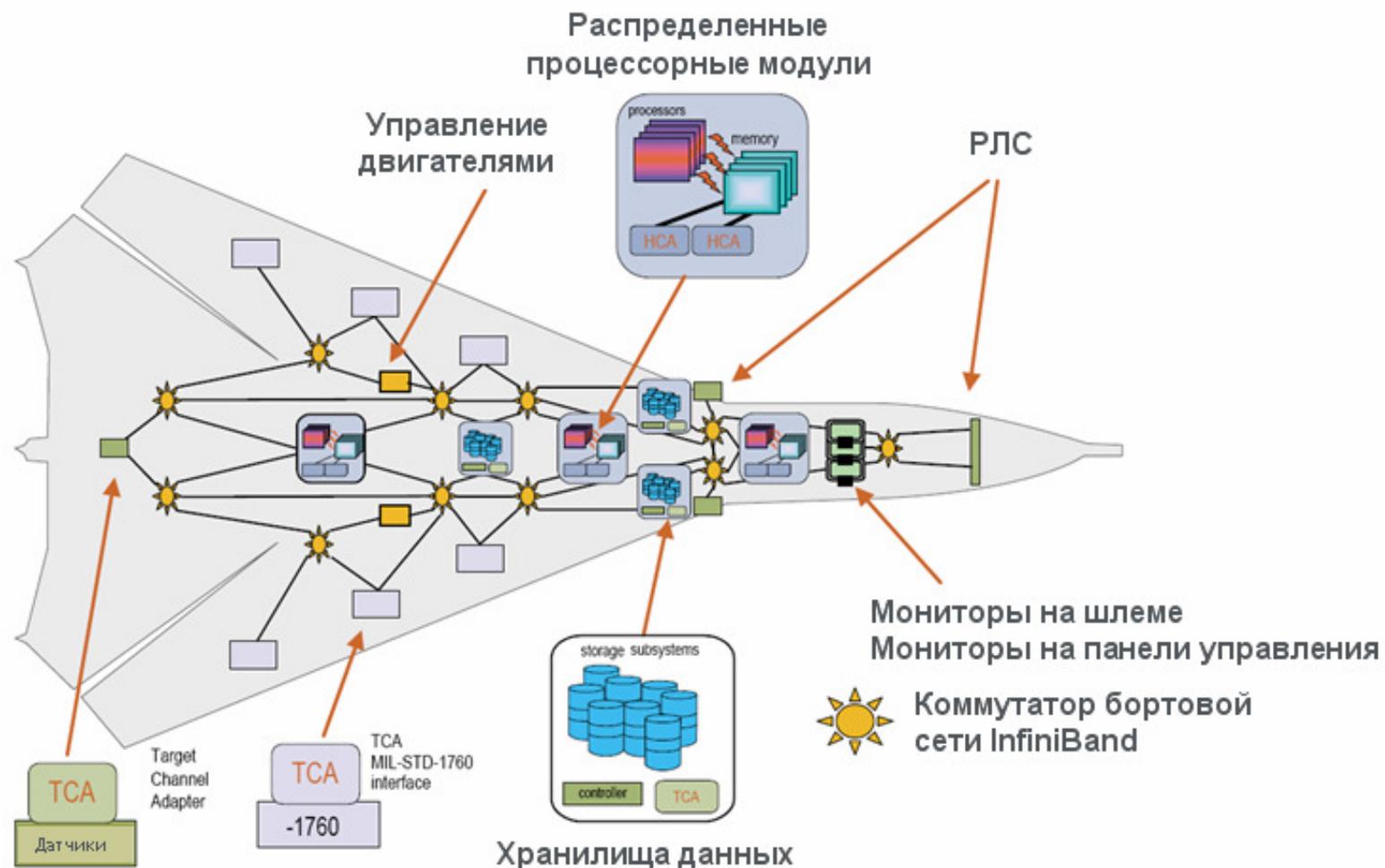
# Зависимости $K_{п.свч}$ от $U_{п}$ при различных $K_{з.ммц}$ ( $P_{оп.1} = 20$ мВт, $U_{свч.вх} = 7$ мВ, $P_{ф} = 0.6$ А / Вт)



# Зависимости $K_{оп.свч}$ от $U_{п}$ при различных $P_{ф}$ ( $K_{з.ммц} = 6$ дБ, $U_{свч.вх} = 7$ мВ, $P_{оп.1} = 20$ мВт)



# Зачем нужны аналоговые ВОЛС СВЧ с положительными коэффициентами передачи?



**Взаимодействия уровня «подсистема-подсистема»**

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

***Спасибо  
за внимание!***

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