

Курс лекций по дисциплине
«Приемные устройства диапазона СВЧ и радиофотоника»

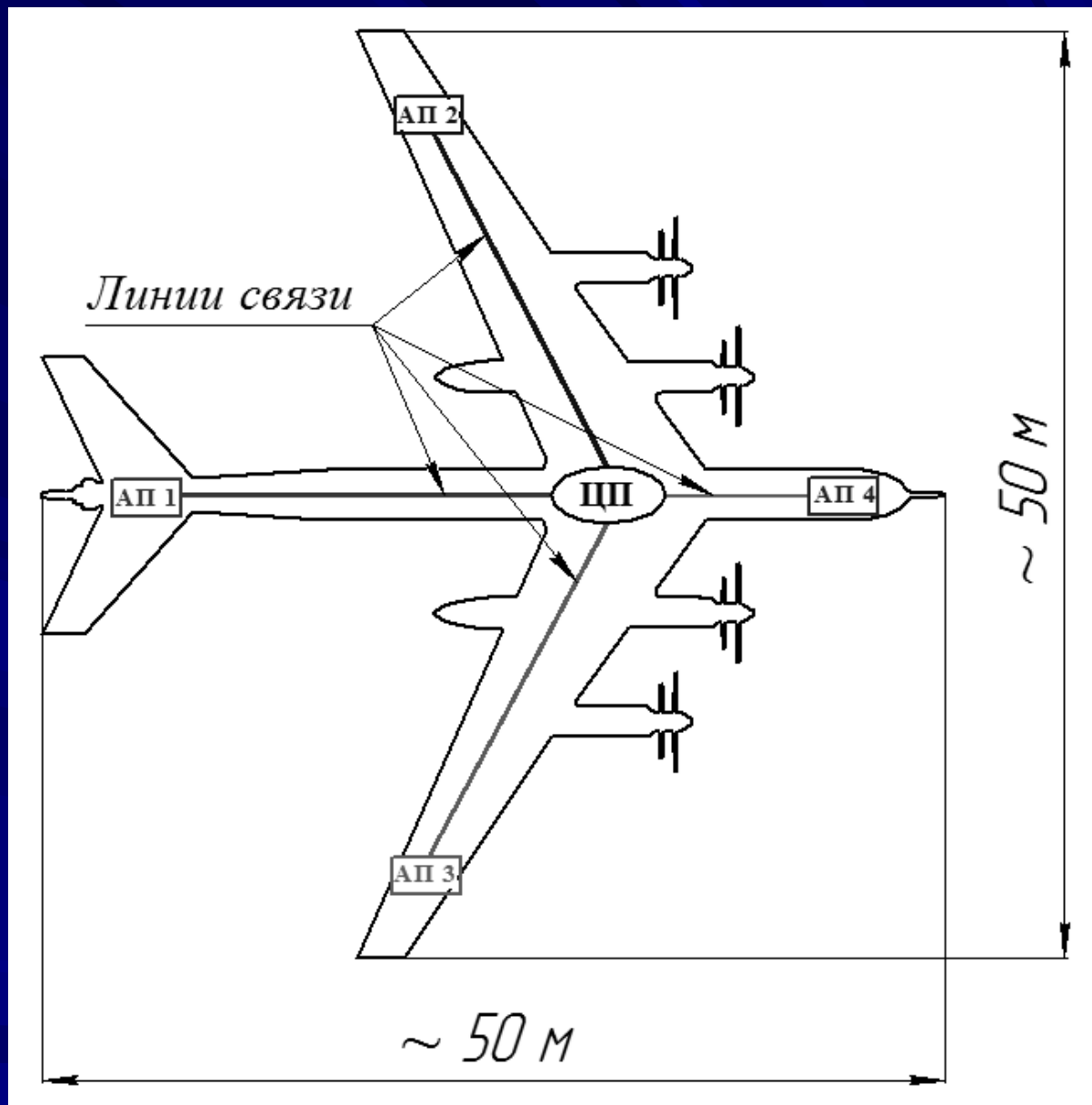
Лекция №2

*Теоретическое и экспериментальное моделирование
сверхширокополосных
аналоговых радиофотонных трактов
диапазона СВЧ*

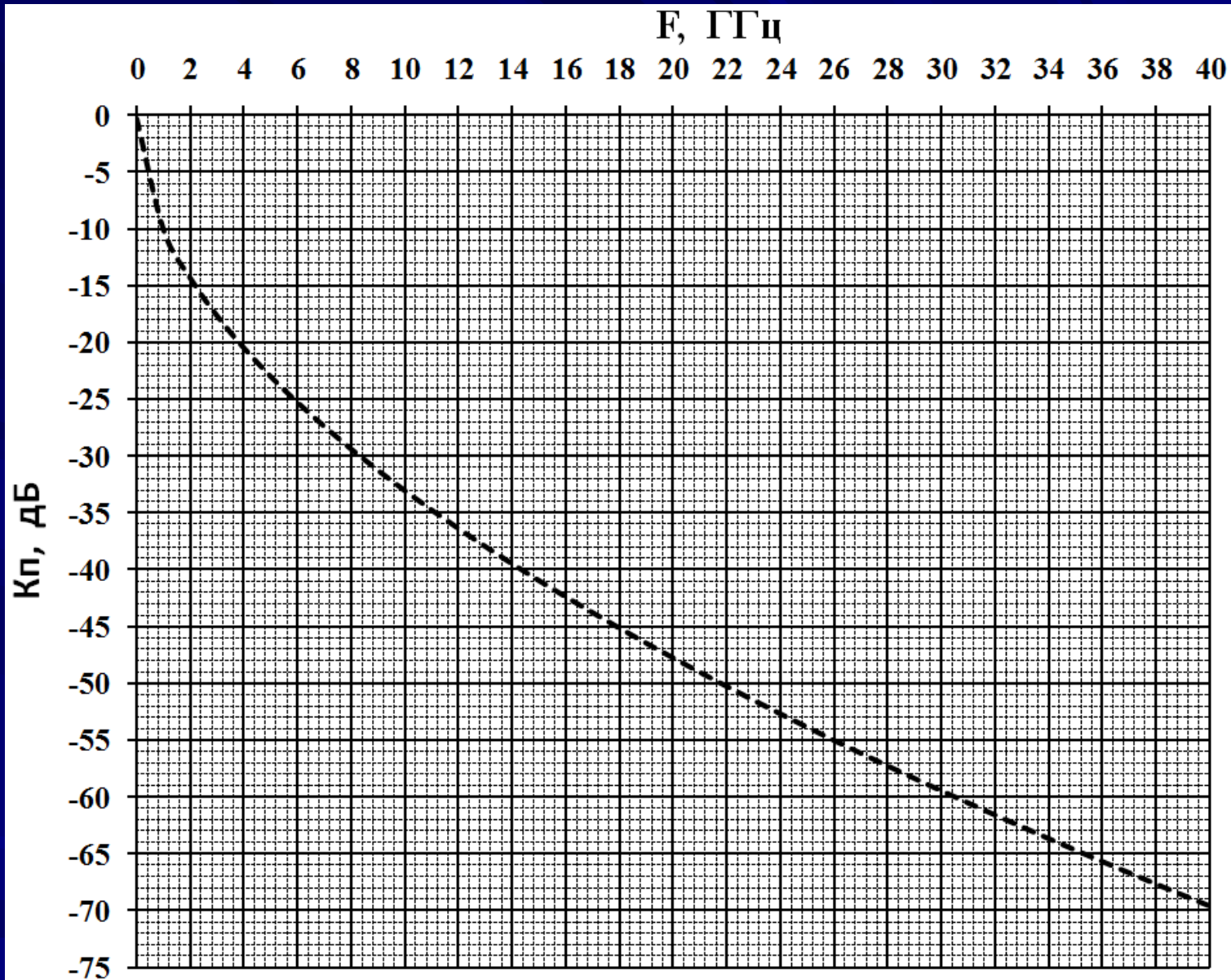
www.ckba.net/121/



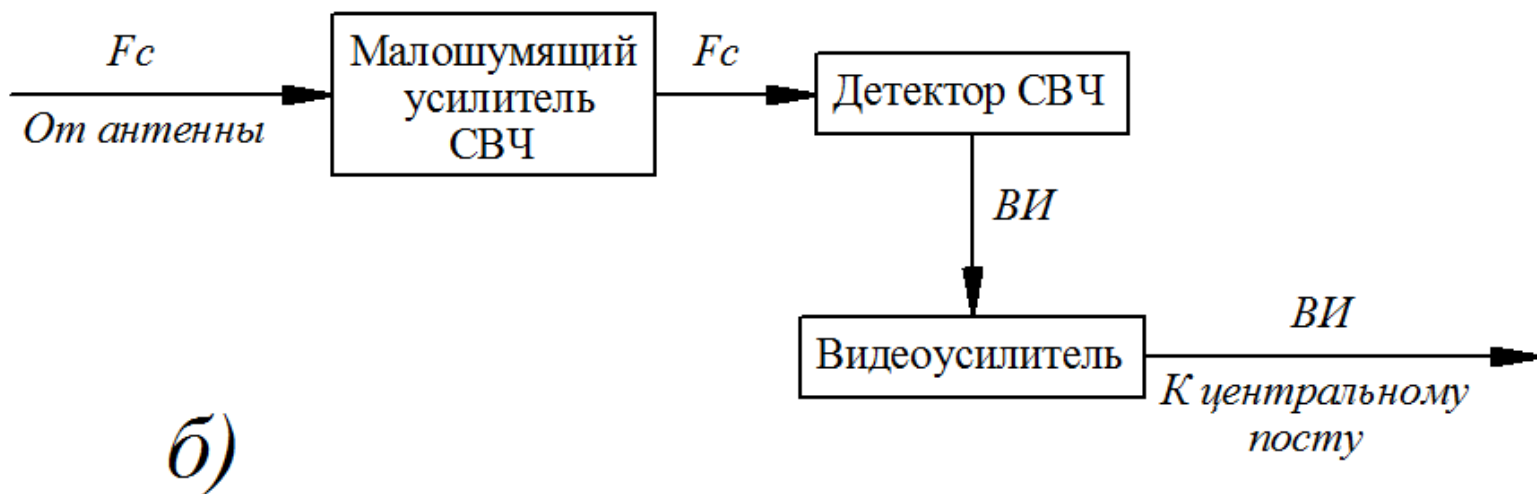
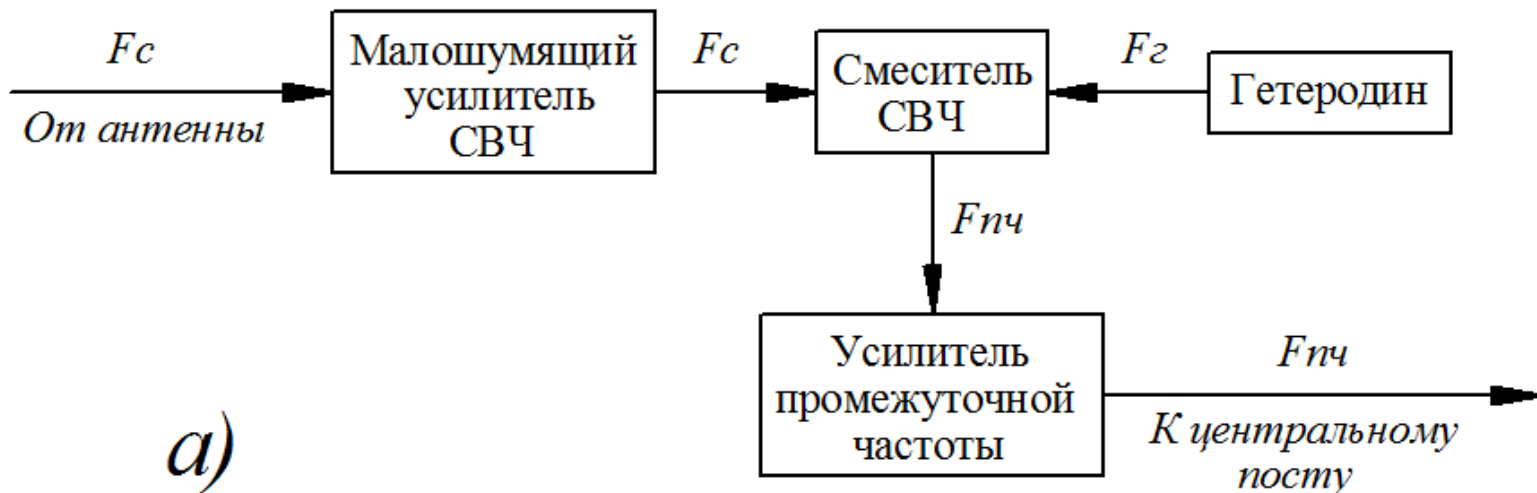
*Станция предупреждения о радиолокационном облучении
(СПО)*



Позиционирование элементов системы предупреждения об облучении на большой авиационной платформе



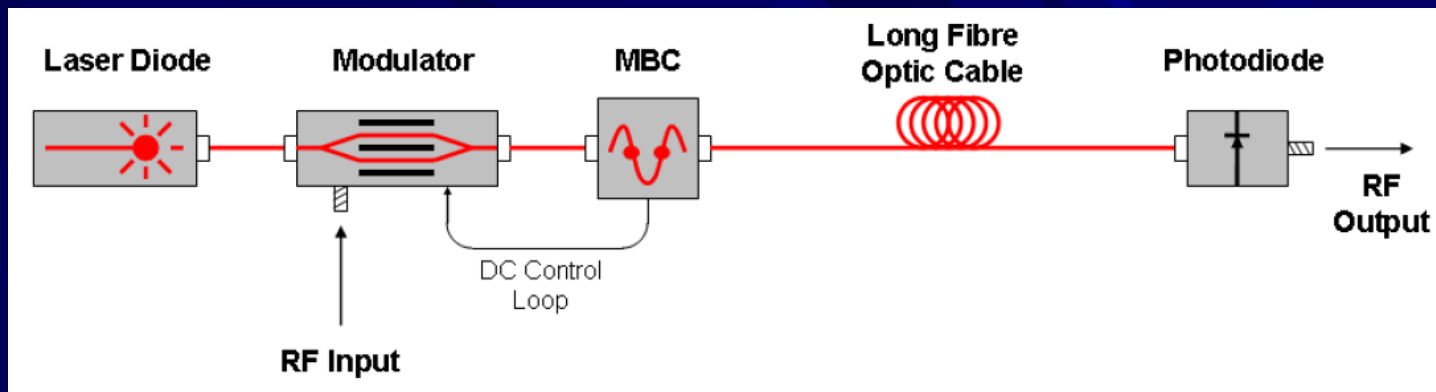
*АЧХ отрезка коаксиального кабеля типа LL160
(ф. Harbour Industries www.harbourind.com) длиной 30 м.*



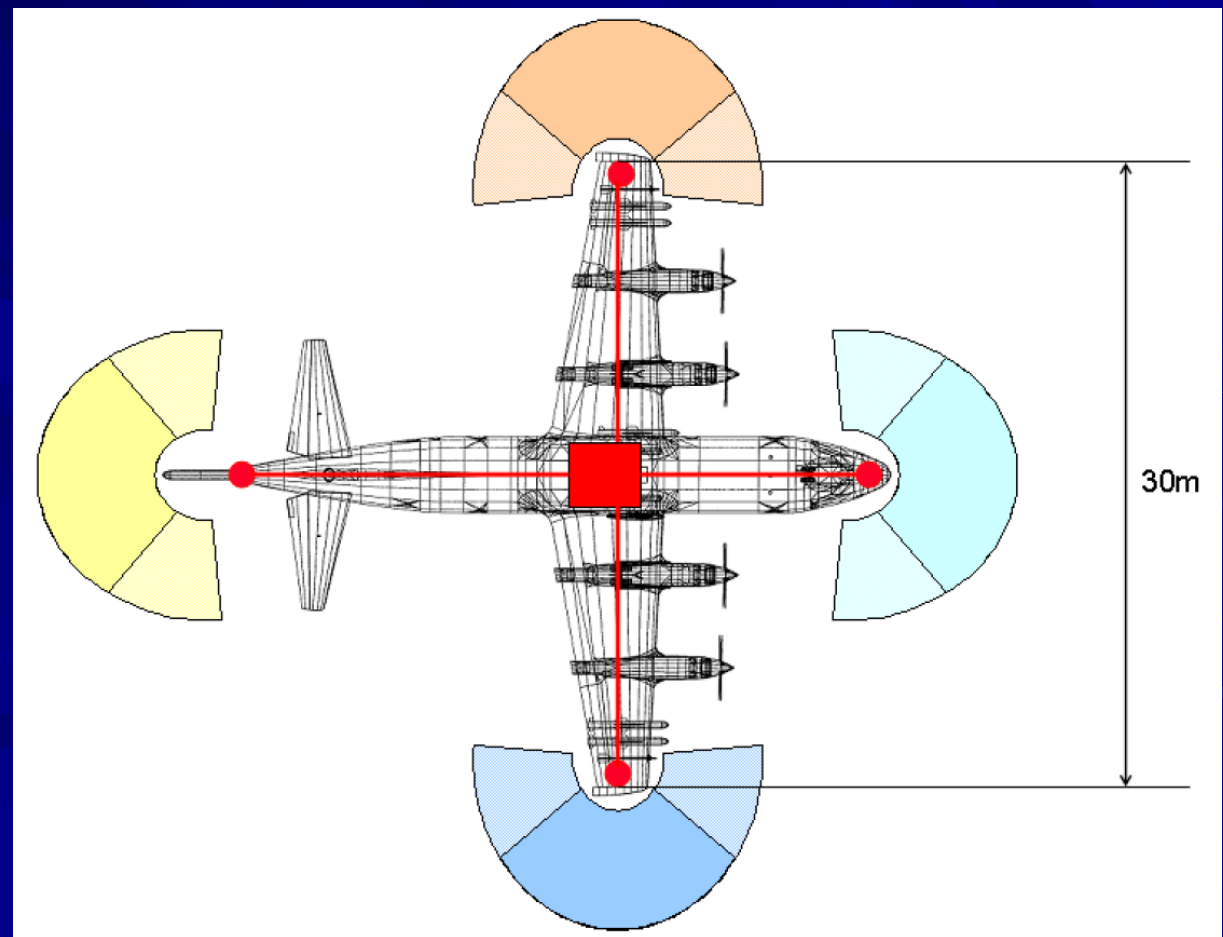
**Возможные варианты архитектуры антенных постов:
 а - супергетеродинный приёмник, б - приёмник прямого усиления**

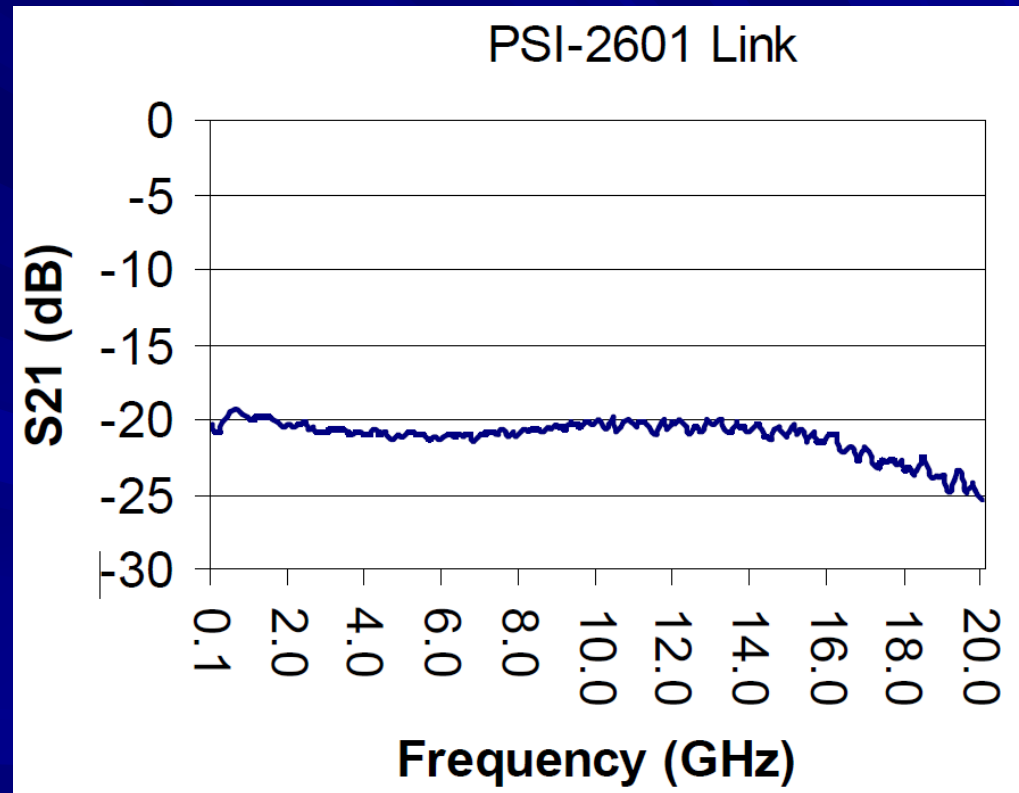
Michael E Manka.

*Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications //
Microwave photonics, 2008. jointly held with the 2008
asia-pasific microwave photon ics conference. mwp/apmp
2008. international topical meeting on.*



*Сверхширокополосная
аналоговая ВОЛС
для систем EW*

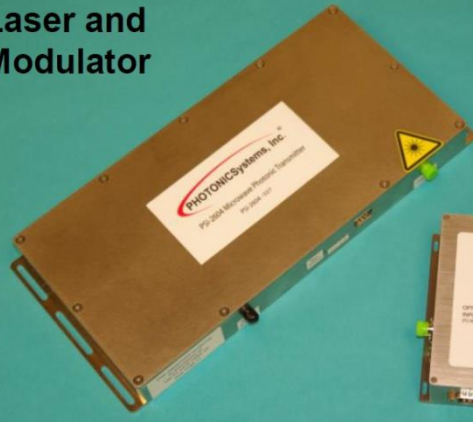




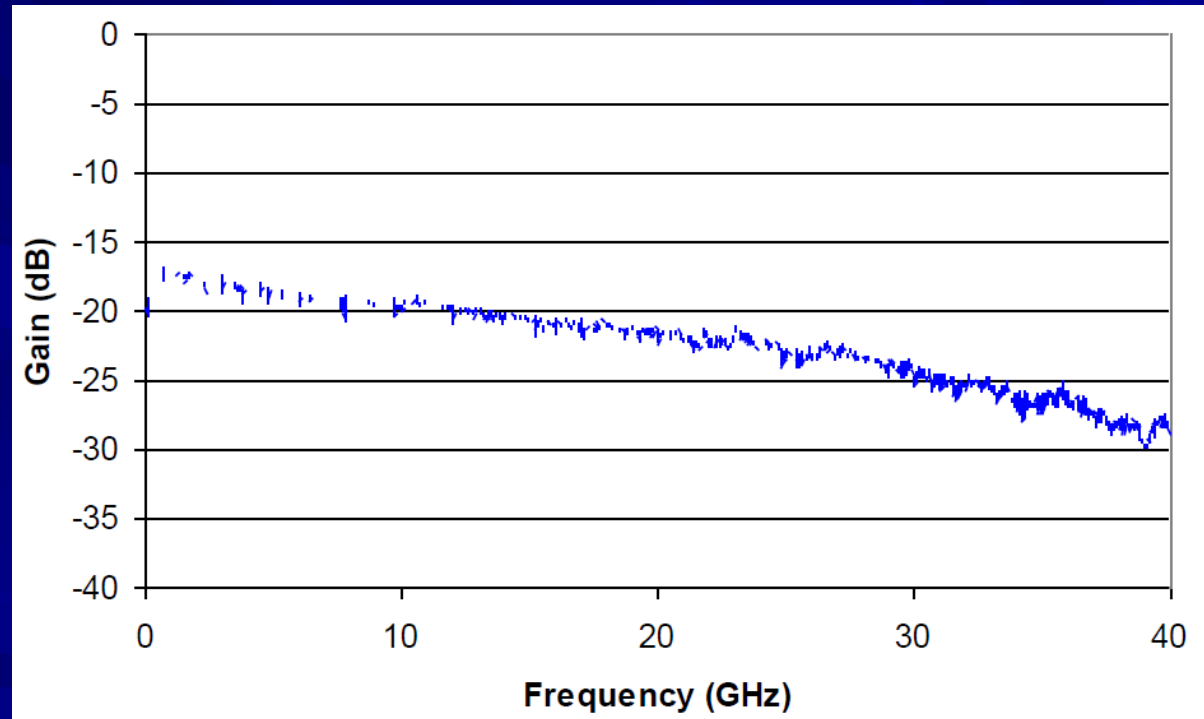
Широкополосные линки серии PSI-2601

производства ф. Photonic Systems (www.photonicsinc.com)

Link Input
Laser and
Modulator



Link output
Photodetector

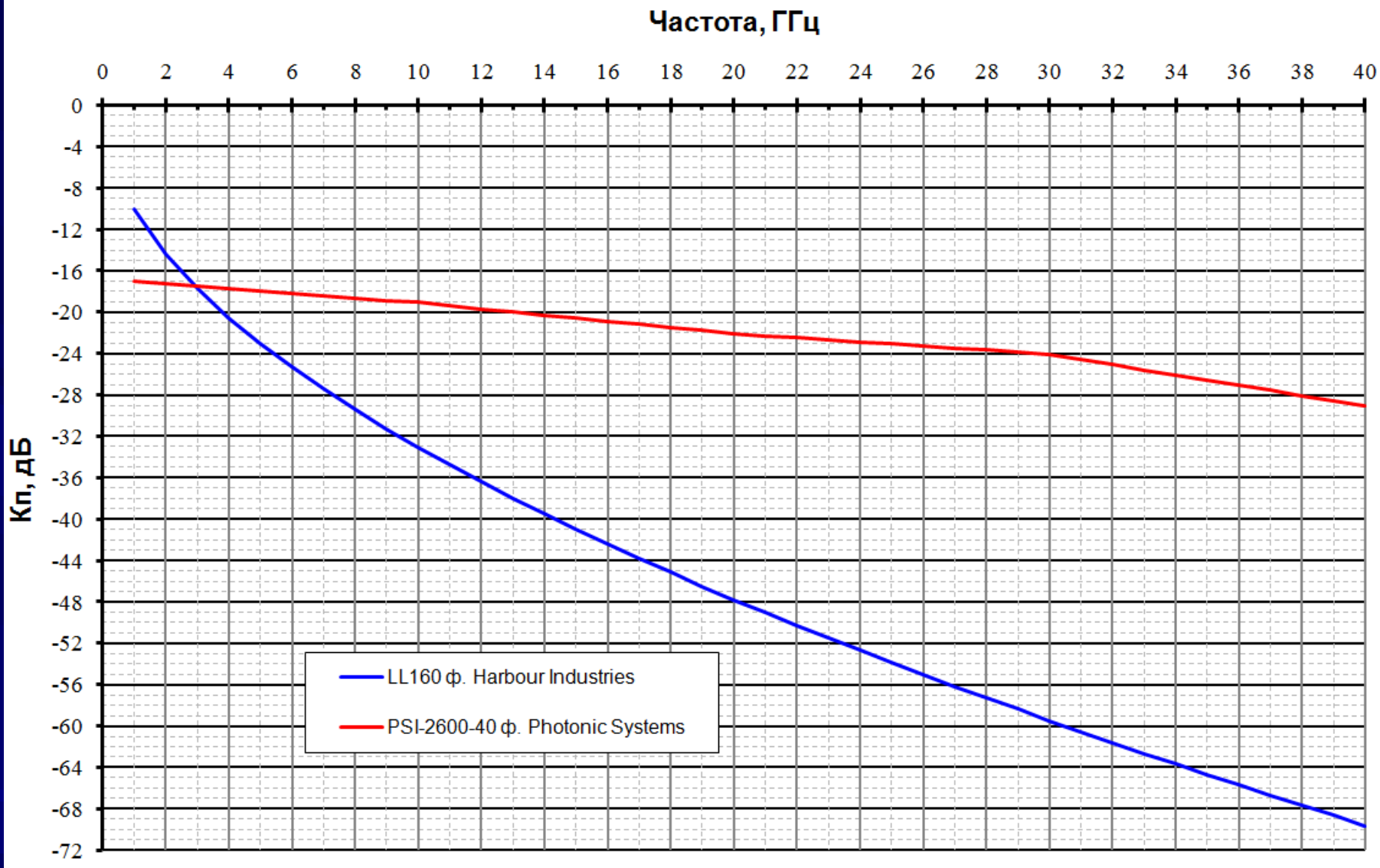


Широкополосные линки серии PSI-2600-40

производства ф. Photonic Systems (www.photonicsinc.com)

C. H. Cox III and E. I. Ackerman.

*A Path to Realizing High-Performance 100-GHz Analog Links //
Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP),
2013 IEEE.*



АЧХ отрезка высокочастотного коаксиального кабеля LL160 ф. Harbour Industries (www.photonicsinc.com) длиной 30 м и радиопотонного линка серии PSI-2600-40 ф. Photonic Systems (www.photonicsinc.com)

*E. Ackerman, G. Betts, W. Burns, J. Campbell, C. Cox, N. Duan,
J. Prince, M. Regan, and H. Roussell.*

*Signal-to-noise performance of two analog photonic links using
different noise reduction techniques //*

*IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii, pp.
51-54, June 2007.*

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

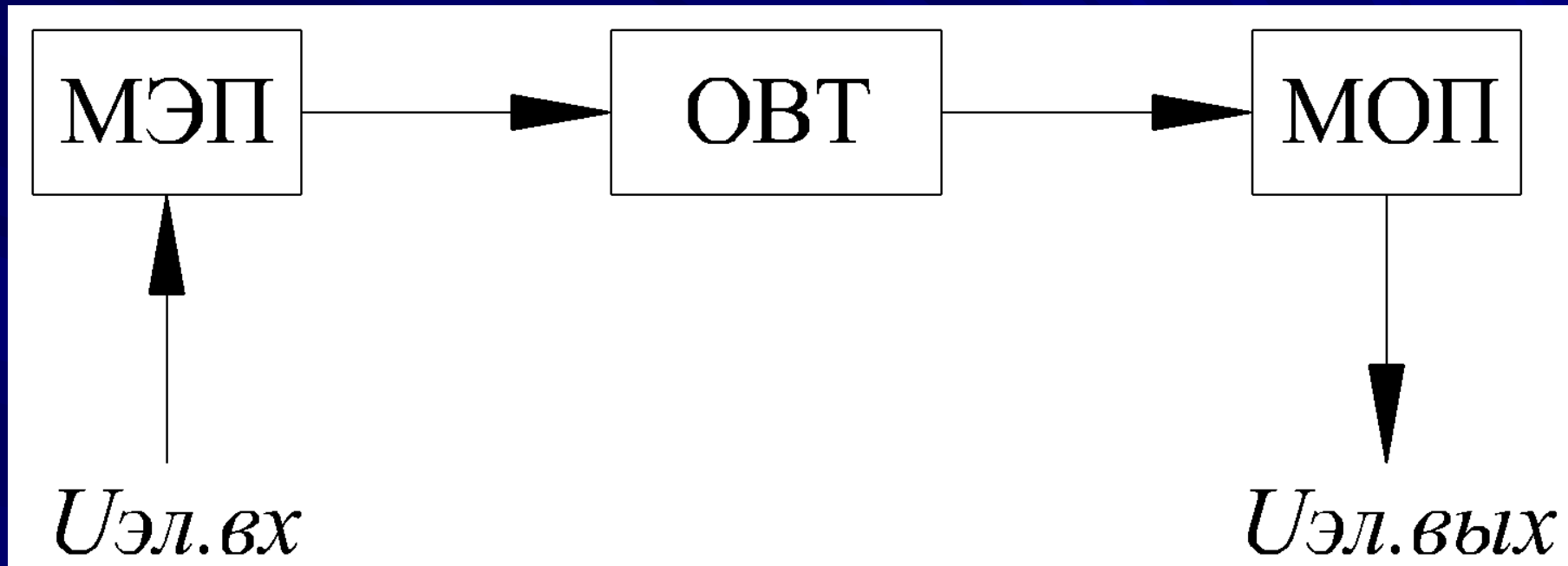
www.psu.ru

Омского Государственного Университета

им. Ф.М. Достоевского

www.omsu.ru

Укрупнённая схема аналогового РФТ

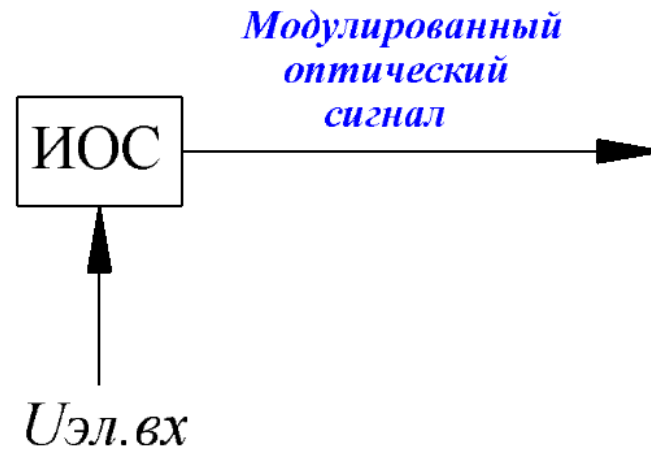


МЭП - модуль электро-оптического преобразования

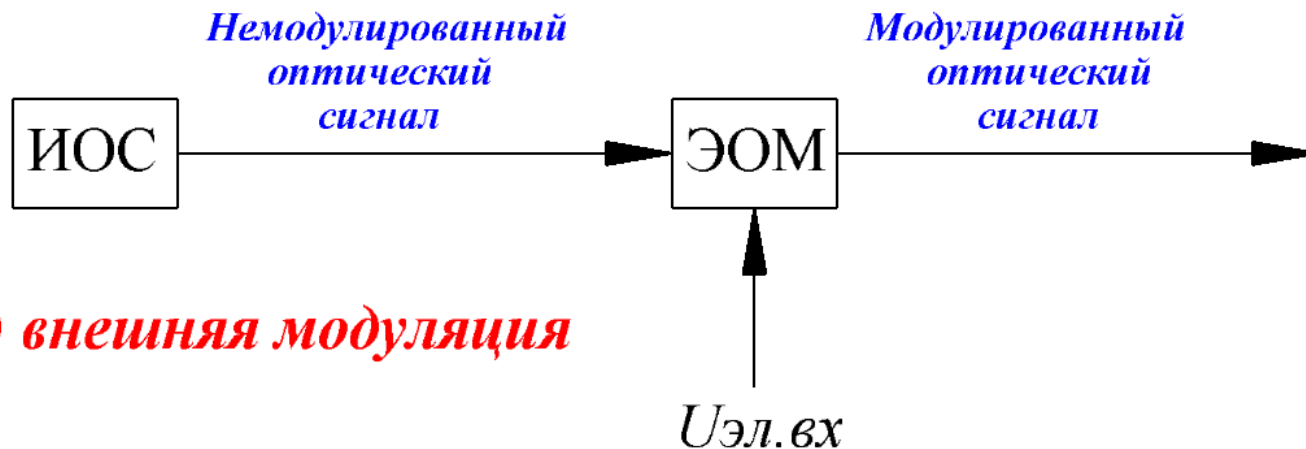
ОВТ - оптоволоконный тракт

МОП - модуль опто-электронного преобразования

а) прямая модуляция



б) внешняя модуляция



Возможные варианты архитектуры модулей электро-оптического преобразования (МЭП):
ИОС - источник оптического сигнала,
ЭОМ - электро-оптический модулятор

Типы электро-оптических модуляторов

Электро-поглощающие модуляторы

+

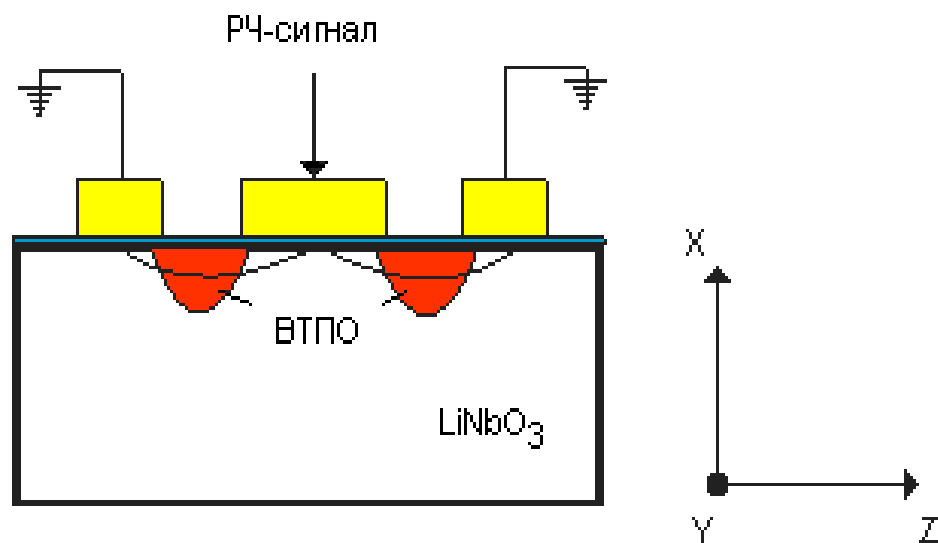
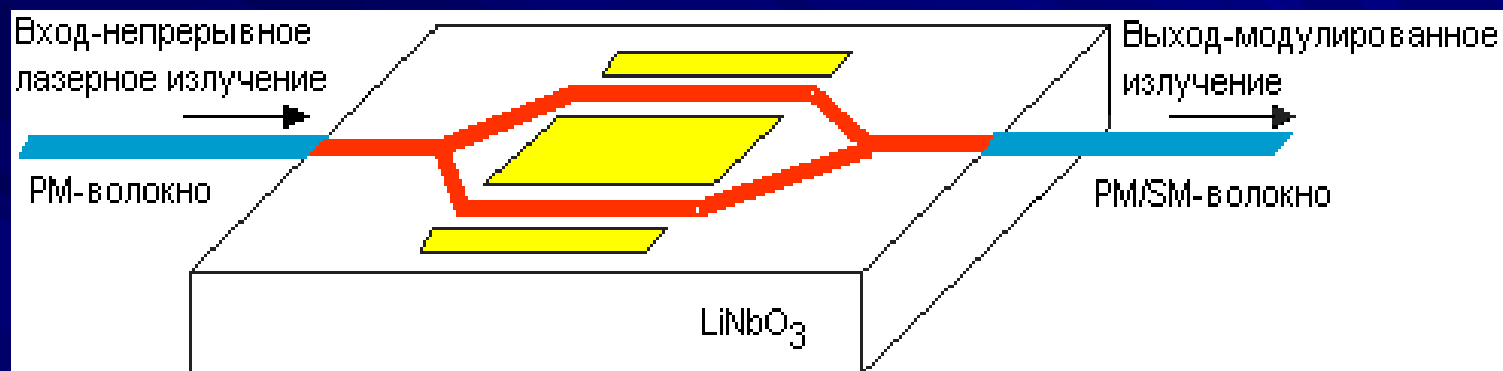
Эффект Келдыша-Франца

Модуляторы Маха-Цандера

+

Эффект Поккельса

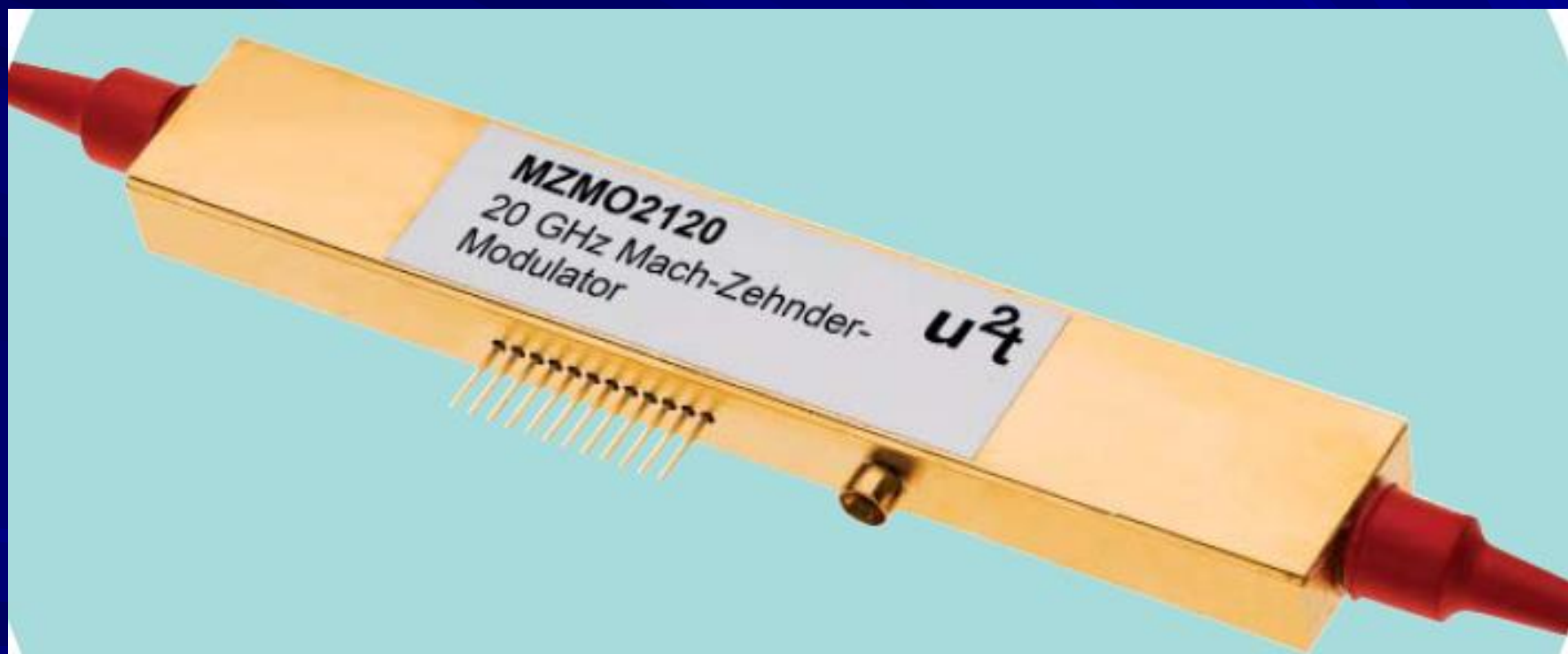
Модулятор Маха-Цандера (ММЦ)
(Mach - Zehnder modulator - MZM)
в планарном исполнении



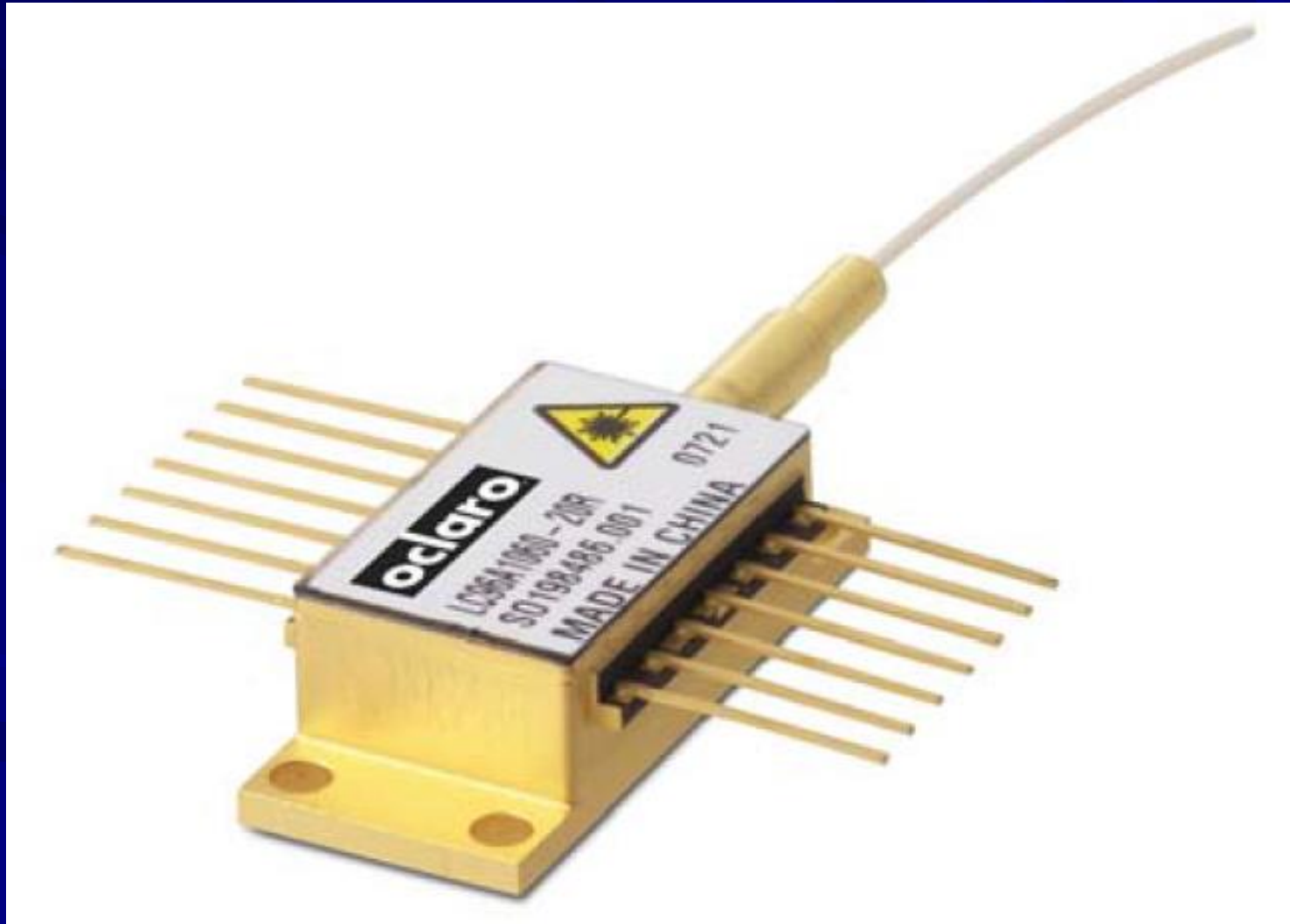
Модулятор Маха-Цандера (ММЦ)

(Mach - Zehnder modulator - MZM)

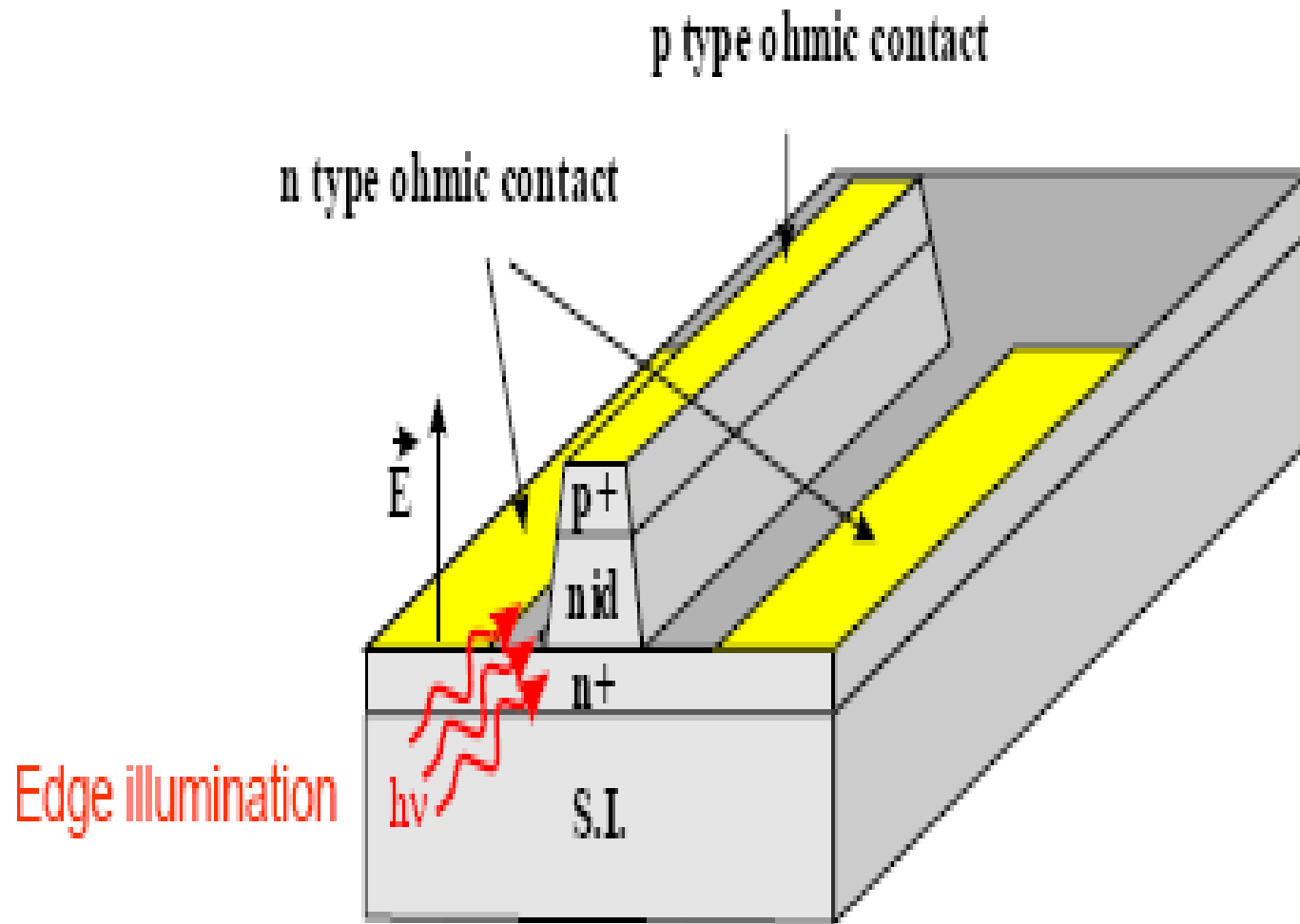
*в виде герметизированной гибридной интегральной схемы
(технология system-on-package)*



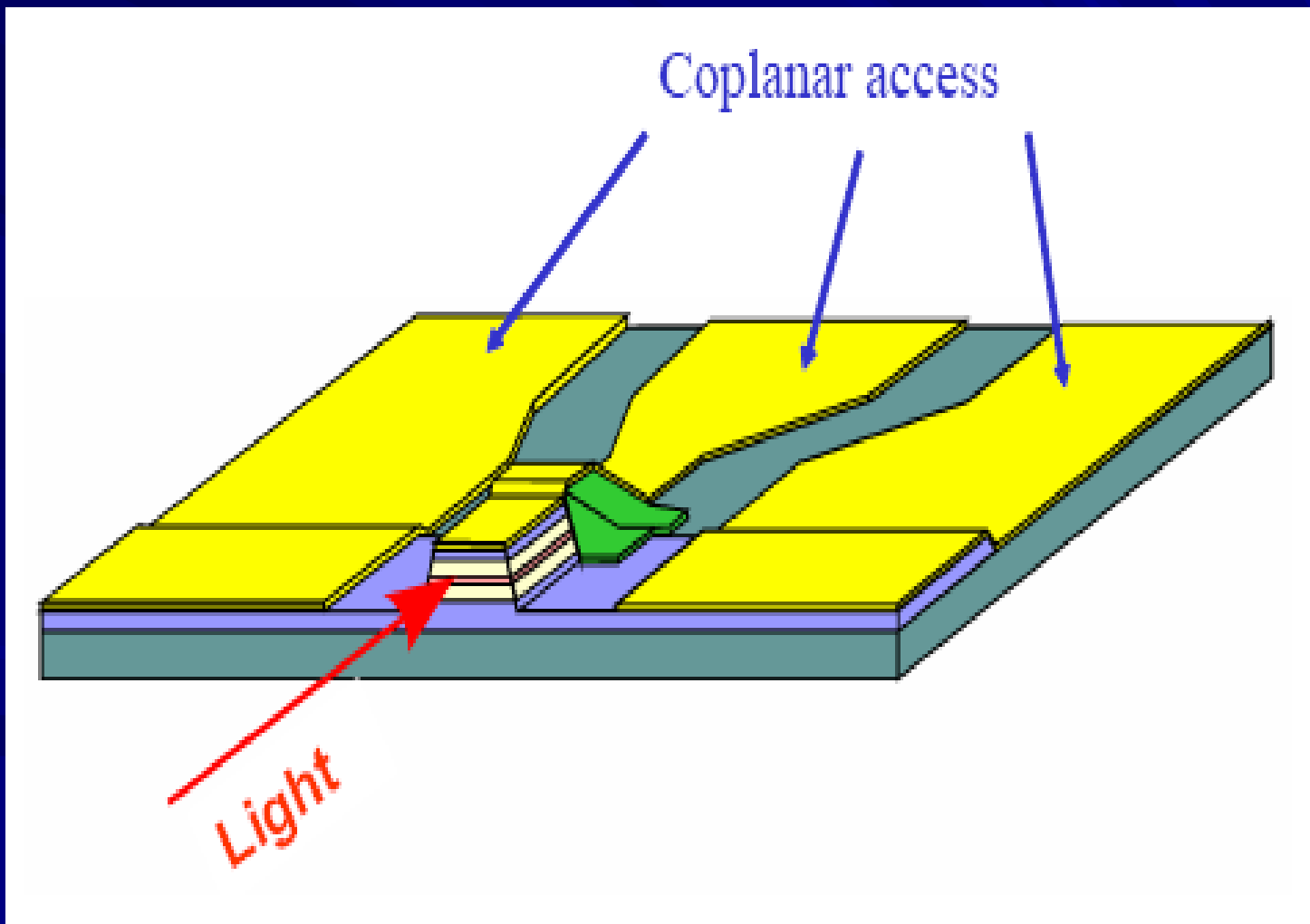
Гибридные интегральные схемы ИОС
в виде полупроводниковых лазеров
(технология system-on-package)



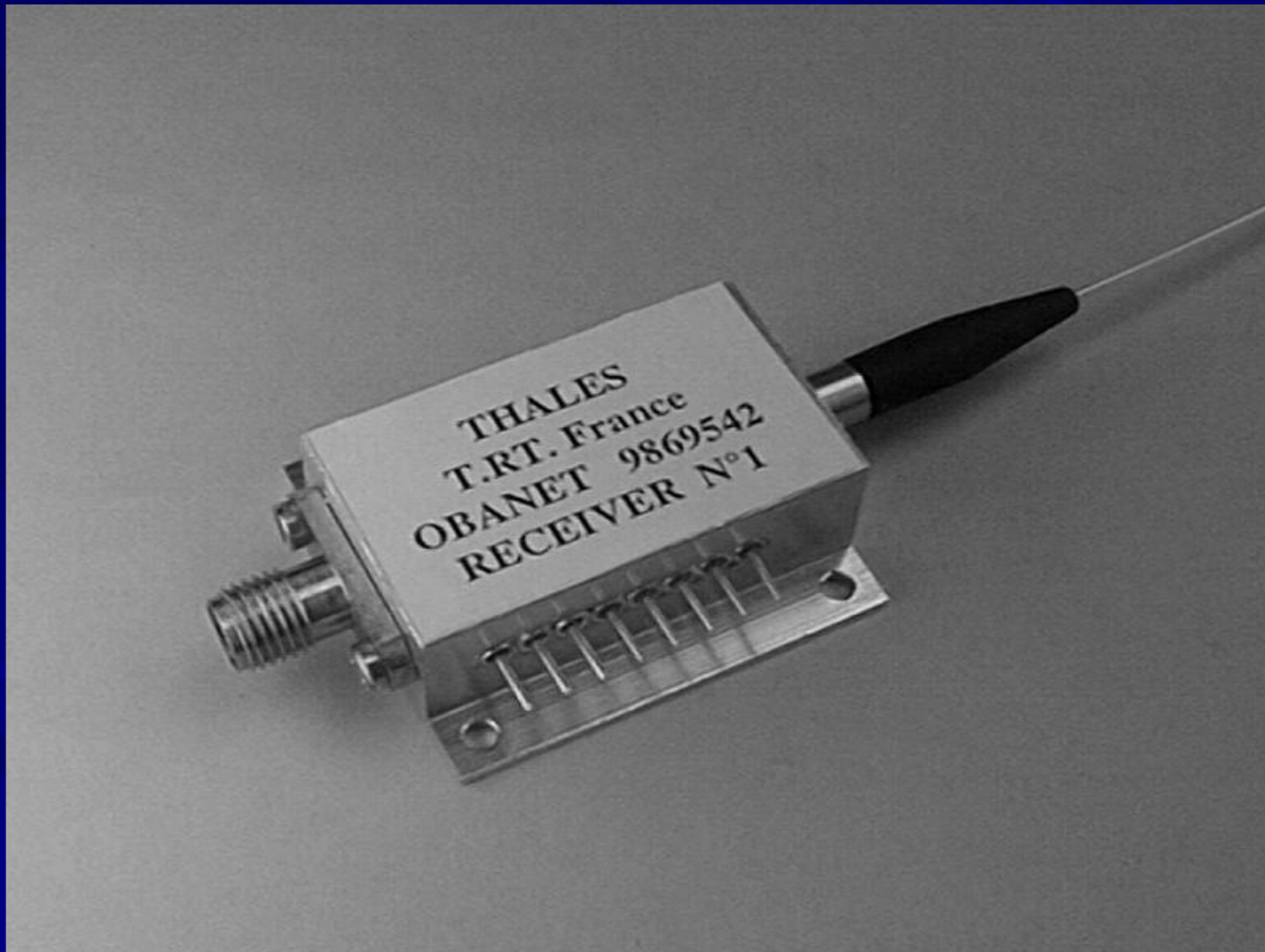
P-I-N - Фотодиод



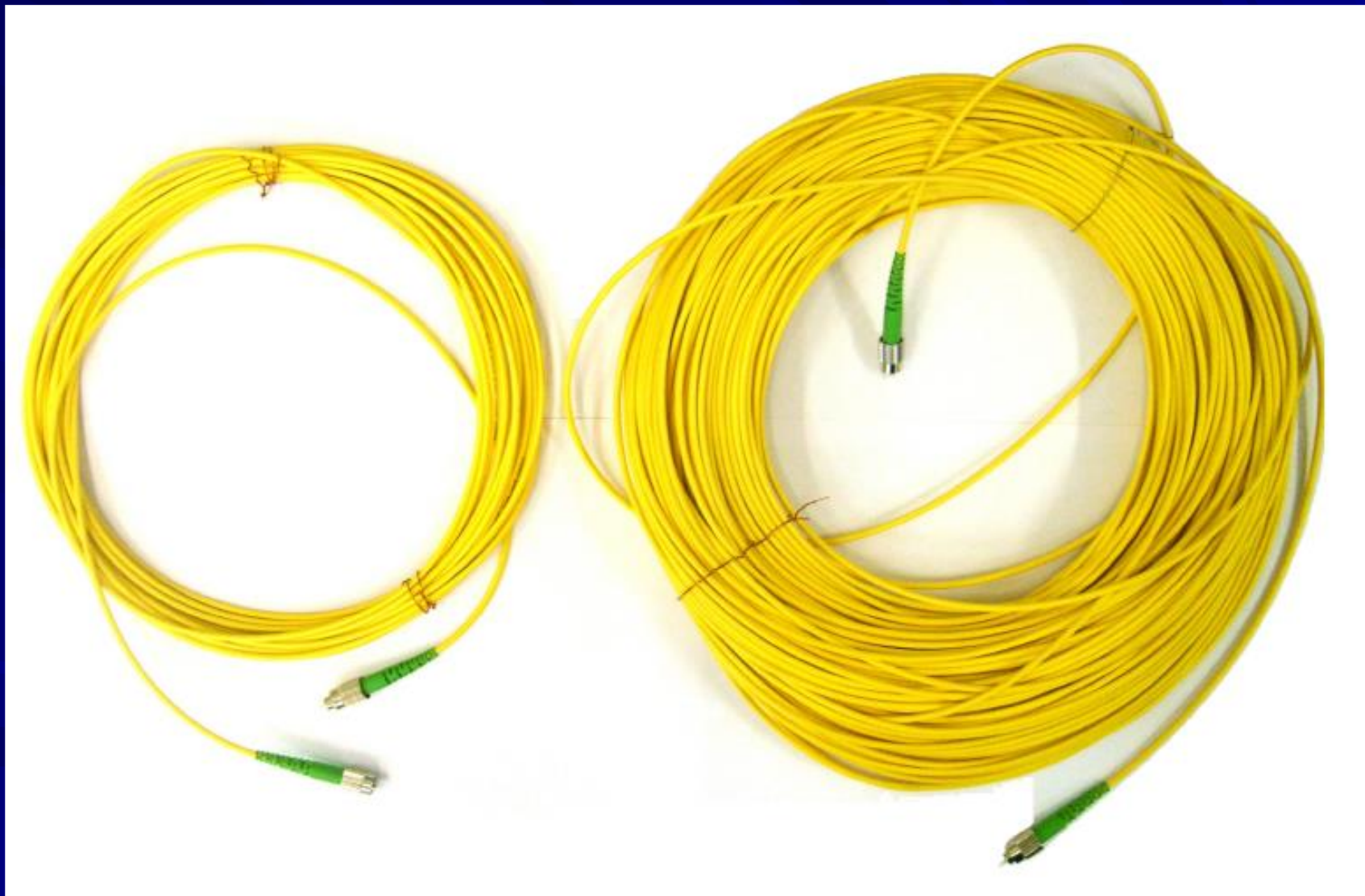
Фотодетектор в виде
планарной гибридной интегральной схемы
(технология *system-on-package*)



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



Опто-волоконный кабель



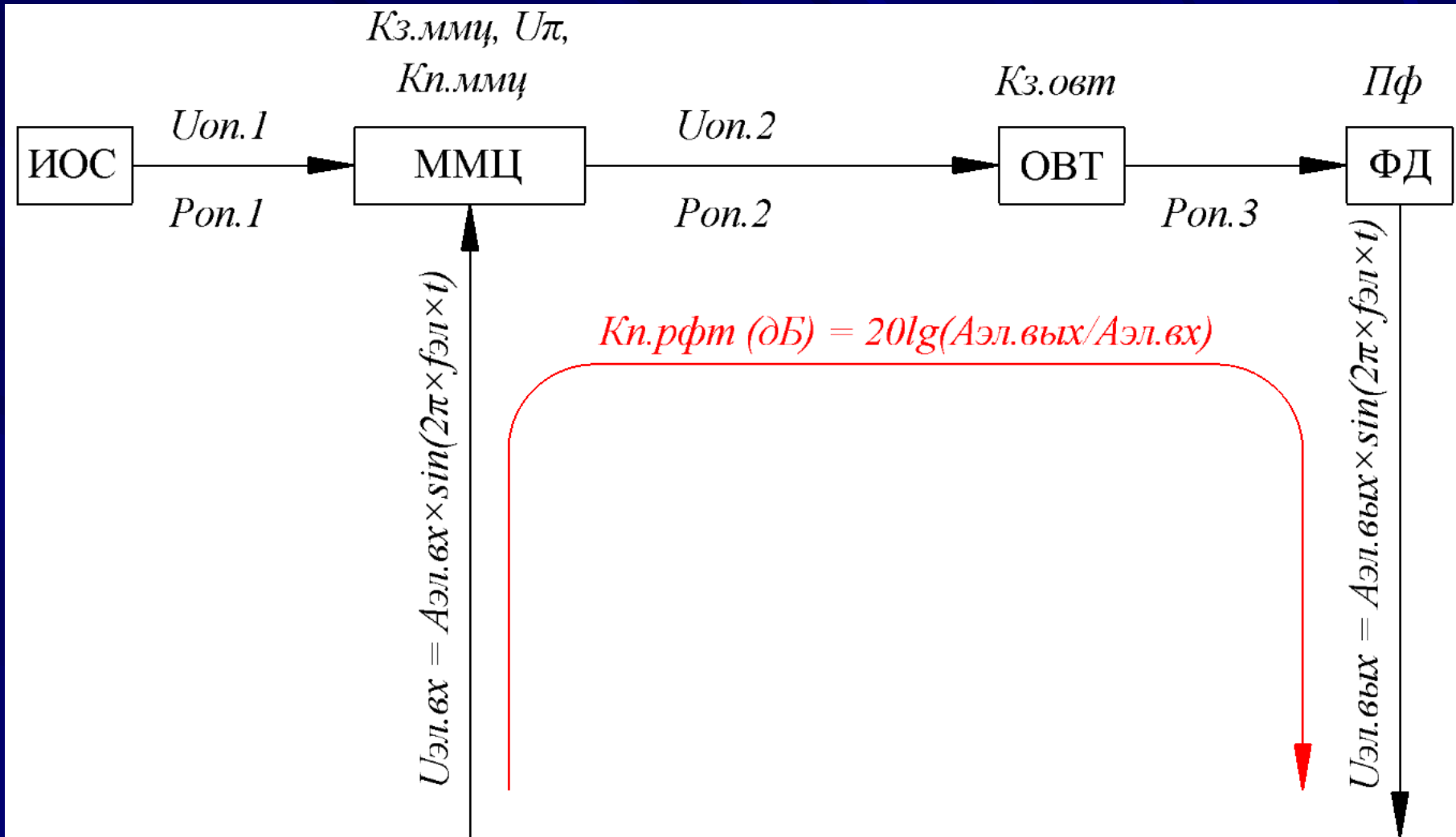


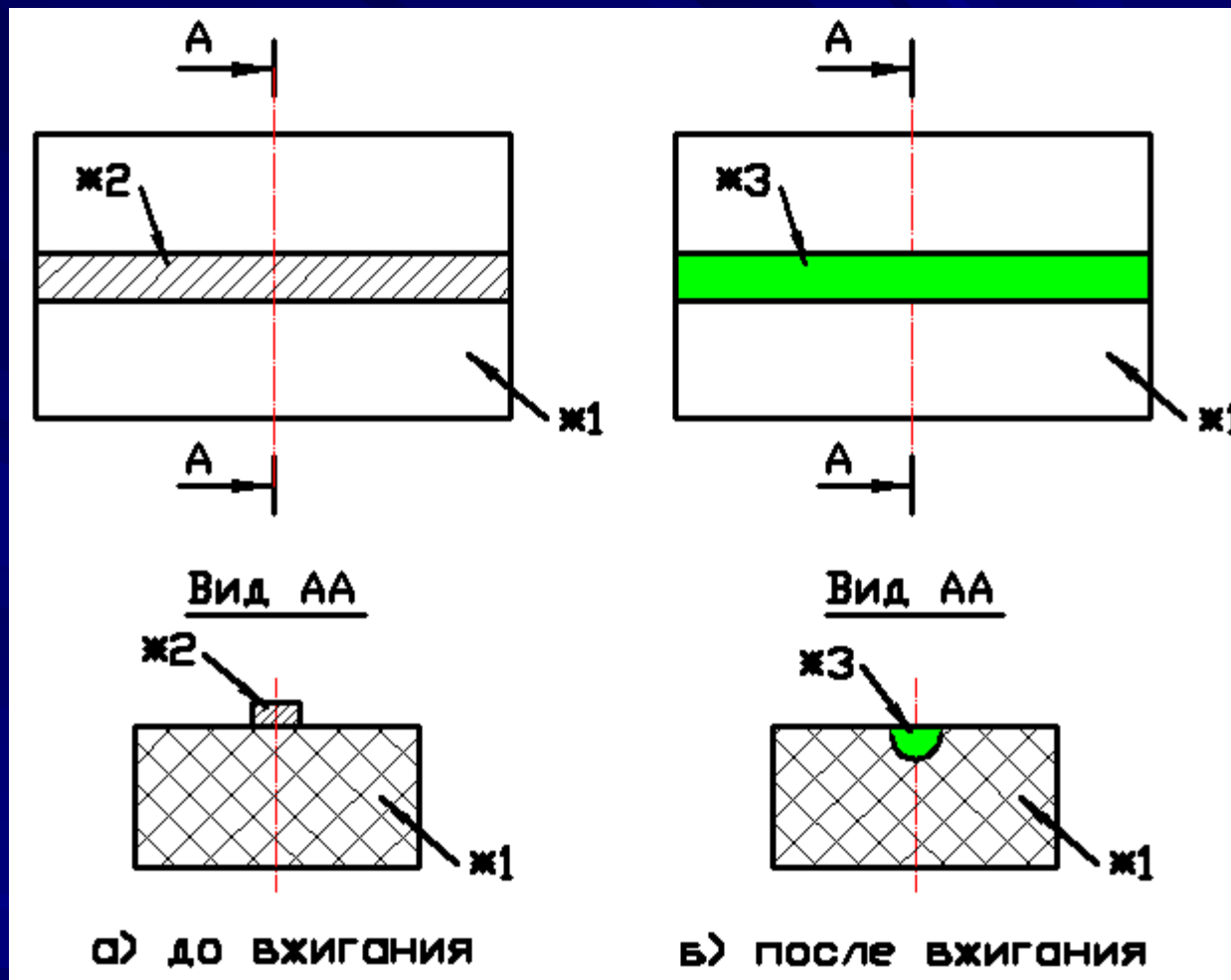
Схема аналогового РФТ СВЧ :

ИОС - источник оптического сигнала,

ММЦ - модулятор Маха-Цандера,

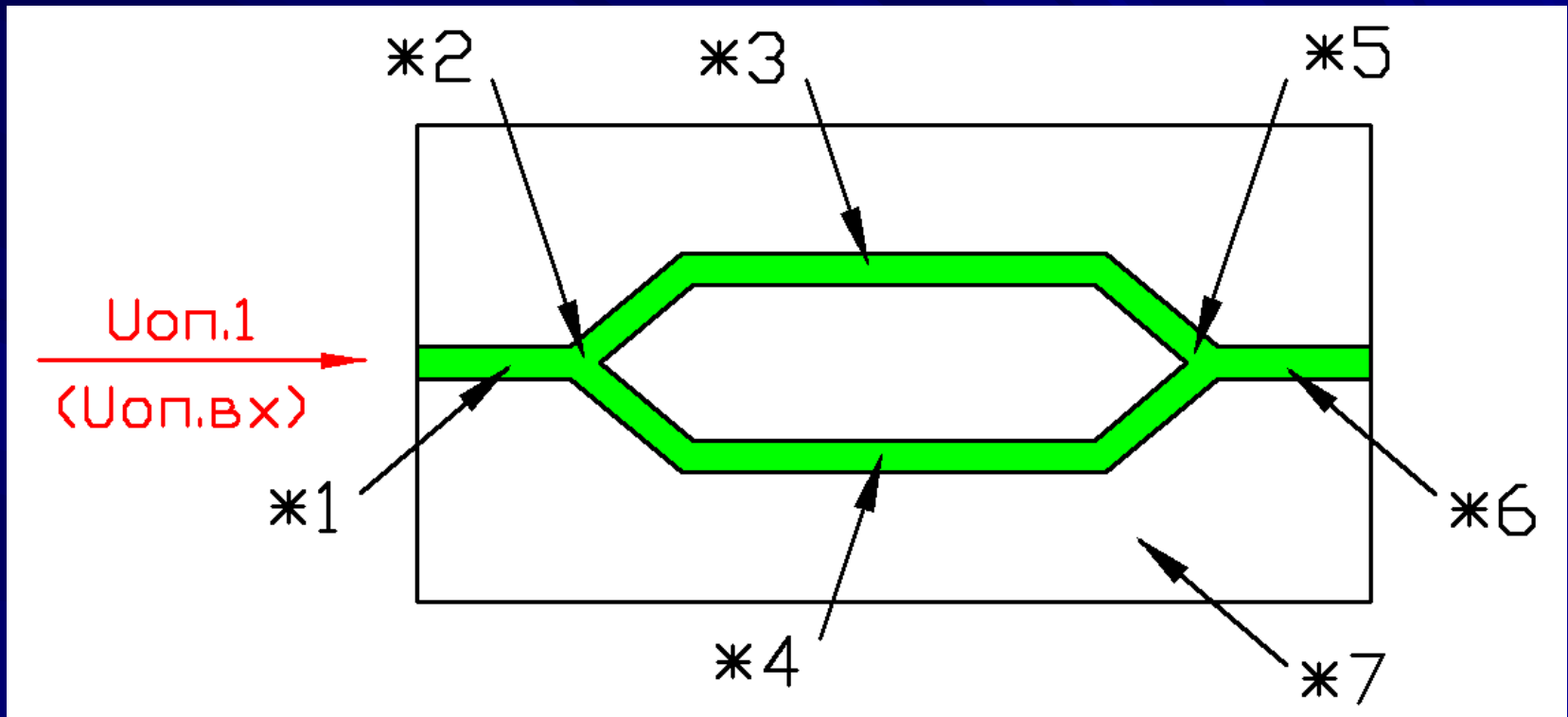
ОВТ - опто-волоконный тракт, ФД - фотодетектор

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*

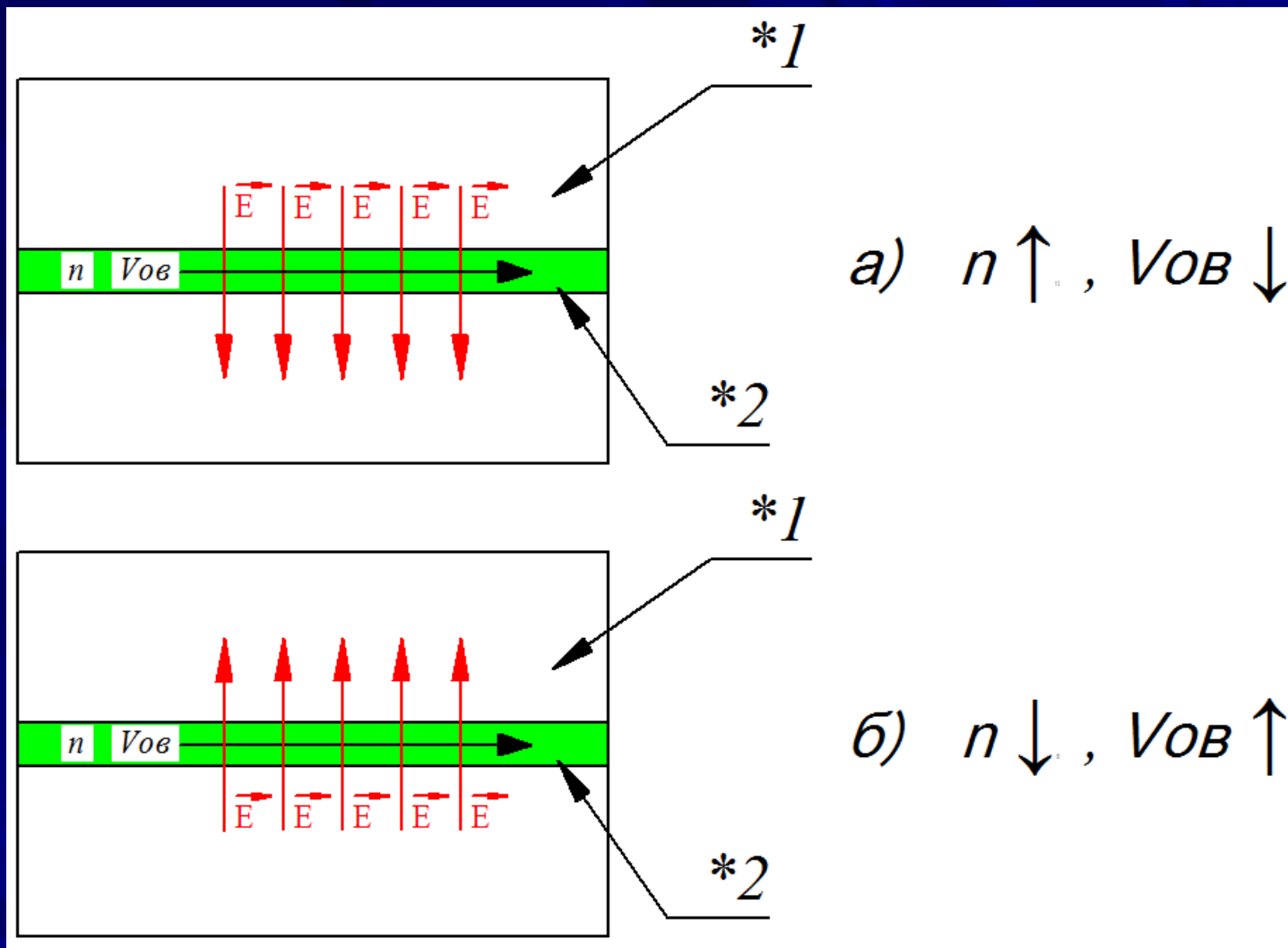
**2 - входной Y - разветвитель*

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

**5 - выходной Y-светвитель*

**6 - выходной световодный канал*

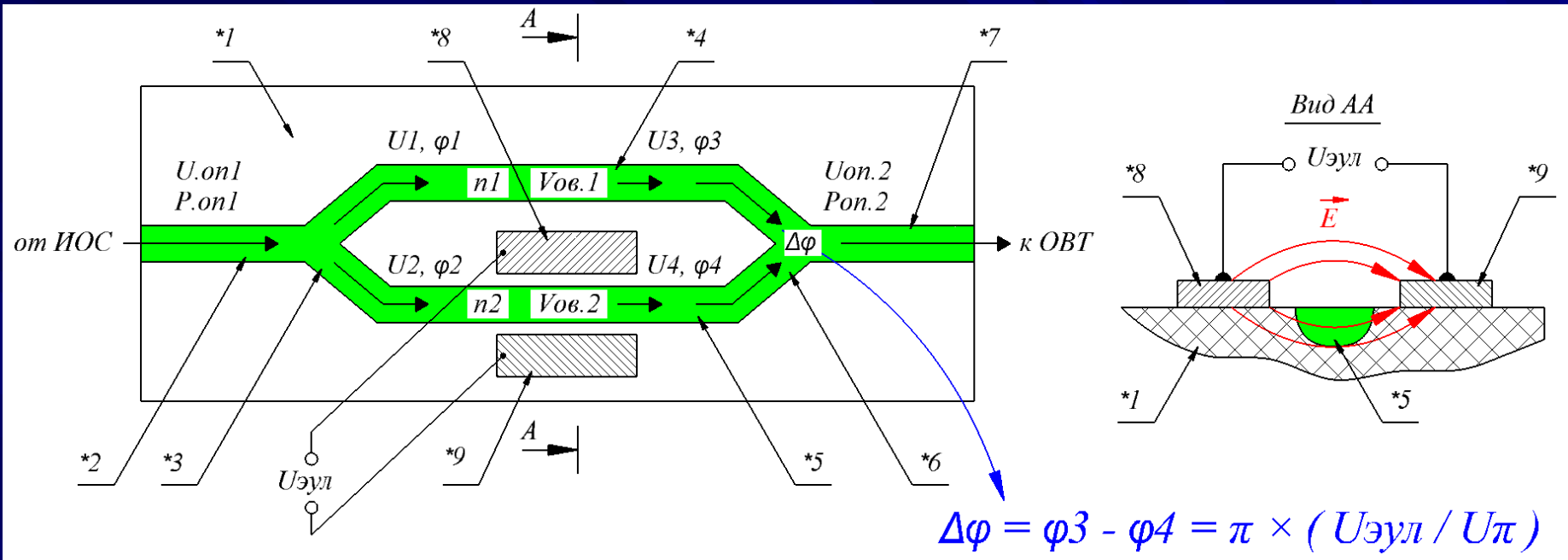
Эффект Погкельса



***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**

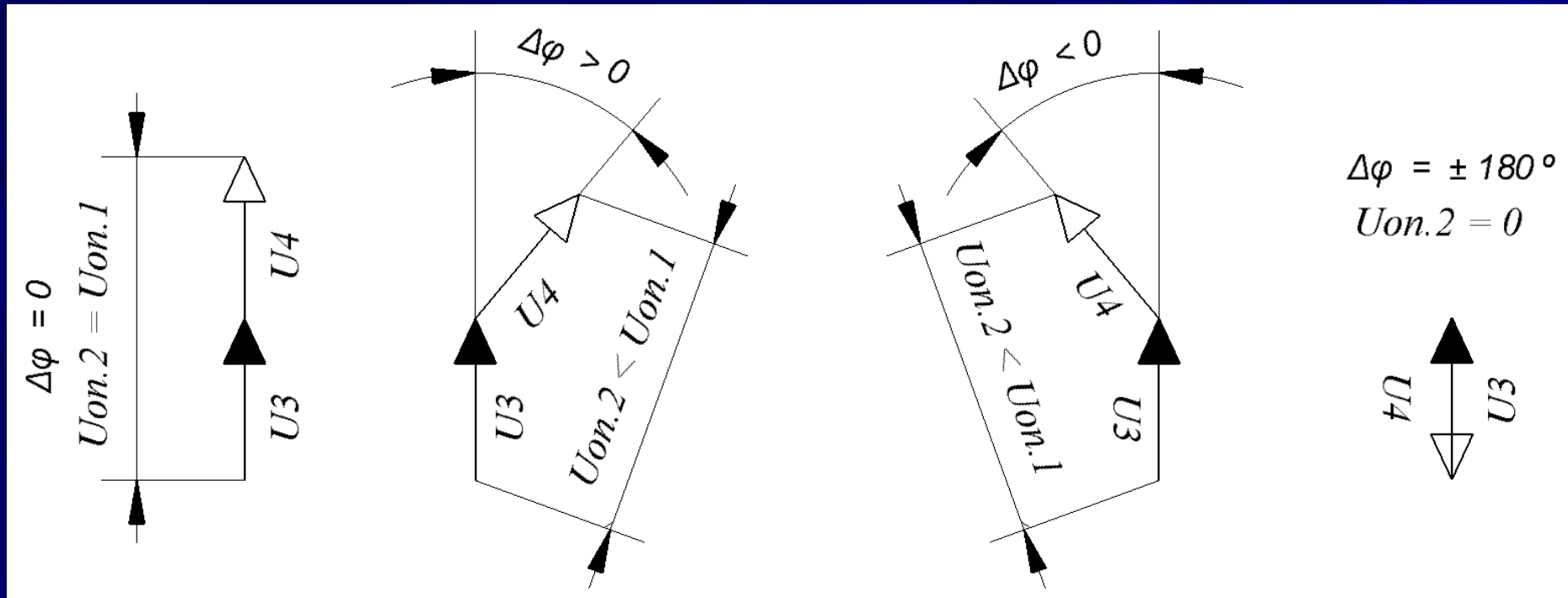
***7- выходной световодный канал**

***8,*9 - первый и второй электроды управляющей линии (ЭУЛ) 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



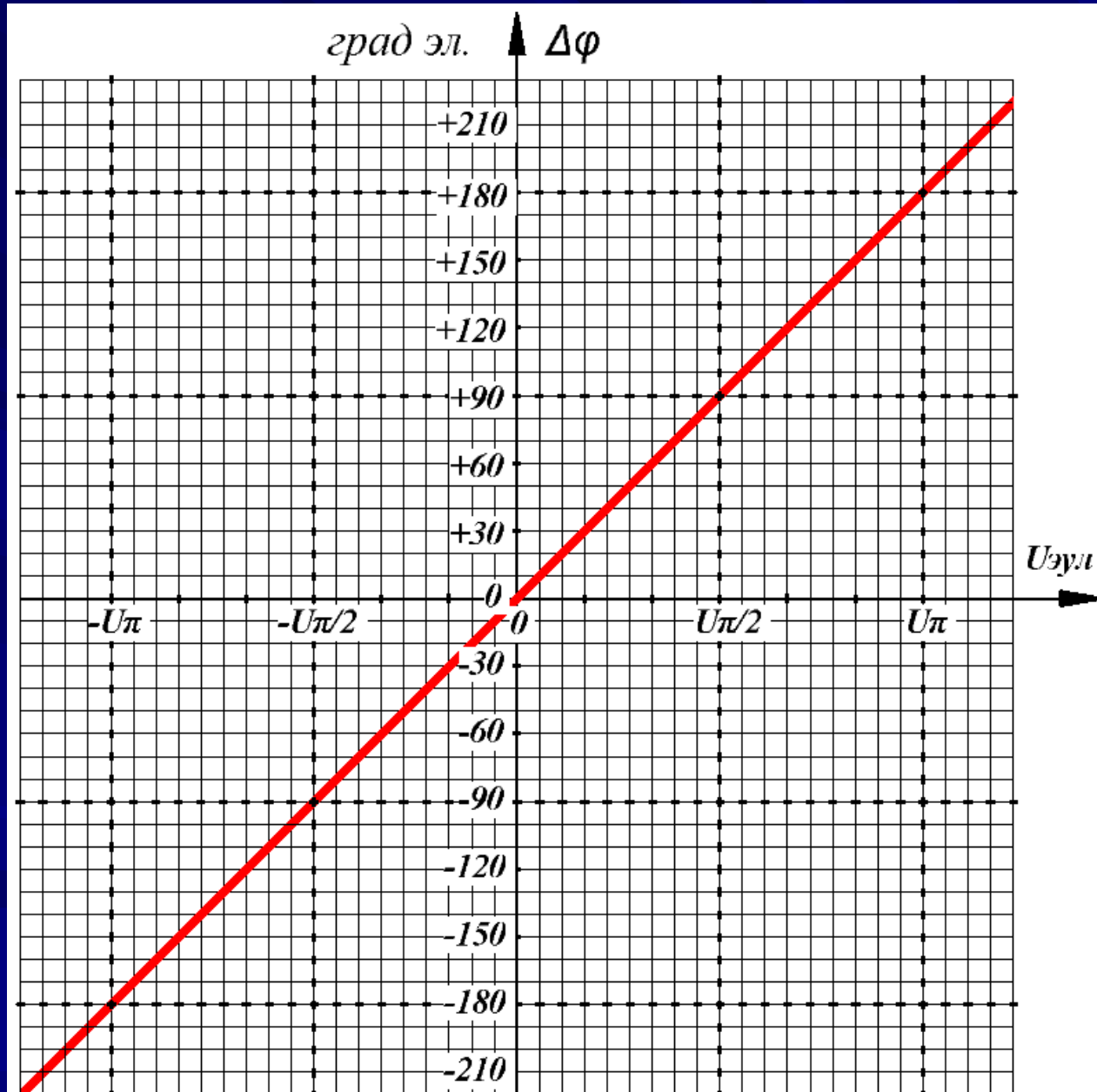
$U_{\text{эул}} = 0$

$0 < U_{\text{эул}} < U_{\pi}$

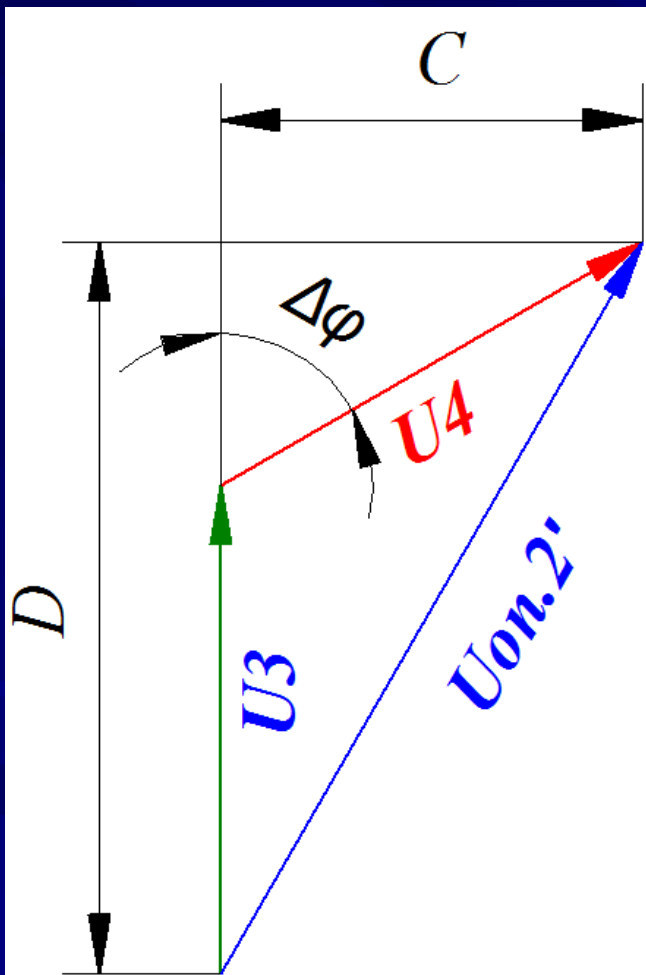
$-U_{\pi} < U_{\text{эул}} < 0$

$U_{\text{эул}} = \pm U_{\pi}$

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



Определение зависимости $U_{оп.2'}$ от $U_{эул}$
для случая отсутствия потерь в оптических трактах ММЦ
($K_{з.ммц} = 0$)



$$U_{оп.2'} = \sqrt{C^2 + D^2}$$

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

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

$$U_3 = U_4 = \frac{U_{оп.1}}{2}$$

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

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

Определение зависимости $K_{и.ммц}'$ и $K_{п.ммц}'$ (в размах) от

$U_{эул}$

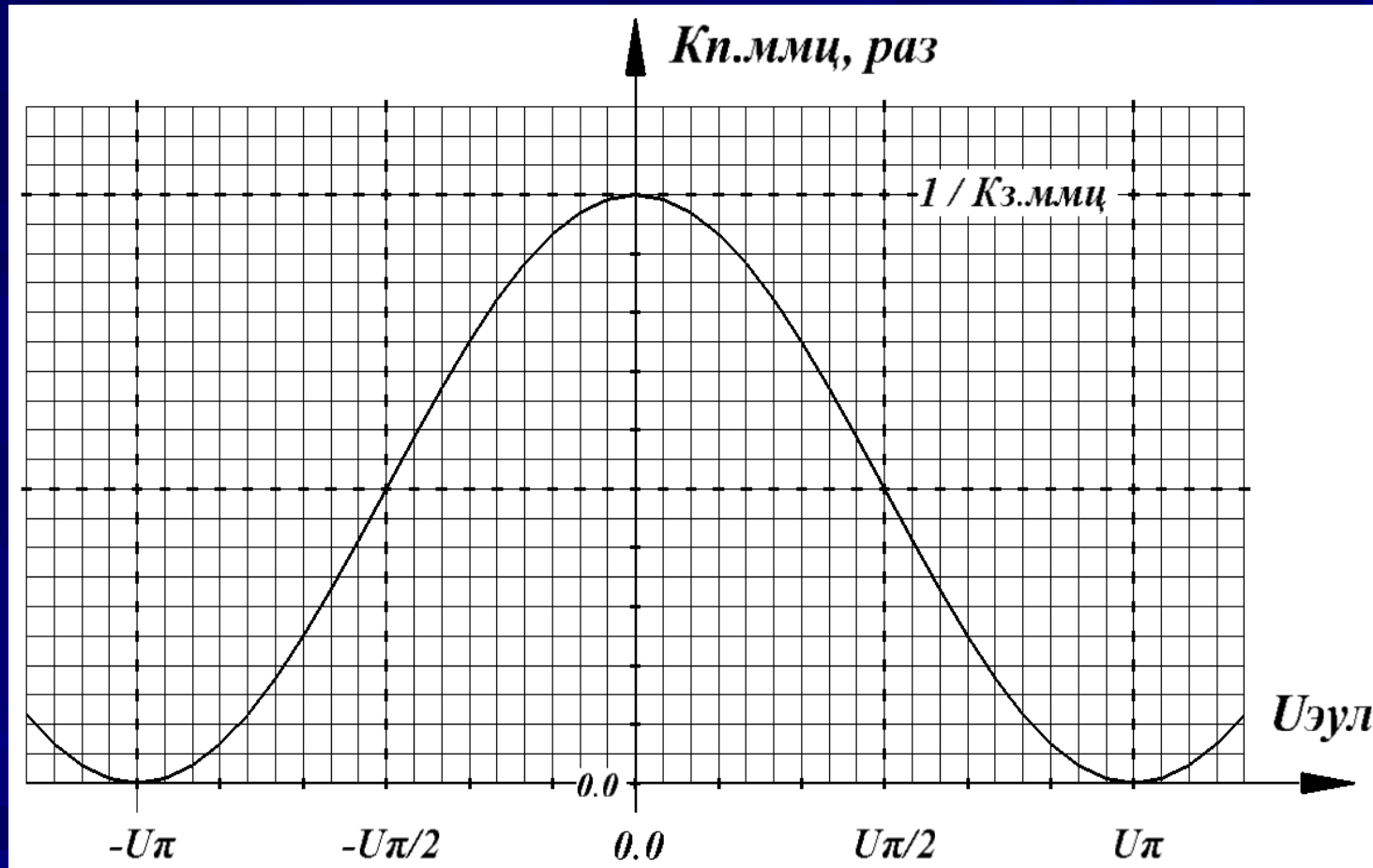
для случая отсутствия потерь в оптических трактах ММЦ

($K_{з.ммц} = 0$)

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

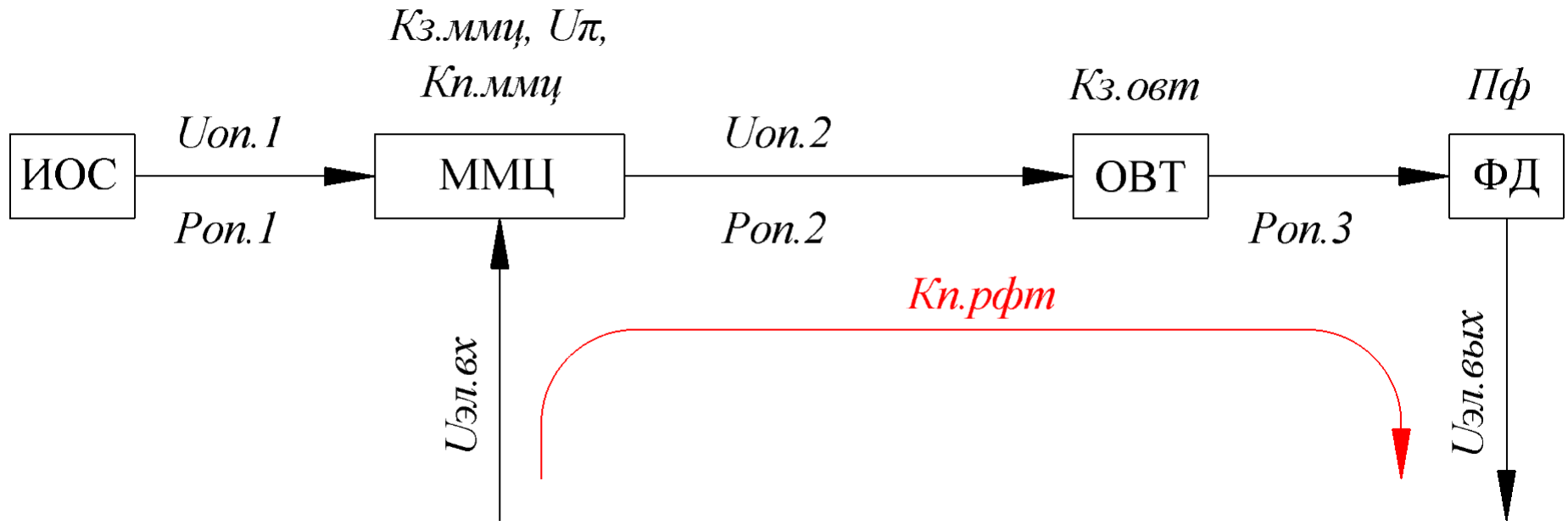
$$K_{п.ммц}' = (K_{и.ммц}')^2 = \frac{1 + \cos(180^\circ \times (U_{эул}/U_{\pi}))}{2}$$

Графическая зависимость $K_{п.ммц}$ (в раз) от $U_{эул}$ для случая реальных потерь в оптических трактах ММЦ ($K_{з.ммц} > 0$)



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

Схема аналогового РФТ СВЧ



$$P_{оп.2} = P_{оп.1} \times K_{п.мми} = P_{оп.1} \times \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{эул}}{U_{\pi}}\right)}{2 \times K_{з.мми}}$$

$$U_{эул} = U_{эл.вх} = U_{\pi} \times \sin\left(2\pi \times \left(1/T_{эл}\right) \times t\right)$$

Временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом $T_{эл} = 1/f_{эл}$ и амплитудой $A_{эл.вх} = U_{\pi}$.

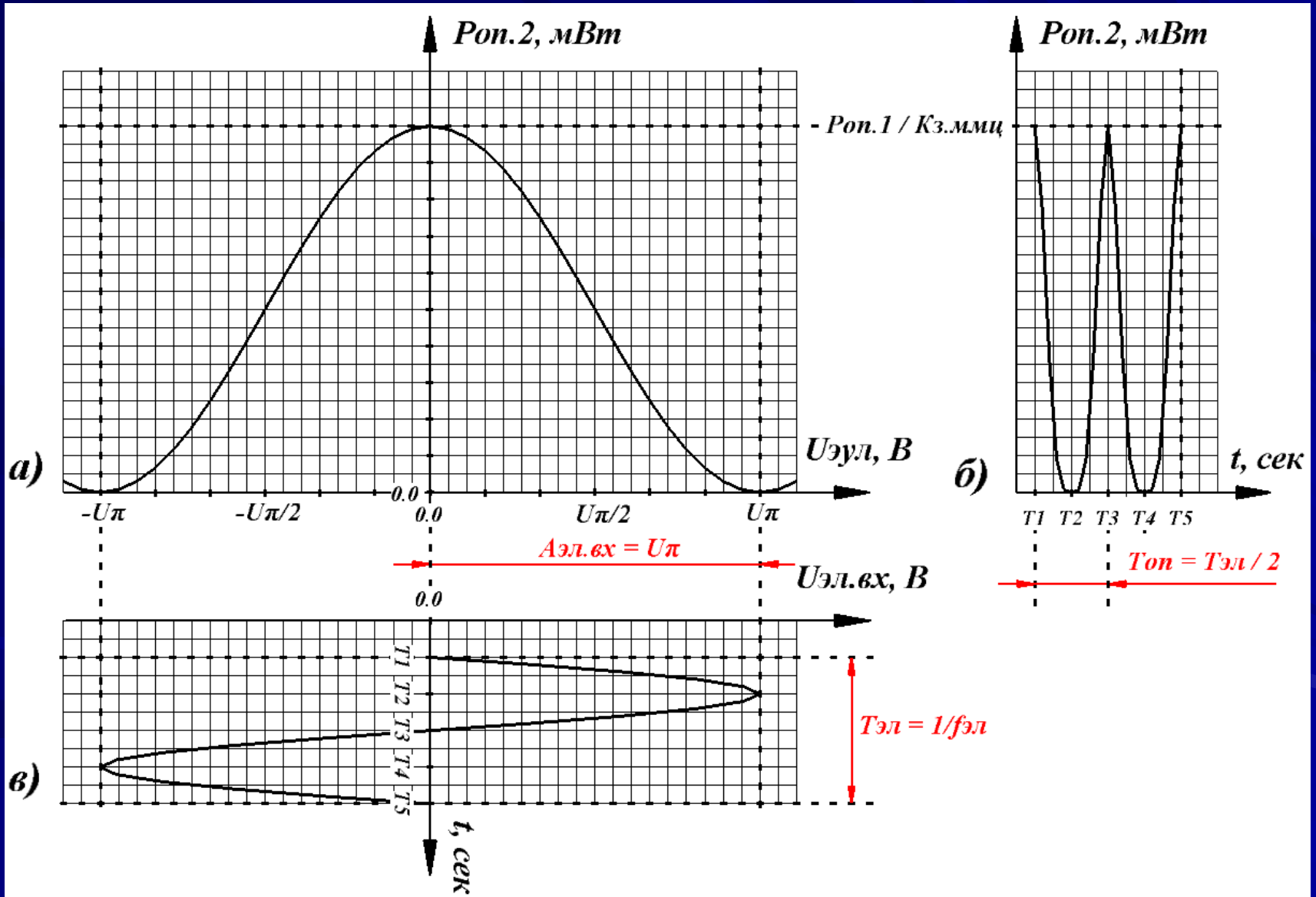
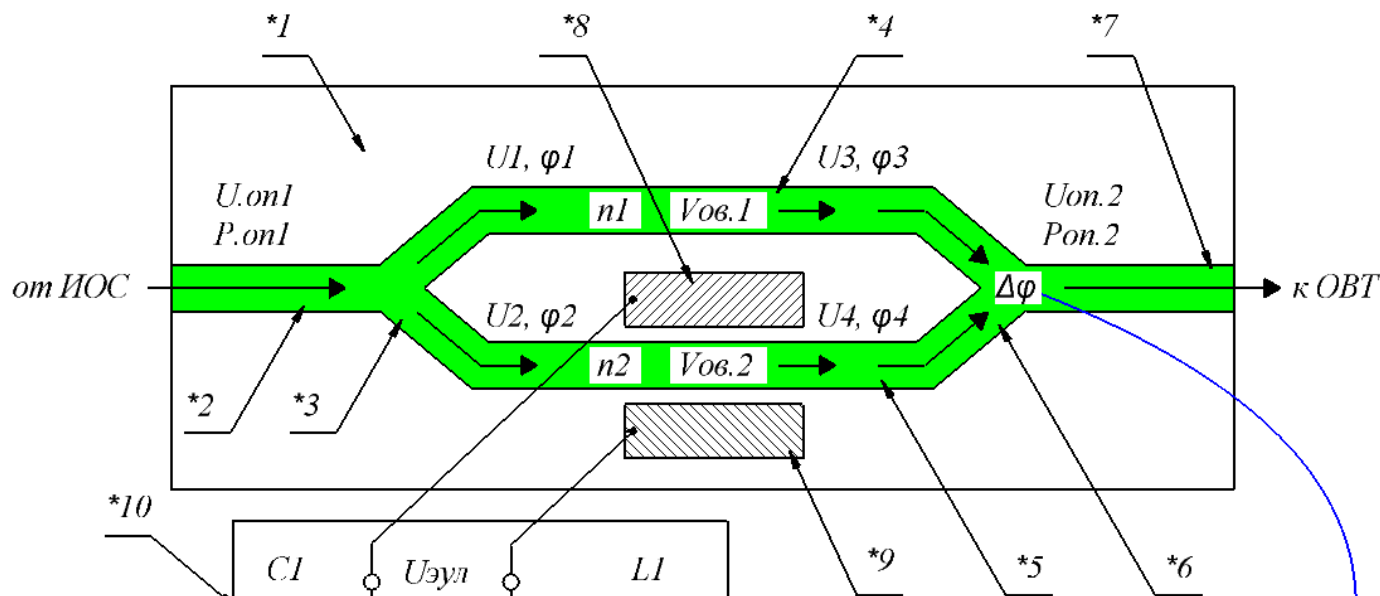


Схема подачи напряжения смещения ($U_{см}$) на ЭУЛ ММЦ через внешний узел подачи напряжения смещения (УПНС)



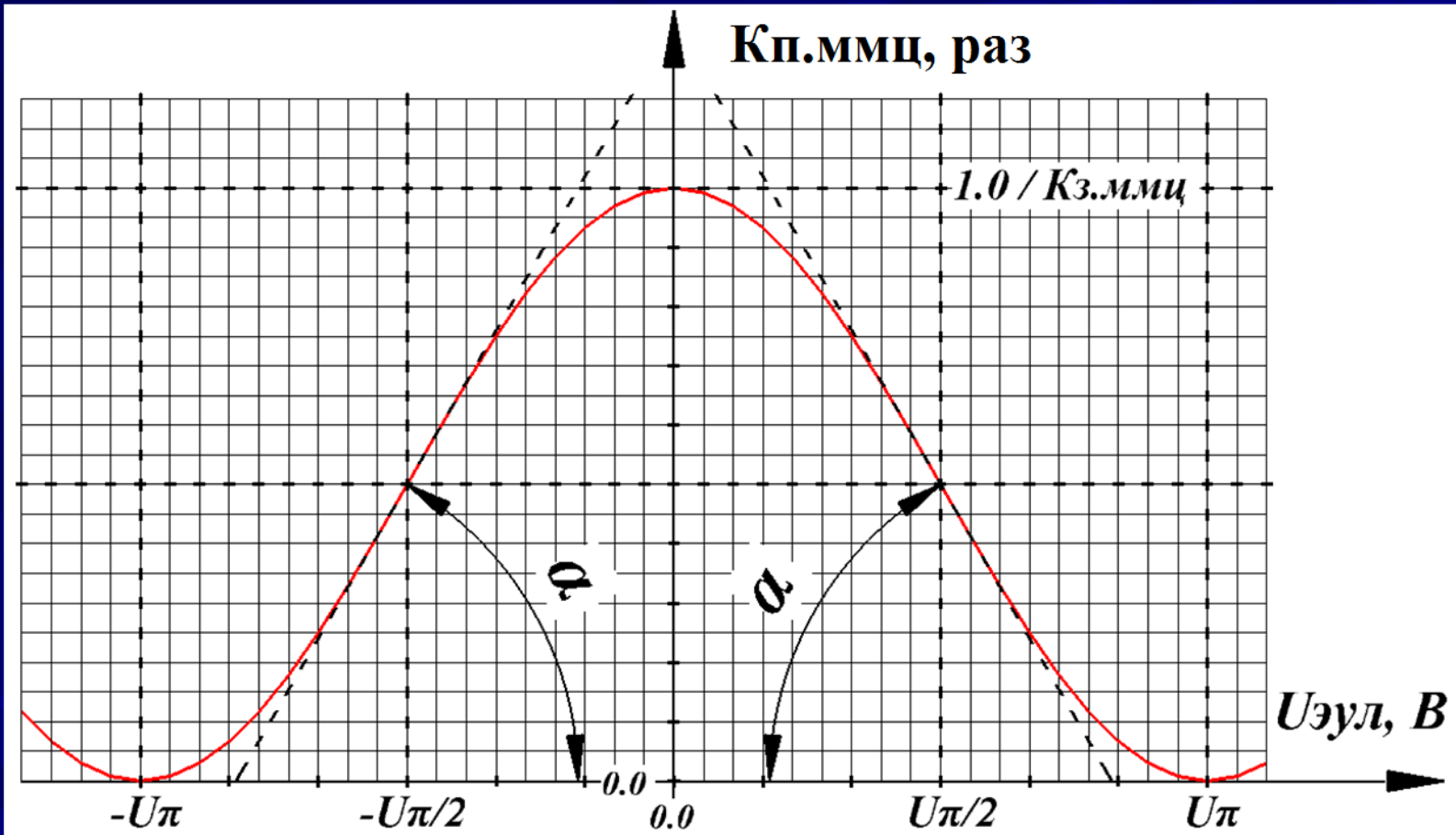
$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_4 = \Delta\varphi_{см} \pm \Delta\varphi_{эл.вх} =$$

$$= (\pi \times (U_{см} / U_{\pi})) \pm (\pi \times (U_{эл.вх} / U_{\pi}))$$

$$U_{эл} = U_{см} + U_{эл.вх}$$

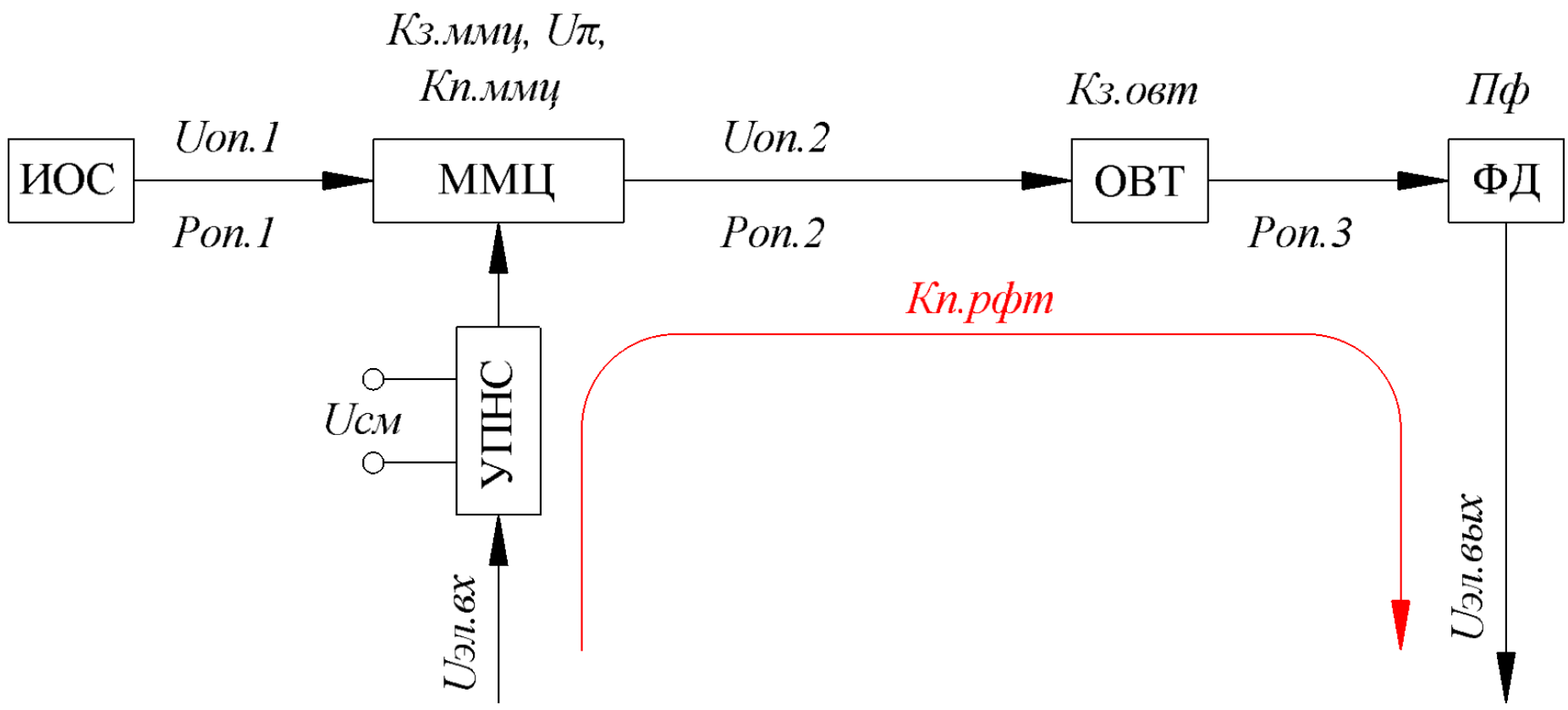
- *1 - пластина из сегнетоэлектрика, *2 - входной световодный канал, *3 - входной Y-разветвитель,
*4,*5 - первый и второй параллельные световодные каналы, *6 - выходной Y-светвитель, *7 - выходной
световодный канал, *8,*9 - первый и второй электроды управляющей линии СВЧ, *10 - внешний УПНС

Графическая зависимость $K_{п.ммц}$ от $U_{эул}$
для случая реальных потерь ($K_{з.ммц} > 0$)
в оптических трактах ММЦ



$$K_{п.ммц} = \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{эул}(V)}{U\pi(V)}\right)}{2 \times K_{з.ммц}(\text{раз})}$$

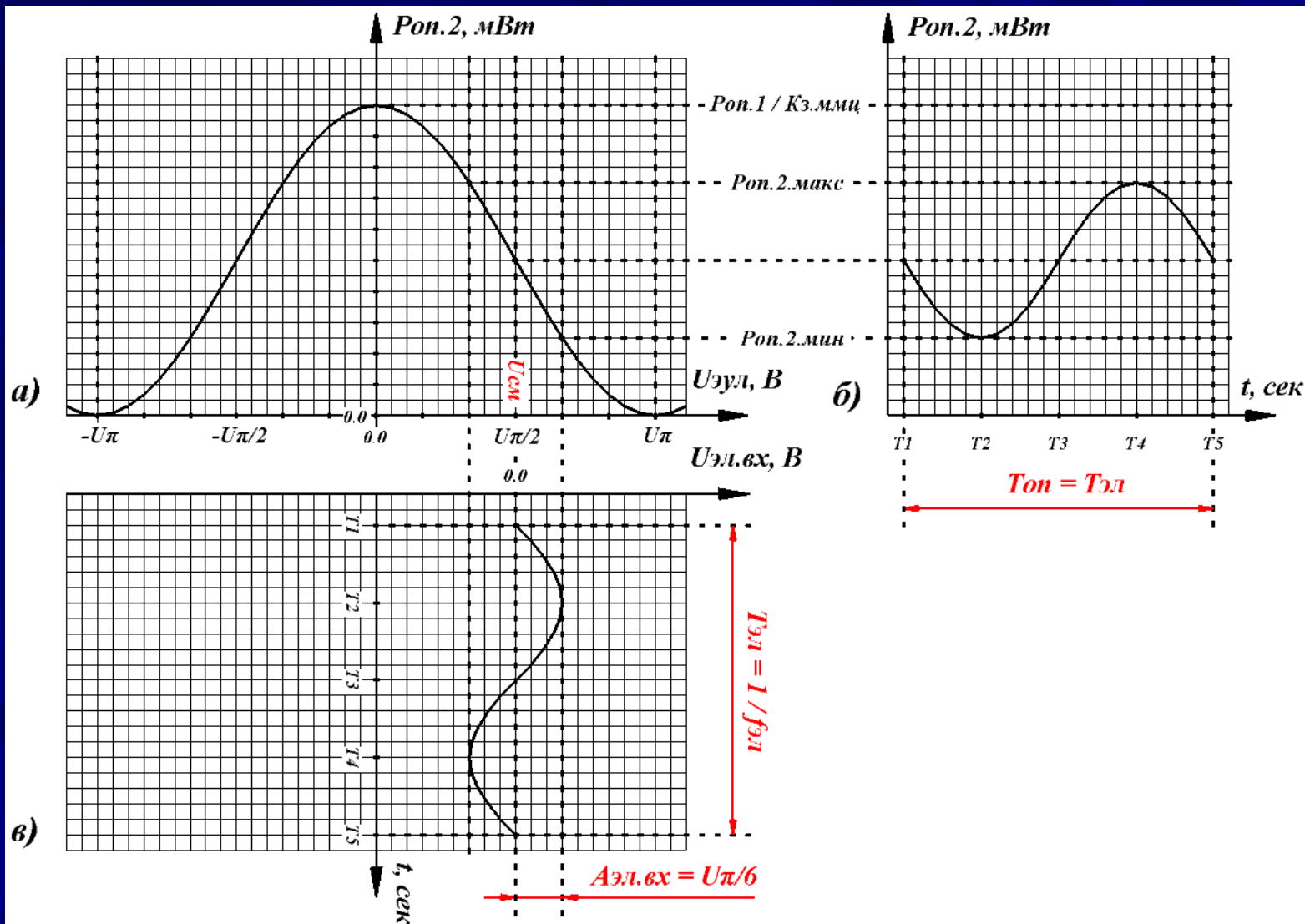
Схема аналогового РФТ СВЧ



$$P_{оп.2} = P_{оп.1} \times K_{п.ммц} = P_{оп.1} \times \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{эул}}{U_{\pi}}\right)}{2 \times K_{з.ммц}}$$

$$U_{эул} = U_{см} + U_{эл.вх} = \pm U_{\pi}/2 + (U_{\pi}/6) \times \sin(2\pi \times (1/T_{эл}) \times t)$$

Временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом $T_{эл} = 1/f_{эл}$ и амплитудой $A_{эл.вх} = U_{\pi}/6$ и напряжения смещения $U_{см} = U_{\pi}/2$



Формулы для вычисления зависимости $P_{оп.2}$

$$\begin{aligned} P_{оп.2} &= P_{оп.1} \times \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{эул}}{U_{\pi}}\right)}{2 \times K_{з.ммц}} = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times \left(1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{эул}}{U_{\pi}}\right)\right) = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times \left(1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{см} + U_{эл.вх}}{U_{\pi}}\right)\right) = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times \left(1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{\frac{U_{\pi}}{2} + \frac{U_{\pi}}{6} \times \sin\left(2\pi \times \left(\frac{1}{T_{эл}}\right) \times t\right)}{U_{\pi}}\right)\right) = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times \left(1 + \cos\left(180^\circ \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \times \sin\left(2\pi \times \left(\frac{1}{T_{эл}}\right) \times t\right)\right)\right) = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times \left(1 + \cos\left(90^\circ + 30^\circ \times \sin\left(2\pi \times \left(\frac{1}{T_{эл}}\right) \times t\right)\right)\right) \end{aligned}$$

**Формулы для вычисления
«экстремальных» значений $P_{оп.2}$**

Общая формула

$$P_{оп.2} = \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(90^\circ + 30^\circ \times \sin(2\pi \times (\frac{1}{T_{эл}}) \times t)))$$

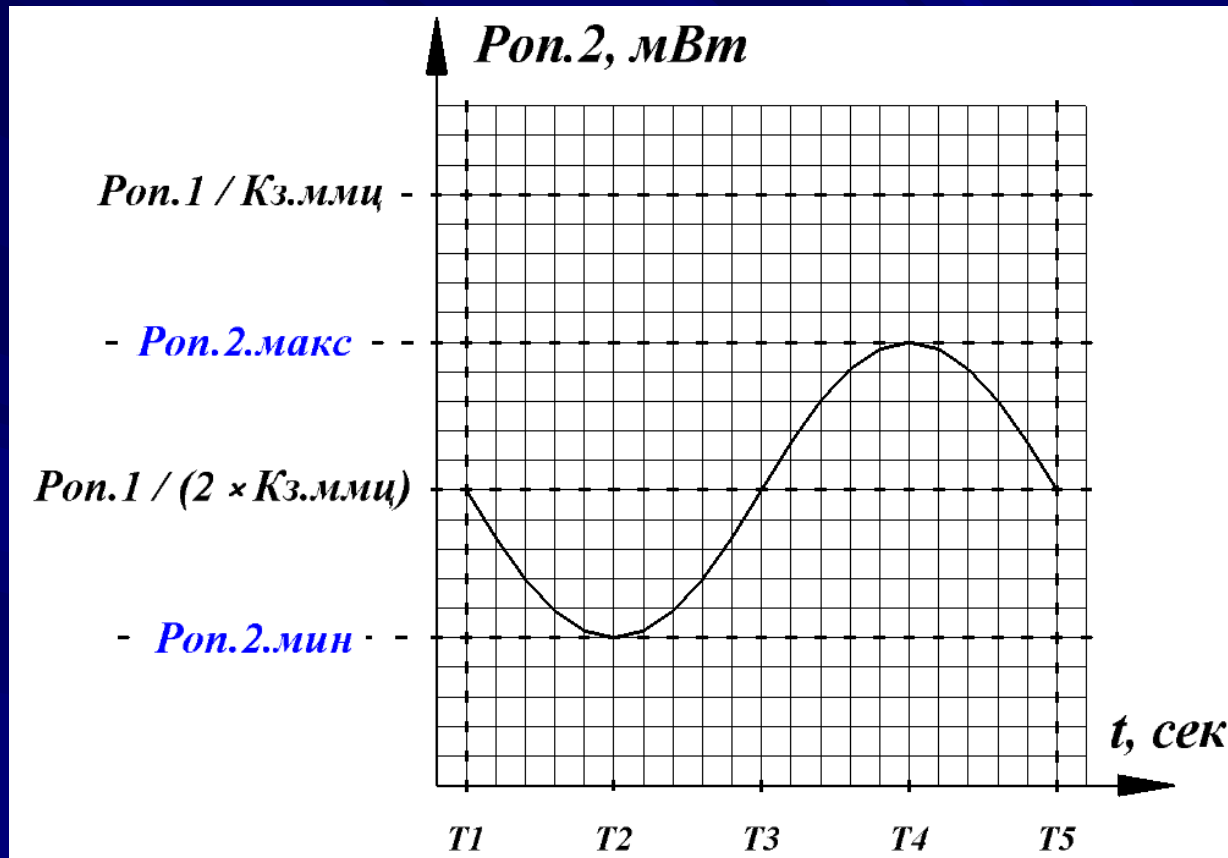
Вид формулы для случая $\sin(2\pi \times (1/T_{эл}) \times t) = (-1)$

$$\begin{aligned} P_{оп.2} &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(90^\circ - 30^\circ)) = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(60^\circ)) \end{aligned}$$

Вид формулы для случая $\sin(2\pi \times (1/T_{эл}) \times t) = (+1)$

$$\begin{aligned} P_{оп.2} &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(90^\circ + 30^\circ)) = \\ &= \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(120^\circ)) \end{aligned}$$

Формулы для вычисления максимального и минимального значений $P_{оп.2}$ (слайды №38, №39, №40)



$$P_{оп.2.макс} = \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(60^\circ))$$

$$P_{оп.2.мин} = \frac{P_{оп.1}}{2 \times K_{з.ммц}} \times (1 + \cos(120^\circ))$$

Схема аналогового РФТ СВЧ

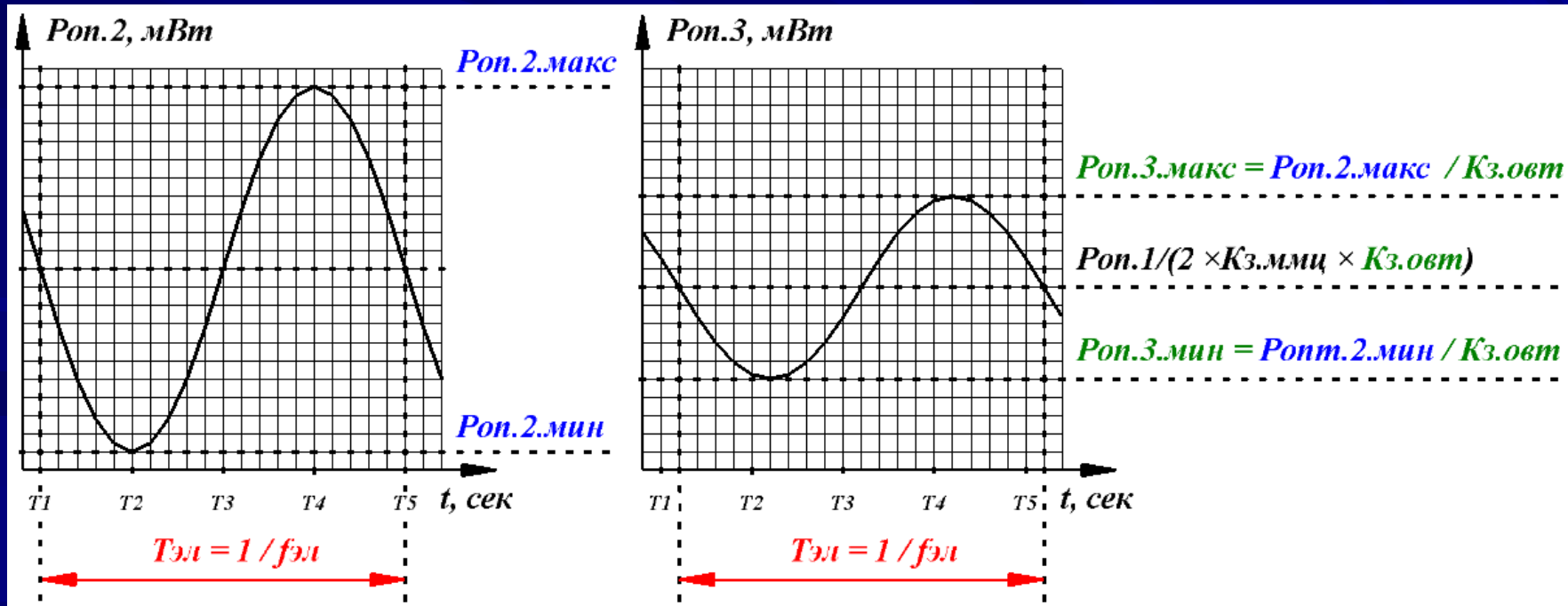
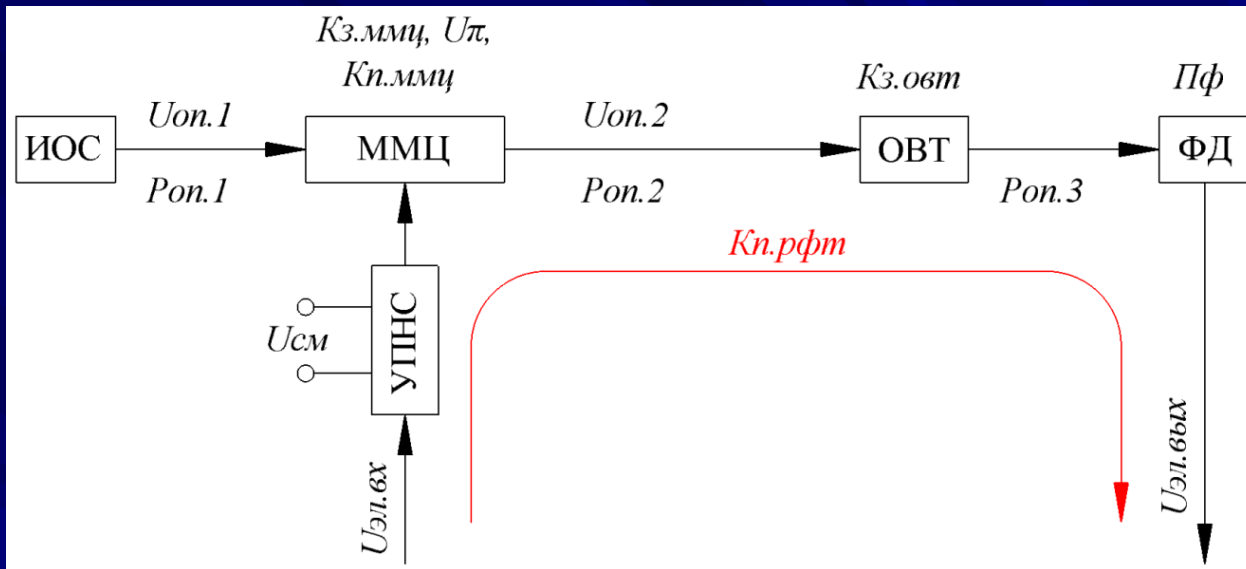


Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ
(модель XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics, www.u2t.com)

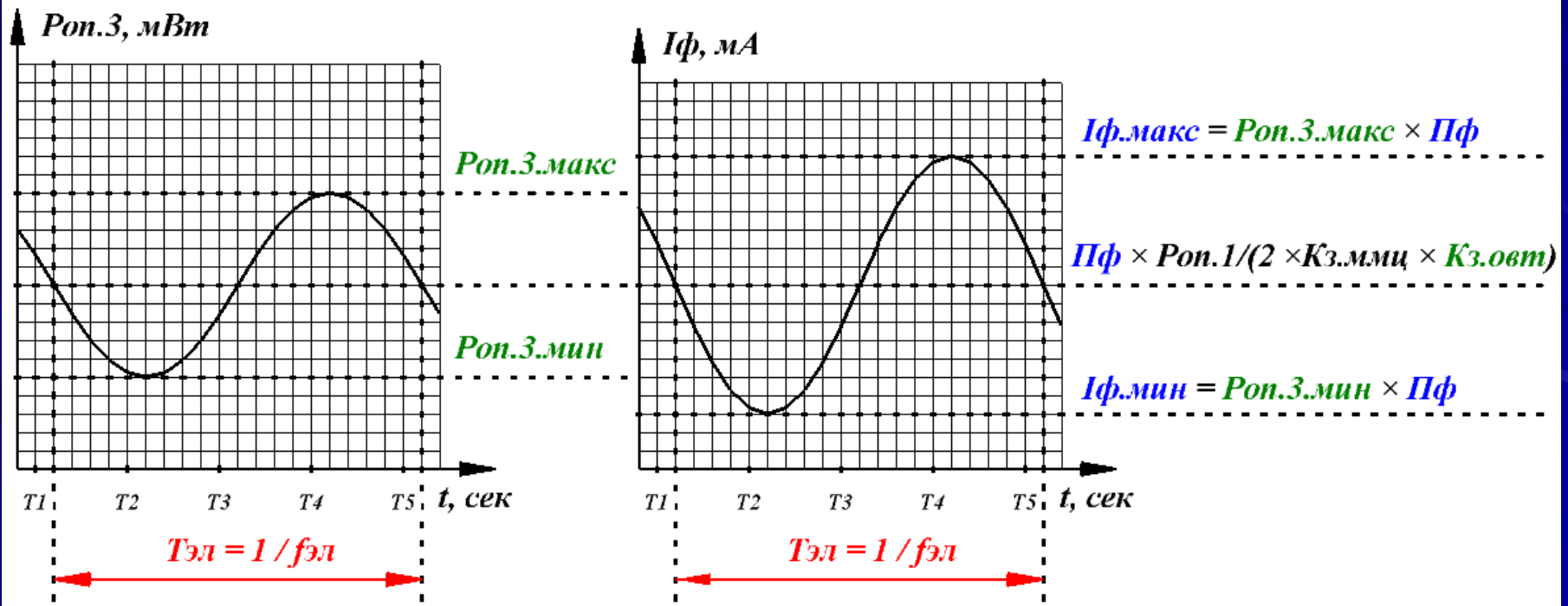
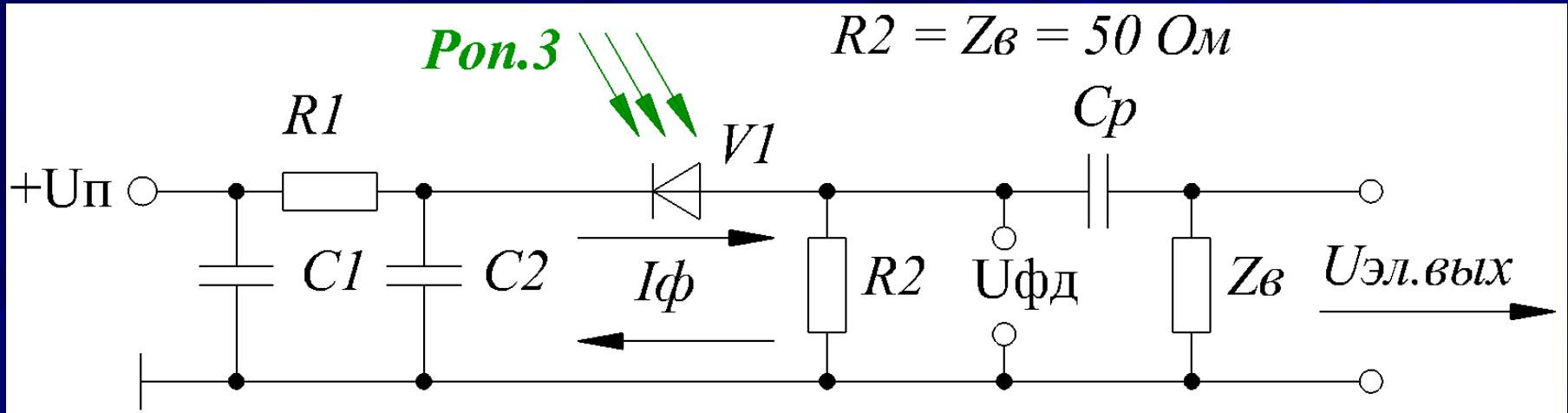


Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ
(модель XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics, www.u2t.com)

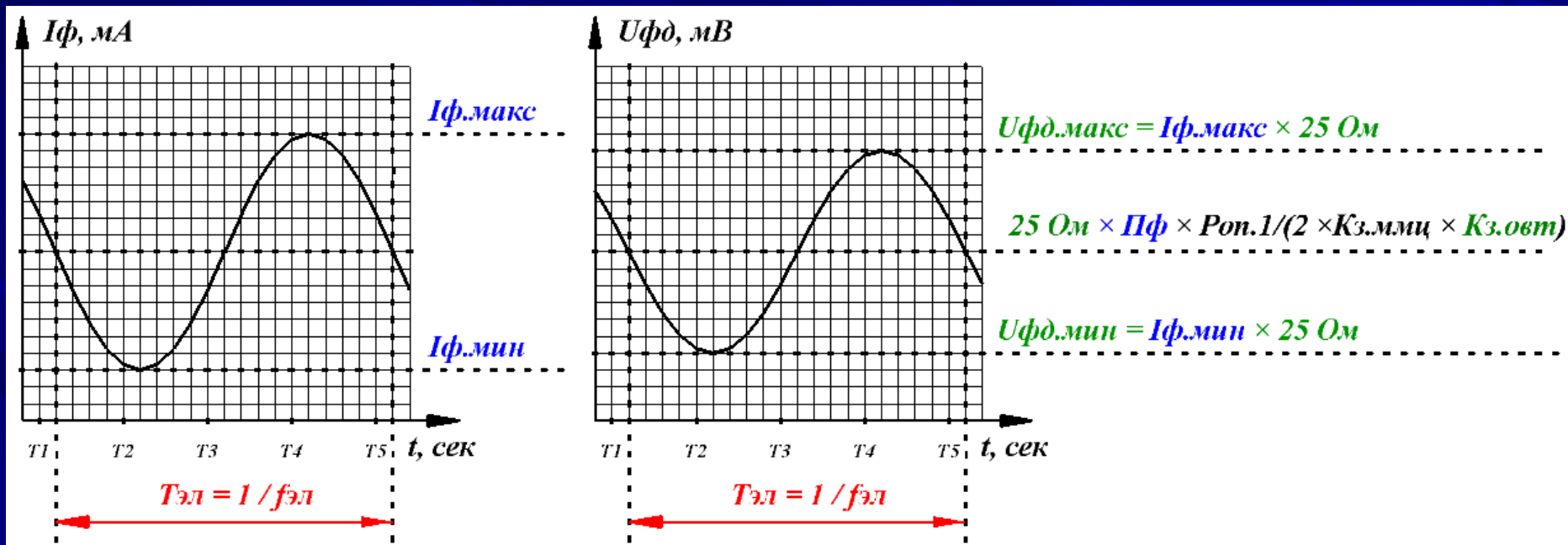
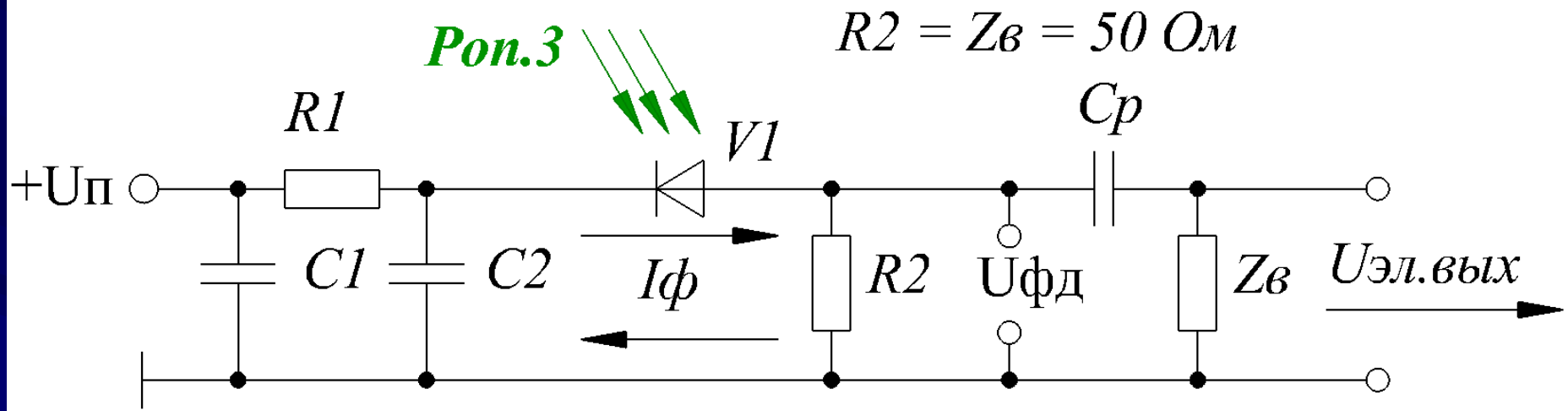


Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ
(модель XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics, www.u2t.com)

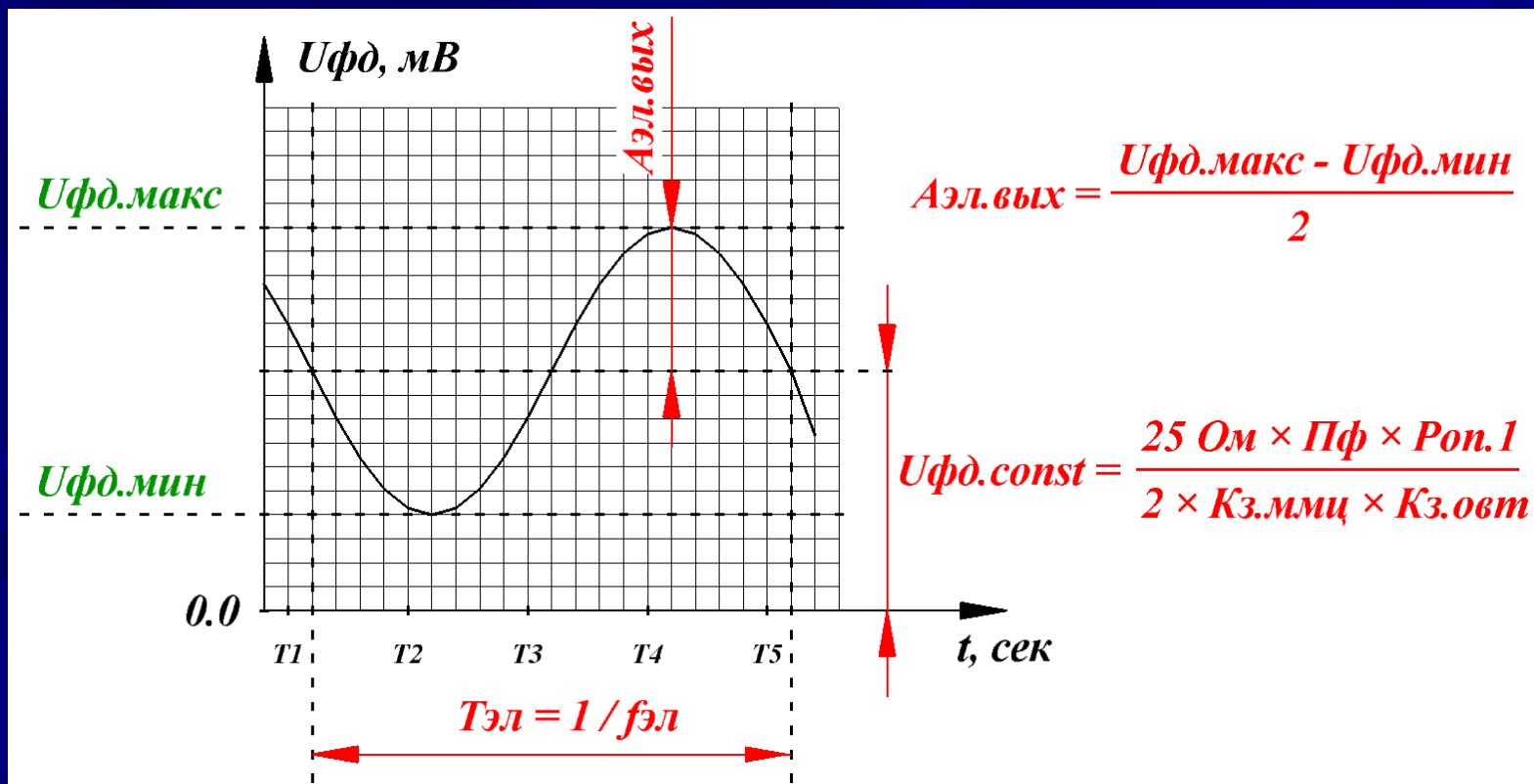
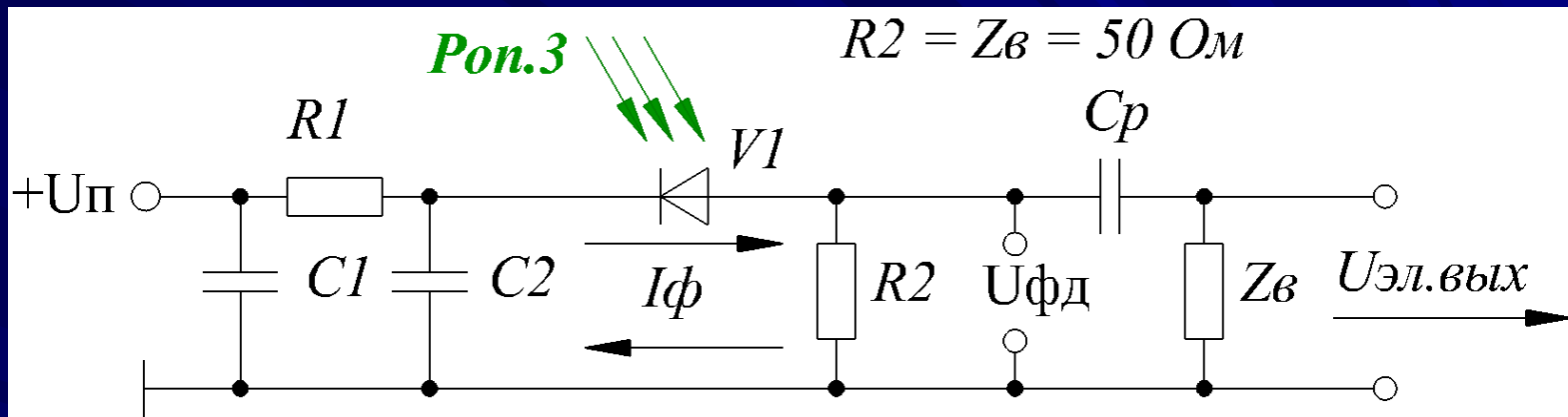
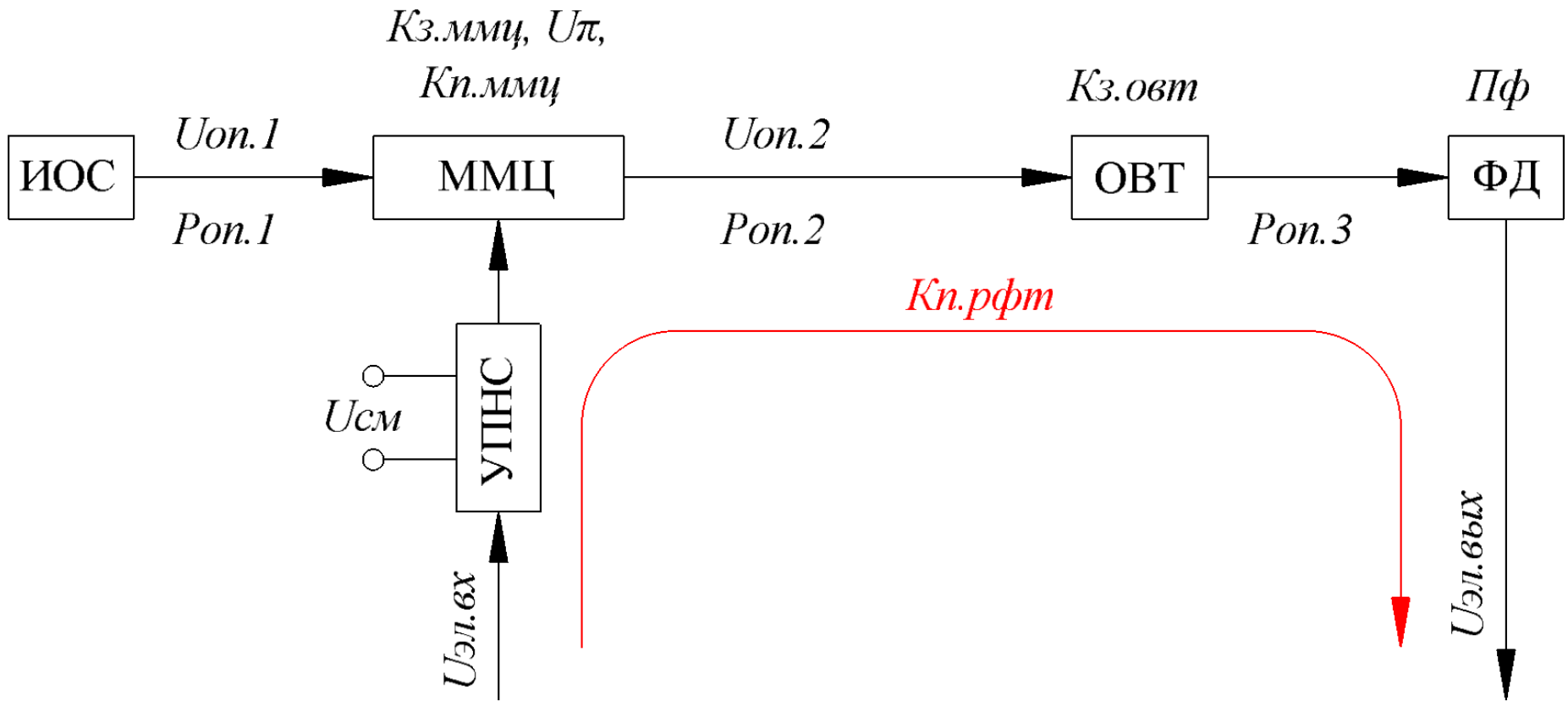
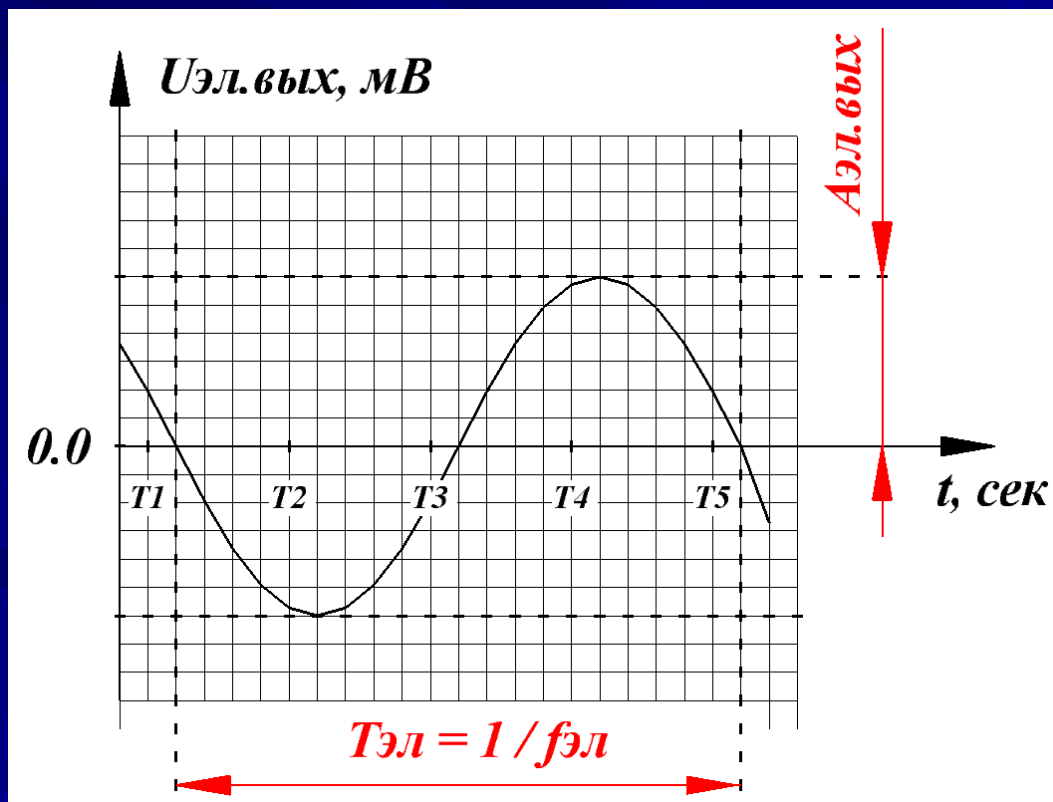
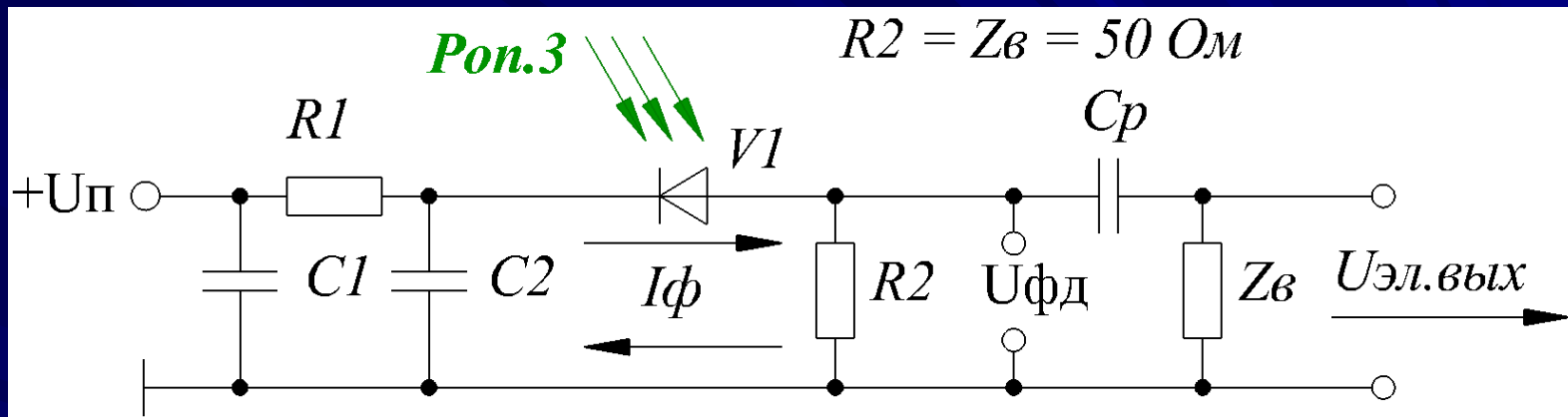


Схема аналогового РФТ СВЧ



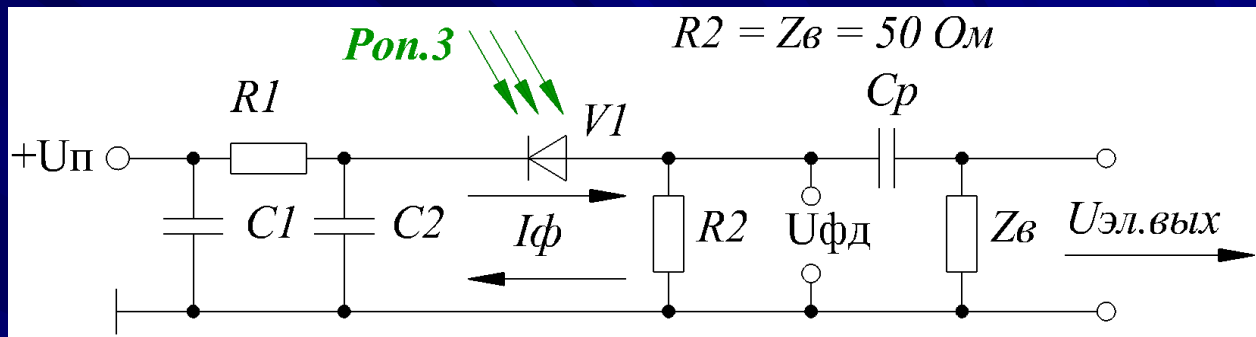
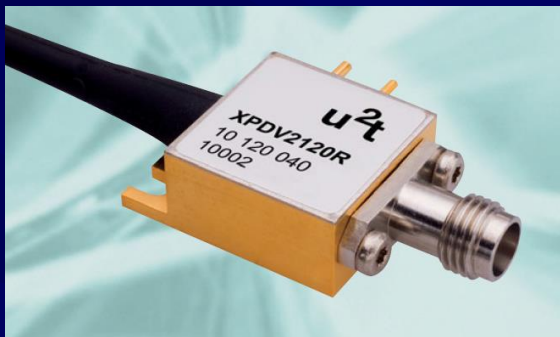
$$K_{п.рфт} (\text{дБ}) = 20 \times \lg (A_{эл.вых} / A_{эл.вх}) = \\ = 20 \times \lg (A_{эл.вых} / (U_{\pi}/6))$$

Схема сверхширокополосного фотодетектора диапазона СВЧ
(модель XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics, www.u2t.com)



Фотодетектор XPDV2120R производства фирмы u²t Photonics

(www.u2t.com)



u²t photonics

Optical and Electrical Specifications 1)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Photodiode DC responsivity @ 1550 nm	R	optimum polarization	0.5	0.65		A/W
Polarization dependent loss XPDV2120R XPDV2150R	PDL			0.3 0.1	0.5 0.2	dB
Optical return loss	ORL		27			dB
3dB cut-off frequency XPDV21xxR XPDV21xxRA	f _{3dB}	2)	45 33	50 40		GHz

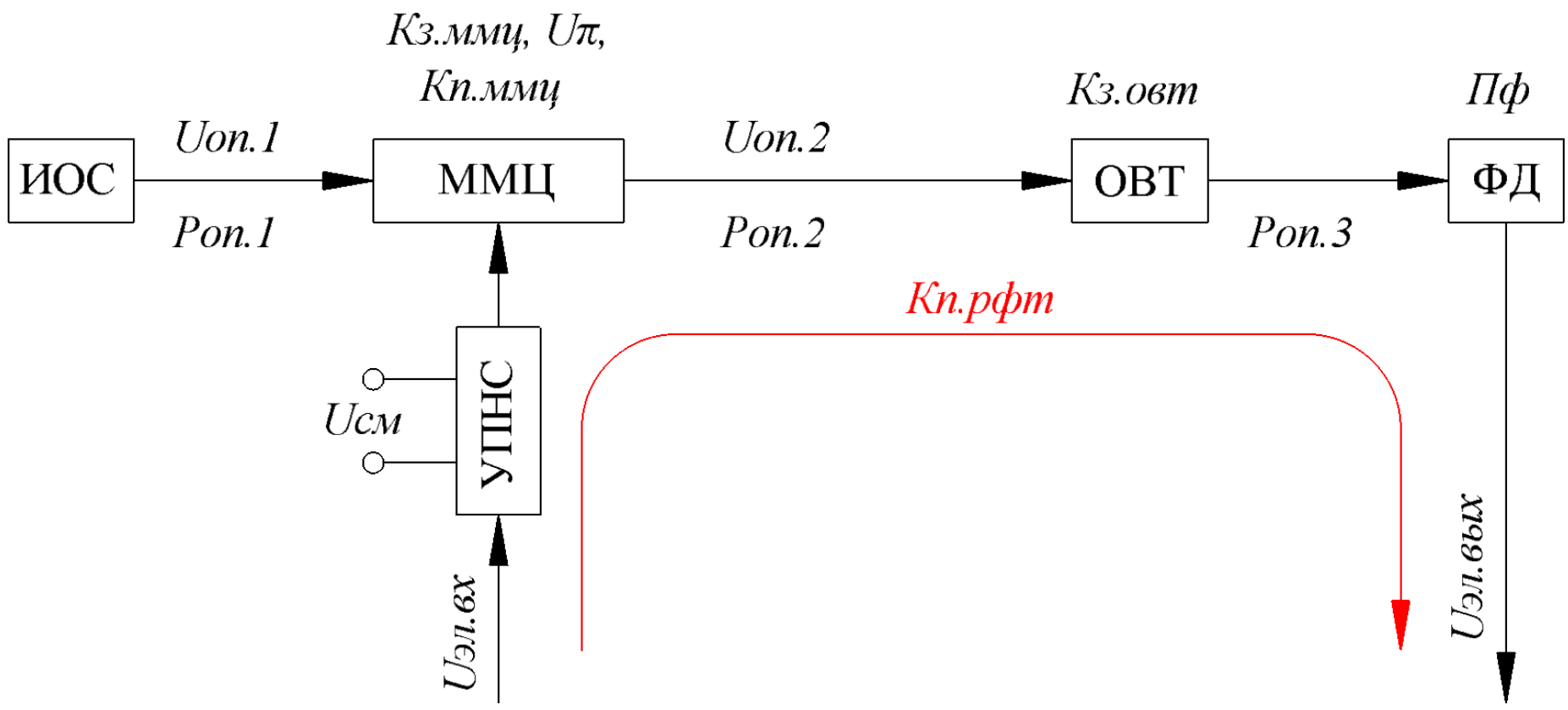
Модулятор Маха-Цандера LN58S-FC производства Thorlabs, Inc.
(www.thorlabs.com)



LN58S-FC
20 GHz Intensity Modulator

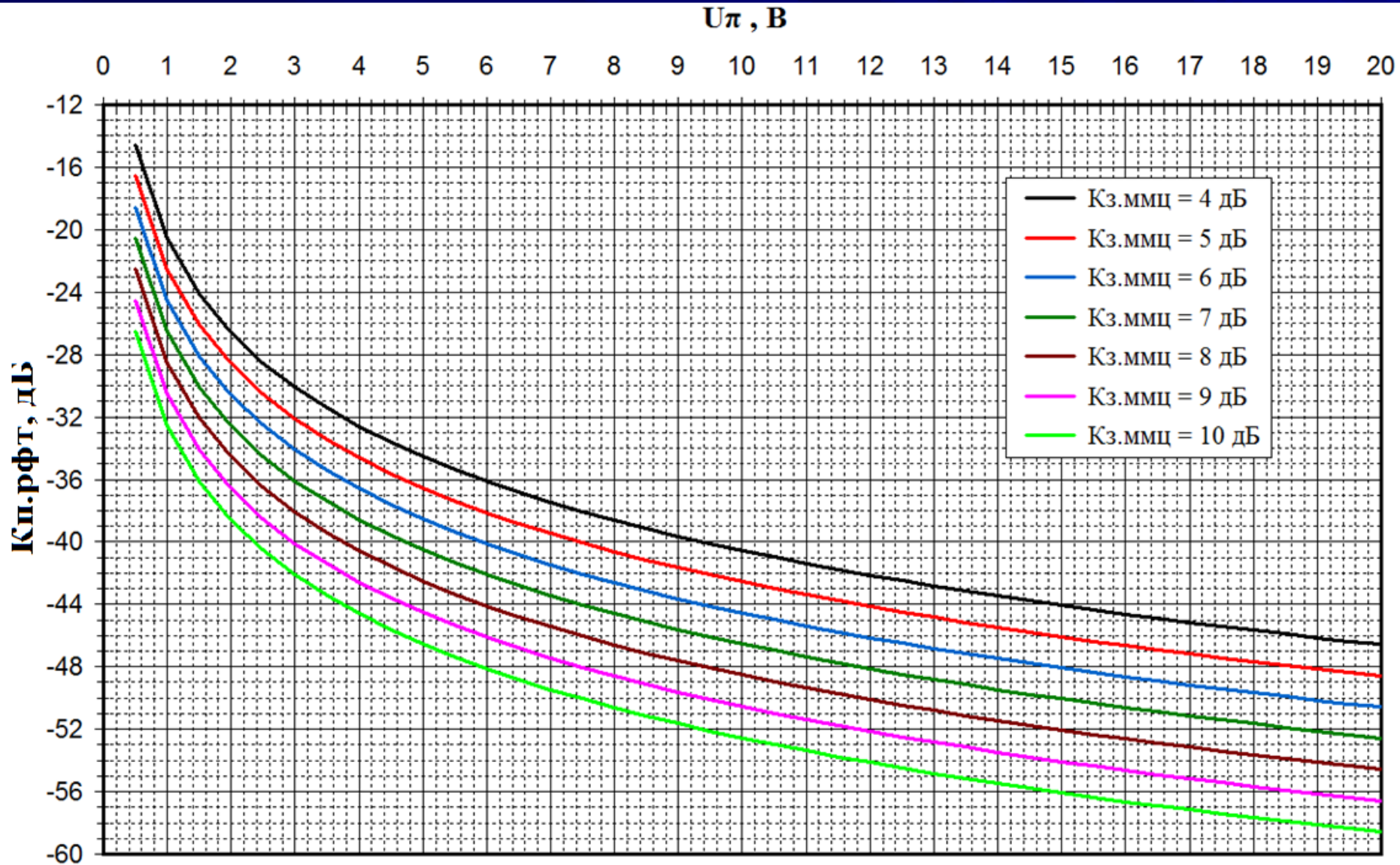
ITEM #	LN58S		
Parameter	Min	Typical	Max
Operating Wavelength*	1525 nm	–	1605 nm
Optical Insertion Loss (Connectorized)	–	–	5.5 dB
V_{π} at 20 GHz	–	3.5 V	3.9 V
V_{π} at DC	–	1.5 V	2.0 V
Optical On/Off Extinction Ratio	20 dB	–	–
Optical Return Loss	40 dB	–	–
S11 (DC to 20 GHz)	–	-12 dB	-10 dB
Insertion Loss Variation (EOL**)	-0.5 dB	–	–
Operating Case Temperature	0 °C	–	70 °C
Storage Temperature	-40 °C	–	85 °C

Схема аналогового РФТ СВЧ

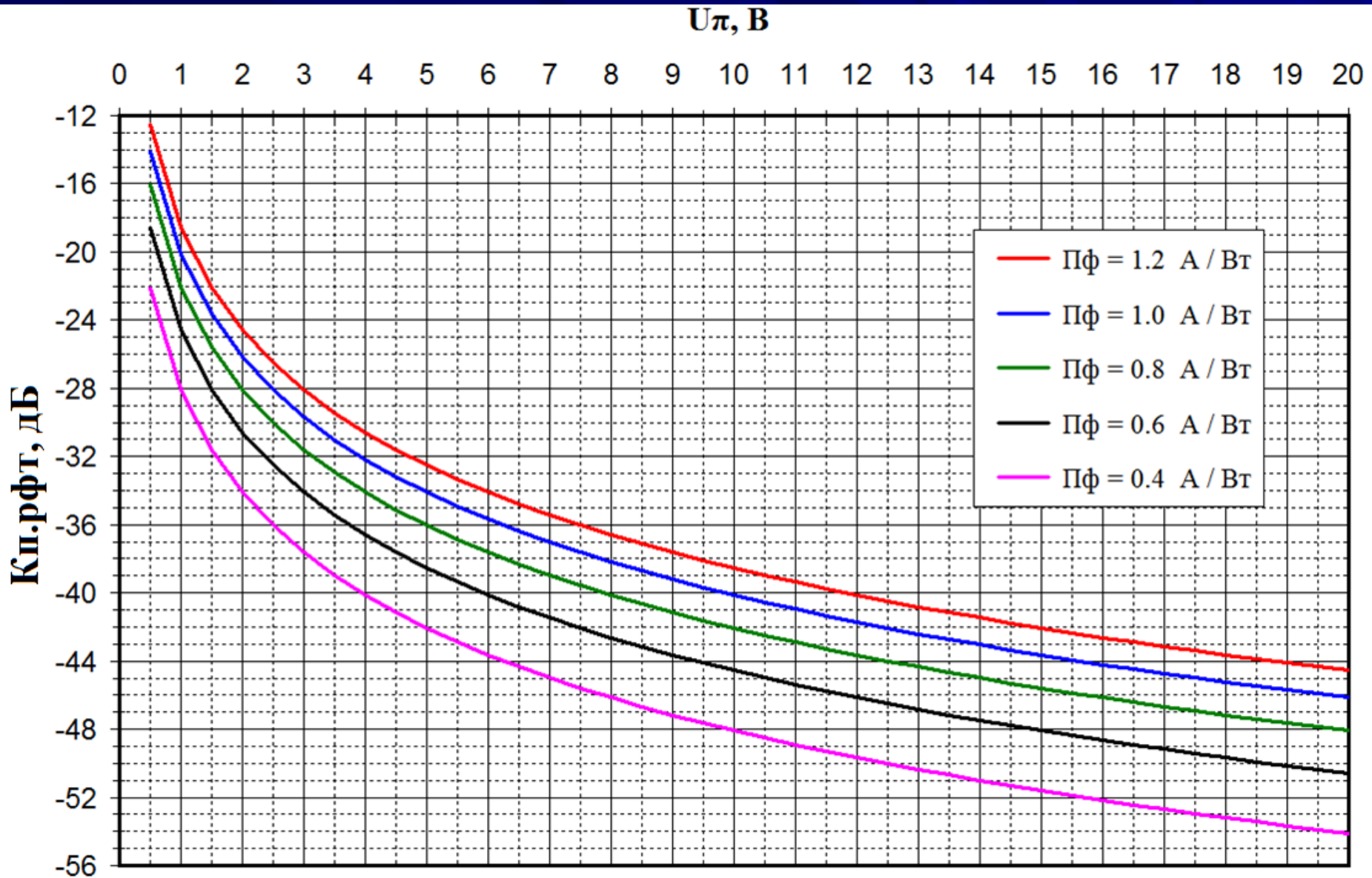


$$\begin{aligned}
 U_{эул} &= U_{см} + U_{эл.вх} = \\
 &= \pm U_{\pi/2} + (A_{эл.вх}) \times \sin(2\pi \times (1/T_{эл}) \times t)
 \end{aligned}$$

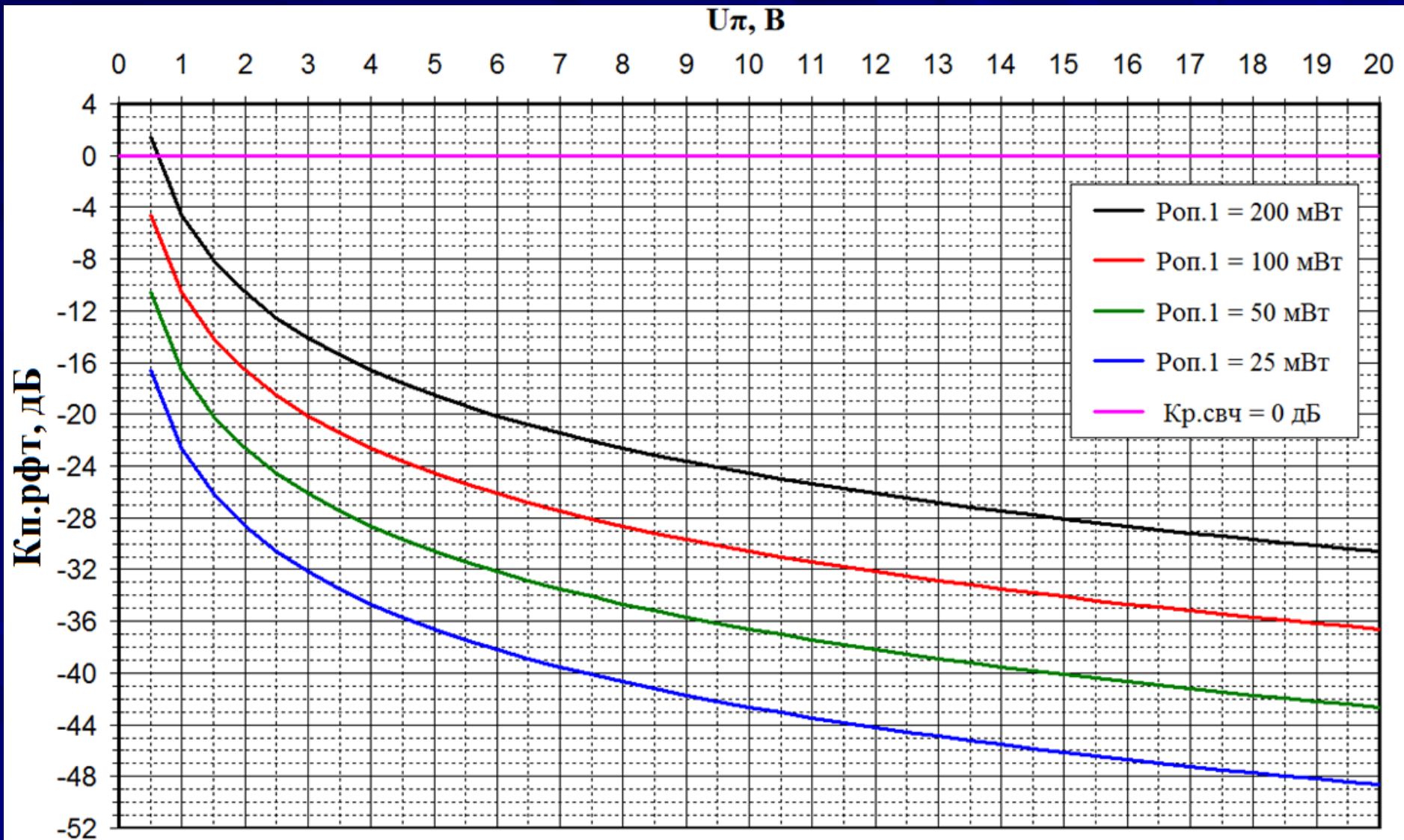
Зависимости $K_{п.рфт}$ от $U_{п}$ при различных $K_{з.ммц}$
($P_{оп.1} = 20$ мВт, $A_{эл.вх} = 7$ мВ, $P_{ф} = 0.6$ А / Вт)



Зависимости $K_{п.рфт}$ от $U_{п}$ при различных $P_{ф}$
($K_{з.мми} = 6$ дБ, $A_{эл.вх} = 7$ мВ, $P_{оп.1} = 20$ мВт)



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



*Как рассчитать АЧХ РФТ
в диапазоне рабочих частот?*

Примеры возможных вариантов представления информации об V_{π} и P_{ϕ} на DC или на близких к DC частотах

V_{π} at DC	-	1.5 V	2.0 V
-----------------	---	-------	-------

V_{π} @ DC			1.5	2	V
----------------	--	--	-----	---	---

V_{π} RF @20 GHz	$V_{\pi RF_{20\text{GHz}}}$	RF electrodes	-	8	8.5	V
----------------------	-----------------------------	---------------	---	---	-----	---

Drive Voltage V_{pi}

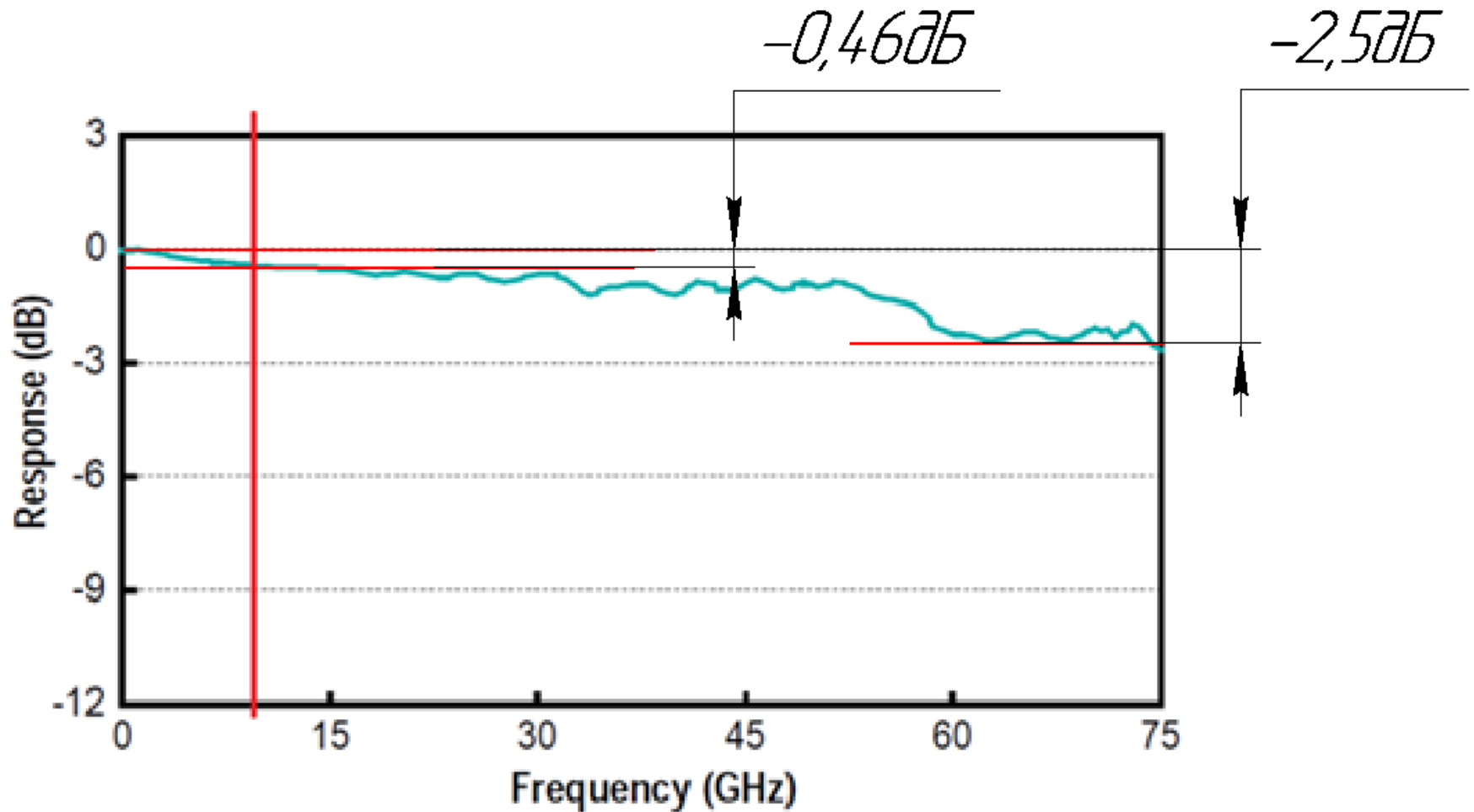
3.1V Typical @ DC;

Optical and Electrical Specifications 1)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Photodiode DC responsivity @ 1550 nm	R	optimum polarization	0.5	0.65		A/W

Графическое изображение частотной зависимости снижения эффективности детектирования в ФД

Frequency Response



Возможные варианты графического изображения частотной зависимости снижения эффективности модуляции в ММЦ

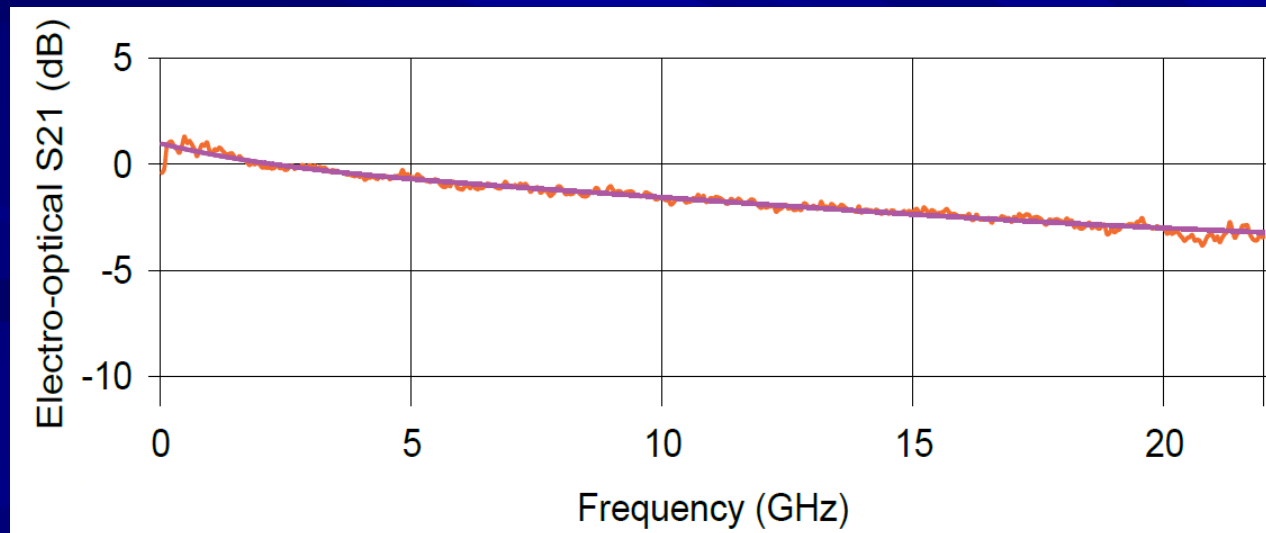
Вариант №1

V_{π} at 20 GHz	–	3.5 V	3.9 V
V_{π} at DC	–	1.5 V	2.0 V

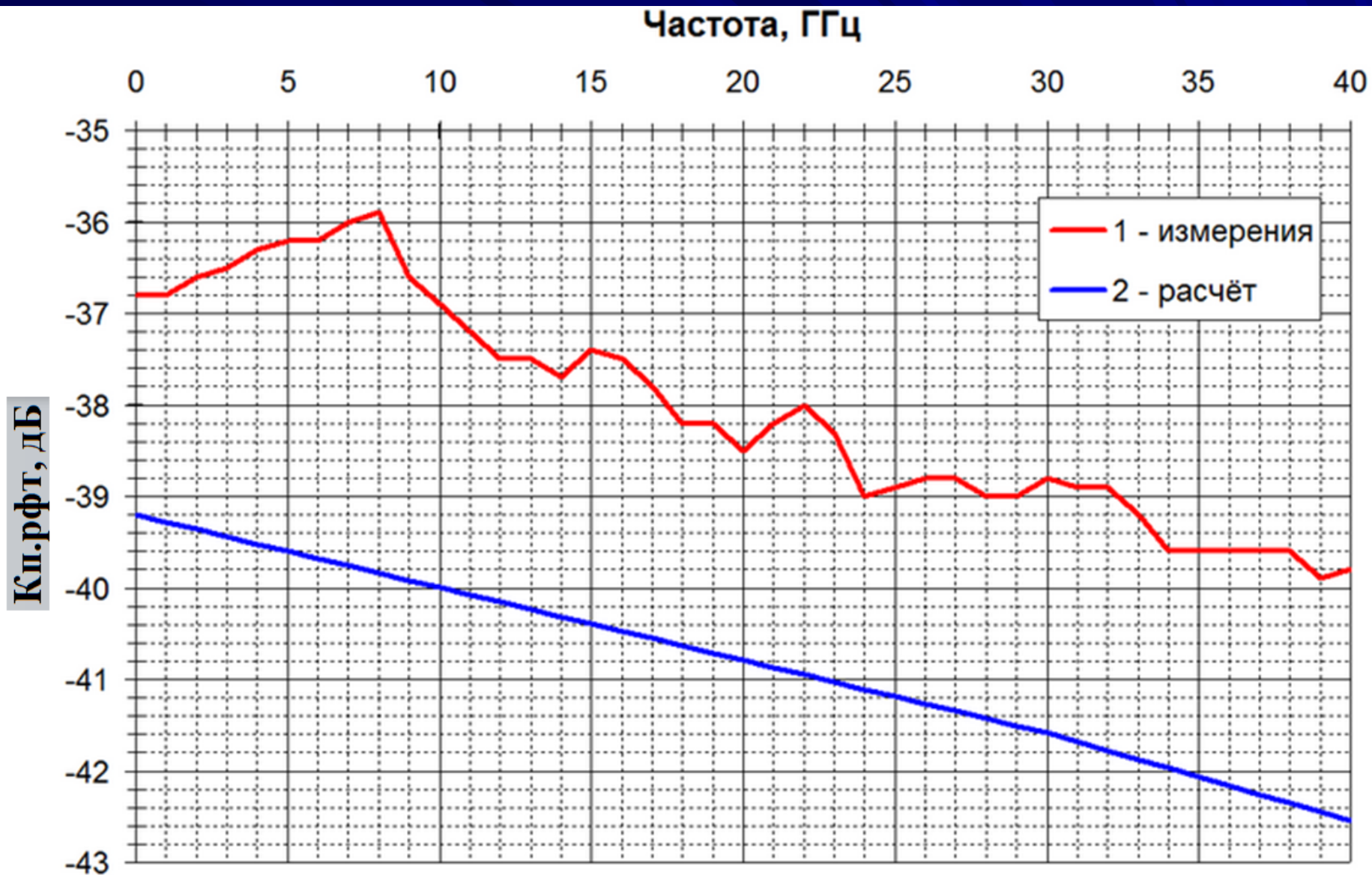
Вариант №2

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Electro-optic bandwidth	S_{21}	RF electrodes, from 2 GHz	18	20	-	GHz

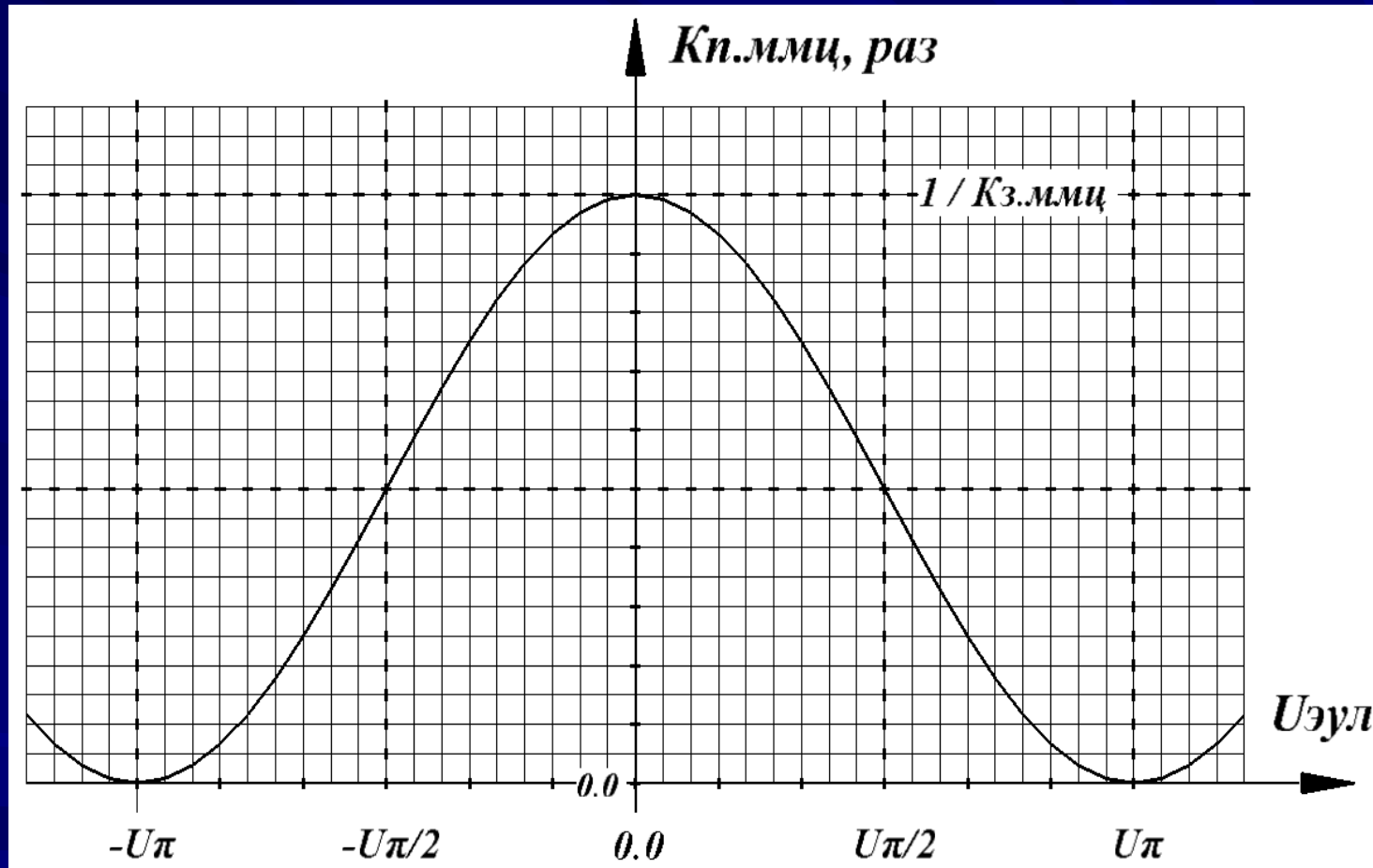
Вариант №3



Расчётная и измеренные характеристики РФТ

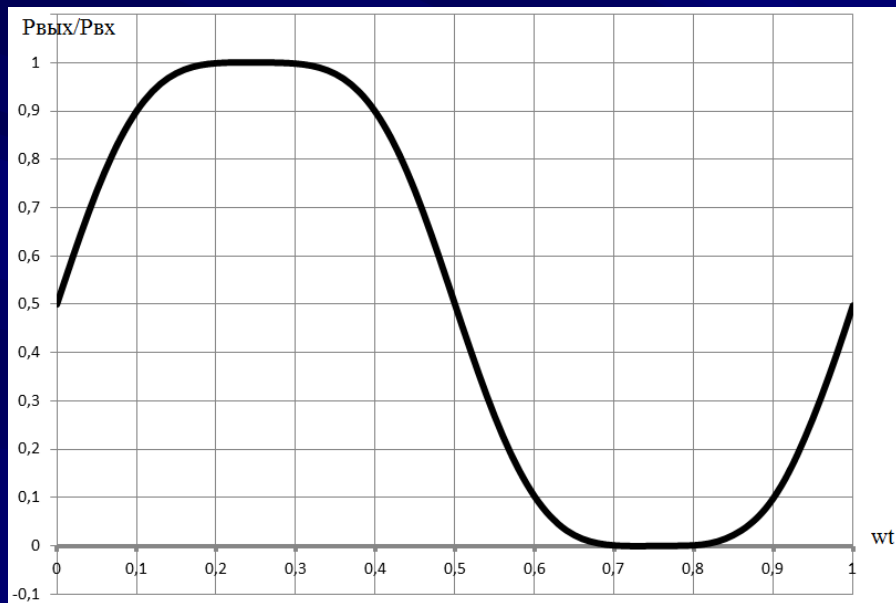


Графическая зависимость $K_{п.ммц}$ (в раз) от $U_{эул}$ для случая реальных потерь в оптических трактах ММЦ ($K_{з.ммц} > 0$)

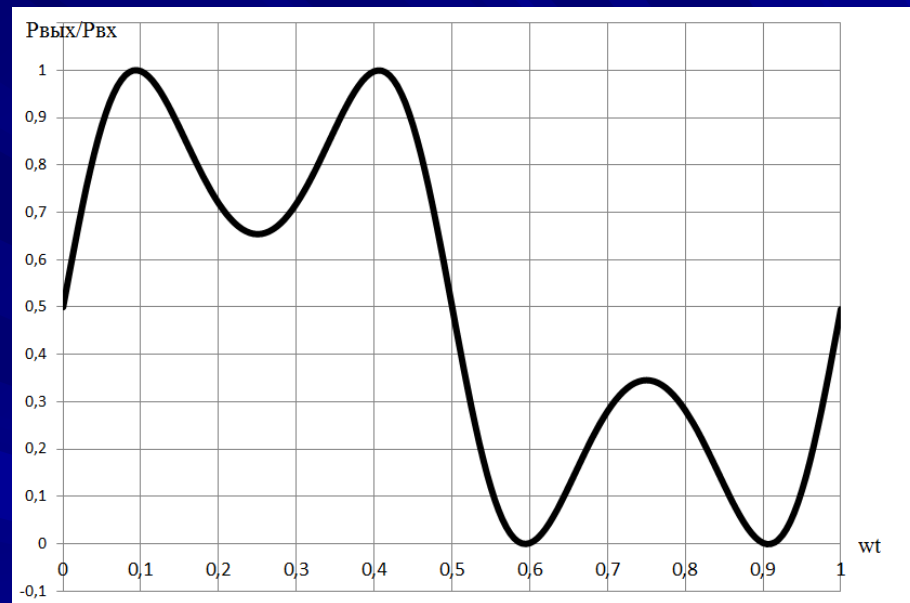


$$K_{п.ммц} = \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{эул}(B)}{U\pi(B)}\right)}{2 \times K_{з.ммц}(\text{раз})}$$

*Возможные варианты искажения сигнала,
обусловленные нелинейностью модуляционной
характеристики ММЦ*



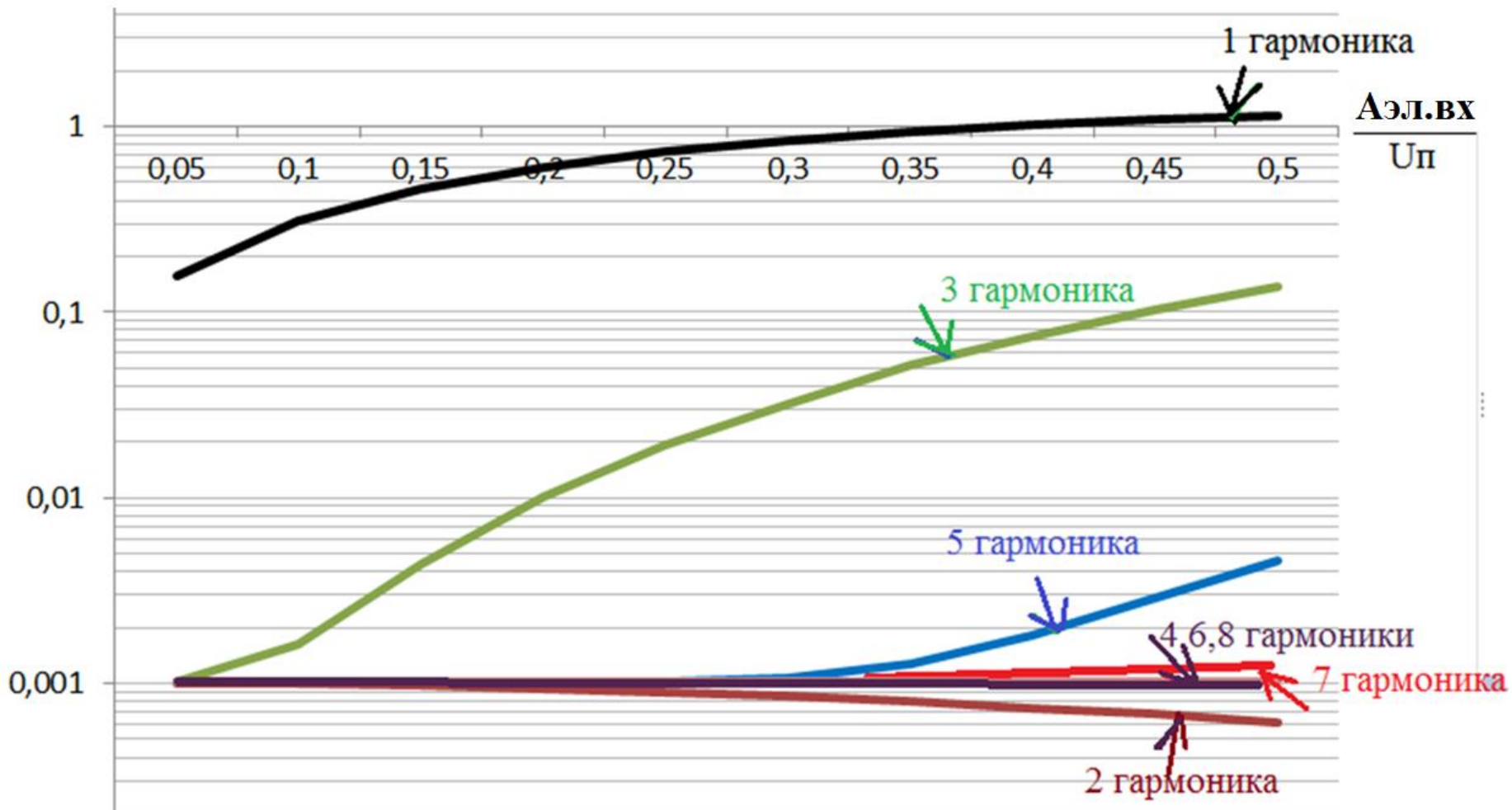
$A_{\text{эл.вх}} \leq U_{\pi} / 2$



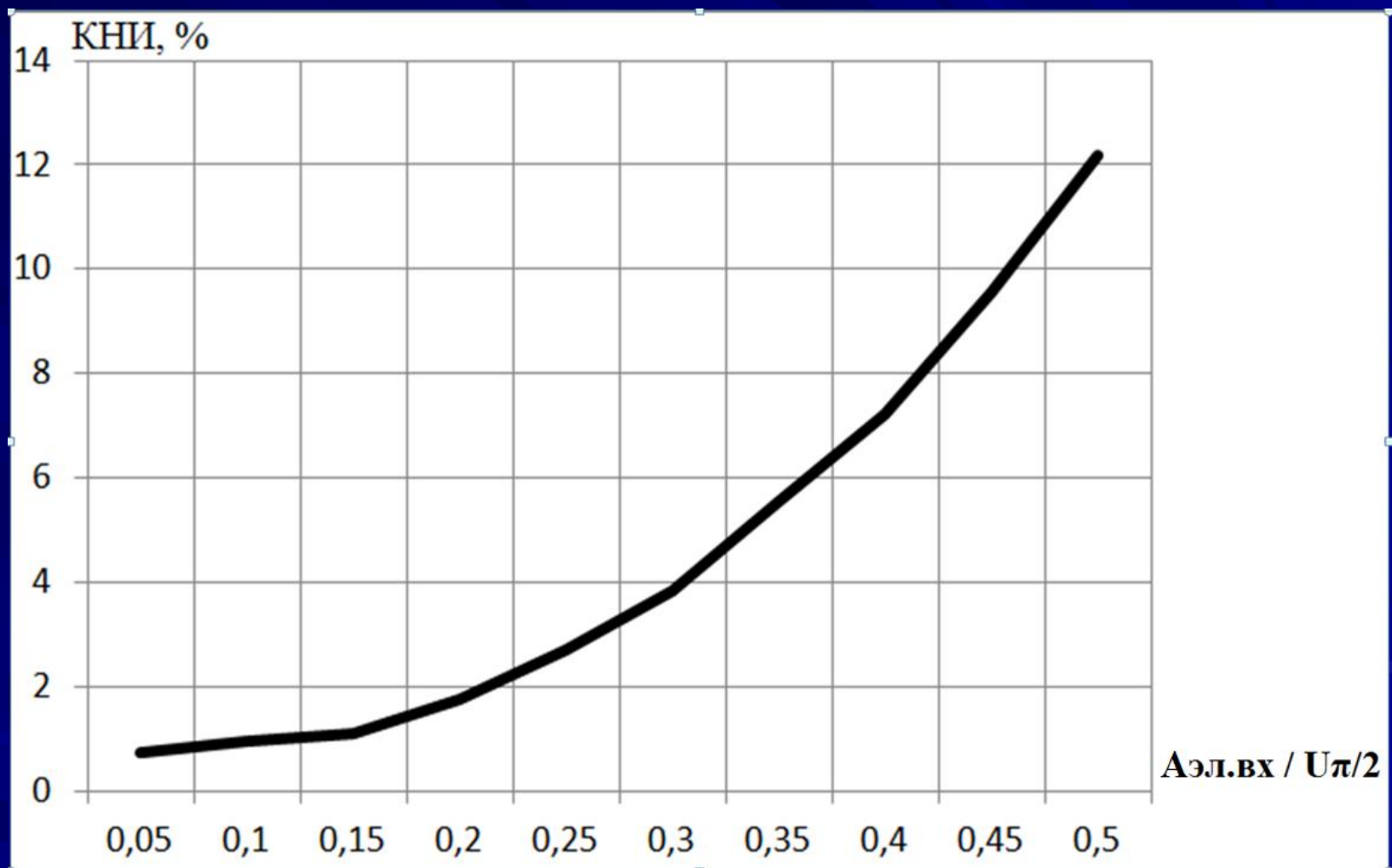
$A_{\text{эл.вх}} > U_{\pi} / 2$

Зависимости относительных уровней гармоник от соотношения $A_{эл.вх} / U_{п}$

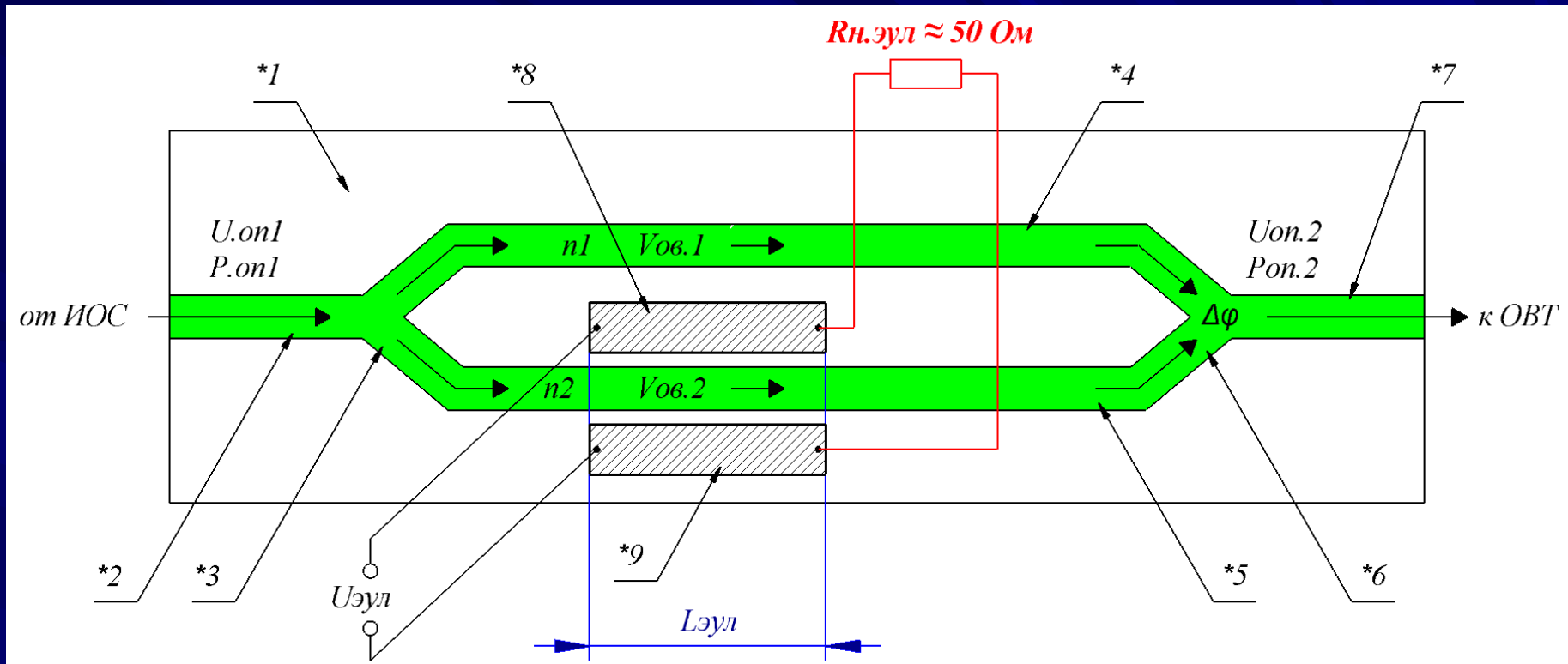
$A_{эл.вх.N} / A_{эл.вх.макс}$



Зависимость КНИ от соотношения $A_{эл.вх}/U_{\pi}$



Схематическое изображение конструкции ММЦ



***1 - пластина из сегнетоэлектрика**

***2 - входной световодный канал**

***3 - входной Y-разветвитель**

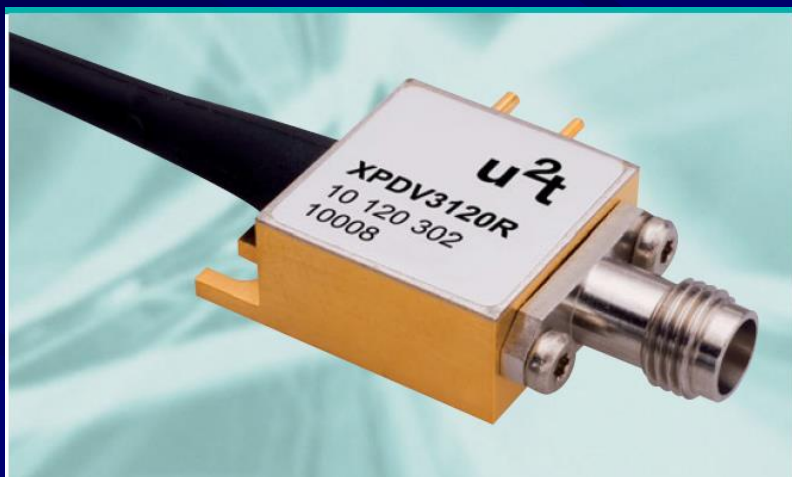
***4,*5 - первый и второй параллельные световодные каналы**

***6 - выходной Y-светвитель**

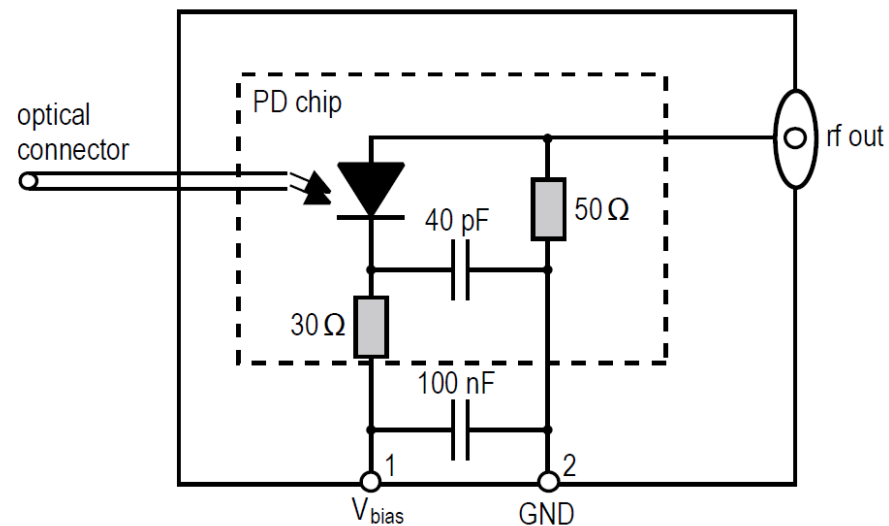
***7- выходной световодный канал**

***8,*9 - первый и второй электроды управляющей линии (ЭУЛ) СВЧ**

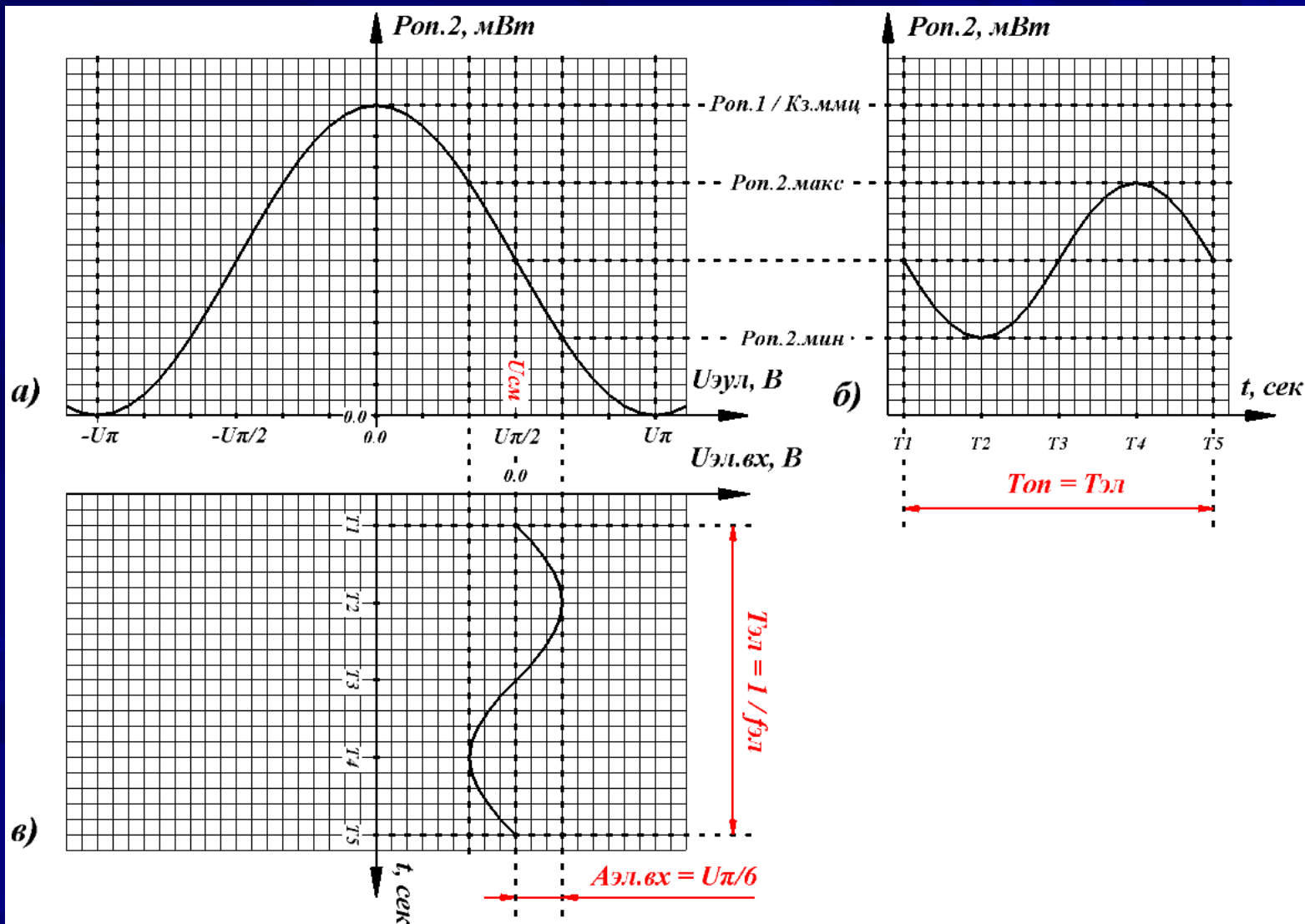
Фотодетектор XPDV3120R производства фирмы u²t Photonics
(www.u2t.com)



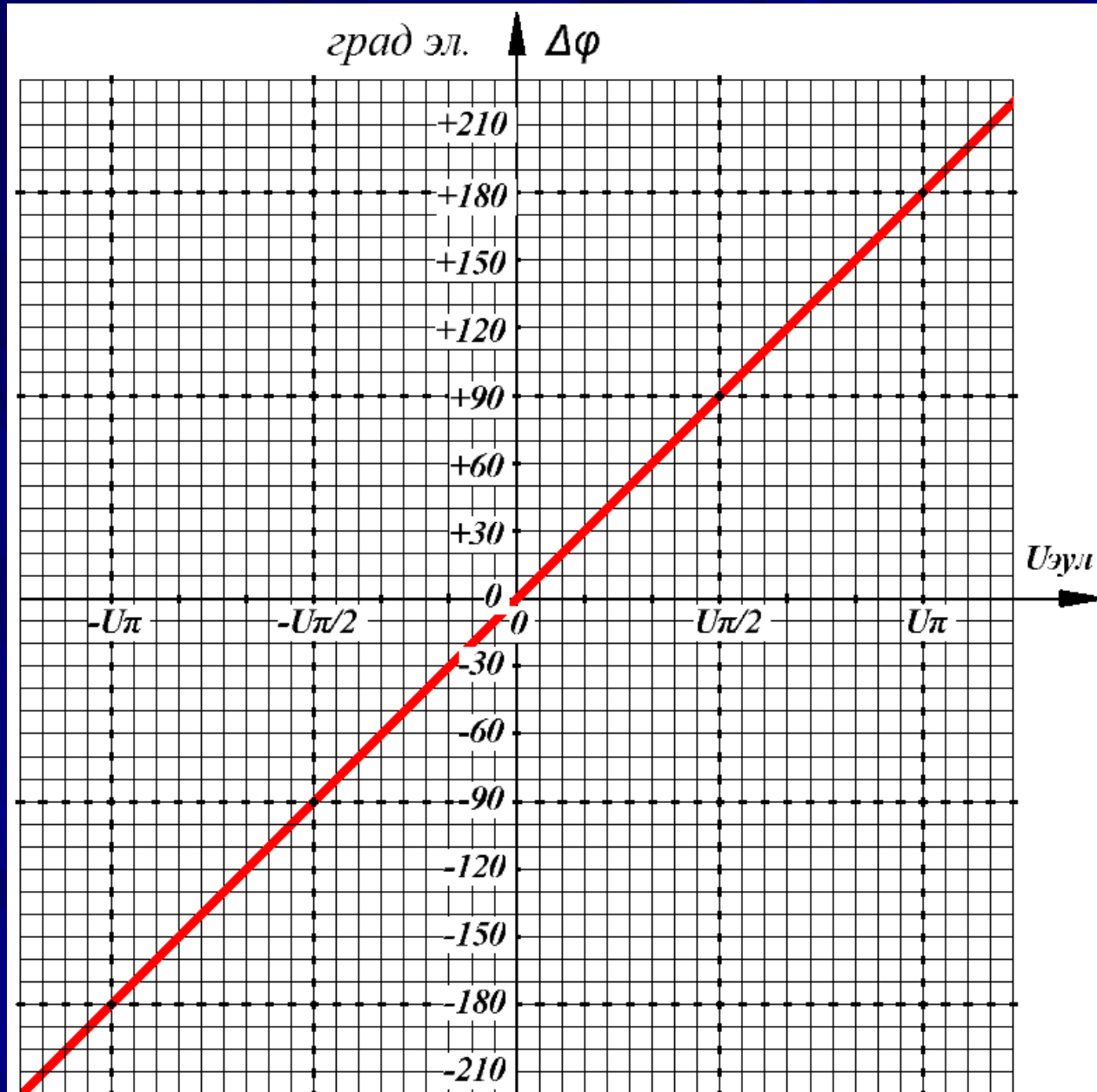
Block Diagram



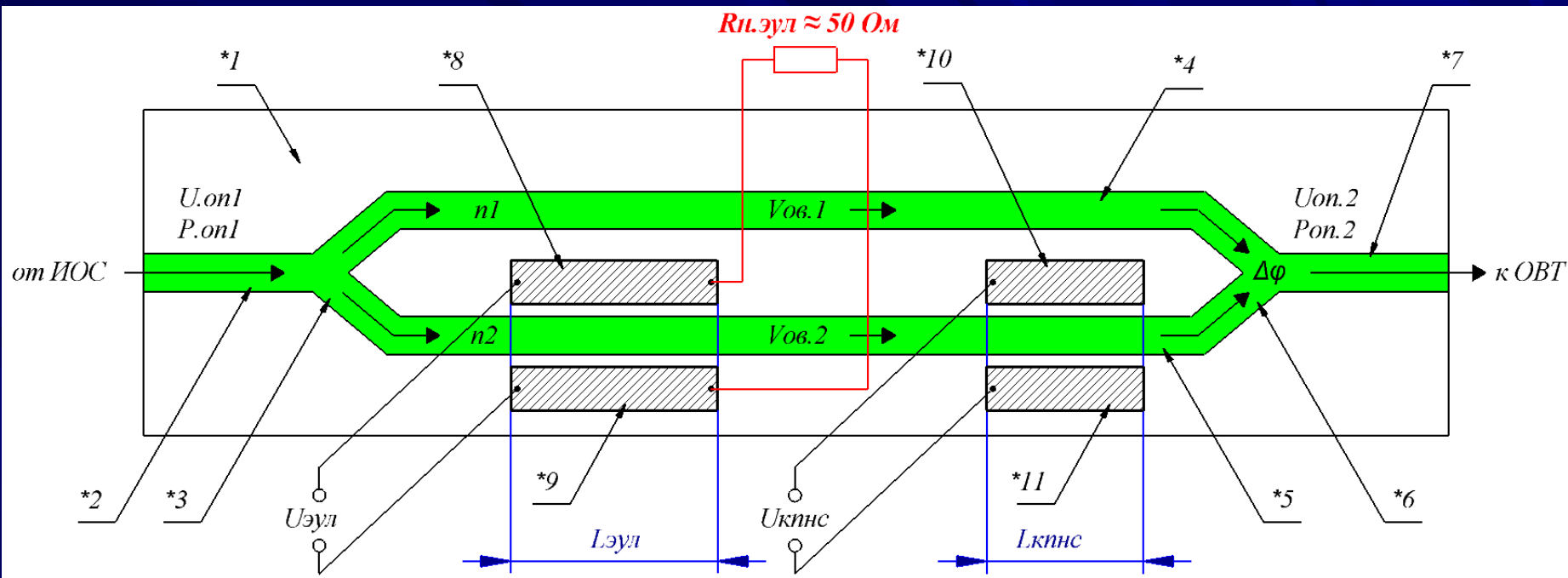
Временная развёртка мощности промодулированного оптического сигнала на выходе ММЦ при подаче на ЭУЛ гармонического модулирующего сигнала с периодом $T_{эл} = 1/f_{эл}$ и амплитудой $A_{эл.вх} = U_{\pi}/6$ и напряжения смещения $U_{см} = U_{\pi}/2$



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



Схематическое изображение конструкции ММЦ с КПНС



***1 - пластина из сегнетоэлектрика**

***2 - входной световодный канал**

***3 - входной Y-разветвитель**

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

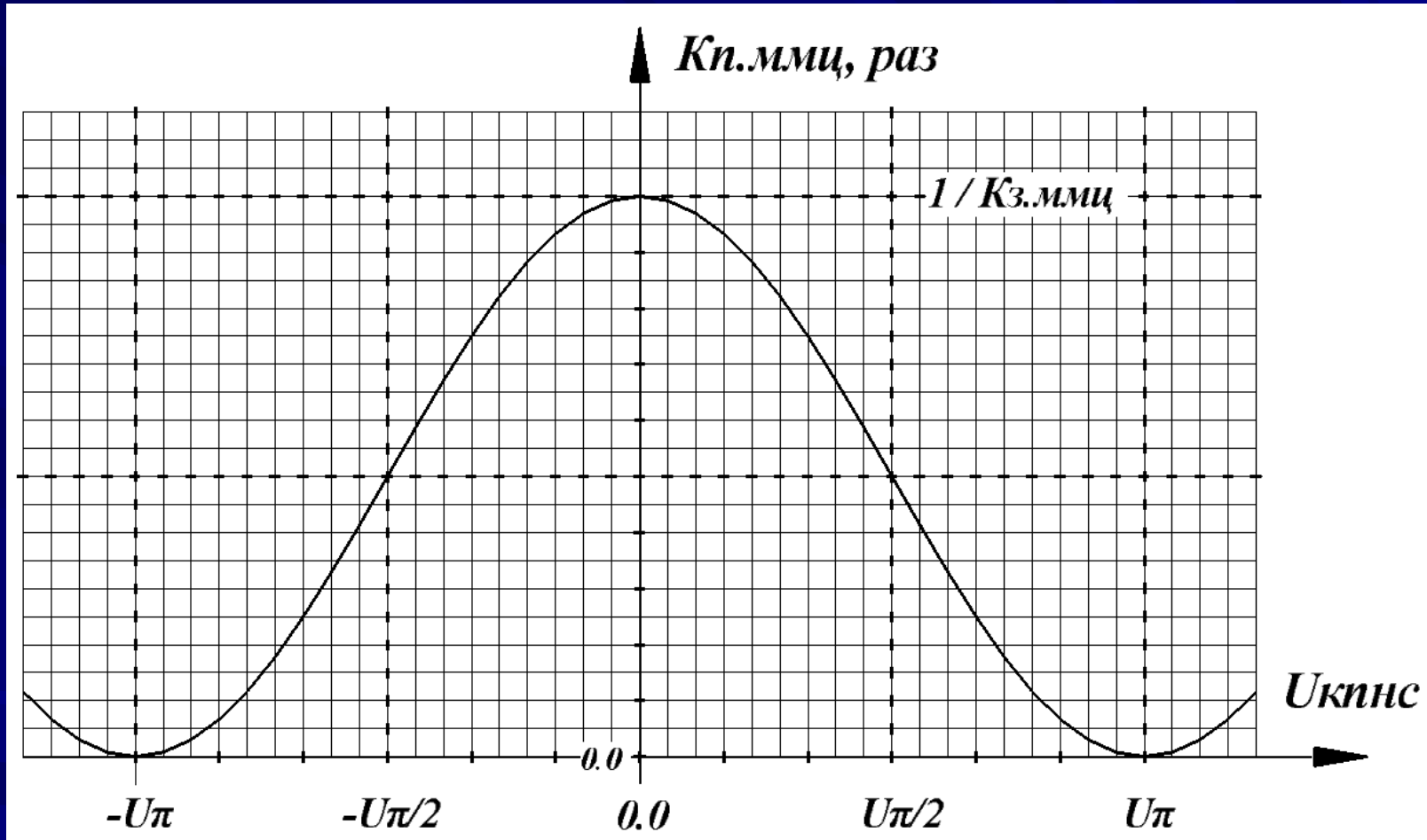
***6 - выходной Y-светвитель**

***7- выходной световодный канал**

***8, *9 - первый и второй электроды управляющей линии (ЭУЛ) СВЧ**

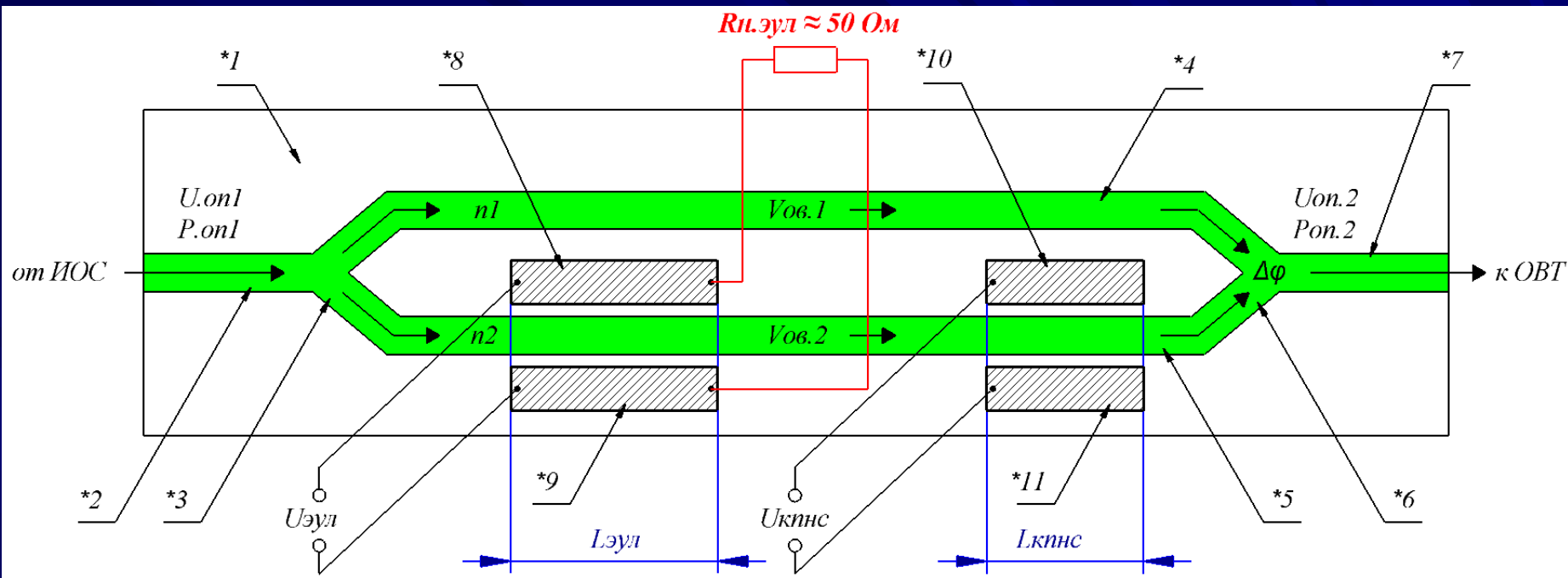
***10, *11 - первая и вторая контактные площадки для подачи напряжения смещения (КПНС)**

Графическая зависимость $K_{п.ммц}$ (в раз) от $U_{кпнс}$ для случая реальных потерь в оптических трактах ММЦ ($K_{з.ммц} > 0$) при $U_{эул} = 0$ В



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

Схематическое изображение конструкции ММЦ с КПНС



***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 (ЭУЛ) СВЧ**

***10,*11 - первая и вторая контактные площадки для подачи напряжения смещения (КПНС)**

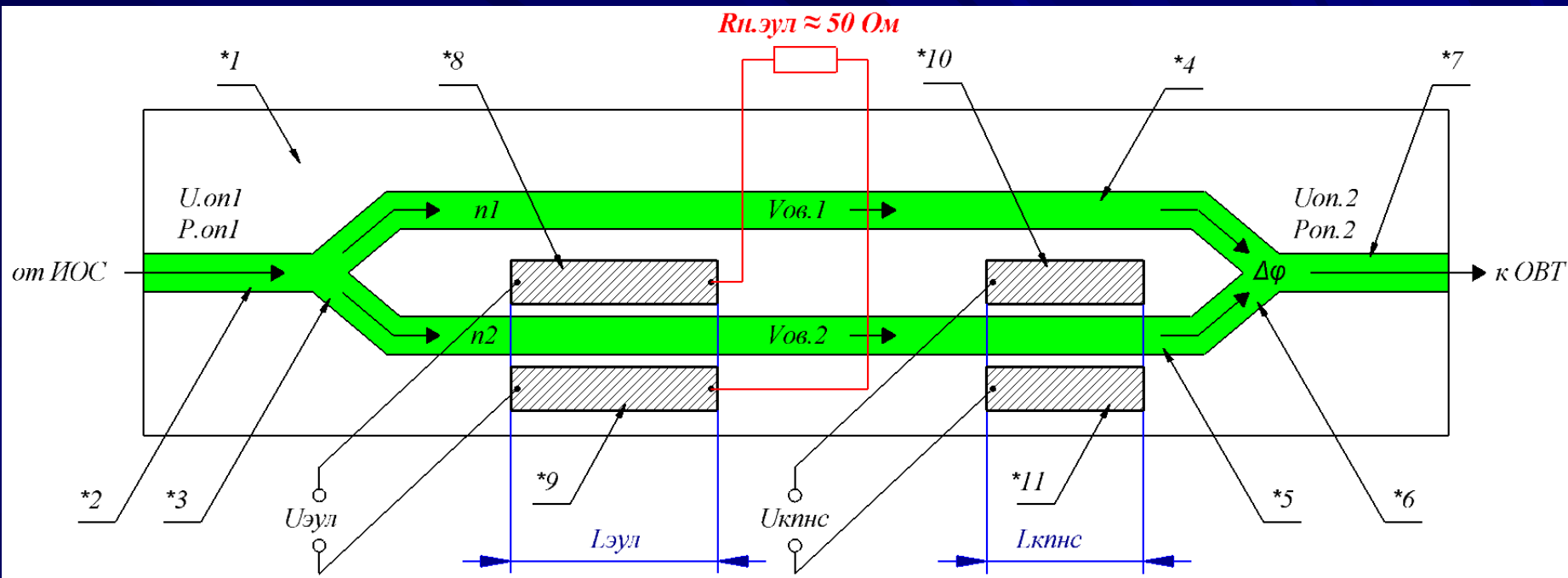
20 GHz Analog Intensity Modulator MXAN-LN-20 произведена Photline Technologies (www.photline.com)



Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Electro-optic bandwidth	S_{21}	RF electrodes, from 2 GHz	18	20	-	GHz
Ripple S21	ΔS_{21}	RF electrodes, $f < 20$ GHz	-	0.5	1	dB
Electrical return loss	ES_{11}	RF electrodes, $f < 20$ GHz	-	-12	-10	dB
V_{π} RF @50 kHz	$V_{\pi RF_{50\text{ kHz}}}$	RF electrodes	-	5.5	6	V
V_{π} RF @20 GHz	$V_{\pi RF_{20\text{ GHz}}}$	RF electrodes	-	8	8.5	V
V_{π} DC electrodes	$V_{\pi DC}$	DC electrodes	-	6.5	7	V
RF input impedance	Z_{in-RF}	-	-	40	-	Ω
DC input impedance	Z_{in-DC}	-	-	1	-	M Ω

Crystal	-	-	Lithium Niobate X-Cut Y-Prop			
Operating wavelength	λ	-	1530	1550	1580	nm

Схематическое изображение конструкции ММЦ с КПНС



***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 (ЭУЛ) СВЧ**

***10,*11 - первая и вторая контактные площадки для подачи напряжения смещения (КПНС)**

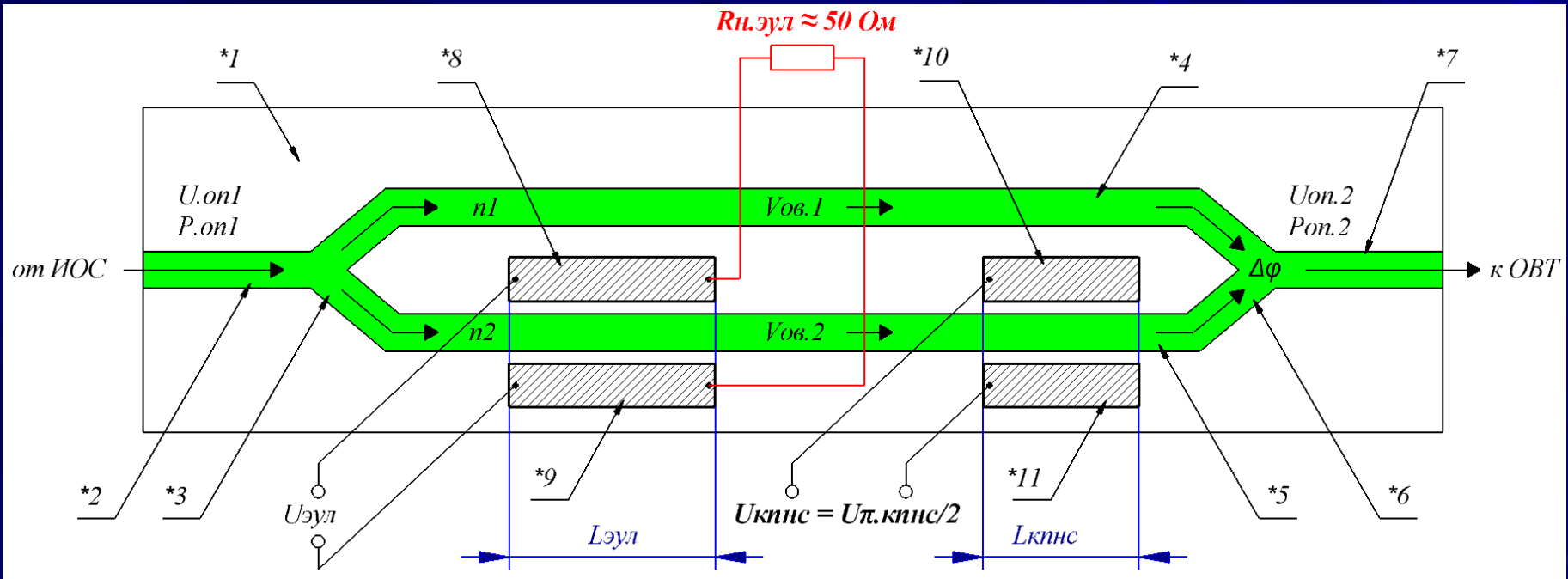
Выражение для определения $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = 180^\circ \times (U_{\text{кпнс}}/U_{\text{п.кпнс}}) + \\ + 180^\circ \times (U_{\text{эул}}/U_{\text{п.эул}})$$

Выражение для определения Кп.мми.

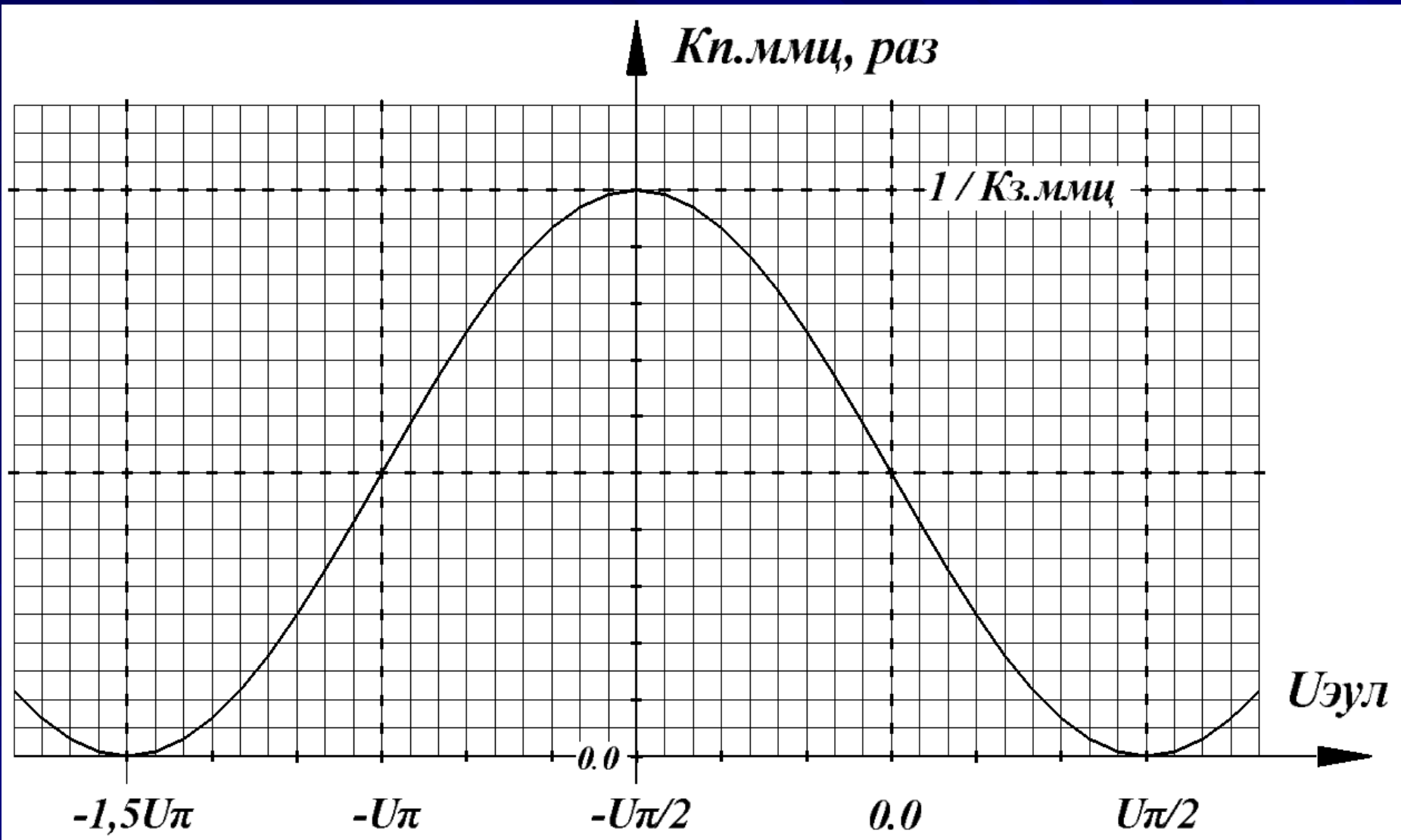
$$\underline{Кп.ммц} \text{ (раз)} = \frac{1 + \cos\left(180^\circ \times \frac{U_{кпнс} \text{ (В)}}{U_{п.кпнс} \text{ (В)}} + 180^\circ \times \frac{U_{эул} \text{ (В)}}{U_{п.эул} \text{ (В)}}\right)}{2 \times Кз.ммц \text{ (раз)}}$$

Выражение для определения Кп.ммц для случая $U_{кпнс} = U_{п.кпнс}/2$

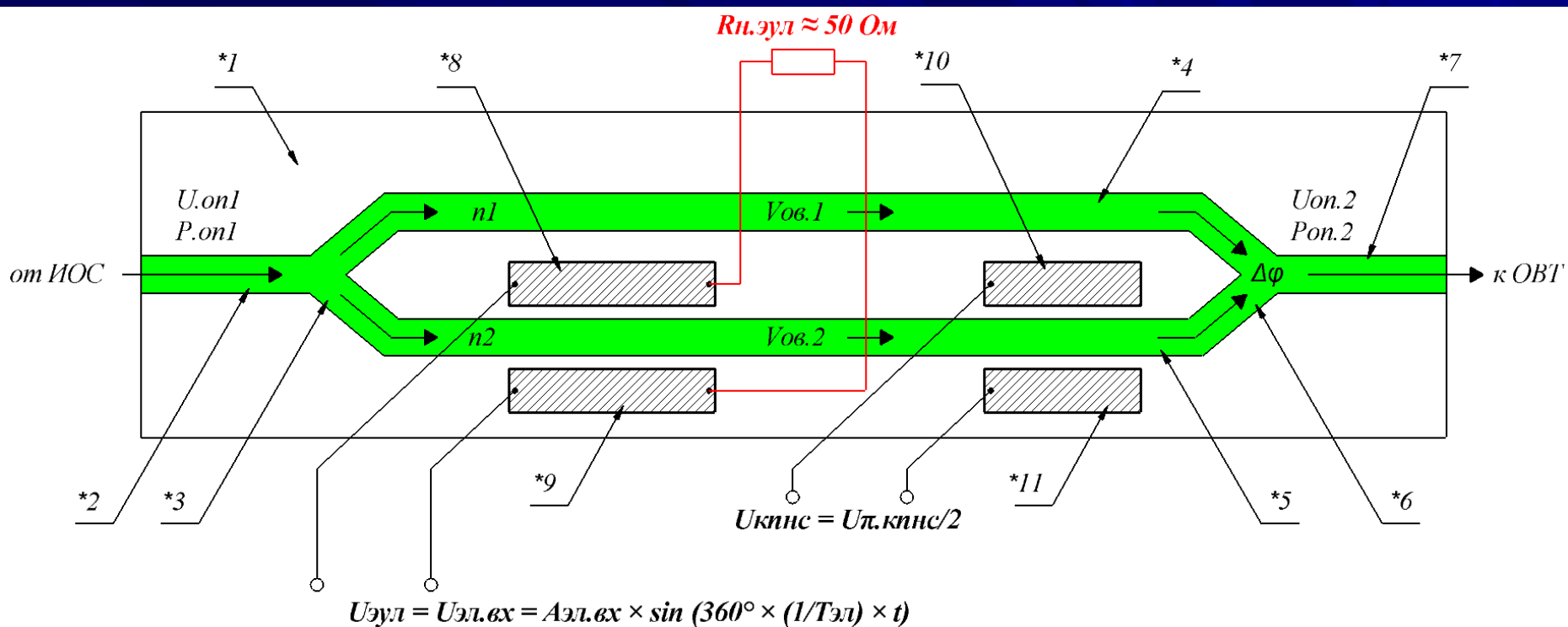


$$\text{Кп.ммц (раз)} = \frac{1 + \cos(90^\circ + 180^\circ \times \frac{U_{\text{эул}} \text{ (В)}}{U_{п.эул} \text{ (В)}})}{2 \times \text{Кз.ммц (раз)}}$$

Графическая зависимость $K_{п.мми}$ (в раз) от $U_{эул}$ для случая реальных потерь в оптических трактах ММЦ ($K_{з.мми} > 0$) при $U_{кпнс} = U_{п,кпнс}/2$



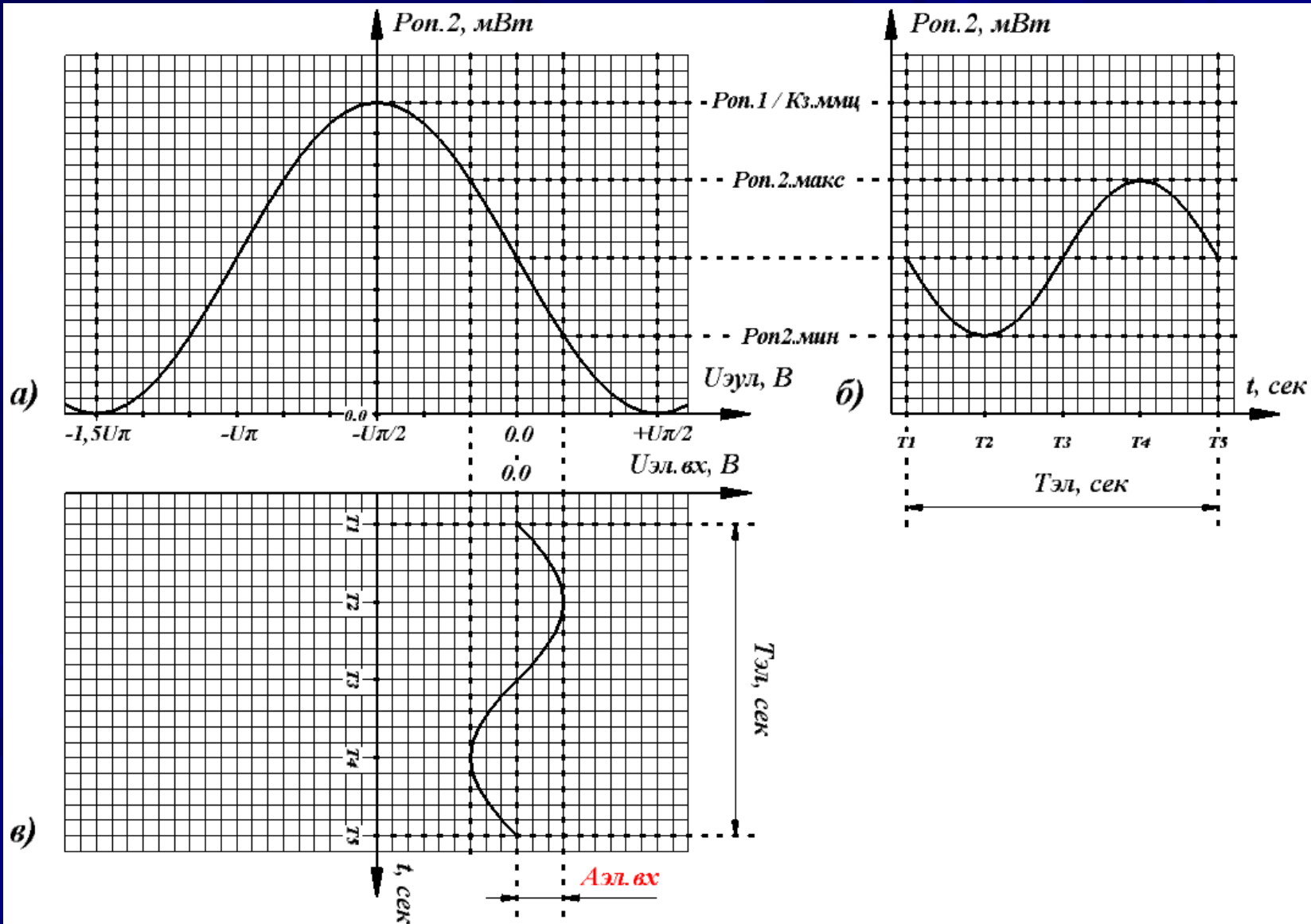
Набор подаваемых на ММЦ электрических сигналов



Выражение для $P_{оп.2}$

$$P_{оп.2} = P_{оп.1} \times \frac{1 + \cos(90^\circ + 180^\circ \times \frac{A_{эл.вх}(В) \times \sin(360^\circ \times (1/T_{эл}(сек)) \times t(сек)) (В)}{U_{п.эул}(В)}}}{2 \times K_{з.ммц} (раз)}$$

Графическое изображение процесса модуляции в ММЦ с КПНС



Выражение для экстремальных значений

Роп.2

$$\text{Роп.2.макс} = \text{Роп.1} \times \frac{1 + \cos\left(90^\circ + 180^\circ \times \frac{A_{\text{эл.вх}}(B) \times (-1)}{U_{\text{п.эул}}(B)}\right)}{2 \times K_{\text{з.ммц}}(\text{раз})}$$

$$\text{Роп.2.мин} = \text{Роп.1} \times \frac{1 + \cos\left(90^\circ + 180^\circ \times \frac{A_{\text{эл.вх}}(B) \times (+1)}{U_{\text{п.эул}}(B)}\right)}{2 \times K_{\text{з.ммц}}(\text{раз})}$$

***Спасибо
за внимание!***

***Конструктивная критика
принимается по адресу
ur-vol@yandex.ru***