



**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДИОТЕХНИКИ И  
ЭЛЕКТРОНИКИ**

**КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННЫХ  
РАДИОТЕХНОЛОГИЙ**



# Радиоприёмные устройства

Слайд-шоу для цикла лекций по дисциплинам РПрУ, МиУПиОС

Доцент кафедры ИРТ , к.т.н.

**КУРОЧКИН АЛЕКСАНДР ЕВДОКИМОВИЧ**

[kurochkin@bsuir.by](mailto:kurochkin@bsuir.by)

# Часть 2. Помехи

# Помехи

1. Помехой является любое воздействие, искажающее факт приема.
2. Электромагнитной помехой является постороннее электромагнитное колебание.
3. Радиопомеха - электромагнитная помеха в диапазоне радиочастот.

# Помехи радиоприему

По месту происхождения:

атмосферные;  
индустриальные;  
излучение сторонних станций;  
космические;  
внутренние

По характеру действия на прием:

пассивные;  
активные.

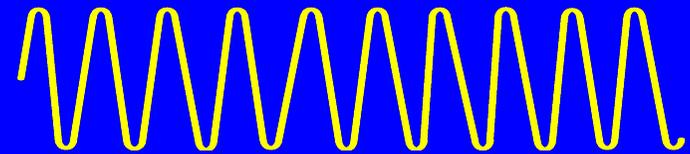
По характеру воздействия на тракт:

мультипликативные;  
аддитивные

По структуре помехи:

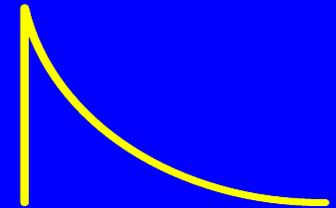
Квазигармонические.

$$U_n = \sum U_{mk} \cos(\omega_k t)$$

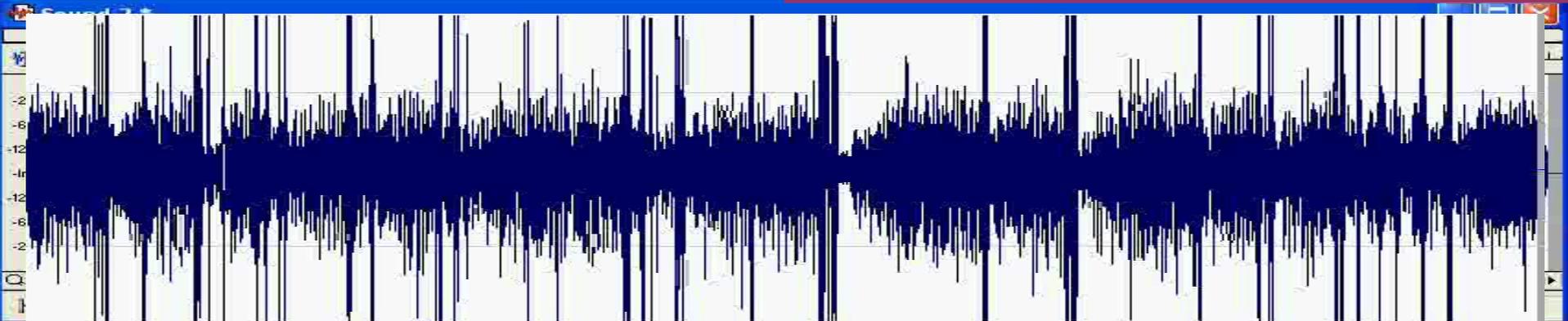


Квазиимпульсные.

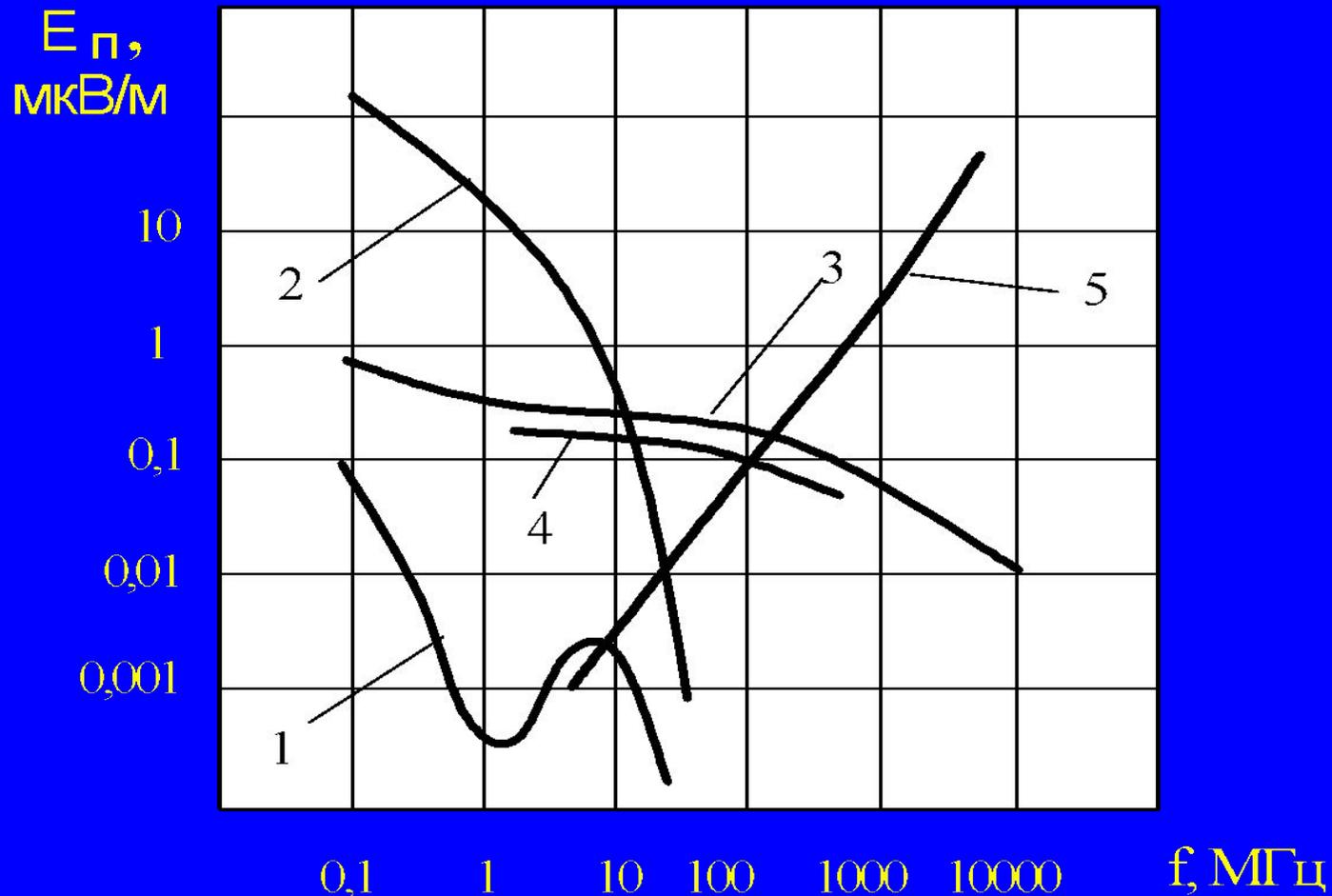
$$U_n = U_{mn} e^{-\frac{t}{\tau}}$$



Гладкие.



# Внешние помехи



1 - средний уровень атмосферных помех днем; 2 - ночью; 3 - средний уровень промышленных помех в городе; 4 - уровень космических помех; 5 - собственные шумы РПУ

# Метод спектральных функций



Спектральная  
плотность энергии

$$N_s = \frac{\Theta}{d\omega}$$

Спектральная  
плотность мощности

$$S = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{N_s}{T}$$

$$P_{uu} = S \Delta f$$

Теорема Парсеваля

$$\Theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} G^2(\omega) d\omega$$

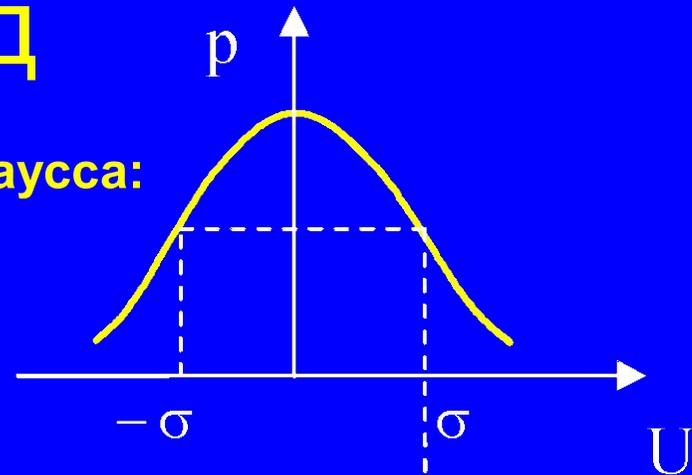
$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) e^{-j\omega t} dt$$

# Вероятностно-статистический

## МЕТОД

Нормальное распределение или  
распределение плотности вероятности Гаусса:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(U - \bar{U})^2}{2\sigma^2}\right)$$



$$\sigma^2 = \overline{U_{\text{ш}}^2}$$

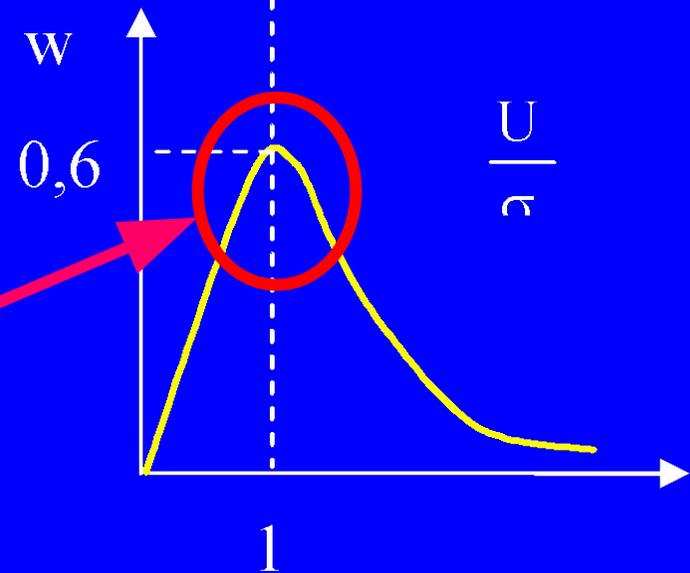
$$S = \frac{d\overline{U_{\text{ш}}^2}}{df}$$

$$S = kT$$

Распределение Рэля  
вероятностей случайной  
величины с плотностью:

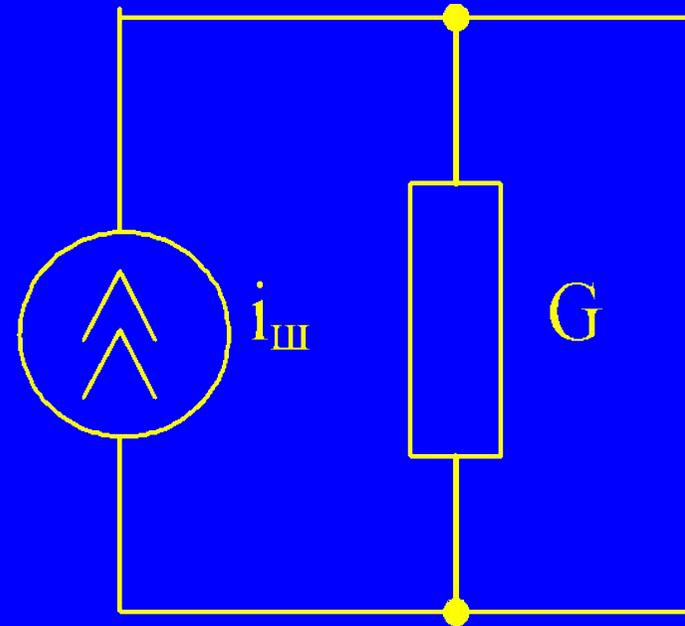
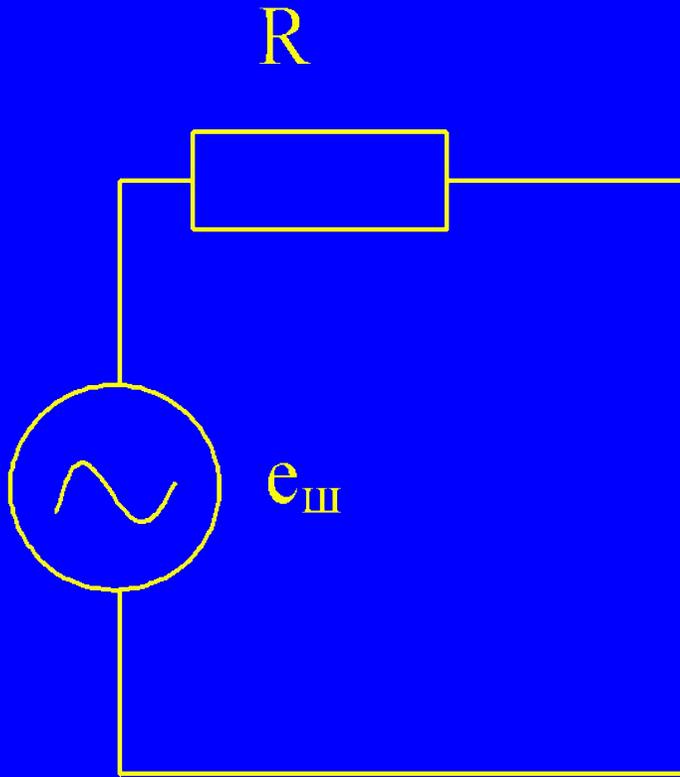
$$w = \frac{U}{U_{\text{ш}}^2} \exp\left(-\frac{U^2}{2U_{\text{ш}}^2}\right)$$

Наиболее  
вероятная  
количественная  
оценка шума –  
эффективное  
значение



# ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШУМОВЫЕ СХЕМЫ

Шумы резисторов



Формула Найквиста:

$$e_{ш}^2 = 4kTR\Delta f$$

$$i_{ш}^2 = 4kTG\Delta f$$

# Формула Найквиста

$$i_{\text{шн}} = \frac{e_{\text{ш}}}{R + R_{\text{н}}}$$

$$P_{\text{ш}} = i_{\text{шн}}^2 R_{\text{н}} = \frac{e_{\text{ш}}^2 R_{\text{н}}}{(R + R_{\text{н}})^2}$$

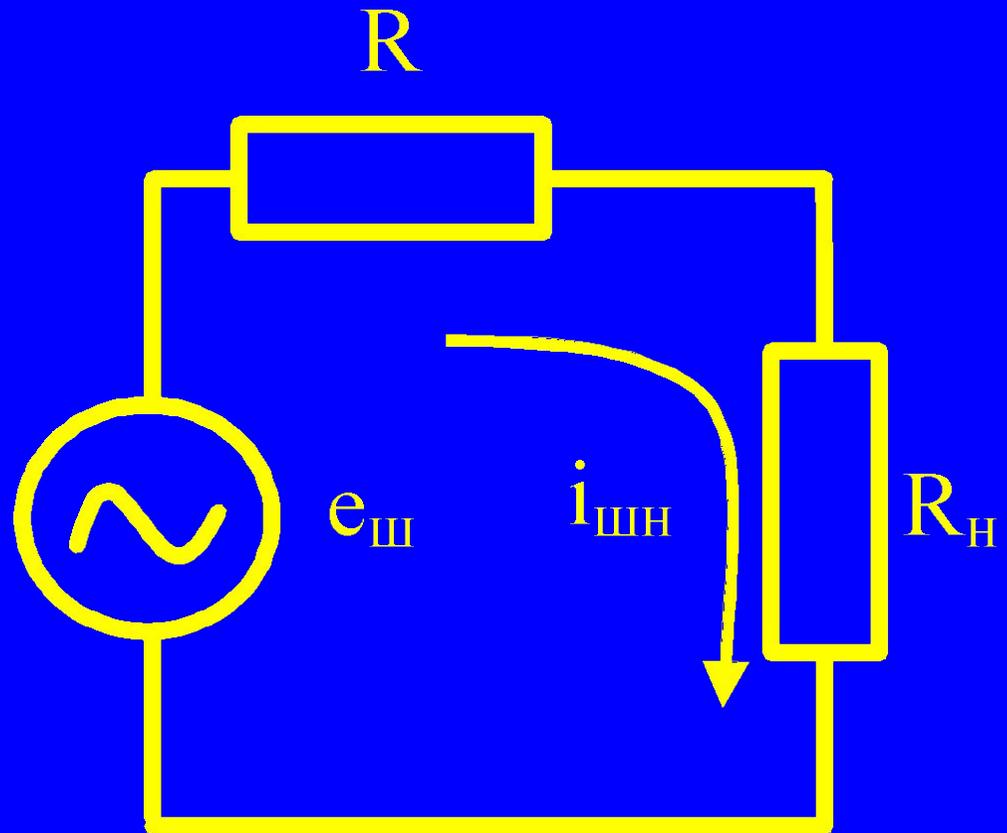
$$R = R_{\text{н}}$$

$$P_{\text{ш max}} = \frac{e_{\text{ш}}^2}{4R}$$

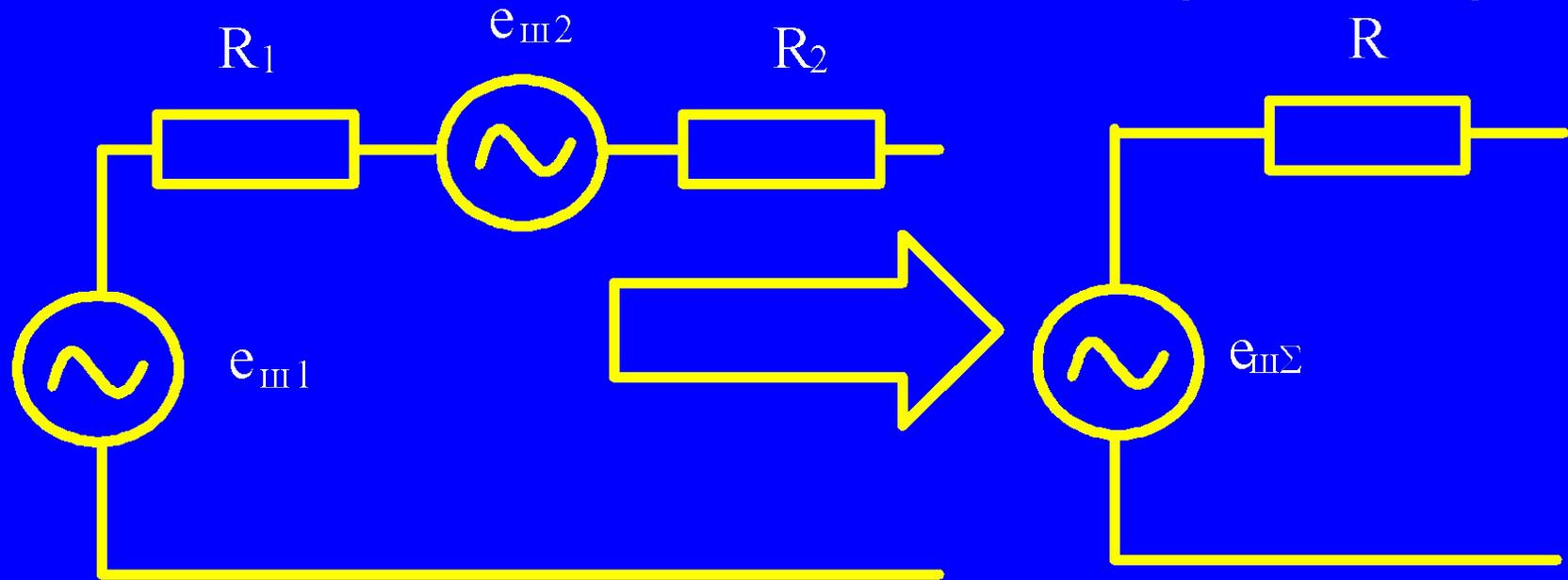
$$e_{\text{ш}}^2 = 4P_{\text{ш max}} R$$

$$P_{\text{ш. max}} = S \Delta f = kT \Delta f$$

$$e_{\text{ш}}^2 = 4kTR \Delta f$$



# Последовательное соединение резисторов



$$e_{шΣ} = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_{шi}^2} = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

$$R = \sum_{i=1}^n R_i$$

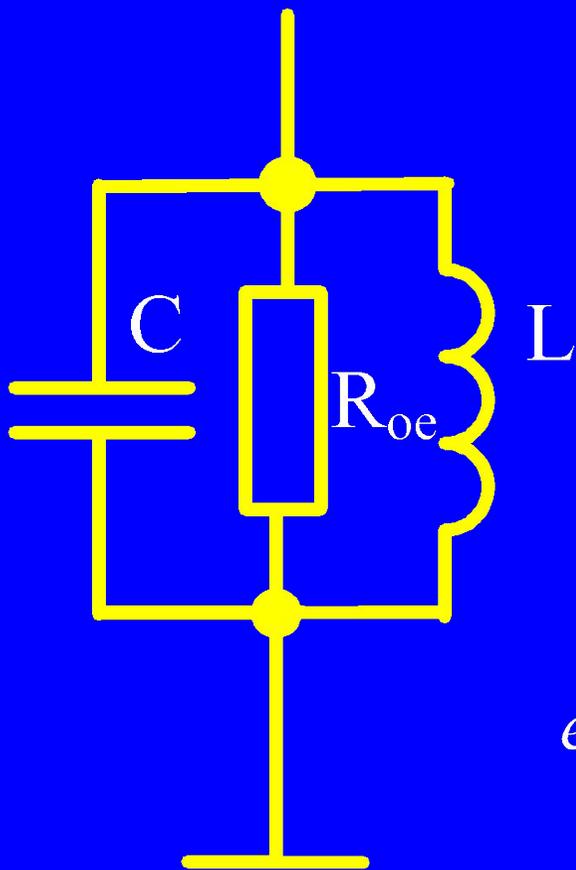
$$e_{шΣ}^2 = 4kT_1R_1\Delta f + 4kT_2R_2\Delta f + 4kT_3R_3\Delta f + \dots = 4kT_9R\Delta f$$

$$T_9 = \frac{T_1R_1}{R} + \frac{T_2R_2}{R} + \dots + \frac{T_nR_n}{R}$$

# Шумы колебательного контура

$$e_{ш}^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} \operatorname{Re} Z(f) df$$

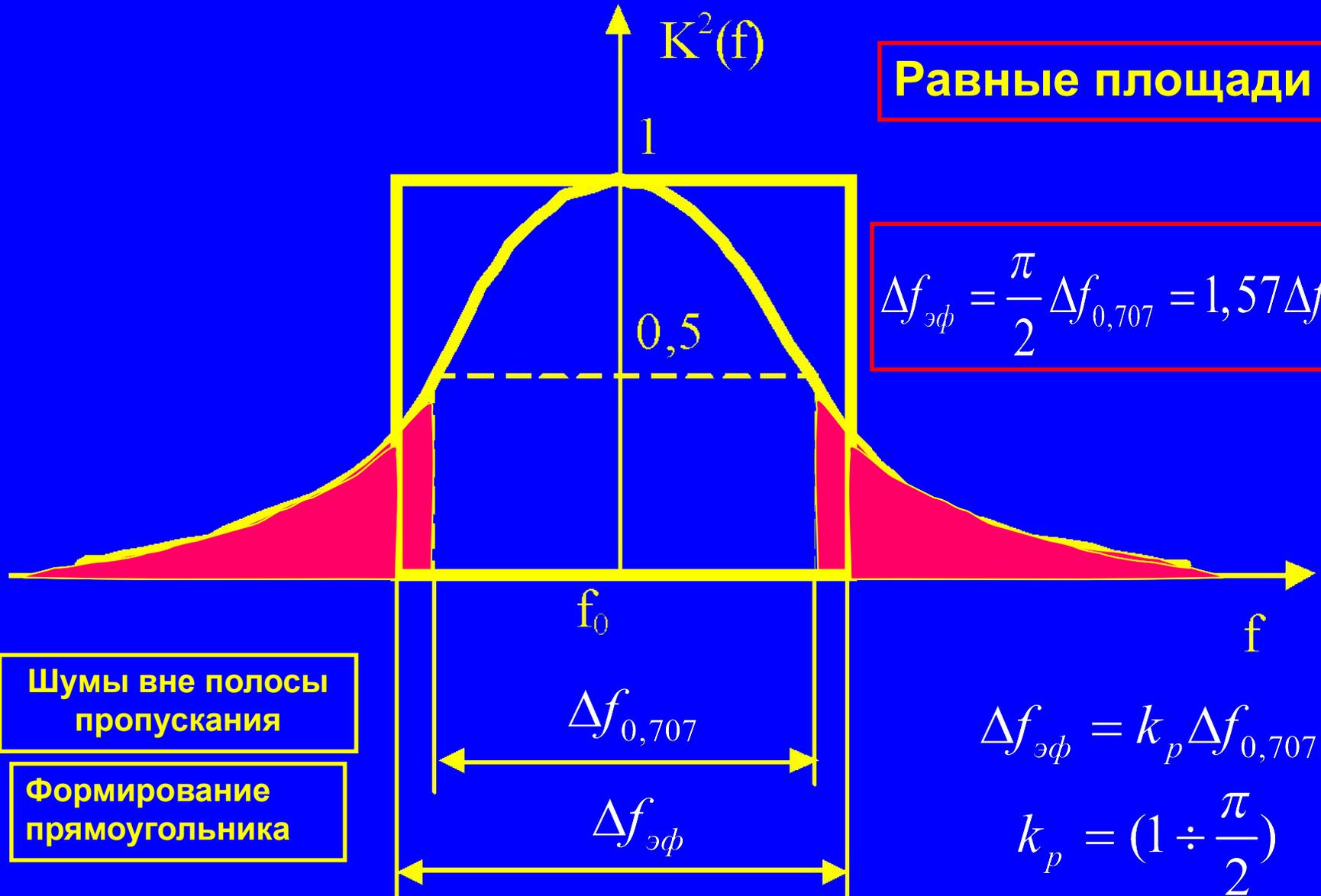
$$Z = \frac{\omega^2 L^2 R_{oe}}{R_{oe}^2 (1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 L^2} + jb;$$



$$\operatorname{Re}(Z) = \frac{R_{oe}}{1 + \frac{R_{oe}^2}{\omega^2 L^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2} = R_{oe} \frac{1}{1 + \xi^2}$$

$$e_{ш}^2 = 4kTR_{oe} \int_0^{\infty} \left( \frac{1}{1 + \xi^2} \right) df = 4kTR_{oe} \Delta f_{\phi}$$

# Эффективная шумовая полоса



Равные площади

$$\Delta f_{эф} = \frac{\pi}{2} \Delta f_{0,707} = 1,57 \Delta f_{0,707}$$

Шумы вне полосы пропускания

Формирование прямоугольника

$$\Delta f_{эф} = k_p \Delta f_{0,707}$$

$$k_p = \left(1 \div \frac{\pi}{2}\right)$$

# Шумы усилительных элементов

1. Тепловые шумы.
2. Дробовые шумы.
3. Фликкер-шумы .
4. Рекомбинационный шум.
5. Шумы флуктуации токораспределения.
6. Шумы, обусловленные инерционностью электронного потока.
7. Шумы лавинного умножения
8. Микроплазменные шумы
9. Взрывной шум
10. Шумы ионизации остатков газа
11. Шумы вторичной эмиссии

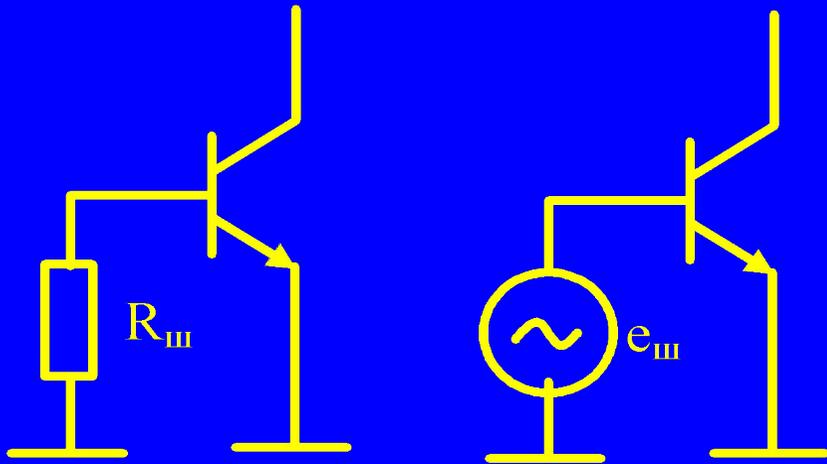
Дробовые шумы:  
формула Шоттки

$$i_{ш}^2 = 2eI_a \Delta f$$

Тепловые шумы:  
формула Найквиста

$$e_{ш}^2 = 4kTR \Delta f$$

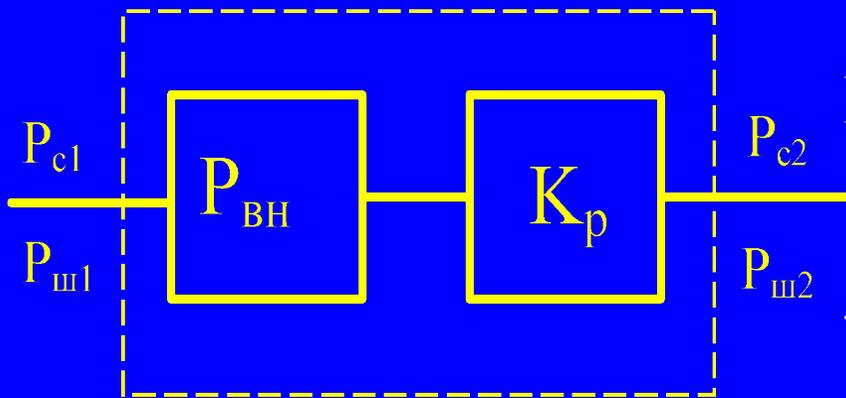
# Эквивалентные шумовые схемы



$$e_{ш}^2 = 4kTR_{ш}\Delta f$$

$$e_{ш}^2 = 4kT_{ш}R_{вх}\Delta f$$

$$K_{ш} = \frac{(c/u)_{вх}}{(c/u)_{вых}} = \frac{P_{с1}/P_{ш1}}{P_{с2}/P_{ш2}} = \frac{u2}{K_p P_{ш1}}$$



$$K_{ш} = \frac{R_{ш1} P + K_{вн} P}{R_{ш1} P} = 1 + \frac{e_{швн}^2}{2 P_{шс}} = 1 +$$

$$+ \frac{4kT_{ш}R_{вх}\Delta f}{4kTR_c\Delta f} = 1 + \frac{T_{ш}R_{вх}}{TR_c} = 1 + \frac{T_{ш}}{T} = 1 + t_{ш}$$

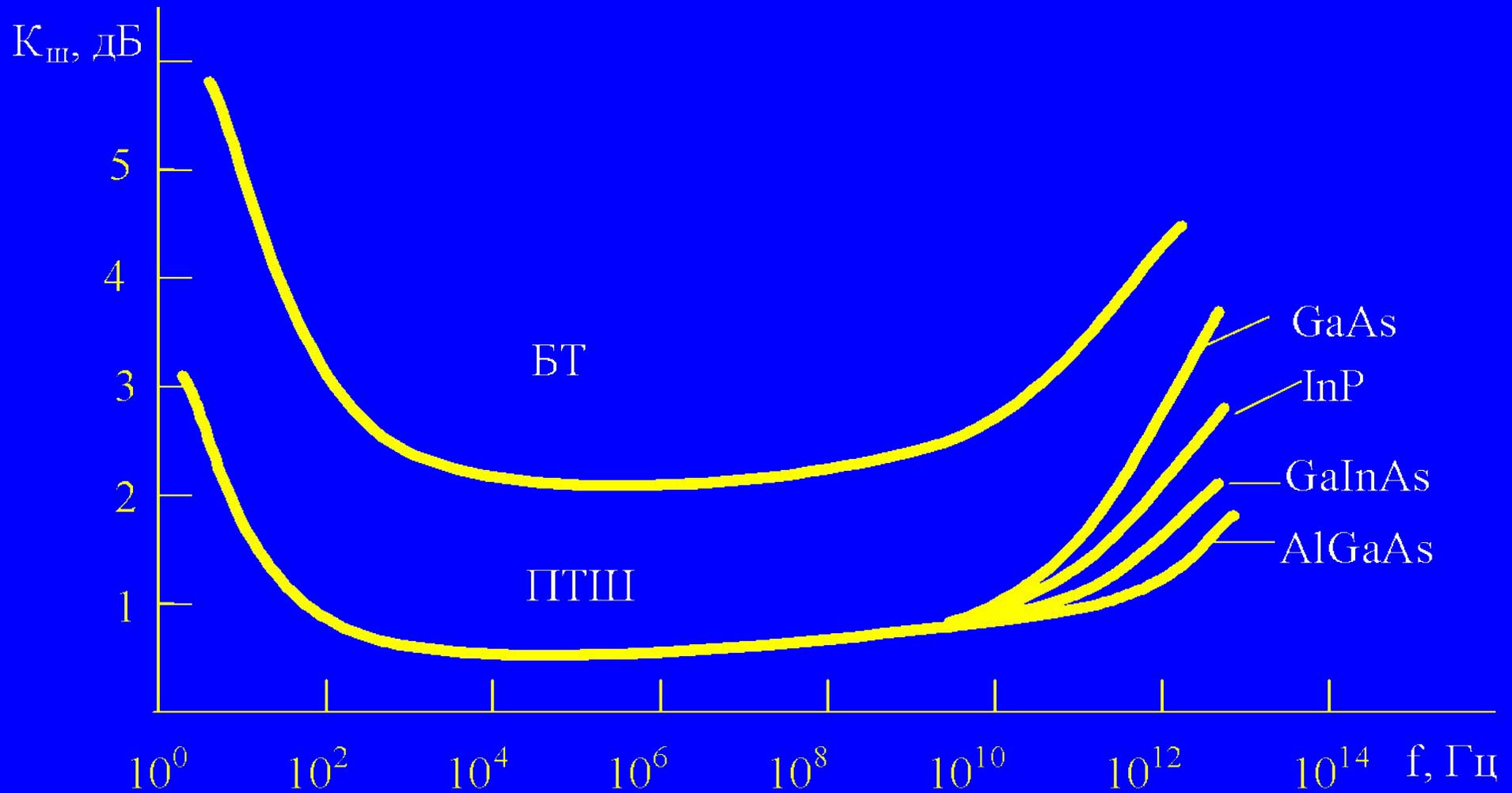
**Входная шумовая температура – определяет собственные шумы четырёхполюсника, приведенные к его входу**

$$T_{ш} = T(K_{ш} - 1)$$

**Выходная шумовая температура – определяет шумы на выходе четырёхполюсника**

$$T_{швых} = TK_{ш}K_p$$

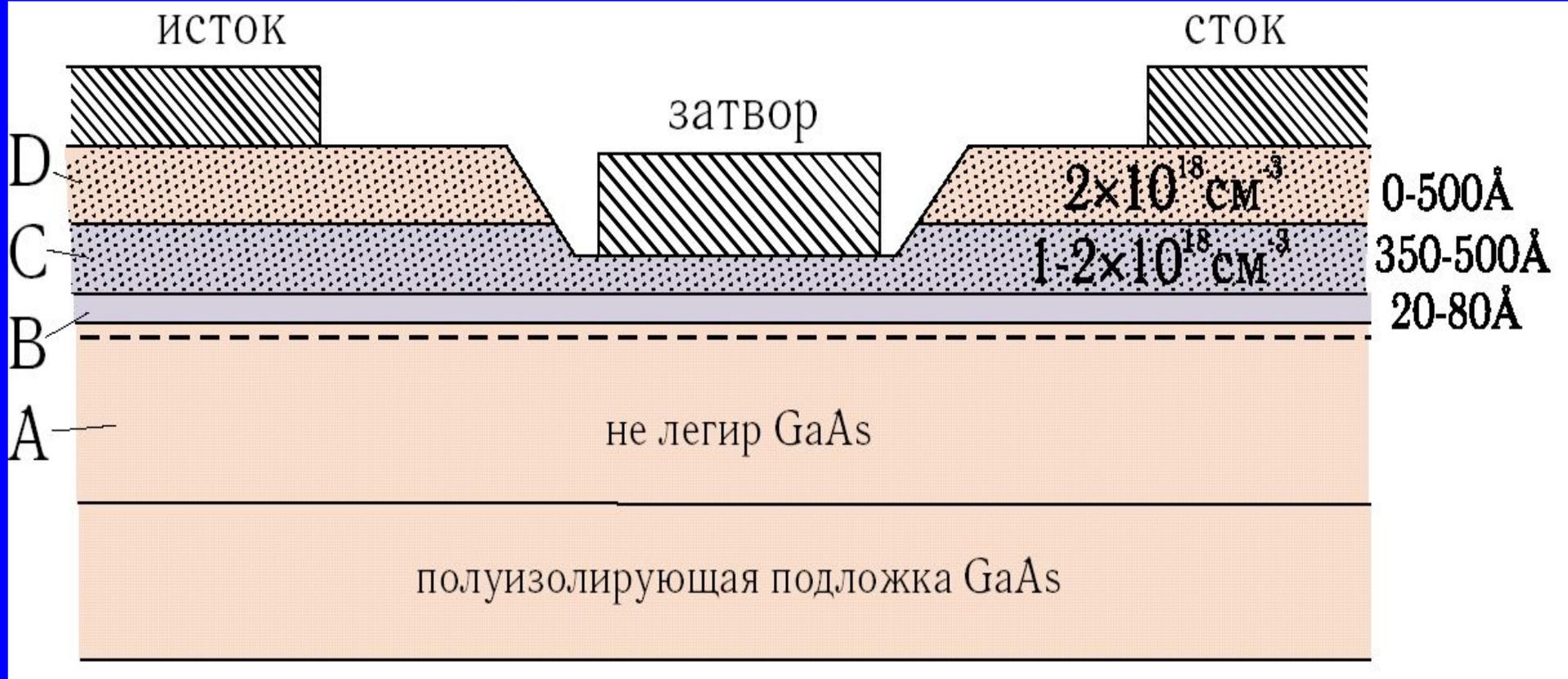
# Шумовые характеристики транзисторов



# HEMT транзисторы

1979 г. Такаши Мимуро (Fujitsu Laboratories)

High Electron Mobility Transistor



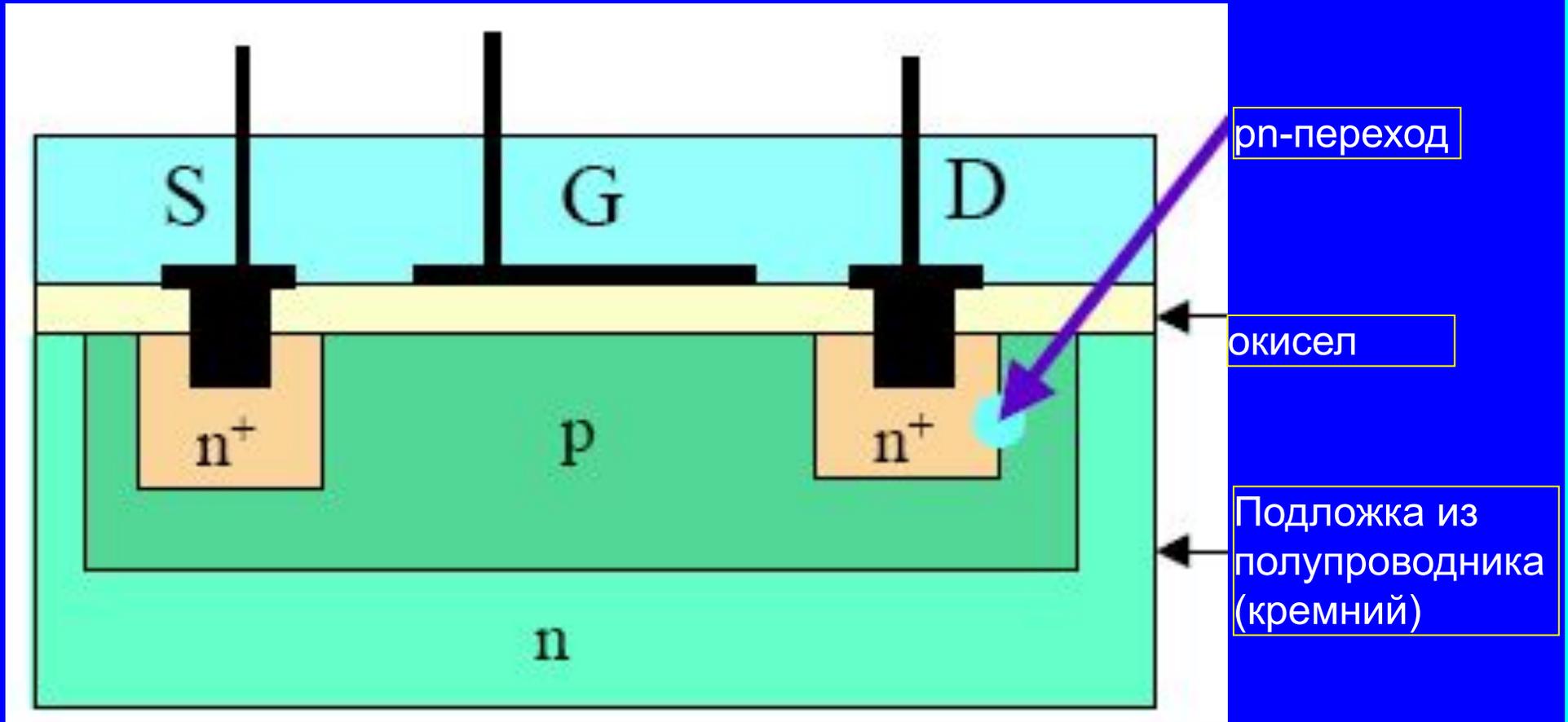
( A – нелегированный GaAs, B – спейсер нелегированный слой AlGaAs, C – барьерный слой –n+AlGaAs, D – контактный слой –n+GaAs).

# HEMT транзисторы

Тип	Производитель	Диапазон частот		Затвор, Физм.,		NF, дБ	Ga, дБ	Режим измерения		P1дБ, Режим измерения	
		ГГц		ГГц			Уси / Ic	дБм		Уси / Ic	
ATF-33143	Agilent	0,45 - 6		1600	2	0,5	15	4 В / 80 мА		+22	4 В / 80 мА
ATF-34143		0,45 - 6	800	2	0,5	17,5	4 В / 60 мА		+20	4 В / 60 мА	
ATF-38143		0,45 - 6	800	2	0,4	16	2 В / 10 мА		+12	2 В / 10 мА	
ATF-58143		0,45 - 6	-	2	0,5	17,7	4 В / 30 мА		+21	4 В / 30 мА	
ATF-36077		2 - 18	0,2 x 200	12	0,5	12	1,5 В/10 мА		+5	1,5 В/10 мА	
NE3210S01	NEC	до 18	0,2 x 160	12	0,35	13,5	2 В / 10 мА		-	-	
NE4210S01		до 18	0,2 x 160	12	0,5	13	2 В / 10 мА		-	-	
NE4211M01		до 18	160	12	0,75	12	2 В / 10 мА		-	-	
NE429M01		до 18	0,3 x 200	12	0,9	10	2 В / 10 мА		-	-	
NE34018		до 6	0,6 x 400	2	0,6	16	2 В / 5 мА		+15	3 В / 30 мА	
NE38018		до 6	0,6 x 800	2	0,55	14,5	2 В / 5 мА		+17...18	3 В / 30 мА	
FHC40LG	Fujitsu	до 12	0,15 x 280	4	0,3	15,5	2 В / 10 мА		-	-	
FHX05LG		до 18	0,25 x 200	12	0,9	10,5	2 В / 10 мА		-	-	
FHX13LG		до 18	0,15 x 200	12	0,45	13,0	2 В / 10 мА		-	-	
FHX35LG		до 18	0,25 x 280	12	1,2	10	3 В / 10 мА		-	-	
MGF4953	Mitsubishi	до 18	-	12	0,4	13,5	2 В / 10 мА		-	-	
MGF4954		до 18	-	12	0,6	13,5	2 В / 10 мА		-	-	

# MOSFET транзисторы

Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



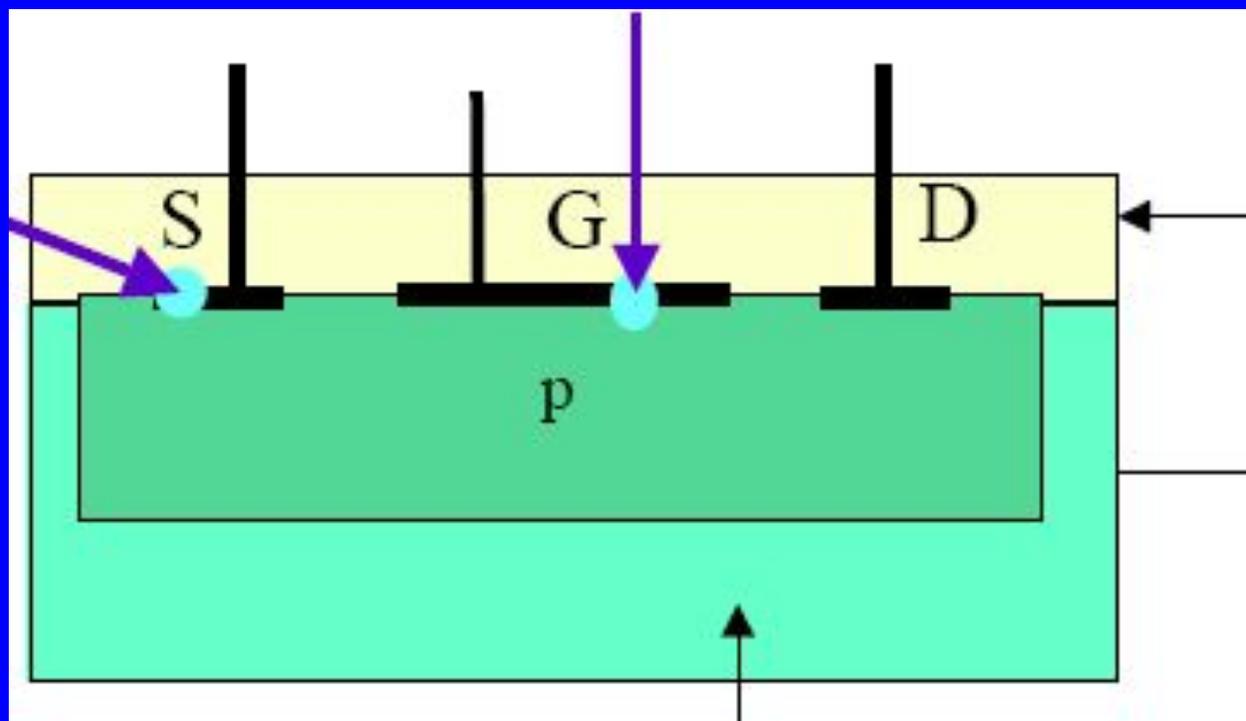
Тип	Фирма- произв.	G, дБ	NF, Уси, В	Режим измерения Iс, мА	f, мГц	I <sub>dss</sub> , мА	C вх., пФ	C вых., пФ	
S525T	Vishay	25	1,0	10	10	200	5...14	2,7	1,0
BF543	Infineon	22	1,0	10	4	200	2...6	2,7	0,9
BF999	Infineon	25	1,0	10	10	200	5...18	2,5	1,0

# MESFET транзисторы

Metal-Semiconductor Field Effect Transistor

Выпрямляющий  
контакт металл-  
полупроводник

Омический  
контакт металл-  
полупроводник



окисел

Подложка из  
полупроводника  
(AsGa)

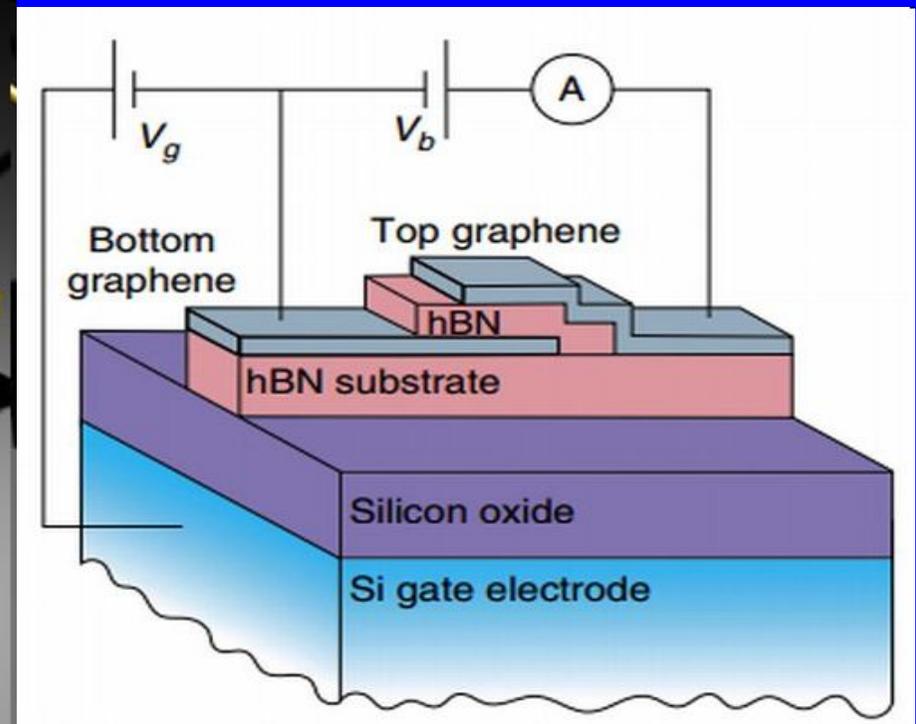
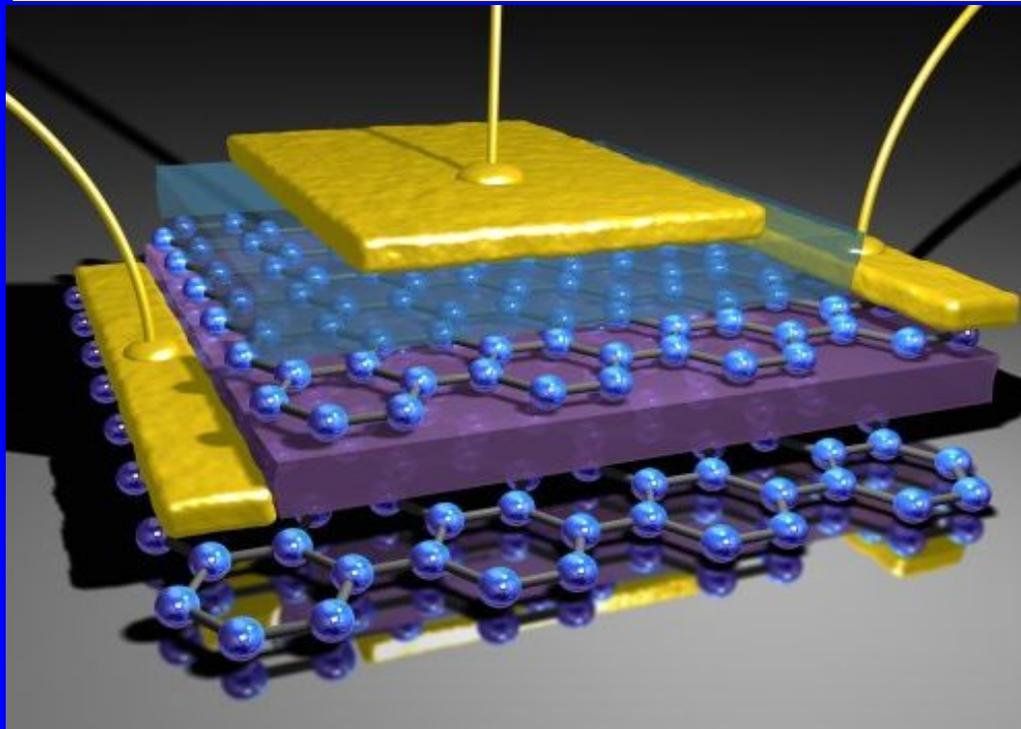
# MESFET транзисторы

Тип	Фирма	Диапазон частот, ГГц	Физм., ГГц	NE, дБ	Ga, дБ	Режим измерения	P1дБ, дБм	Режим измерения
NE71383B	NEC	до 18	12	1,6	9,5	3 В / 10 мА	+14,5	3 В / 30 мА
NE722S01		до 12	4	0,9	12	3 В / 10 мА	+15	3 В / 30 мА
FSU01LG	Fujitsu	до 4	2	0,55	18,5	3 В / 10 мА	+20	6 В / 40 мА
FSU02LG		до 4	2	1,5	17,5	3 В / 20 мА	+23	6 В / 80 мА
FSX017WF		до 12	8	2,5	10,5	3 В / 10 мА	+21,5	8 В / 40 мА
FSX027WF		до 12	8	2,5	9,5	3 В / 30 мА	+24,5	8 В / 80 мА
FH101	WJ	до 3	0,8	1,2	18	3,3 В / 70 мА	+18	5 В / 140 мА
FH1		до 3	0,8	1,2	18	3,3 В / 70 мА	+21	5 В / 140 мА
FHF1		3 - 6	3	2,4	12	3,3 В / 70 мА	+21	5 В / 140 мА

# Графеновые транзисторы

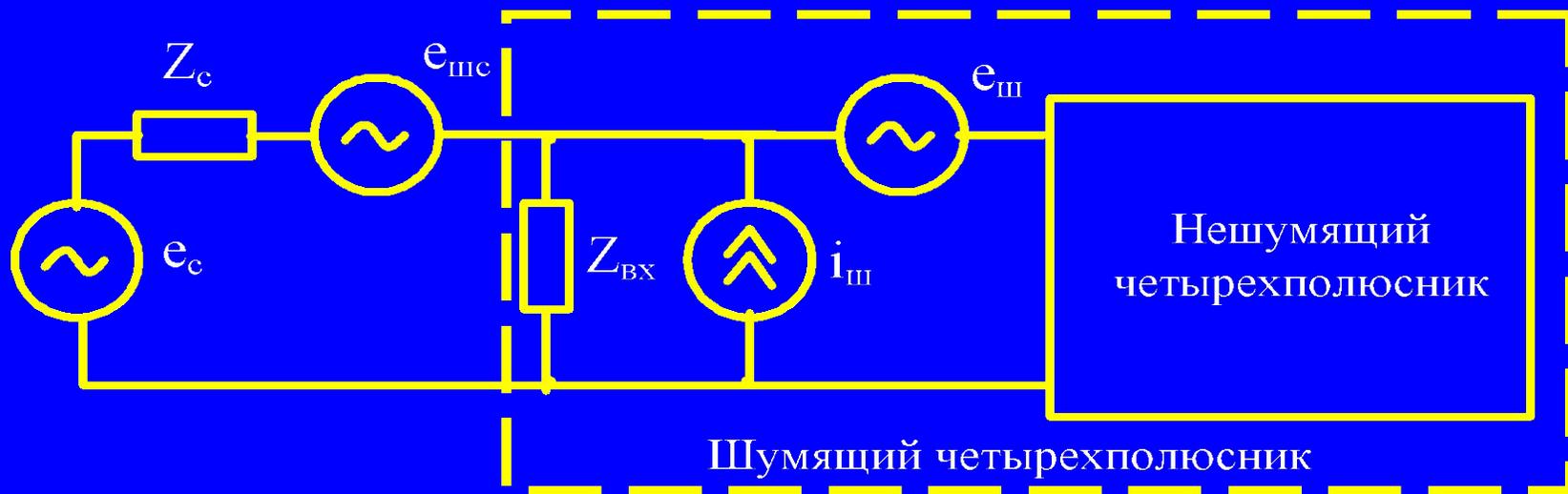
Графен (англ. graphene) — двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом

Самая высокая подвижность электронов среди всех известных материалов делает его перспективным материалом для возможной замены кремния в интегральных микросхемах.



За «передовые опыты с двумерным материалом — графеном» А. К. Гейму и К. С. Новосёлову была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год

# Метод шумящего четырехполюсника



$$i_{ш} = 4kTG_{ш} \Delta f \quad e_{ш} = 4kTR_{ш} \Delta f$$

$$\begin{aligned}
 U_{ш\Sigma}^2 &= \overline{U_{шш} U_{шс}^*} = \overline{(e_{шс} + e_{ш} + i_{ш} Z_{с}) (e_{шс}^* + e_{ш}^* + i_{ш}^* Z_{с}^*)} = \\
 &= \overline{e_{шс}^2} + \overline{e_{ш}^2} + \overline{i_{ш}^2 |Z_{с}|^2} + \overline{e_{ш} i_{ш}^* Z_{с}^*} + \overline{e_{шс}^* i_{ш} Z_{с}} = \\
 &= \overline{e_{шс}^2} + \overline{e_{ш}^2} + \overline{i_{ш}^2 |Z_{с}|^2} + 2\text{Re}(\overline{e_{шс}^* i_{ш} Z_{с}})
 \end{aligned}$$

$$\overline{i_{ш}^2} = \overline{i_{шш} + i_{шз}} = \overline{i_{шш}} + \overline{i_{шз}} \quad U_{ш\Sigma}^2 = \overline{e_{шс}^2} + \overline{e_{ш}^2} + \overline{i_{ш}^2 |Z_{с}|^2} + 2\text{Re}(\overline{e_{шс}^* i_{ш} Z_{с}})$$

# Метод шумящего четырехполюсника

$$U_{\Sigma}^2 = \overline{U_{\text{ш}} U_{\text{ш}}^*} = \overline{(e_{\text{ш}} + e_{\text{с}} + i Z') [e_{\text{ш}}^* + e_{\text{с}}^* + i^* (Z')^*]}$$

$$Z = \text{Re} Z + j \text{Im} Z = \frac{1}{Y} = \frac{g - jb}{(g + jb)(g - jb)} = \frac{g - jb}{g^2 + jb^2} = \frac{\text{Re} Y}{Y \cdot Y^*} - j \frac{\text{Im} Y}{Y \cdot Y^*}$$

$$U_{\text{ш}\Sigma}^2 = \overline{(e_{\text{шс}} + e_{\text{ш}} + i_{\text{ш}} \frac{1}{Y_{\text{вх}} + Y}) (e_{\text{шс}}^* + e_{\text{ш}}^* + i_{\text{ш}}^* \frac{1}{Y_{\text{вх}}^* + Y^*})} =$$

$$= \overline{e_{\text{шс}}^2 + e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 \frac{1}{|Y_{\text{вх}} + Y|^2} + e_{\text{ш}} i_{\text{ш}}^* \frac{1}{Y_{\text{вх}}^* + Y^*} + e_{\text{шс}}^* i_{\text{ш}} \frac{1}{Y_{\text{вх}} + Y}}$$

$$= \overline{e_{\text{шс}}^2 + e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 \frac{1}{|Y_{\text{вх}} + Y|^2} + 2 \text{Re}(e_{\text{ш}}^* i_{\text{ш}} \frac{1}{Y_{\text{вх}} + Y})}$$

$$e_{\text{ш}} i_{\text{ш}}^* + i_{\text{ш}} e_{\text{ш}}^* = i_{\text{шн}} + i_{\text{шк}} \text{кор}$$

$$U_{\text{ш}\Sigma}^2 = \overline{e_{\text{шс}}^2 + e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 \frac{1}{|Y_{\text{вх}} + Y|^2} + 2 \text{Re}(i_{\text{шн}} + i_{\text{шк}} \text{кор} \frac{1}{Y_{\text{вх}} + Y})}$$

# Метод шумящего четырехполюсника

$$\begin{aligned}
 U_{\text{шс}}^2 &= i_{\text{шс}}^2 Z_{\text{вх}}^2 = \frac{e_{\text{шс}}^2}{(Z_{\text{вх}} + Z_c)^2} \cdot Z_{\text{вх}}^2 = \frac{4kT \operatorname{Re} Z_c \Delta f}{(Z_{\text{вх}} + Z_c)^2} \cdot Z_{\text{вх}}^2 \cdot \frac{Z_c^2}{Z_c^2} = \\
 &= \frac{4kT \operatorname{Re} Z_{\text{вх}} \Delta f}{Z_{\text{вх}}^2} \cdot \frac{Z_c^2 Z_c^2}{(Z_c + Z_c)^2} = \frac{4kT \operatorname{Re} Y_c \Delta f}{Z_c^2 \cdot Y_{\text{вх}} \cdot Y_c^*} \cdot \frac{1}{(Y_c + Y_{\text{вх}})^2} = \frac{4kT g_c \Delta f}{|Y_{\text{вх}} + Y_c|^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\text{ш}} &= 1 + \frac{U_{\text{ш}\Sigma}^2}{U_{\text{шс}}^2} = 1 + \frac{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 \frac{1}{|Y_{\text{вх}} + Y_c|^2} + 2 \operatorname{Re}(e_{\text{ш}}^* i_{\text{ш}} \frac{1}{Y_{\text{вх}} + Y_c})}{4kT \operatorname{Re} Y_c \Delta f \cdot \frac{1}{|Y_{\text{вх}} + Y_c|^2}} \\
 &= 1 + \frac{4kT \Delta f \cdot \left\{ R_{\text{ш}} \cdot |Y_c + Y_{\text{вх}}|^2 + G_{\text{ш}} + 2 \operatorname{Re}[R_{\text{ш}} \cdot Y_{\text{кор}} (Y_c^* + Y_{\text{вх}}^*)] \right\}}{4kT \Delta f \cdot \operatorname{Re} Y_c} = \\
 &= 1 + \frac{R_{\text{ш}} \cdot |Y_c + Y_{\text{вх}}|^2 + G_{\text{ш}} + 2 \operatorname{Re}[R_{\text{ш}} \cdot Y_{\text{кор}} (Y_c^* + Y_{\text{вх}}^*)]}{\operatorname{Re} Y_c}
 \end{aligned}$$

# Минимальный коэффициент шума

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{R_{\text{ш}} |Y_{\text{вх}} + Y_{\text{с}}|^2 + G_{\text{ш}} + 2\text{Re}[R_{\text{ш}} Y_{\text{кор}} (Y_{\text{с}}^* + Y_{\text{вх}}^*)]}{g_{\text{с}}}$$

$$\frac{\partial K_{\text{ш}}}{\partial b_{\text{с}}} = 0$$

$$\frac{\partial K_{\text{ш}}}{\partial g_{\text{с}}} = 0$$

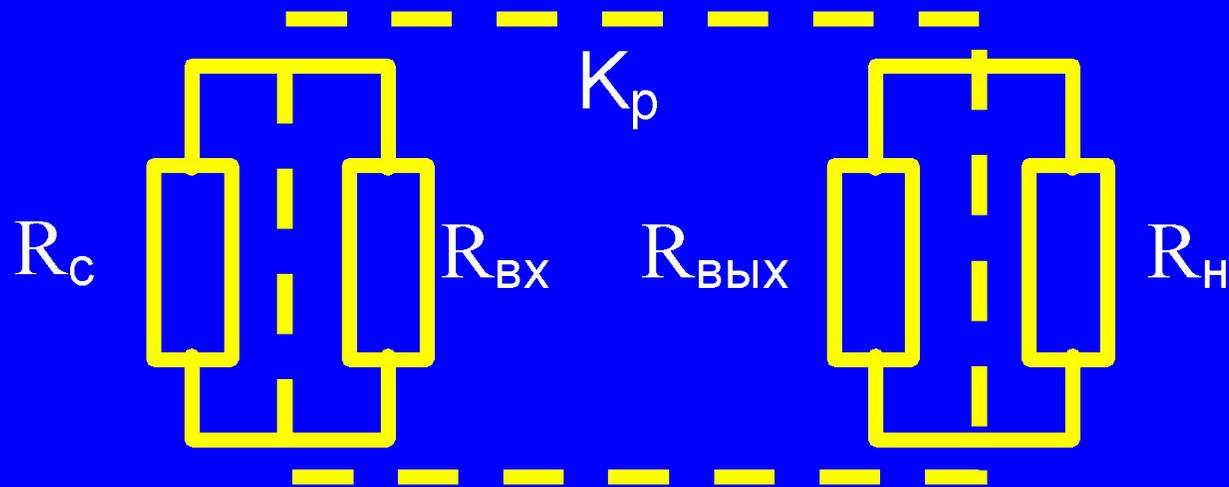
$$b_{\text{опт}} = -(b_{\text{кор}} + b_{\text{вх}})$$

$$g_{\text{с опт}} = \sqrt{g_{\text{вх}}^2 + \frac{G_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} + 2g_{\text{вх}} g_{\text{кор}} - b_{\text{кор}}^2}$$

При  $g_{\text{вх}} = 0$ :

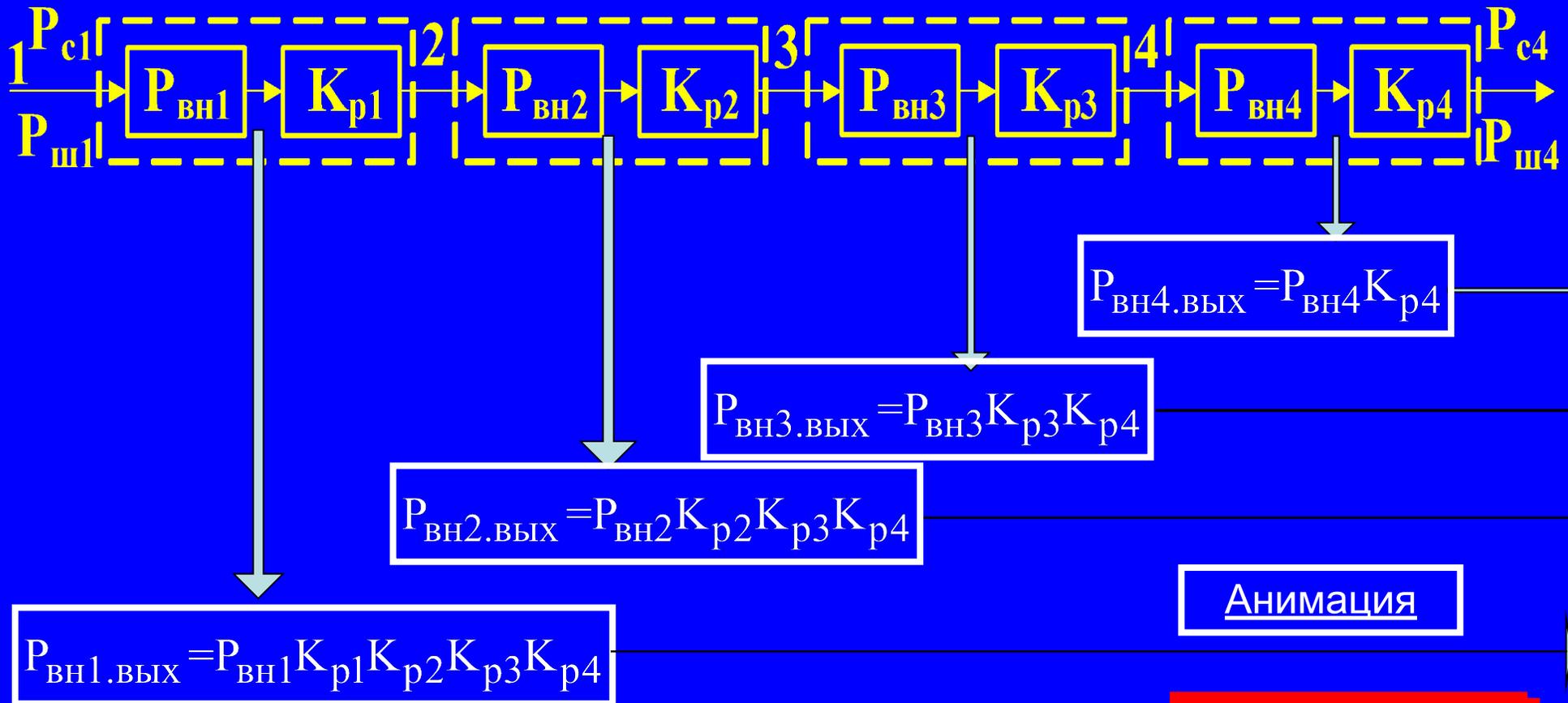
$$K_{\text{ш мин}} = 1 + 2R_{\text{ш}} (g_{\text{кор}} + g_{\text{с опт}} + g_{\text{вх}}) = 1 + 2R_{\text{ш}} \left( g_{\text{кор}} + \sqrt{\frac{G_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} - b_{\text{кор}}^2} \right)$$

# Коэффициент шума пассивного четырёхполюсника



$$K_{ш} = \frac{P_{швых}}{P_{швх} K_p} = \frac{kT \Delta f}{kT \Delta f K_p} = \frac{1}{K_p}$$

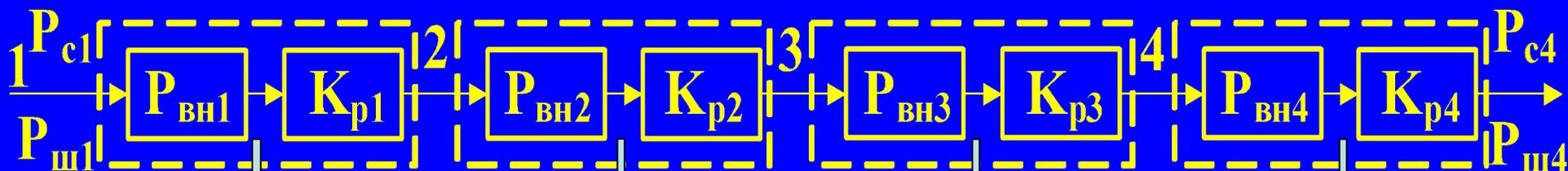
# Каскадное соединение четырехполюсников



**В результате при одинаковых уровнях собственных значений коэффициентов передачи суммарные шумы тракта определяются в основном шумами первого**

**Шум 4-го каскада на выходе тракта**

# Каскадное соединение четырехполюсников



$$P_{\text{вн1}} = kT_{\text{ш1}}\Delta F_{\text{эф}}$$

$$P'_{\text{вн2}} = \frac{kT_{\text{ш2}}\Delta F_{\text{эф}}}{K_{\text{р1}}}$$

$$P'_{\text{вн3}} = \frac{kT_{\text{ш3}}\Delta F_{\text{эф}}}{K_{\text{р1}}K_{\text{р2}}}$$

$$P'_{\text{вн4}} = \frac{kT_{\text{ш4}}\Delta F_{\text{эф}}}{K_{\text{р1}}K_{\text{р2}}K_{\text{р3}}}$$

**Шум 4-го каскада**

е при больших значениях коэффициентов передачи суммарные шумы тракта определяются в основном шумами первого каскада

$$P_{\text{ш}\Sigma} = P_{\text{вн1}} + P'_{\text{вн2}} + P'_{\text{вн3}} + P'_{\text{вн4}}$$

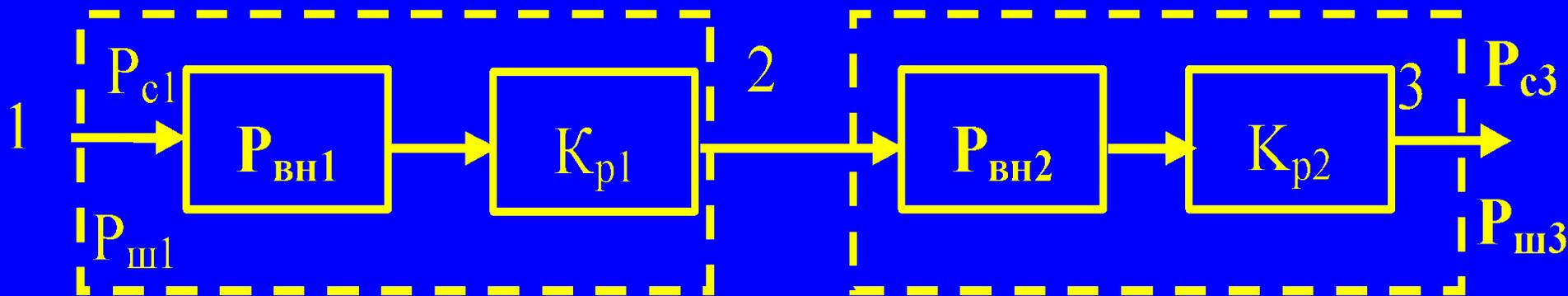
$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{P_{\text{ш}\Sigma}}{P_{\text{ш1}}}$$

Анимация

# Каскадное соединение четырехполюсников

$$\begin{aligned}
 K_{\sigma} &= \frac{P_{\sigma \Sigma} \hat{\alpha} \delta}{P_{\sigma 1}} = \\
 &= \frac{q_1 k T_{\hat{1}} \Delta F_{y\delta} + q_1 k T_{\sigma 1} \Delta F_{y\delta} + \frac{q_2 k T_{\sigma 2} \Delta F_{y\delta}}{K_{p1}} + \frac{q_3 k T_{\sigma 3} \Delta F_{y\delta}}{K_{p1} K_{p2}} + \frac{q_4 k T_{\sigma 4} \Delta F_{y\delta}}{K_{p1} K_{p2} K_{p3}}}{q_1 k T_{\hat{1}} \Delta F_{y\delta}} = \\
 &= 1 + \frac{T_{\sigma 1}}{T_{\hat{1}}} + \frac{q_2 T_{\sigma 2}}{q_1 K_{p1} T_{\hat{1}}} + \frac{q_3 T_{\sigma 3}}{q_1 K_{p1} K_{p2} T_{\hat{1}}} + \frac{q_4 T_{\sigma 4}}{q_1 K_{p1} K_{p2} K_{p3} T_{\hat{1}}} = \\
 &= 1 + \frac{1}{T_{\hat{1}}} \left( T_{\sigma 1} + \frac{q_2 T_{\sigma 2}}{q_1 K_{p1}} + \frac{q_3 T_{\sigma 3}}{q_1 K_{p1} K_{p2}} + \frac{q_4 T_{\sigma 4}}{q_1 K_{p1} K_{p2} K_{p3}} \right) = 1 + \frac{T_{\sigma \Sigma}}{T_{\sigma}} = \\
 &= 1 + \frac{1}{T_{\hat{1}}} \left( (\hat{E}_{\sigma 1} - 1) T_{\hat{1}} + \frac{(\hat{E}_{\sigma 2} - 1) T_{\hat{1}}}{K_{p01}} + \frac{(\hat{E}_{\sigma 3} - 1) T_{\hat{1}}}{K_{p01} K_{p02}} + \frac{(\hat{E}_{\sigma 4} - 1) T_{\hat{1}}}{K_{p01} K_{p02} K_{p03}} \right) = \\
 &= \hat{E}_{\sigma 1} + \frac{(\hat{E}_{\sigma 2} - 1)}{K_{p01}} + \frac{(\hat{E}_{\sigma 3} - 1)}{K_{p01} K_{p02}} + \frac{(\hat{E}_{\sigma 4} - 1)}{K_{p01} K_{p02} K_{p03}}.
 \end{aligned}$$

# Каскадное соединение четырёхполюсников



$$K_{ш} = K_{ш1} + \frac{K_{ш2} - 1}{K_{p1}} + \frac{K_{ш3} - 1}{K_{p1} K_{p2}} + \dots + \frac{K_{ши} - 1}{K_{p1} \dots K_{poi-1}}$$

$$T_{ш} = T_{ш1} + \frac{T_{ш2}}{K_{p1}} + \frac{T_{ш3}}{K_{p1} K_{p2}} + \dots + \frac{T_{ши}}{K_{p1} \dots K_{poi-1}}$$

$$K_{ш} = K_{ш1} \frac{\Delta f_{\varphi1\varphi2}}{\Delta f_{\varphi}} + \frac{K_{ш2} - 1}{K_{p1}} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\varphi}} + \frac{K_{ш3} - 1}{K_{p1} K_{p2}} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\varphi}} + \dots + \frac{K_{ши} - 1}{K_{p1} \dots K_{poi-1}} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\varphi}}$$

$$K_{poi} = K_{pi} \frac{q_{вх}}{q_{вх1}}$$

$$K_{ш} = 1 + \frac{P_{внi}}{P_{шс}}$$

## Связь коэффициента шума и чувствительности

$$K_{ш} = \frac{P_c / P_{шс}}{P_{свых} / P_{швых}} \quad \gamma = \frac{P_{свых}}{P_{швых}}$$

$$P_c = P_{c \min} = \gamma P_{шс} K_{ш} = \gamma k T_0 \Delta f_{эф} K_{ш}$$

$$P_{c \min} = \gamma k T_{ш\Sigma} \Delta f_{эф}$$

$$T_{ш\Sigma} = T_0 K_{ш} = T_0 + T_{ш}$$

# Расчет реальной чувствительности



$$K_{ш\Sigma} = K_{шА} + \frac{K_{шф} - 1}{K_{pA}} + \frac{K_{шпр} - 1}{K_{pA} K_{pф}} = 1 + \frac{T_A}{T} + \frac{1}{K_{pф}} - 1 + \frac{K_{шпр}}{K_{pф}} - \frac{1}{K_{pф}} = \frac{T_A}{T} + \frac{K_{шпр}}{K_{pф}}$$

$$K_{\Sigma} = 1 + \frac{T_{ш\Sigma}}{T} = \frac{T_A}{T} + \frac{K_{шпр}}{K_{pф}} \quad \longrightarrow \quad T_{ш\Sigma} = T_A + T \left( \frac{K_{шпр}}{K_{pф}} - 1 \right)$$

$$P_{c\min} = \gamma k T_{ш\Sigma} \Delta f_{\text{эф}} = \gamma k \left[ T_A + T \left( \frac{K_{шпр}}{K_{pф}} - 1 \right) \right] \Delta f_{\text{эф}}$$

$$K_{шпр\text{доп}} \leq K_{pф} \left( \frac{P_{c\min}}{\gamma k T \Delta f_{\text{эф}}} - t_A + 1 \right)$$

$$P_{c\min} = \frac{E_{c\min}^2}{4R_A}$$

$$E_{c\min} R = \sqrt{4k T_{ш\Sigma} \Delta f_{\text{эф}} \gamma}$$