

НИУ МЭИ  
Кафедра Полупроводниковой электроники

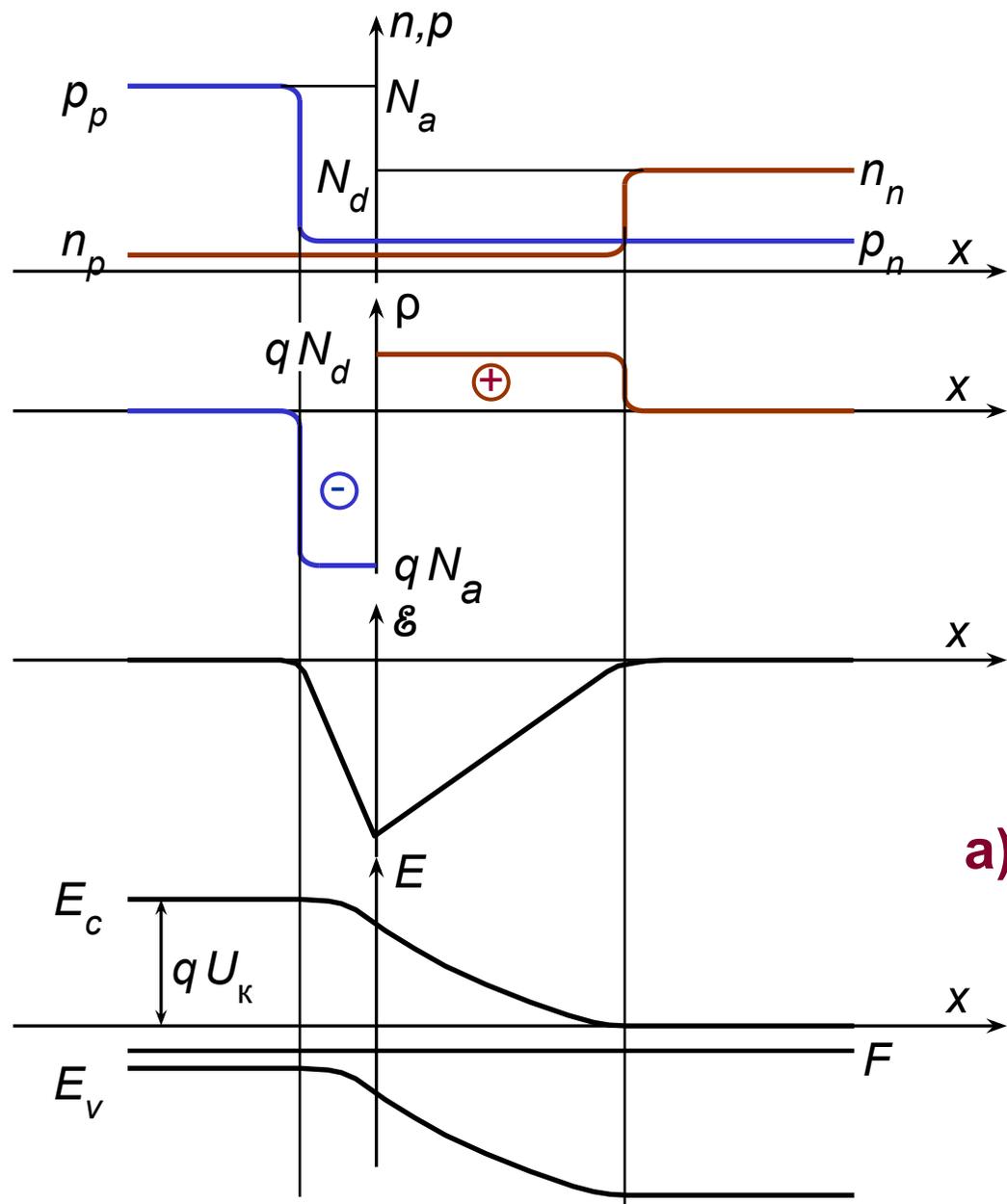


**Дисциплина:**  
**Полупроводниковые СВЧ приборы**

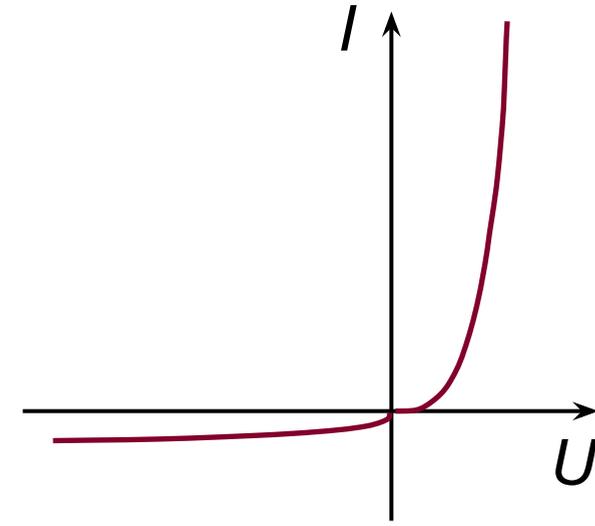
**Тема 2.**  
**Диоды с переменной емкостью**

**Рис. 8а**

## Ступенчатый $pn$ -переход



а)



б)

$$I \approx I_s \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right); \quad N_a \gg N_d$$

$$C(U) \approx S \left[ \frac{\epsilon \epsilon_0 q N_d}{2(U_k + U_0)} \right]^{1/2}$$

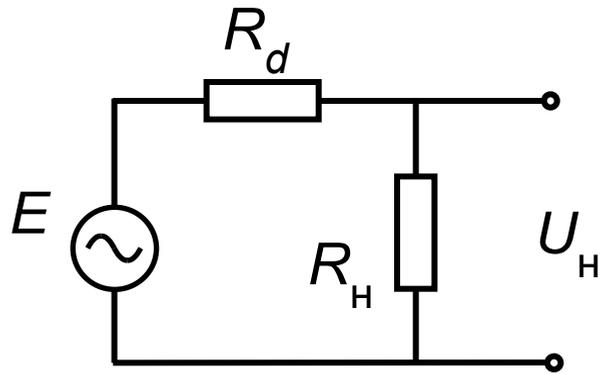
Рис. 9

## Типы диодов с переменной емкостью

Название	Назначение	Типичные значения емкости (пФ)
Параметрический диод	Усиление слабых сигналов	0,01 – 0,1
Варактор (умножительный диод)	Умножение частоты	0,1 – 1
Варикап (настроечный диод)	Перестройка частоты; частотная модуляция	1 – 10

Рис. 9в

## Усиление с помощью двухполюсника



$$U = E \frac{R_H}{R_H + R_d}$$

$$U > E (?) \Rightarrow \boxed{R_d < 0}$$

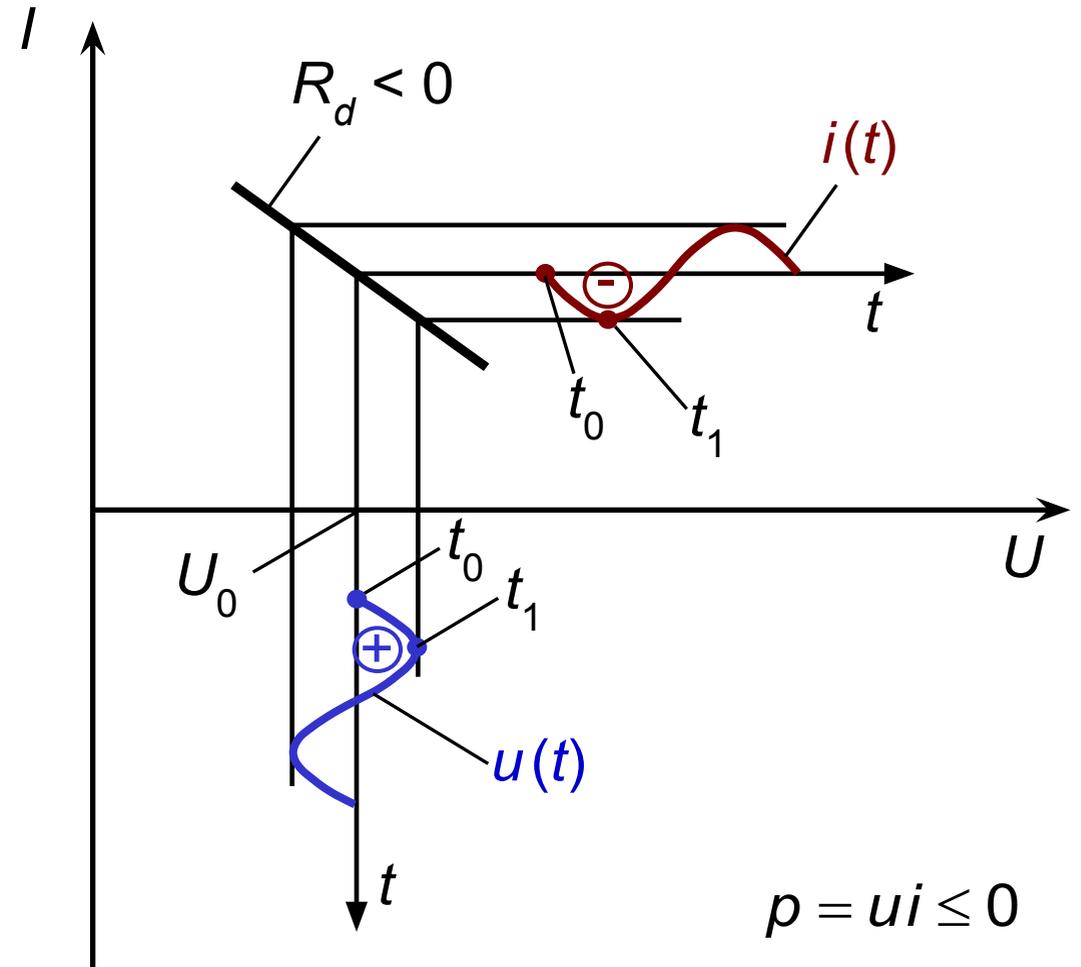
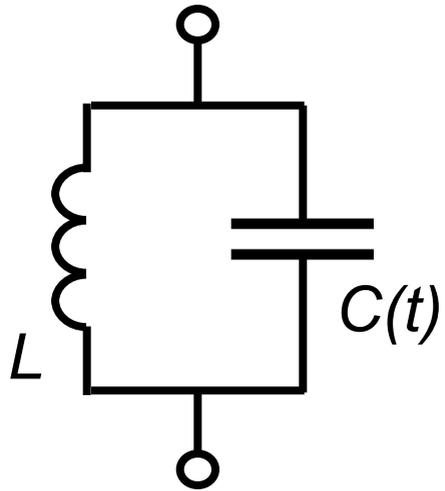
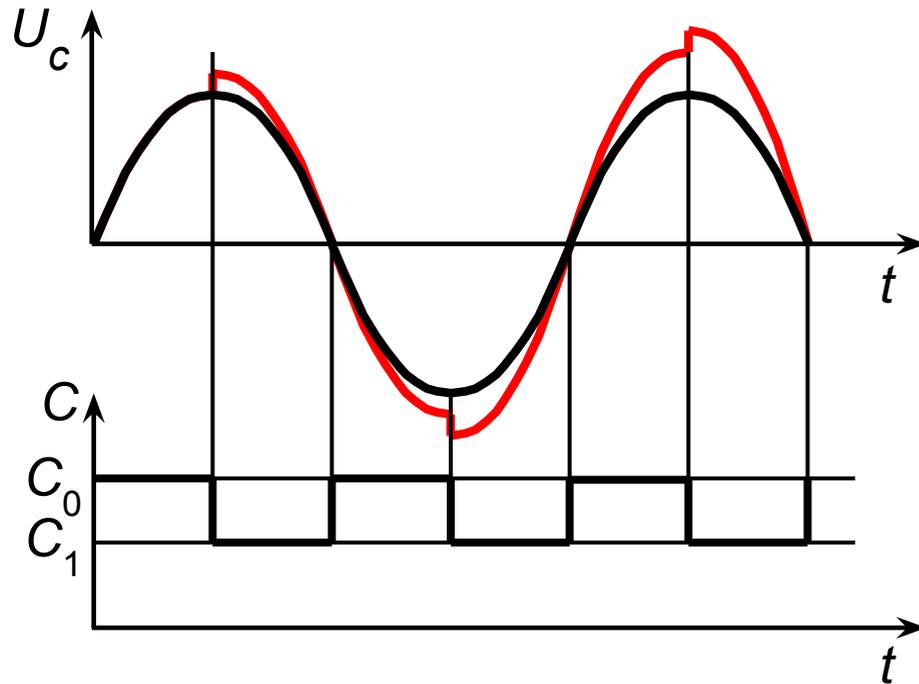


Рис. 9г

## Параметрический диод (модель)



a)



б)

$$Q = CU; W = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

$$C_1 = C_0 - \Delta C$$

$$\Delta t \rightarrow 0; \Delta Q = I \cdot \Delta t \rightarrow 0$$

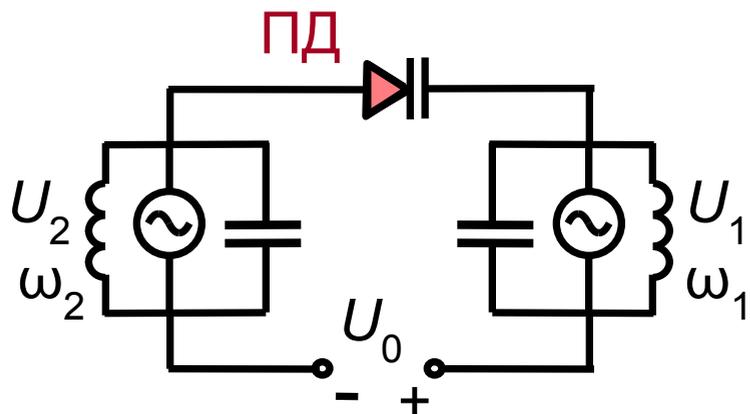
$$\Delta W = W_1 - W_0 = \frac{Q^2}{2C_1} - \frac{Q^2}{2C_0}$$

$$\Delta C \ll C_0; C_1 \approx C_0$$

$$\Delta W \approx \frac{Q^2}{2C_0^2} \Delta C > 0$$

Рис. 10

## Усиление с помощью ПД в двухконтурной схеме



$$u = U_0 + u_1; \quad u_1 \ll U_0;$$

$$u_1 = U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2);$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial u} \frac{du}{dt} = C(u) \frac{du}{dt};$$

$$i = \left( C_0(U_0) + \frac{\partial C}{\partial u} \Big|_{U_0} u_1 + \dots \right) \frac{du}{dt};$$

$$i = i_{C_0} + i'$$

Допущения:  $N_a \gg N_d$ ;  $U_0 \gg U_k$ ;

$$C(U) \approx S \left[ \frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_d}{2U} \right]^{1/2}$$

Принимаем условно:  $U_{\text{обр}} > 0$

$$\frac{\partial C}{\partial u} \Big|_{U_0} = -\frac{1}{2} S \left[ \frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_d}{2} \right]^{1/2} U_0^{-3/2} = -\frac{1}{2} \frac{C_0}{U_0}$$

$$i' = \frac{1}{2} \frac{C_0}{U_0} [U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)] \times \\ \times [U_1 \omega_1 \sin \omega_1 t + U_2 \omega_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)];$$

Учтем:  $\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)]$

Рис. 10В

## Усиление с помощью ПД в двухконтурной схеме (продолжение)

$$i' = \frac{1}{4} \frac{C_0}{U_0} \{ U_1^2 \omega_1 \sin 2\omega_1 t + U_1 U_2 (\omega_1 + \omega_2) \sin [(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi_2] + U_1 U_2 (\omega_1 - \omega_2) \sin [(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi_2] + U_2^2 \omega_2 \sin 2(\omega_2 t + \varphi_2) \}. \quad \text{Зададим: } \omega_1 = 2\omega_2$$

$$i_2 = \frac{1}{4} \frac{C_0}{U_0} \omega_2 U_1 U_2 \sin (\omega_2 t - \varphi_2); \quad \text{Обозначим: } C_1 = \frac{1}{2} \frac{C_0}{U_0} U_1 = \left| \frac{\partial C}{\partial U} \right| U_1;$$

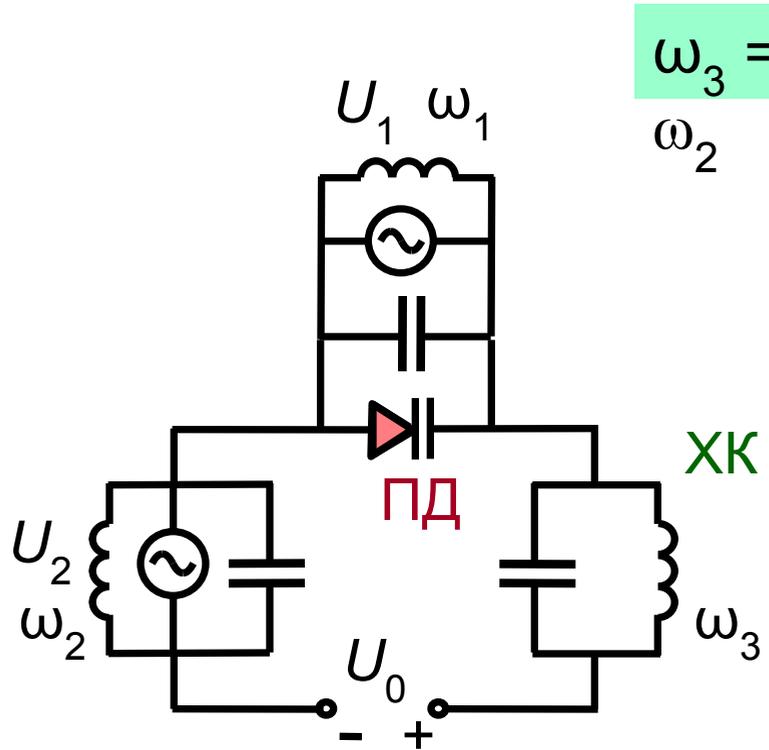
$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{2} \omega_2 C_1 U_2 \exp \left[ j \left( \omega_2 t - \frac{\pi}{2} - \varphi_2 \right) \right]; \quad \tilde{U}_2 = U_2 \exp [j(\omega_2 t + \varphi_2)]$$

$$Y_2 = \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{U}_2} = \frac{1}{2} \omega_2 C_1 \exp \left[ -j \left( \frac{\pi}{2} + 2\varphi_2 \right) \right]; \quad \text{Зададим: } \varphi_2 = \pi/4$$

$$\exp \left[ -j \left( \frac{\pi}{2} + 2\varphi_2 \right) \right] = \exp (-\pi) = -1; \quad Y_2 = G_2 = -\frac{1}{2} \omega_2 C_1 < 0$$

Рис. 10г

## Принцип усиления в трехконтурной схеме



$$\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$$

Упрощенно:

$$1) [U_1, \omega_1] + [U_2, \omega_2] \Rightarrow [U_3, \omega_3];$$

$$i_3 = \frac{1}{4} \frac{C_0}{U_0} \omega_3 U_1 U_2 \sin(\omega_3 t - \varphi_2)$$

$$2) [U_1, \omega_1] + [U_3, \omega_3] \Rightarrow [U'_2, \omega_2];$$

$$i'_2 = -\frac{1}{4} \frac{C_0}{U_0} \omega_2 U_1 U'_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

$$Y_2 = G_2 < 0$$

Рис. 10д

$$[\omega_1] + [\omega_2] \Rightarrow [n \omega_1 \pm m \omega_2]$$

# Усилитель на параметрическом диоде

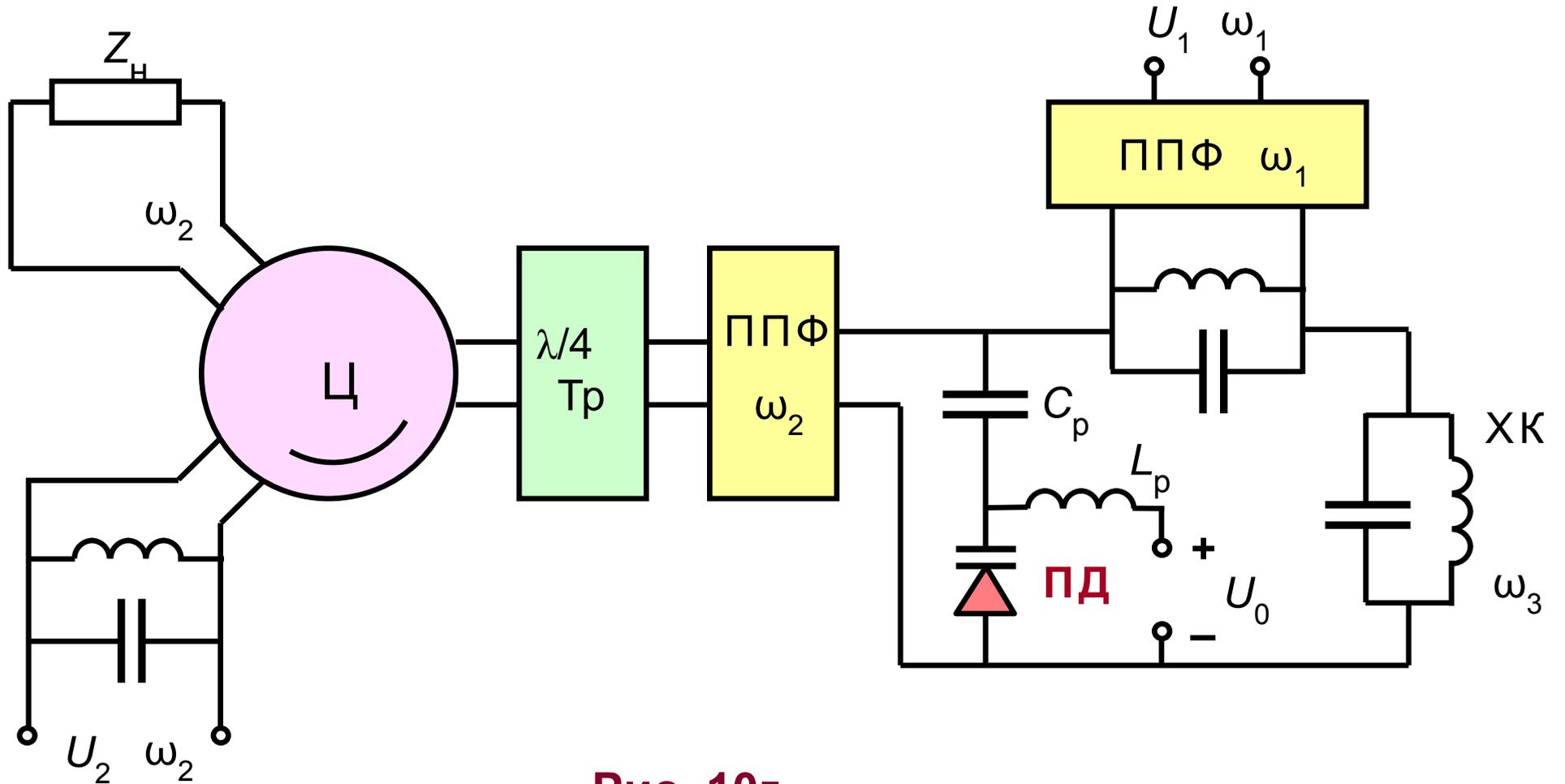


Рис. 10г

# Удвоитель-утроитель частоты

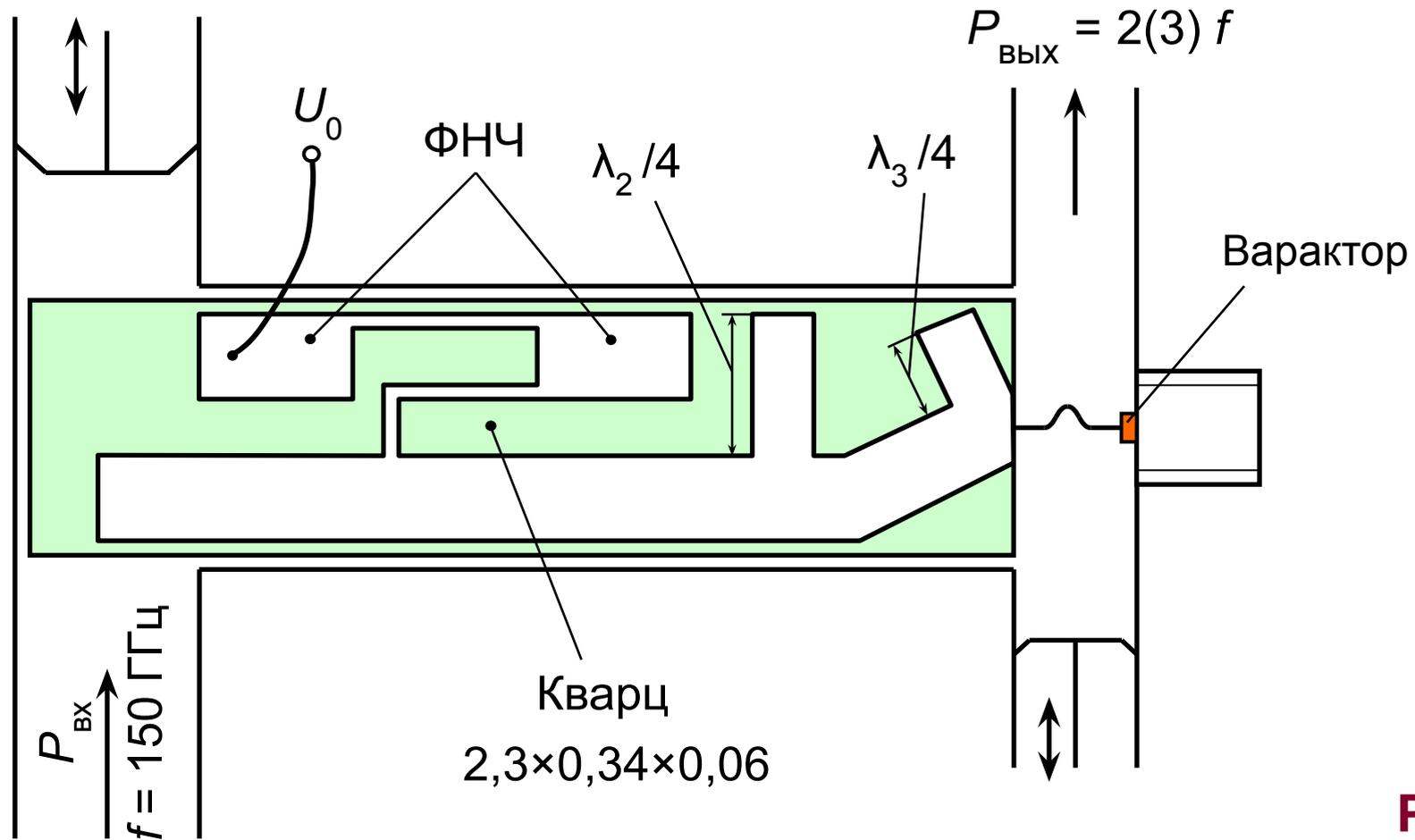


Рис. 11

## Эквивалентная схема умножителя частоты

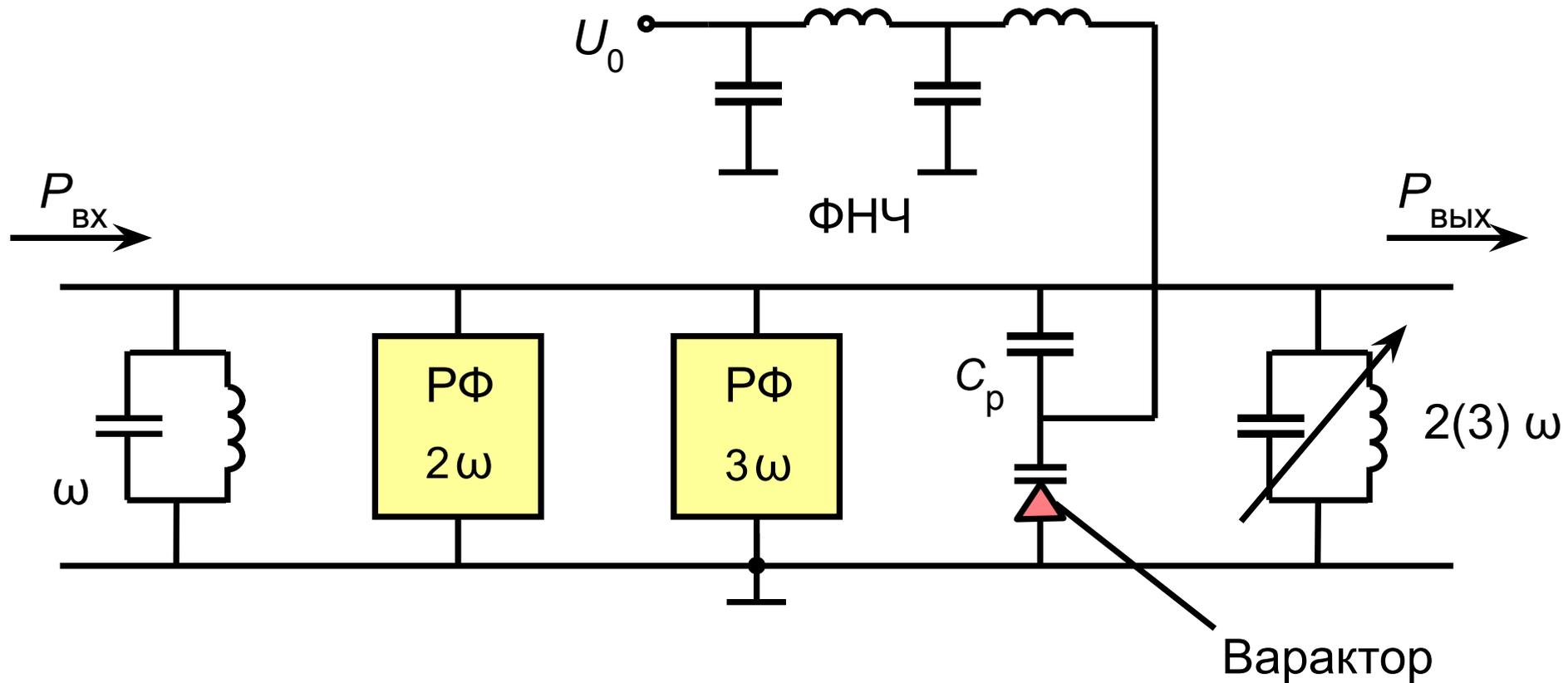


Рис. 12