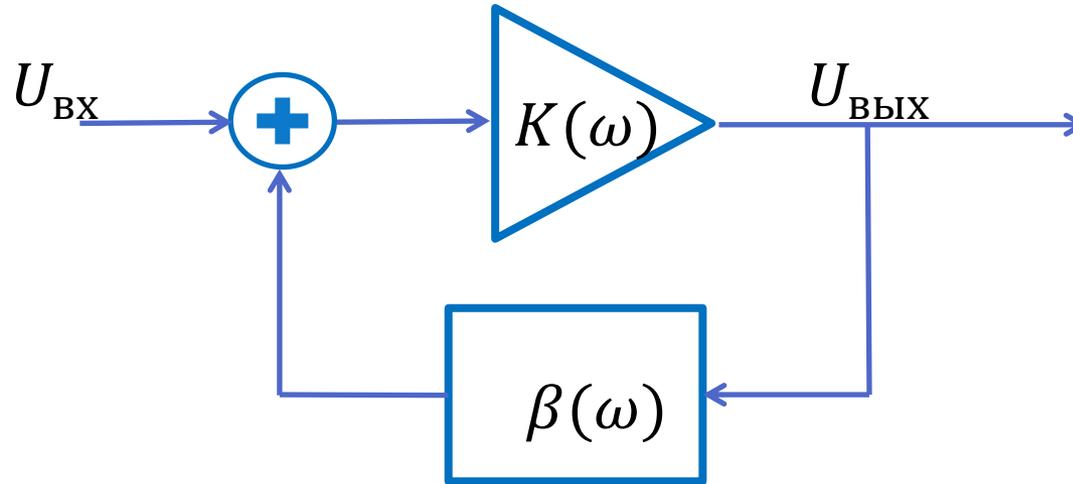




Генерирование электрических колебаний



Коэффициент усиления с обратной связью:

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 - \beta K} \quad (1)$$

(2)

K и β --- комплексные величины.

Условия существования стационарных автоколебаний:

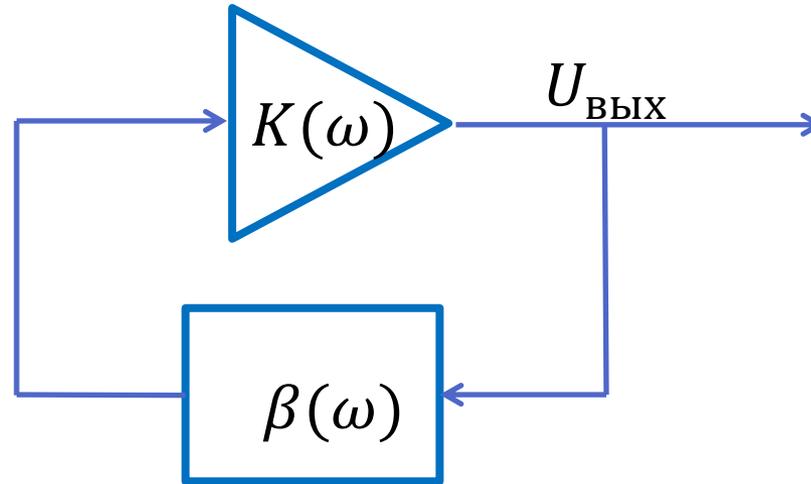
баланс амплитуд: $|K| |\beta| = 1,$

баланс фаз: $\varphi_K + \varphi_{\beta} = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2 \dots$

“выживают” только те колебания,
у которых есть баланс.



Генерирование электрических колебаний



баланс амплитуд: $|K| |\beta| = 1,$

- Стационарные гармонические колебания – амплитуда постоянна.
Как выполнить это условие строго?



Простейший генератор

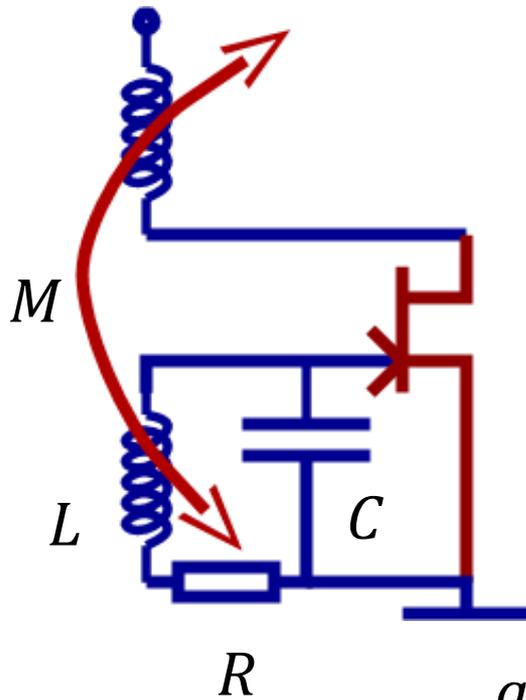
q - заряд на конденсаторе C

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} = M \frac{dI_{СИ}}{dt},$$

В линейном приближении:

$$I_{СИ} = SU_{ЗИ} = Sq/C,$$

$$L\ddot{q} + \left(R - \frac{MS}{C} \right) \dot{q} + \frac{q}{C} = 0$$



$$q(t) = q_0 \exp\left(-\left[R - \frac{MS}{C}\right] \frac{t}{L}\right) \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

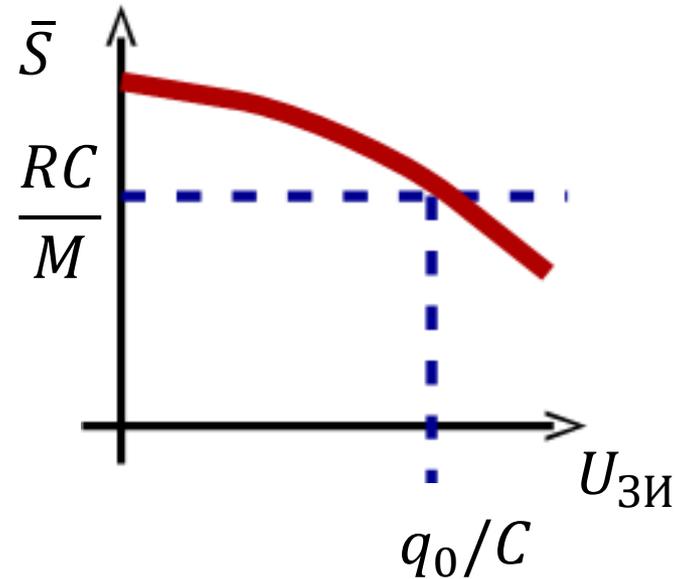
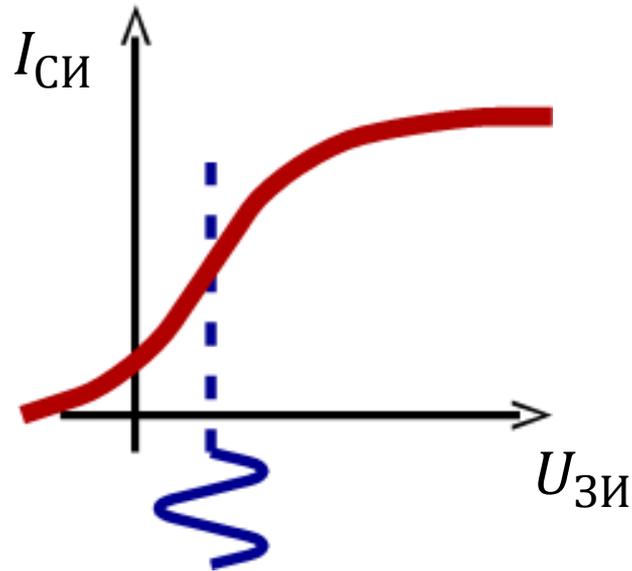
$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Стационарные колебания: $\left[R - \frac{MS}{C}\right] = 0$

В общем случае: $S(q, U_{\pm})$ --- **нелинейная** функция.

Учтем нелинейную зависимость $S(q)$.



Мягкий режим возбуждения автоколебаний



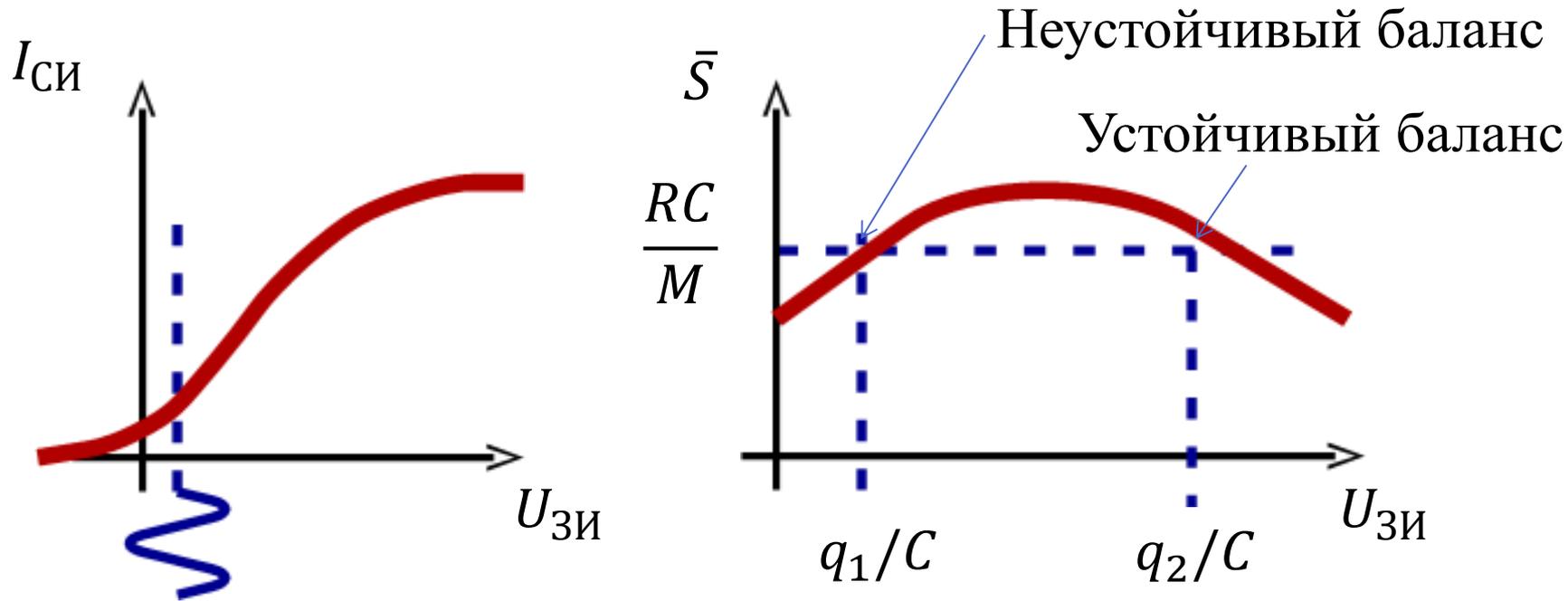
В начале: $R - \frac{MS}{C} < 0$.

Автоколебания возникают «сами собой»

Можно считать $\bar{S} = S_0 - S_1 \overline{q^2}$, (усреднение по $q = CU_{зи}$)
 $q(t) = q_0 \cos \omega t$.



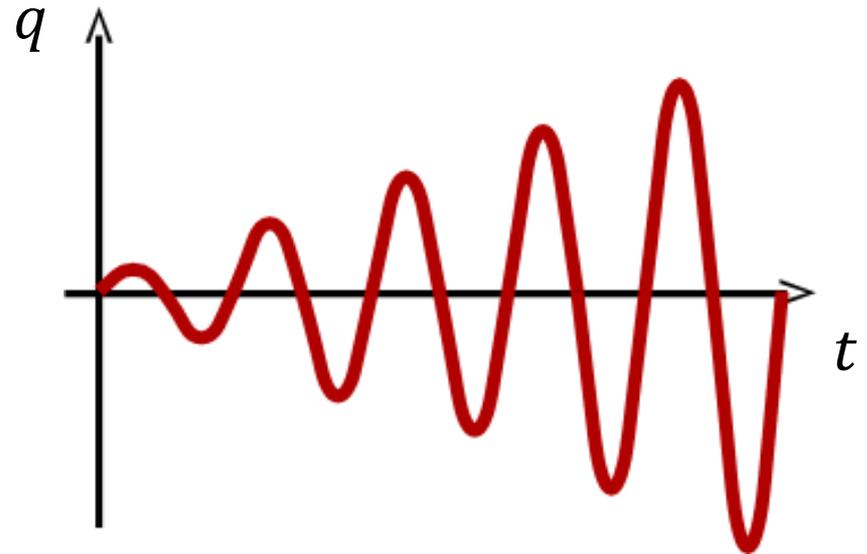
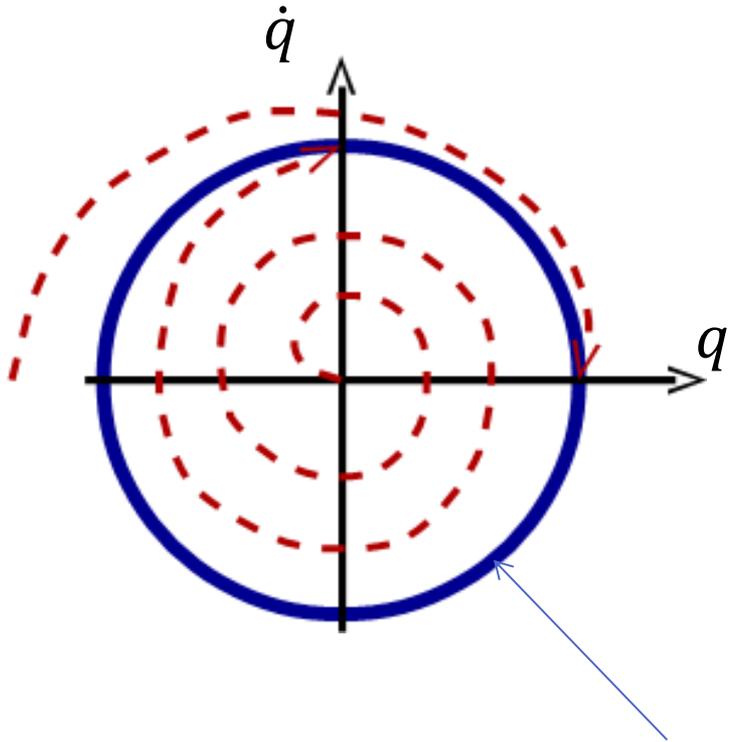
Жесткий режим возбуждения автоколебаний



Автоколебания могут не возникнуть (нужно дополнительное внешнее воздействие)



Мягкий режим на фазовой плоскости:

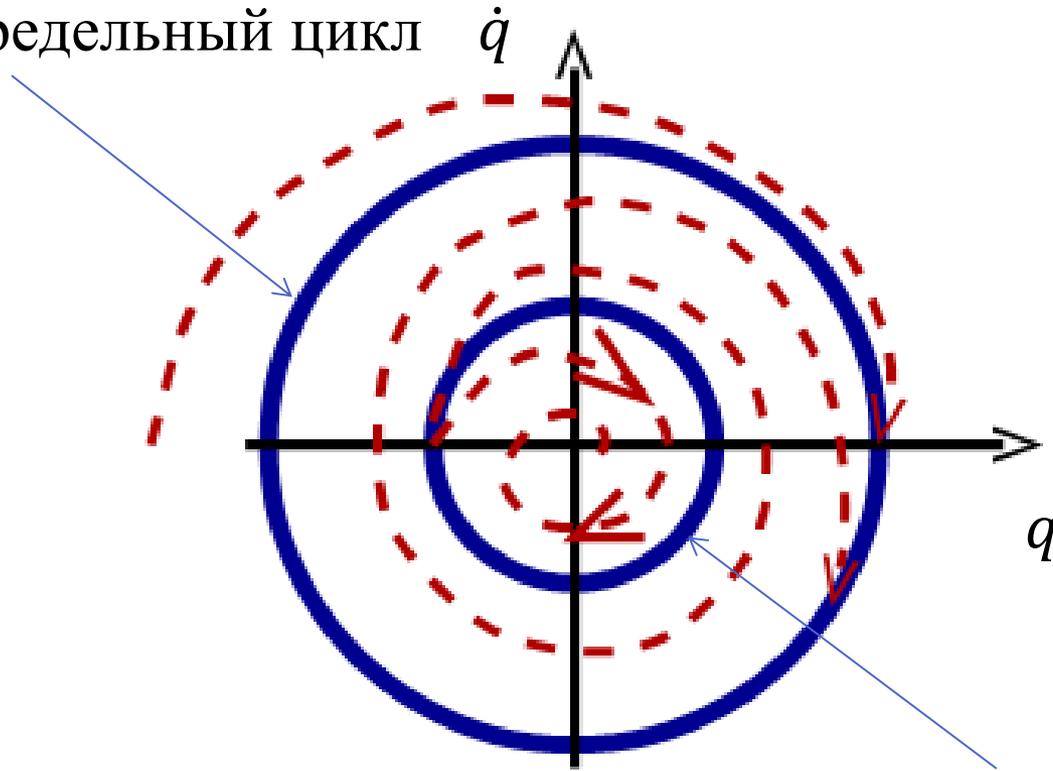


Устойчивый предельный цикл



Жесткий режим на фазовой плоскости:

Устойчивый предельный цикл

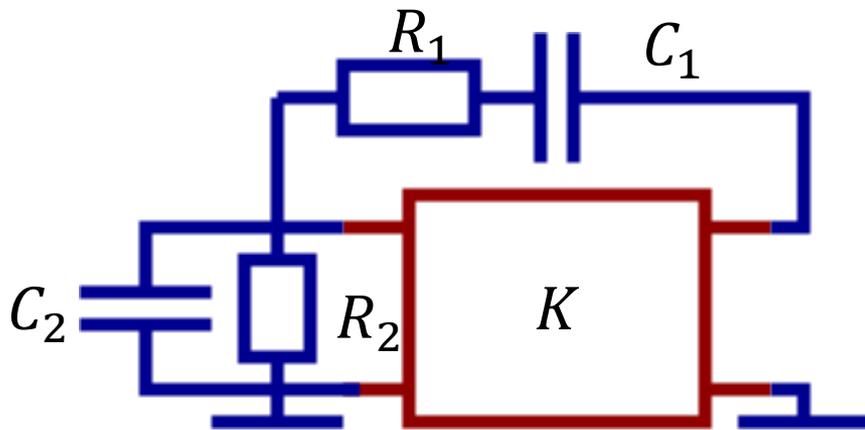


Неустойчивый предельный цикл



RC-генераторы

(**НЕ**инвертирующий усилитель)



$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{i\omega C_1},$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + i\omega C_2 R_2}$$

$$\beta = \frac{R_2}{(1 + i\omega C_2 R_2) \left[R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + i\omega C_2 R_2} \right]}$$

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + \frac{1 - \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{i\omega C_1 R_2},$$

Пусть $\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \Rightarrow \beta(\omega_0) = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}}.$



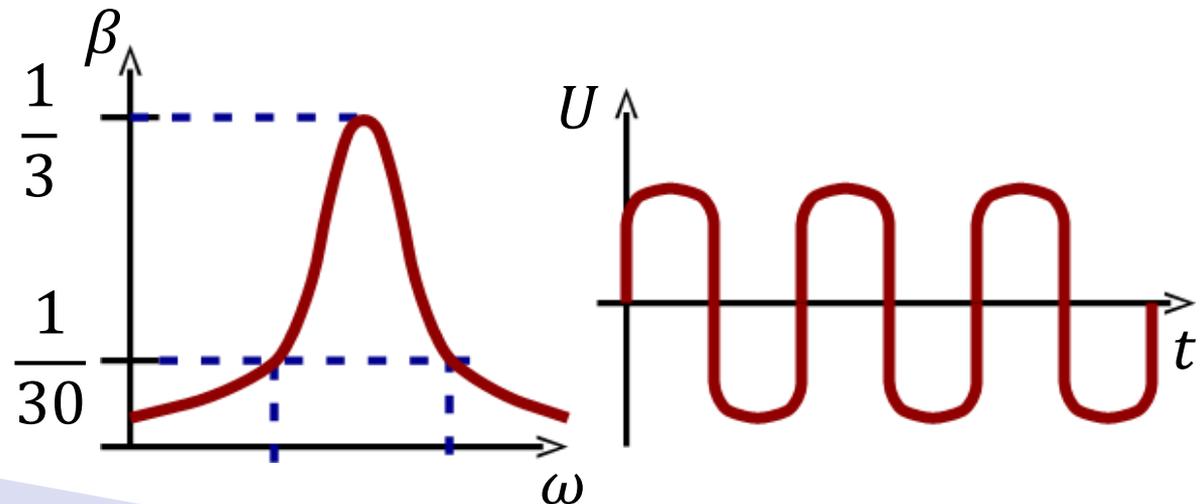
Пусть $\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \Rightarrow \beta(\omega_0) = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}}$.

Пусть $R_1 = R_2, \quad C_1 = C_2 \Rightarrow \beta(\omega_0) = \frac{1}{3},$

$K_\beta = \frac{K}{1 - K\beta},$ Условие генерации: $K(\omega_0) = \frac{1}{\beta(\omega_0)} = 3$

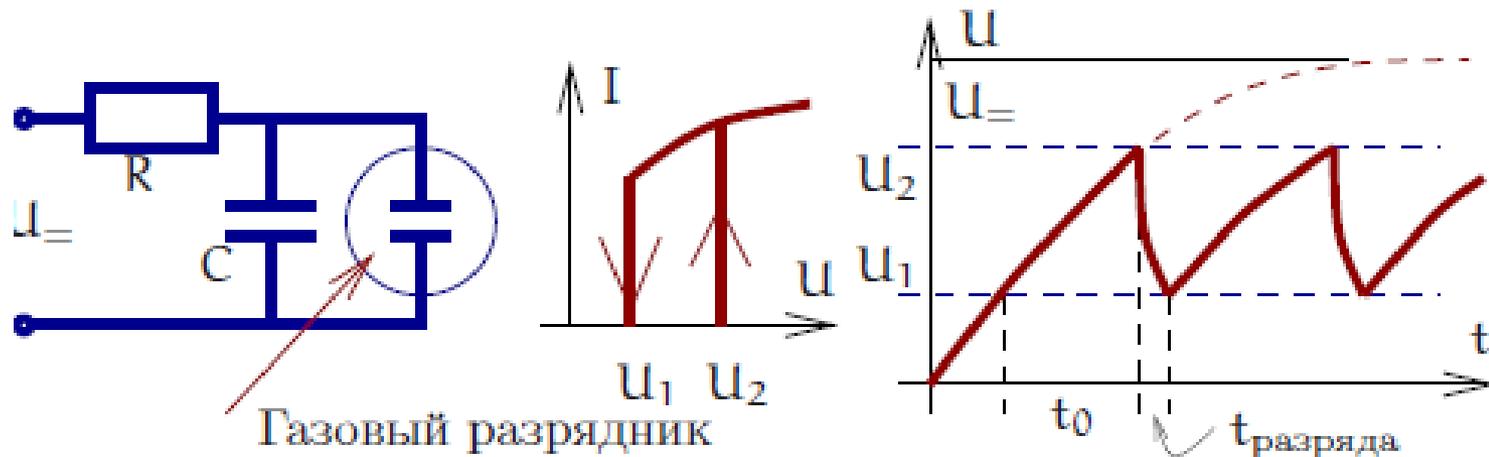
Если $K \gtrsim 3$ и $\arg(K) = 2\pi$ - гармонические колебания.

Если K существенно больше, например, $K = 30$ – колебания сложной формы, т.к. условия возбуждения выполняются для широкой полосы частот.





Простейший генератор релаксационных колебаний

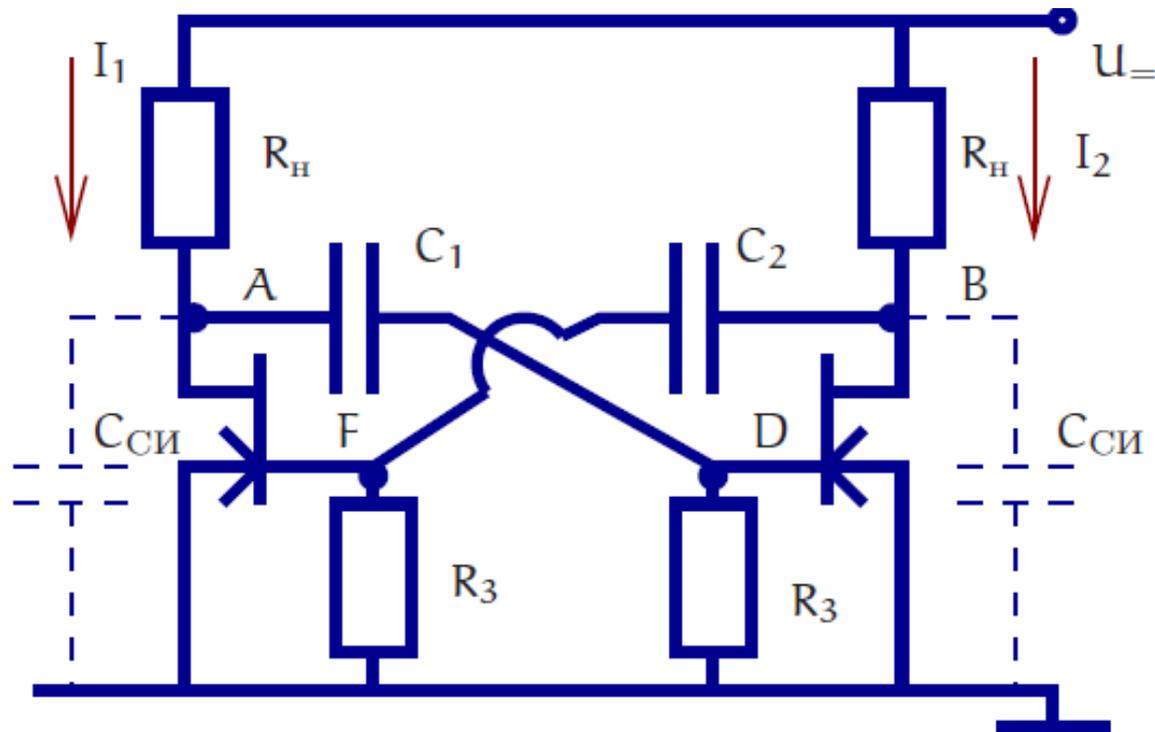


$$U(t) = U_0(1 - e^{t/RC}) \Rightarrow \frac{U_0 t_0}{RC} \approx U_2 - U_1,$$

$$T = t_0 + t_{\text{разряда}} \approx \frac{U_2 - U_1}{U_0} \times RC + t_{\text{разряда}}$$

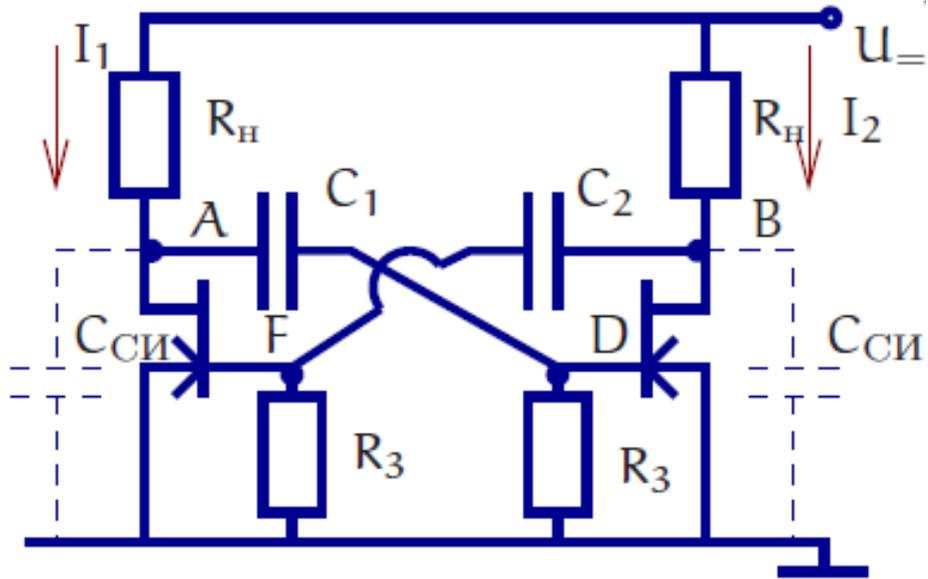


Симметричный мультивибратор



Для обычных параметров R_H , C_1 , C_2 , R_3 ,
условие возбуждения “перевыполнено”:

$$K_{\beta} = K_1 K_2 \gg 1$$



Обычно еще выполнено условие

$$R_H C_{СИ} \ll C_{1,2} R_3$$

Пусть токи через транзисторы равны.

Пусть из-за флуктуаций I_1 возрос на $+\Delta I_{10}$. Тогда:

$$\Delta U_A = -\Delta I_{10} R_H, \quad \Delta U_{C_1} \simeq 0,$$

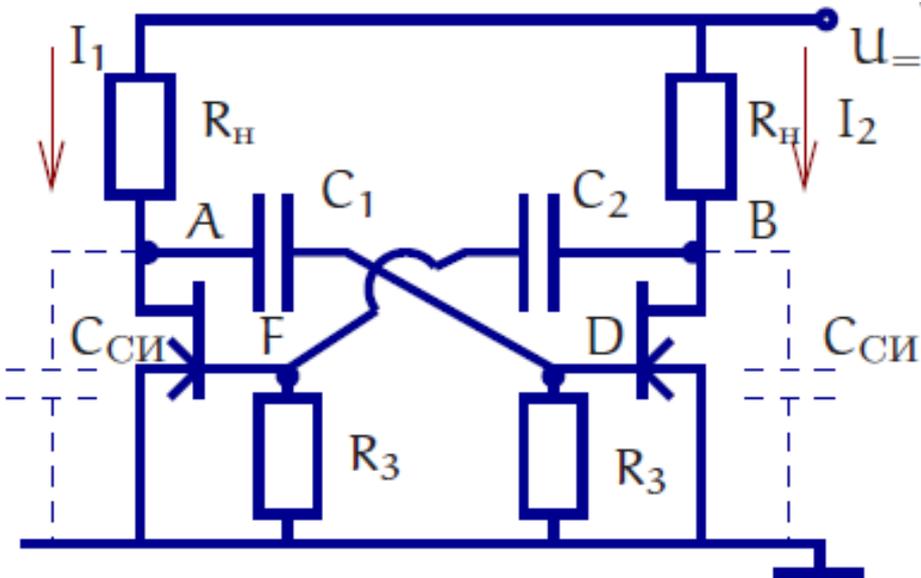
$$\Delta U_D = -\Delta I_{10} R_H \Rightarrow \Delta U_B = -\mu \Delta U_D = +\mu \Delta I_{10} R_H,$$

$$\Delta U_{C_2} \simeq 0 \Rightarrow \Delta U_F = \Delta U_B,$$

$$\Rightarrow \Delta I_1 = +S \Delta U_B = S R_H \mu \Delta I_{10} = \mu^2 \Delta I_{10} \gg \Delta I_{10}$$

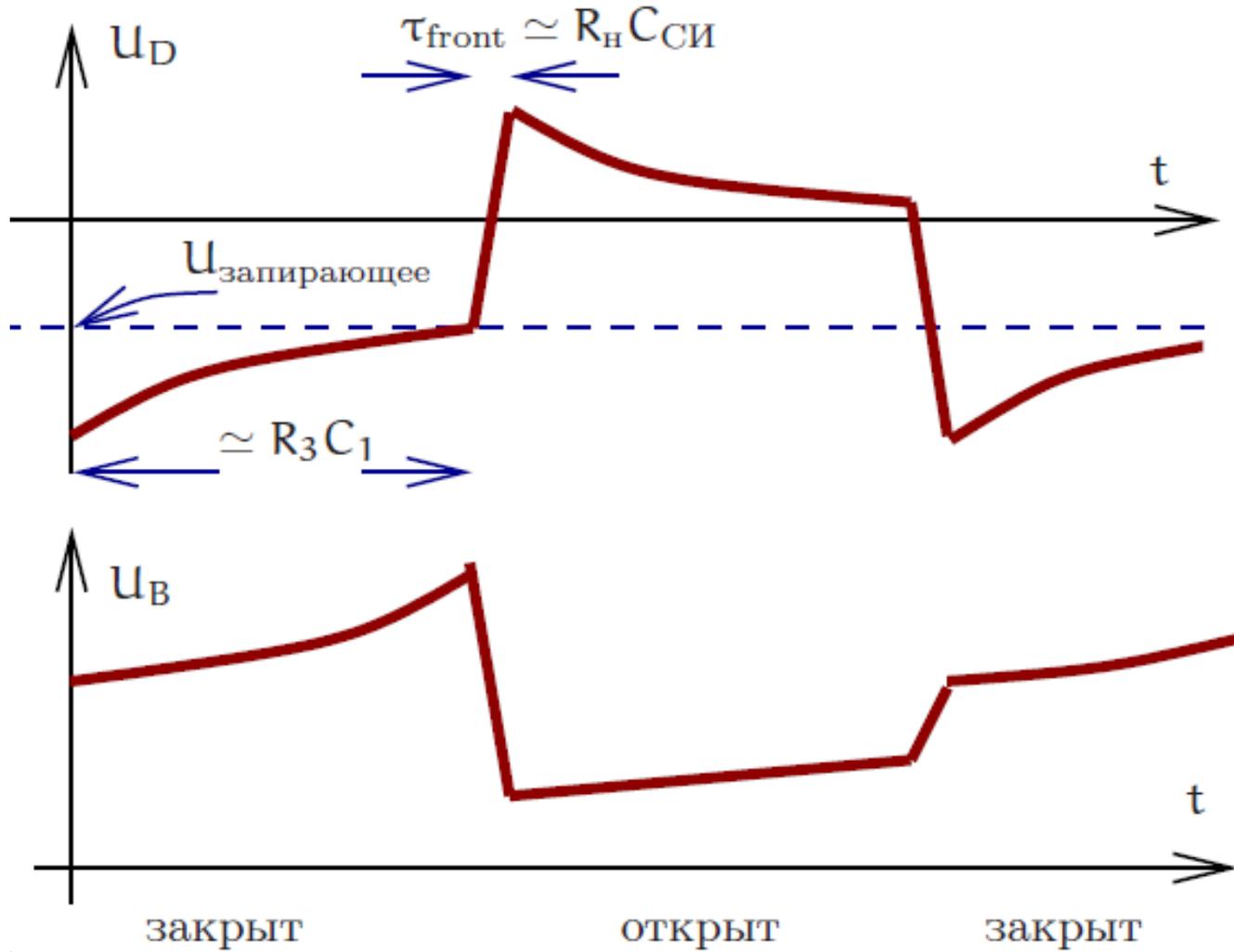
т. е. неустойчивость!

Лавинный процесс: $\tau_{front} \simeq R_H C_{СИ} \simeq 10^3 \times 10^{-11} = 10^{-8}$ сек.



Во время скачка U_A резко упало (ток I_1 сильно вырос), поэтому после скачка C_1 -- разряжается. Этот ток I_{C1} создает **отрицательное** напряжение на правом затворе и поддерживает **правый транзистор запертым**.

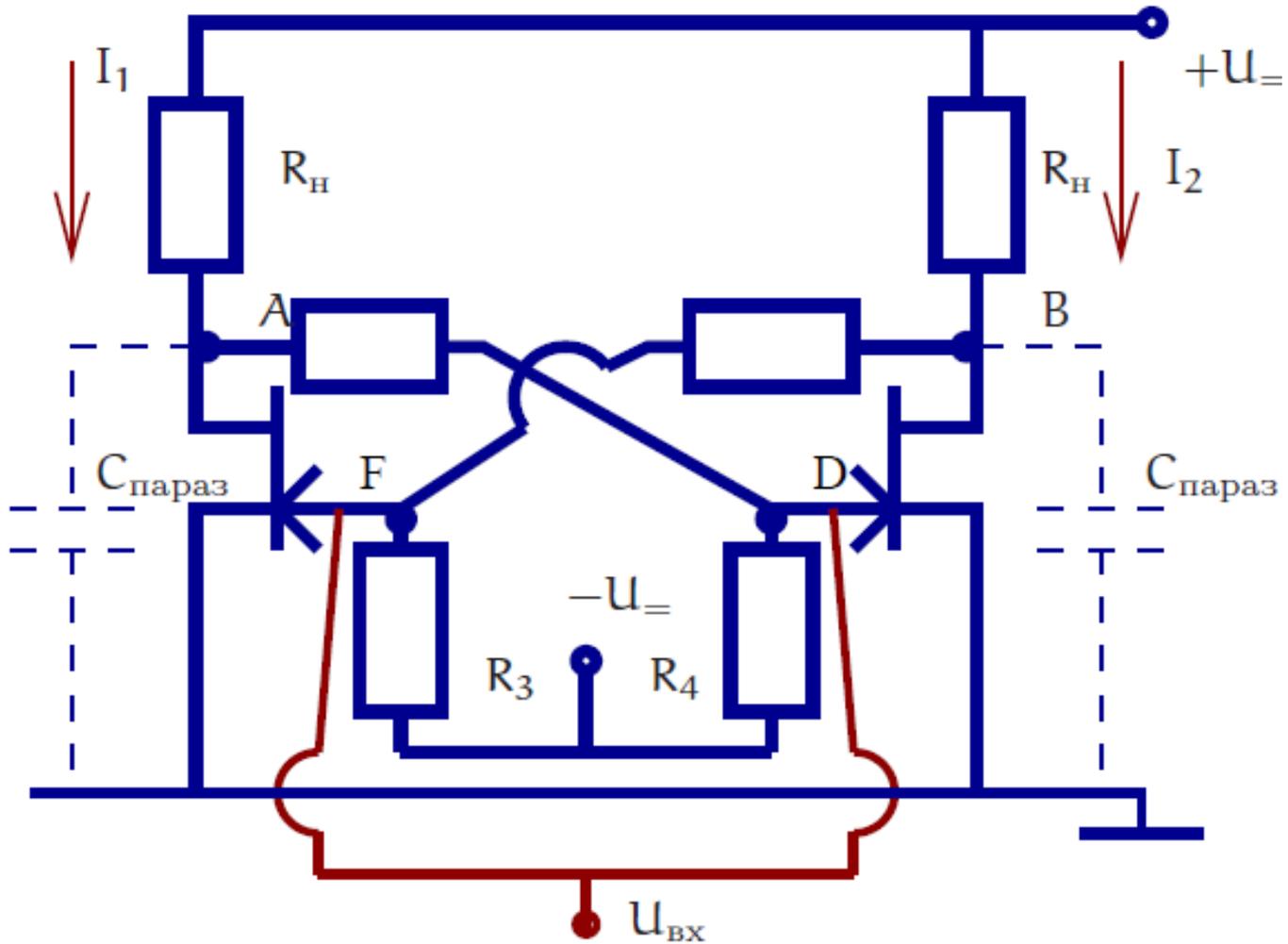
Одновременно C_2 -- дозаряжается от U_{C_2} до U_+ . Этот ток поддерживает **положительное** напряжение на левом транзисторе (он открыт). Когда C_1 разрядится, напряжение на затворе правого транзистора станет **меньше** запирающего. Тогда ток через правый транзистор возрастет, и произойдет **обратный скачок**: в итоге будет заперт левый транзистор.





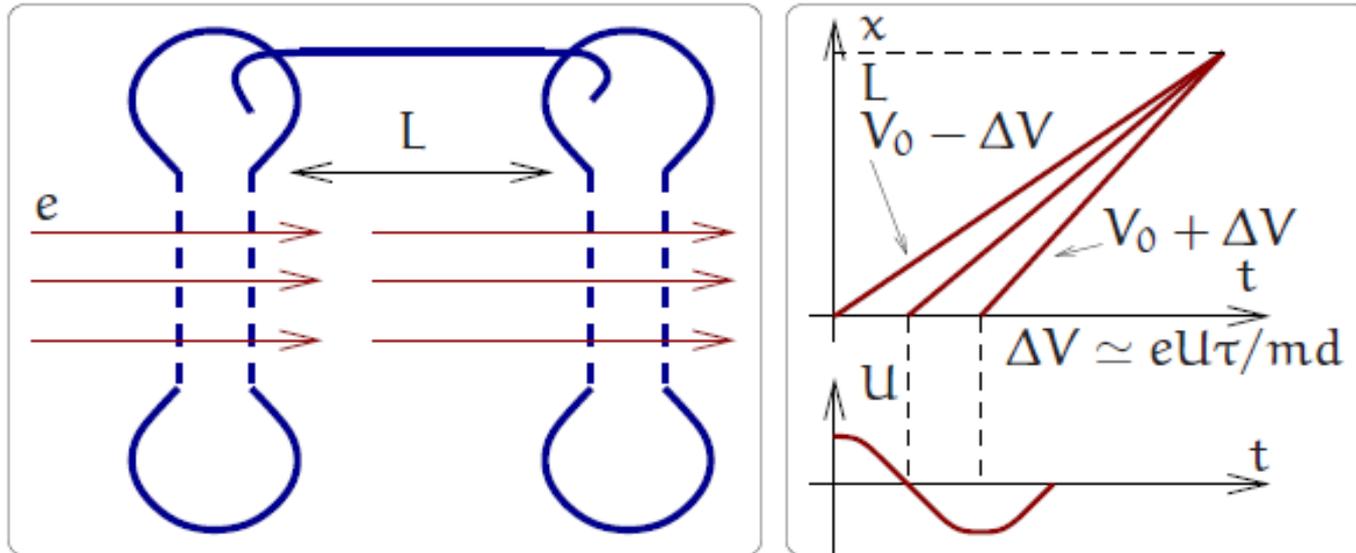
Триггер

-- система с двумя устойчивыми положениями равновесия (основной элемент ЭВМ). Это модифицированный мультивибратор: нет емкостей, автоколебаний нет. Подбором параметров можно добиться двух устойчивых положений равновесия (1-ый транзистор открыт, а 2-ой закрыт, или наоборот). Импульс входного напряжения перебрасывает триггер в другое состояние.





Клистрон



Формирование сгустков: Поток электронов --- сначала через первый резонатор (время пролета $\tau \ll 1/\omega_0$). Электроны получают дополнительный импульс $\Delta p = \pm eU\tau/d$ --- формирование электронных сгустков при пролете второго резонатора на расстоянии L от первого резонатора.

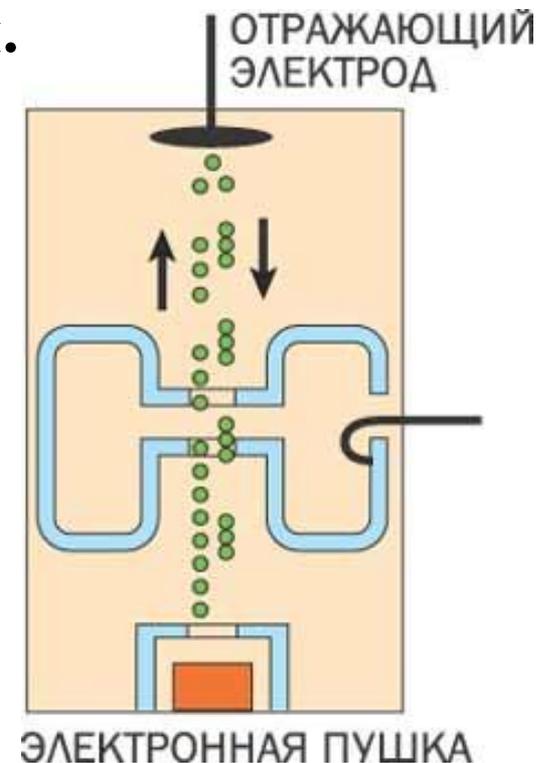


Клистрон (продолжение)

Подбирают время пролета так, чтобы в момент влета «сгущение» электронов было бы максимальным - тогда электроны будут *отдавать* энергию электромагнитным колебаниям. Первый и второй резонаторы должны быть связаны.

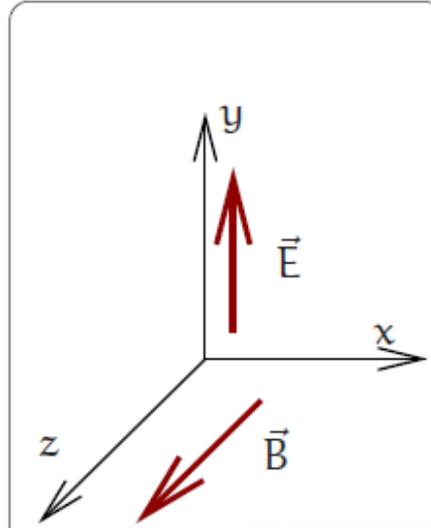
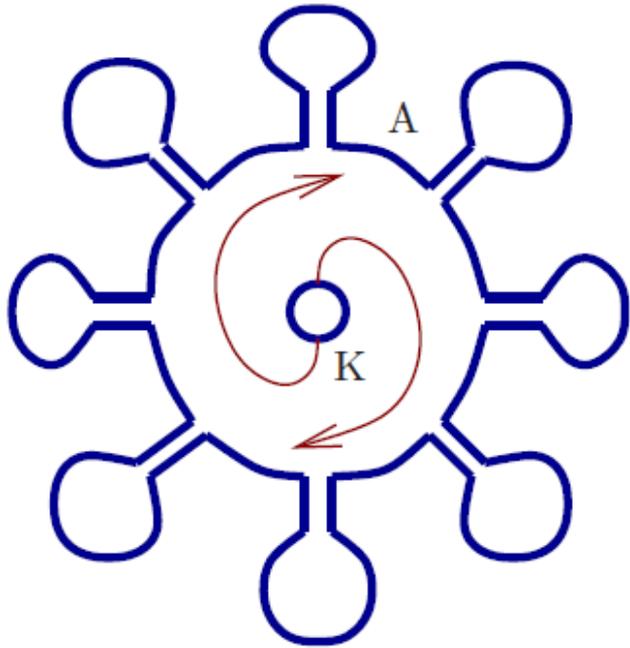
Отражательный клистрон.

Мощность клистронов и магнетронов: до 1 МВт в непрерывном и до 20 МВт в импульсном режиме $\lambda \approx 1\text{ мт} \dots 10\text{ см}$. Высокое значение к.п.д. (до 70% кинетической энергии электронов преобразовывается в энергию колебаний).

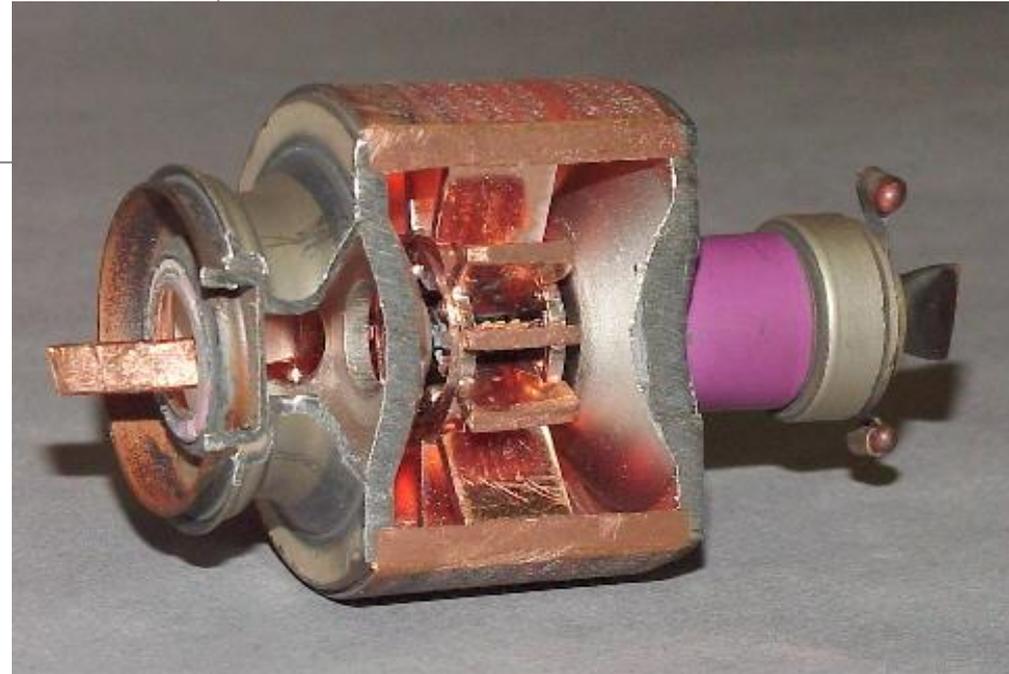




Магнетрон



Принцип – тот же, магнитное поле «заворачивает» электроны, увеличивая время взаимодействия.





При $V_0 = E/B$ --- наложение поступательного движения и вращения в магнитном поле B . **Циклоида.** Важно:

$$\vec{V}_0 \perp \vec{E}, \vec{B}$$

В магнетроне: электроны испытывают “клистронный” эффект: у одного резонатора они **получают** добавки к скоростям, которые приводят к формированию сгустков заряда. У другого --- сгустки (“спицы”) **отдают** энергию. Колебания в соседних резонаторах в противофазе.

Мощность магнетронов: от 1 Вт (малогабаритные лабораторные магнетроны) до 100 МВт импульсной мощности в РЛС.