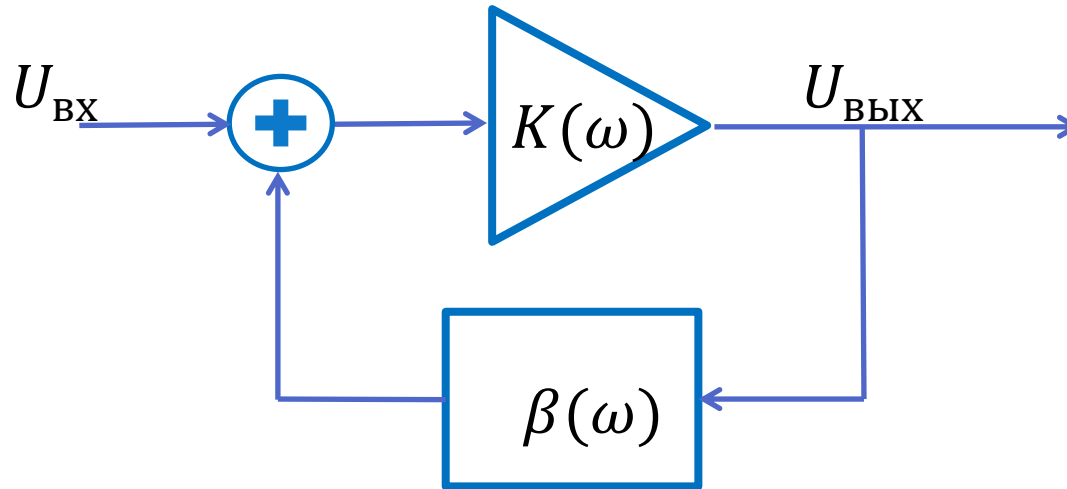




# Генерирование электрических колебаний



Коэффициент усиления с обратной связью:

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

(2)

$K$  и  $\beta$  --- комплексные величины.

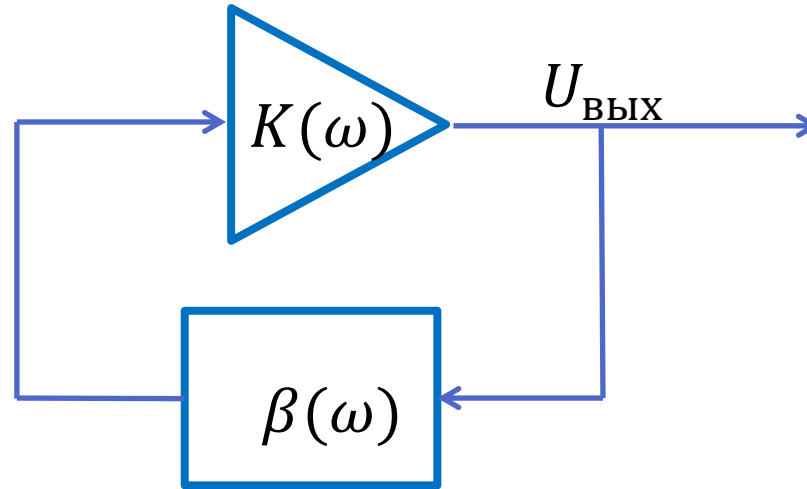
Условия существования стационарных автоколебаний:

$$\begin{aligned} \text{баланс амплитуд:} & \quad |K| |\beta| = 1, \\ \text{баланс фаз:} & \quad \varphi_K + \varphi_{\beta} = 2\pi n, \quad n = 0, 1, 2 \dots \end{aligned}$$

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



# Генерирование электрических колебаний

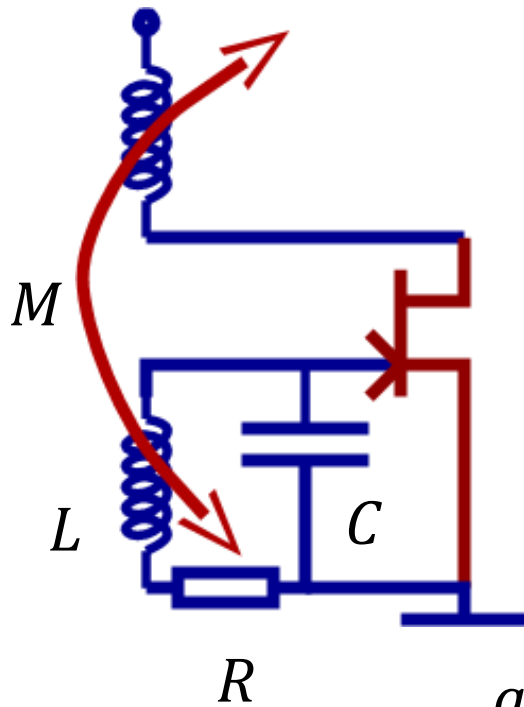


баланс амплитуд:  $|K| |\beta| = 1,$

- 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:

$$I_{СИ} = SU_{ЗИ} = Sq/C,$$

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

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

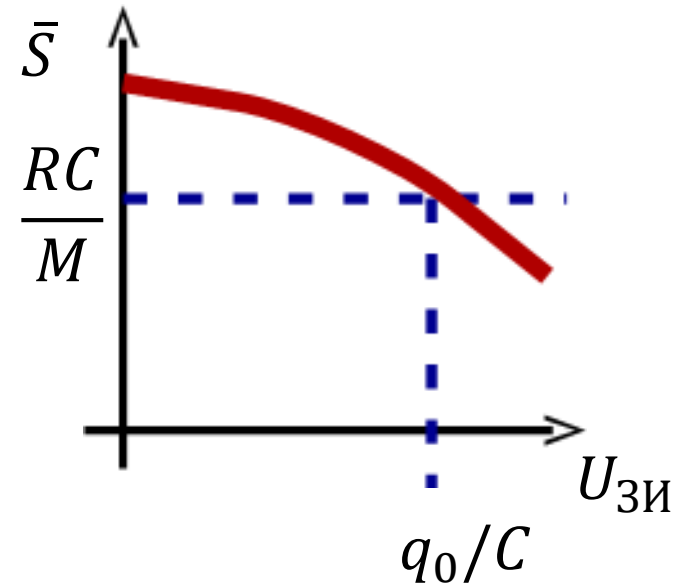
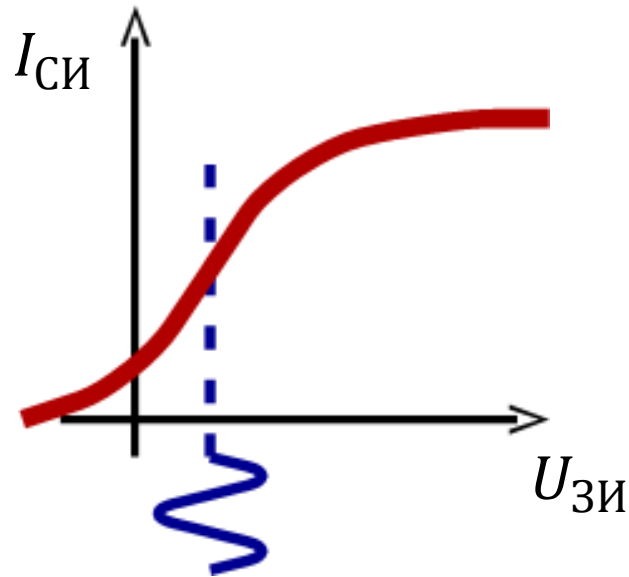
$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Стационарные колебания:  $\left[R - \frac{MS}{C}\right] = 0$

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

Учтем нелинейную зависимость  $S(q)$ .



# Мягкий режим возбуждения автоколебаний



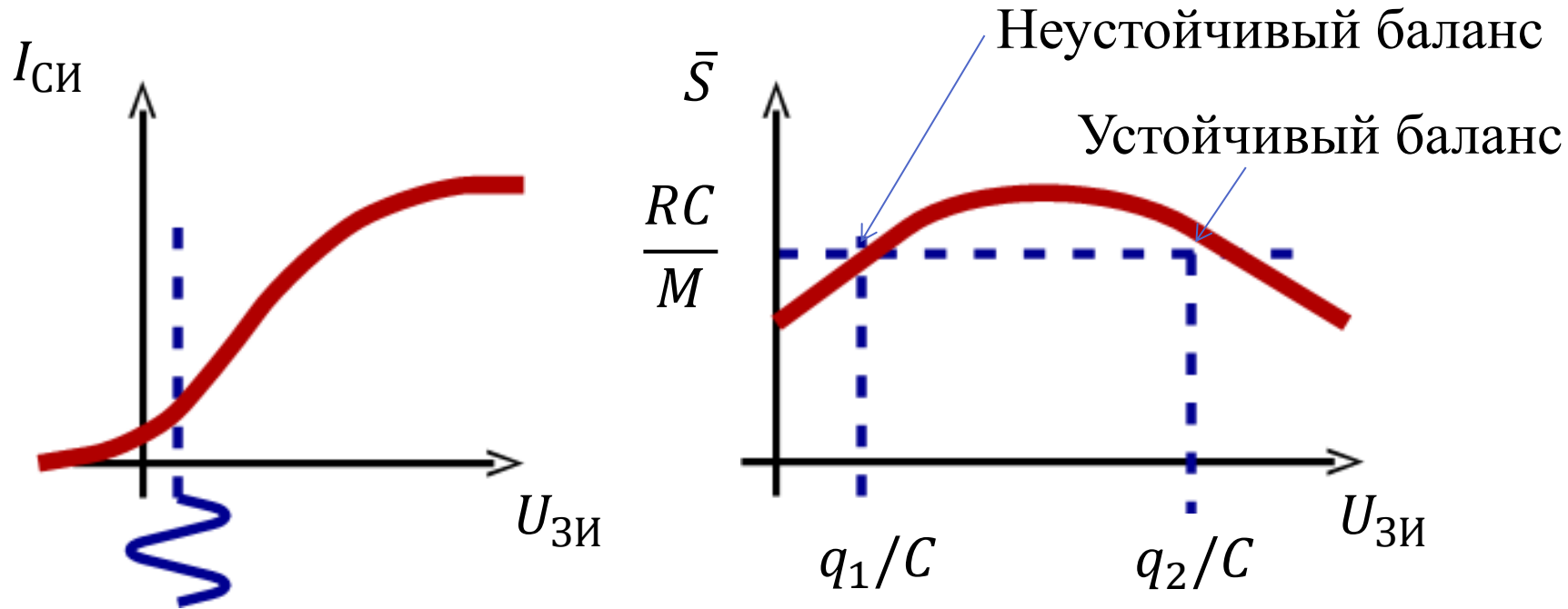
В начале:  $R - \frac{MS}{C} < 0$ .

Автоколебания возникают «сами собой»

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



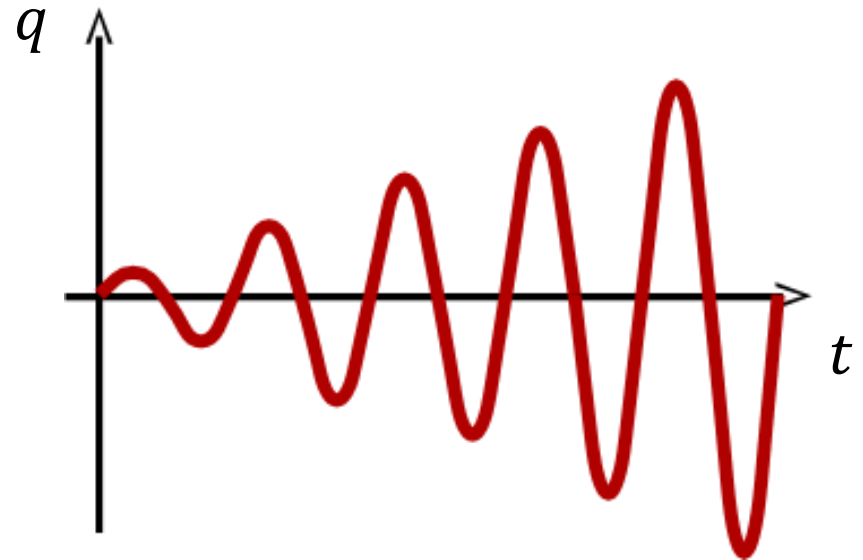
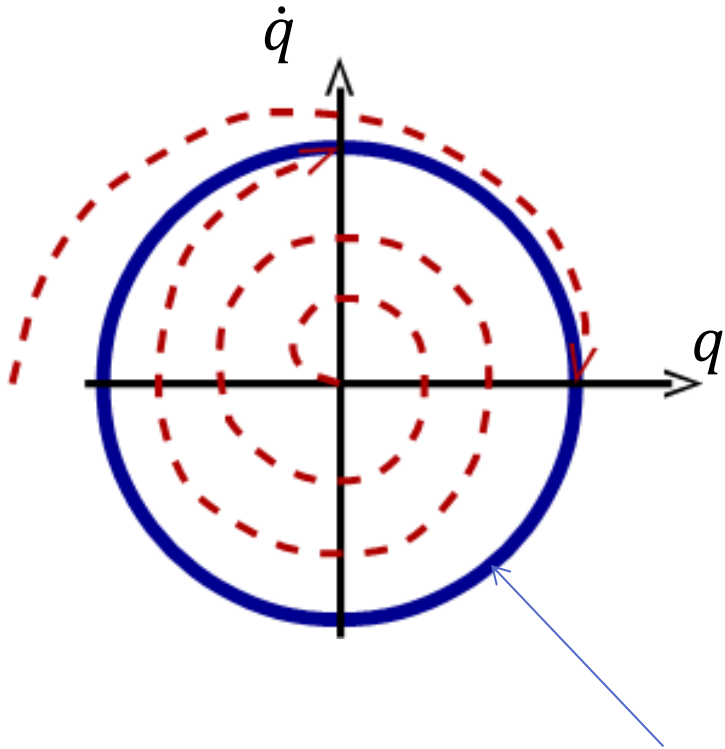
## Жесткий режим возбуждения автоколебаний



**Автоколебания могут не возникнуть (нужно дополнительное внешнее воздействие)**



## Мягкий режим на фазовой плоскости:

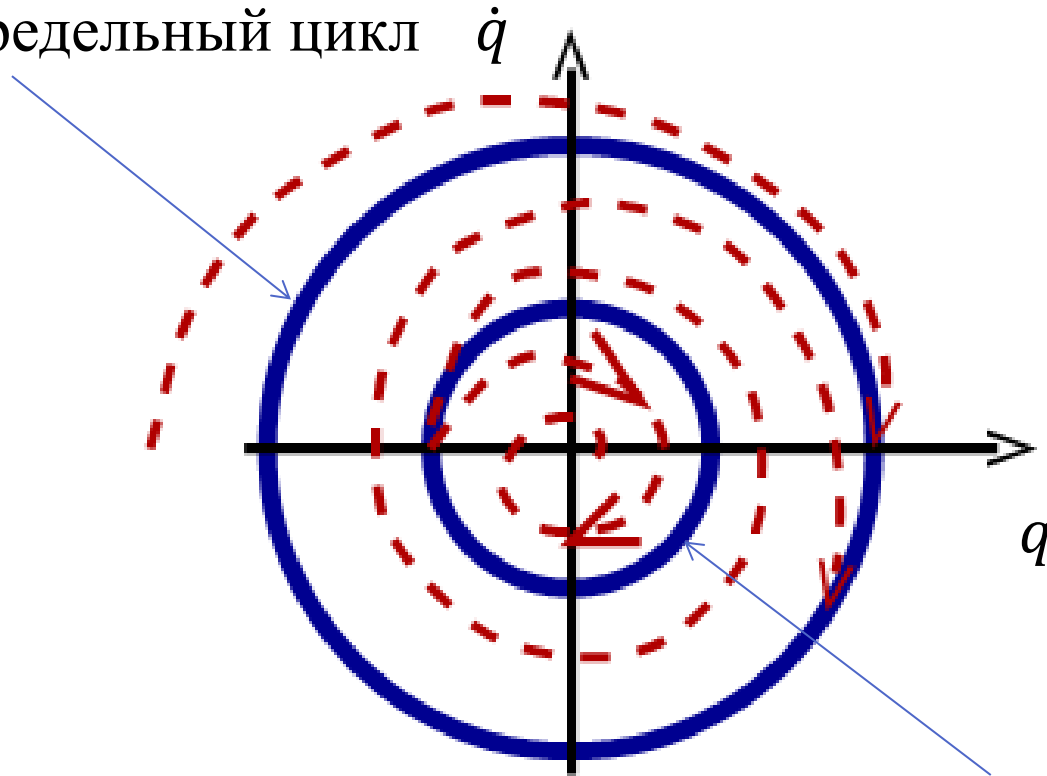


Устойчивый предельный цикл



## Жесткий режим на фазовой плоскости:

Устойчивый предельный цикл

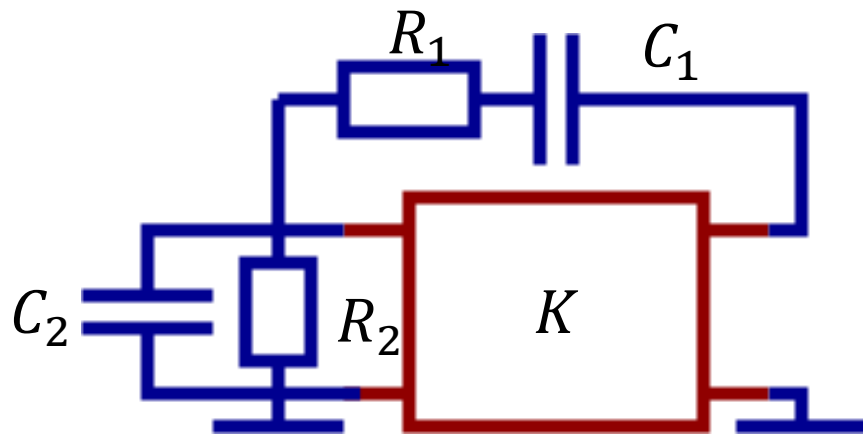


Неустойчивый предельный цикл



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





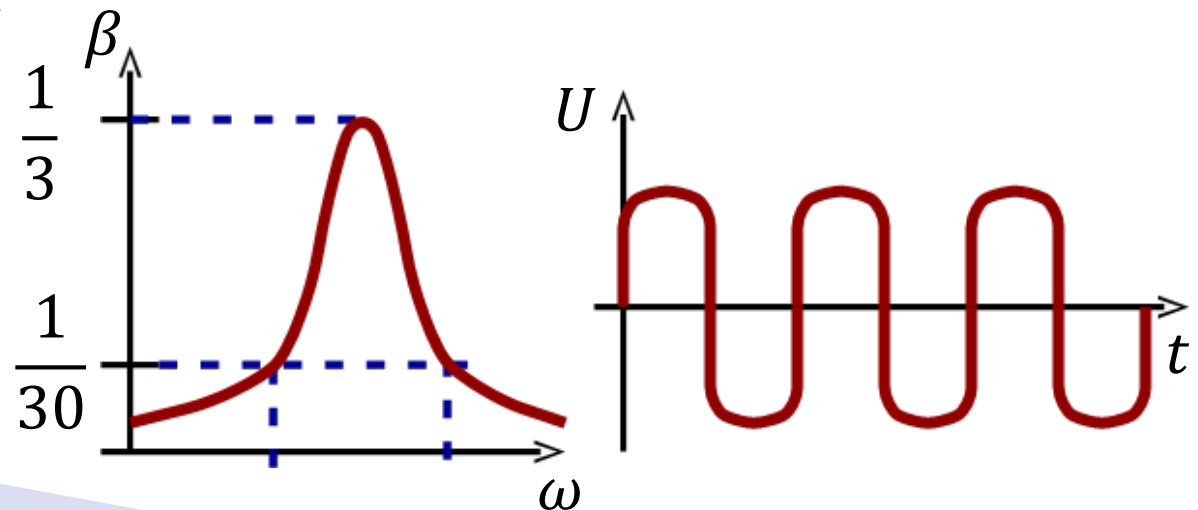
Пусть  $\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \Rightarrow \beta(\omega_0) = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}}$ .

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:  $K(\omega_0) = \frac{1}{\beta(\omega_0)} = 3$

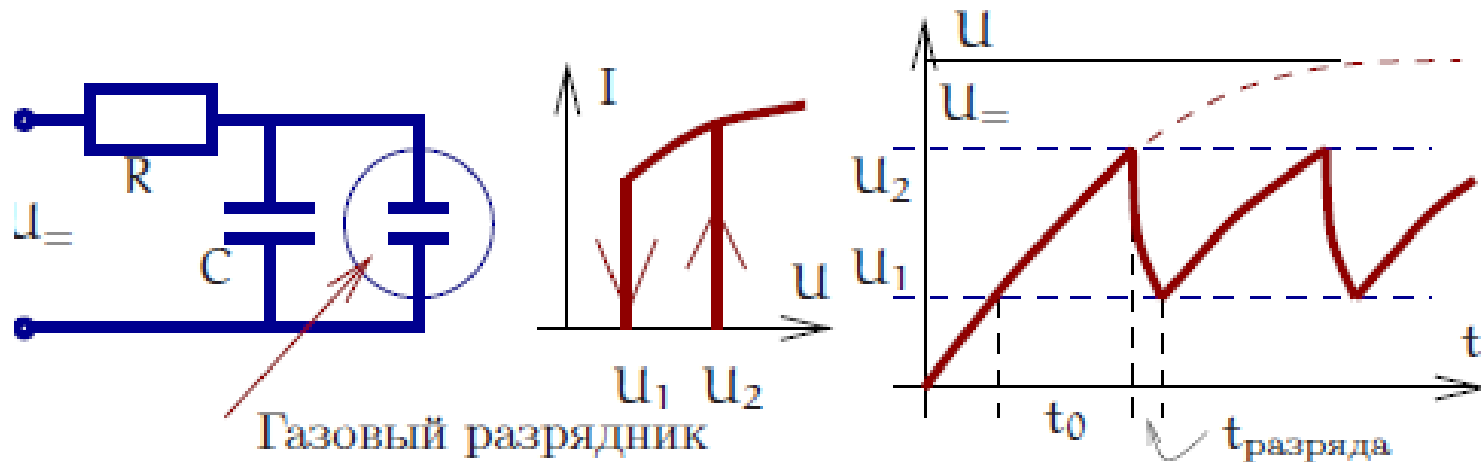
Если  $K \gtrsim 3$  и  $\arg(K) = 2\pi$  - гармонические колебания.

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





# Простейший генератор релаксационных колебаний

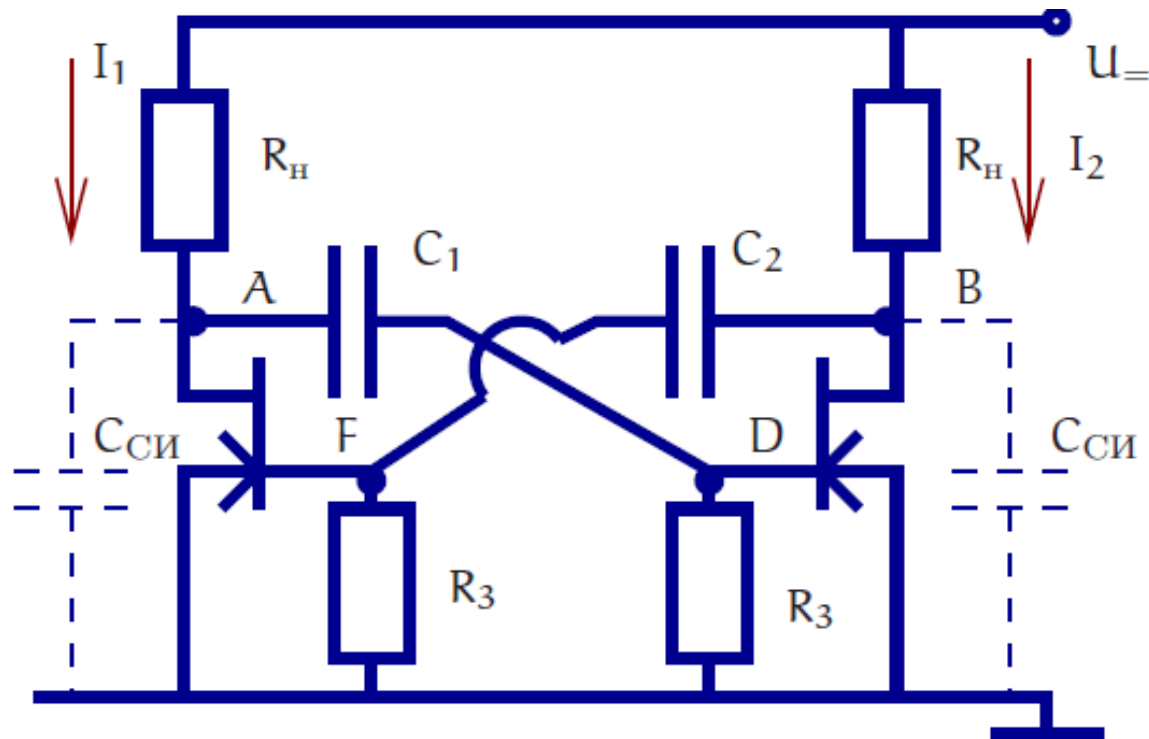


$$U(t) = U_0(1 - e^{t/RC}) \Rightarrow \frac{U_0 t_0}{RC} \approx U_2 - U_1,$$

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

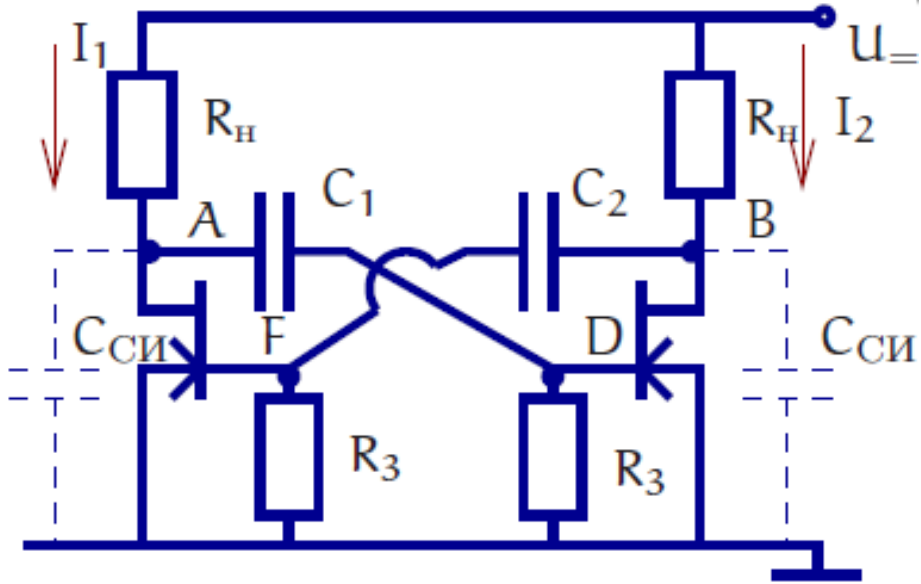


## Симметричный мультивибратор



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:

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

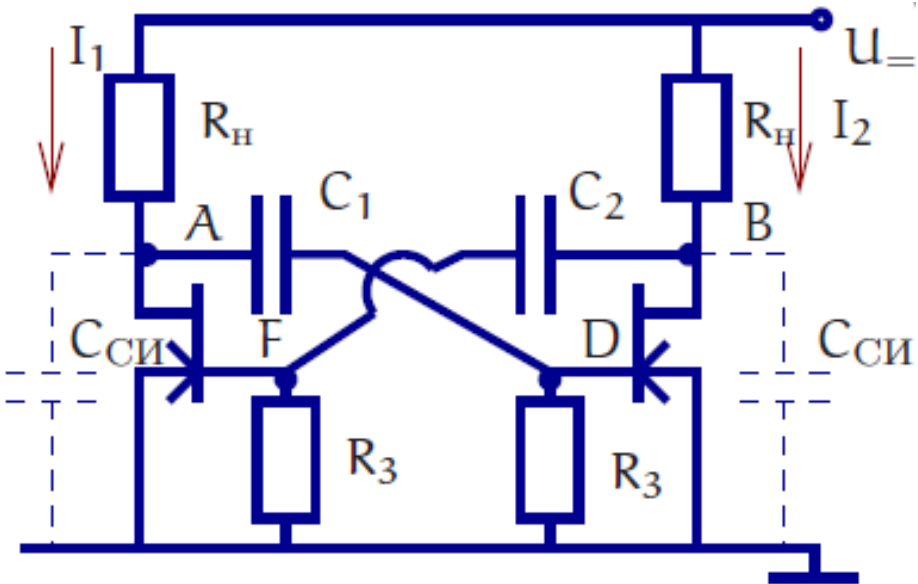
$$\Delta U_D = -\Delta I_{10} R_H \Rightarrow \Delta U_B = -\mu \Delta U_D = +\mu \Delta I_{10} R_H,$$

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

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

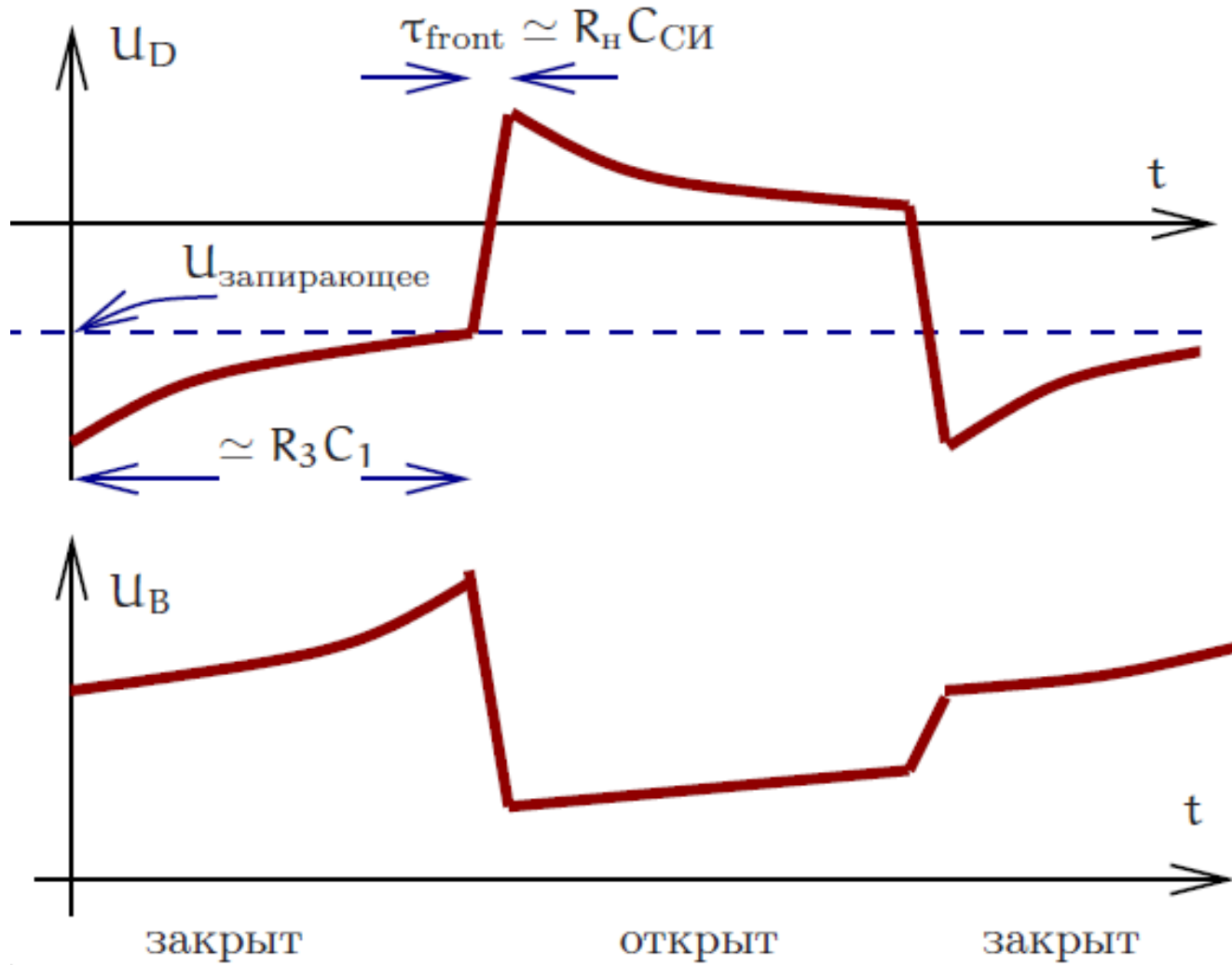
т. е. неустойчивость!

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**.

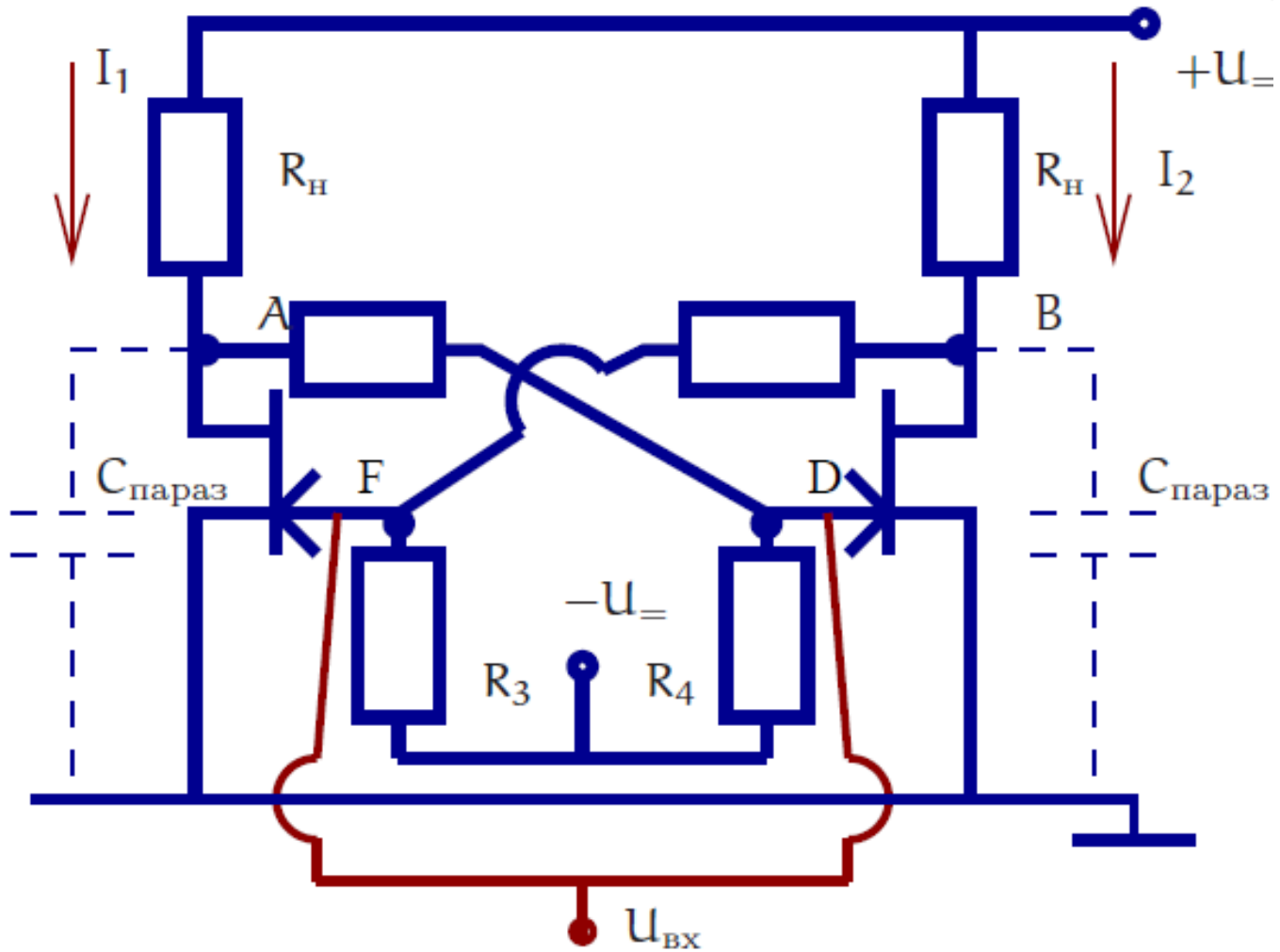
Одновременно  $C_2$  -- дозаряжается от  $U_{C_2}$  до  $U_{=}$ . Этот ток поддерживает **положительное** напряжение на левом транзисторе (он открыт). Когда  $C_1$  разрядится, напряжение на затворе правого транзистора станет **меньше** запирающего. Тогда ток через правый транзистор возрастет, и произойдет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





# Триггер

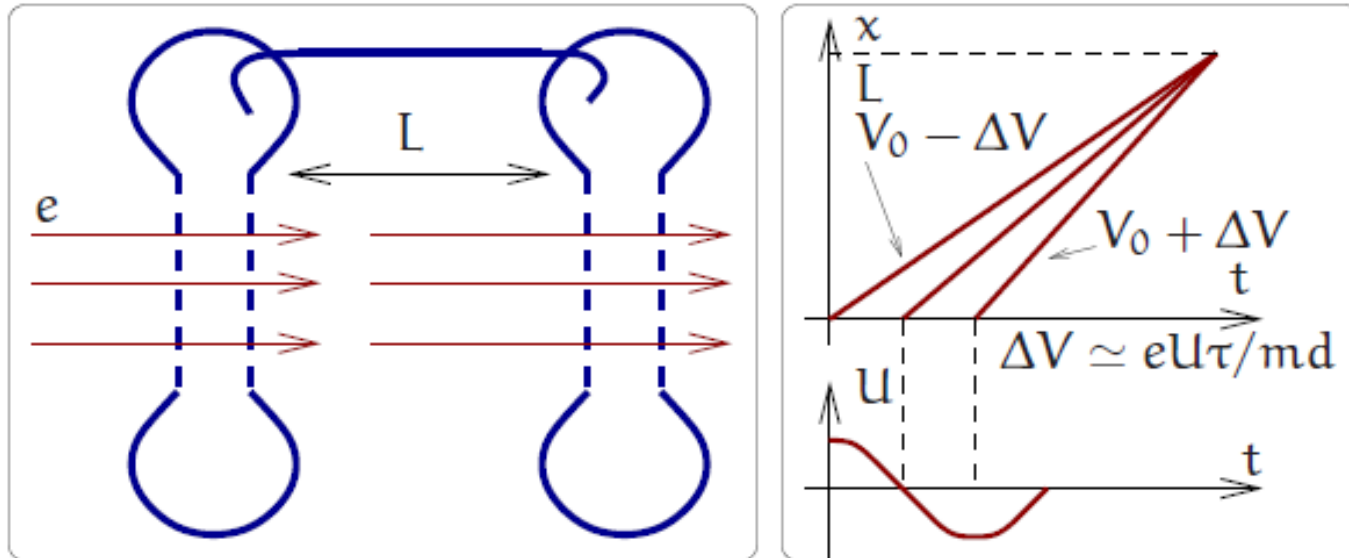
-- система с двумя устойчивыми положениями равновесия (основной элемент ЭВМ). Это модифицированный мультивибратор: нет емкостей, автоколебаний нет. Подбором параметров можно добиться двух устойчивых положений равновесия (1-ый транзистор открыт, а 2-ой закрыт, или наоборот). Импульс входного напряжения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

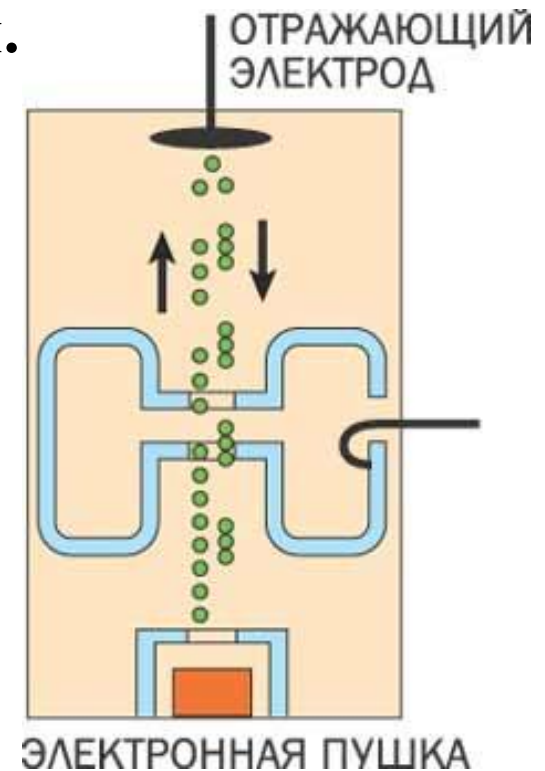


## Клистрон (продолжение)

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.

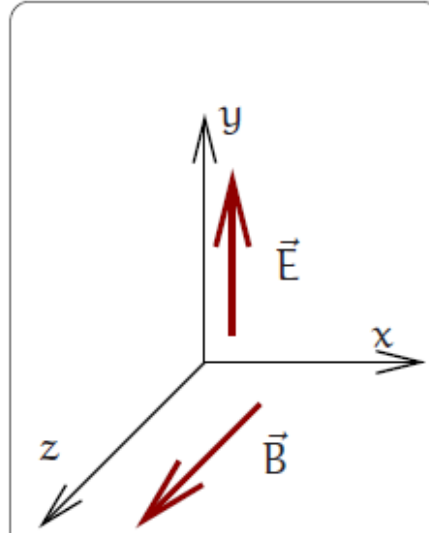
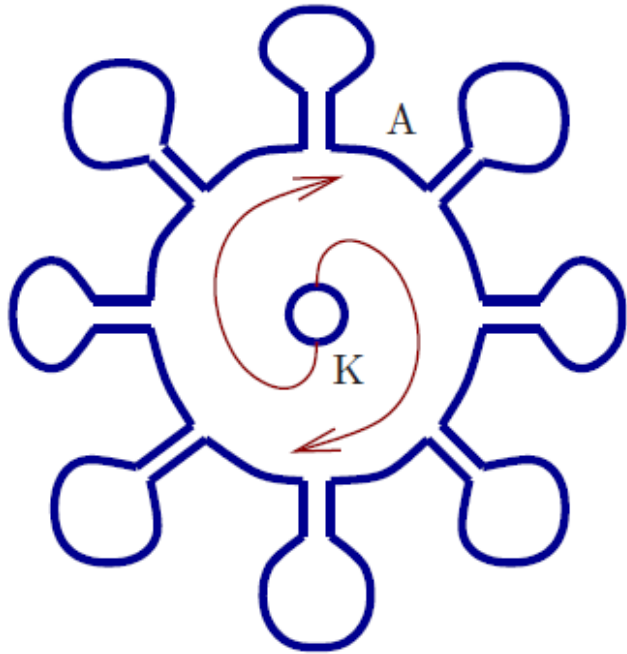
### Отражательный клистрон.

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).

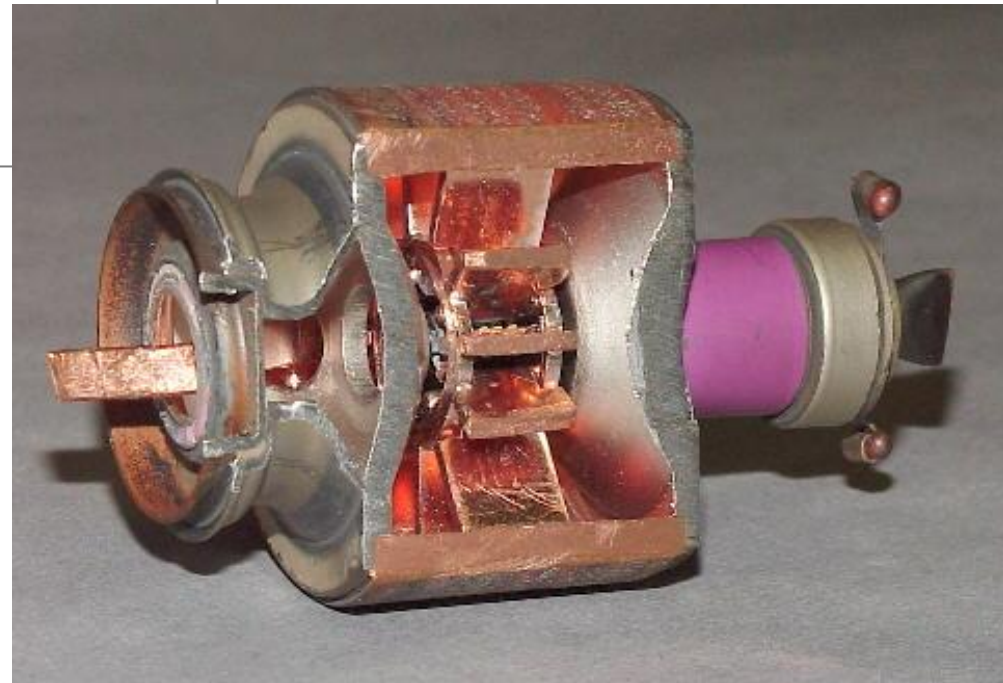




# Магнетрон



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.