

---

# Техника высоких напряжений

Высокое напряжение используется для ускорения частиц (электронов или ионов)

Для получения больших токов и больших энергий необходимо получение электрического поля большой напряженности

$$j = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot \frac{U^{3/2}}{a^2} \quad \text{-закон Чайлда-Ленгмюра}$$

## Предельные электрические поля

Воздух – 30 кВ/см

Вакуум – 100-150 кВ/см

Поверхность – 3 кВ/см

# Пути повышения рабочего напряжения

*Ограничение по пробою по поверхности*

Полировка поверхности изоляторов

Увеличение длины поверхности изоляторов

Уменьшение напряженности поля вдоль изолятора

Уменьшение электрического поля в “тройных точках” (металл-диэлектрик-вакуум)



# Пути повышения рабочего напряжения

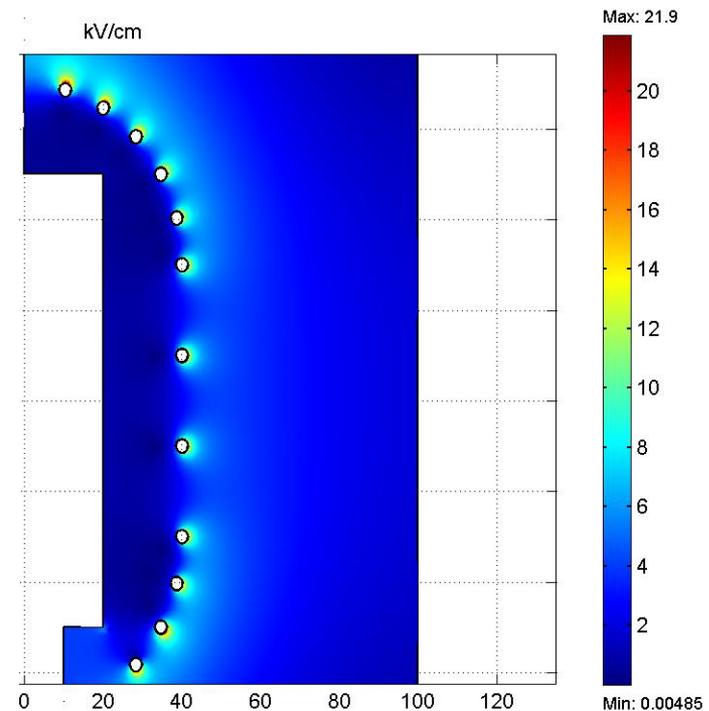
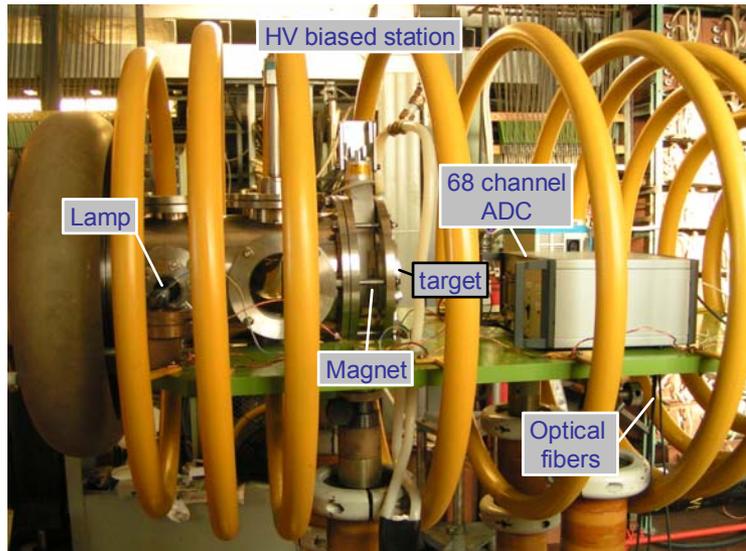
*Ограничение по пробое в воздухе*

Экранирование областей повышенного поля

Применение газовой или масляной изоляции

Элегаз (1 атм) – 90 кВ/см – **сосуды под давлением**

Масло (1 атм) – 250 кВ/см – **горючая жидкость**



# Пути повышения рабочего напряжения

*Ограничение по пробоем в вакууме*

Экранирование областей повышенного поля

Полировка поверхности электродов

Тренировка зазоров (ограничение мощности в пробое)

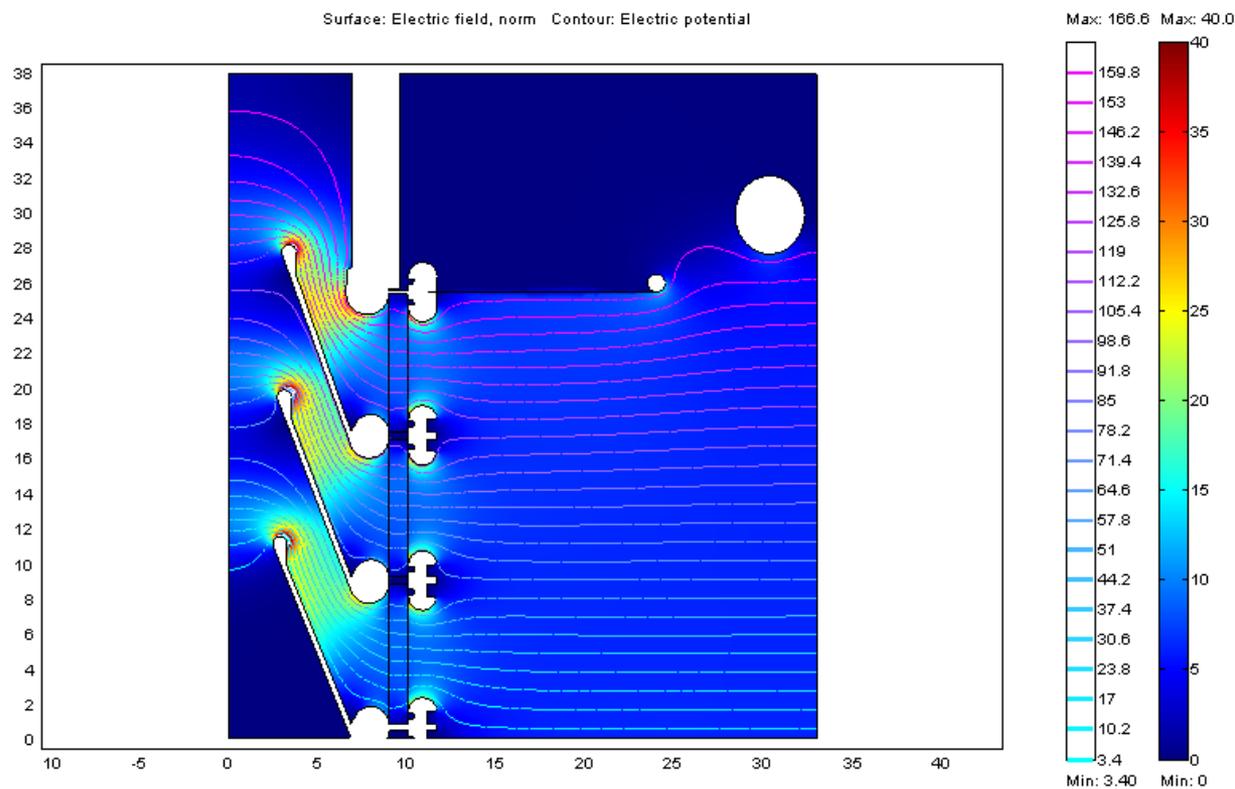
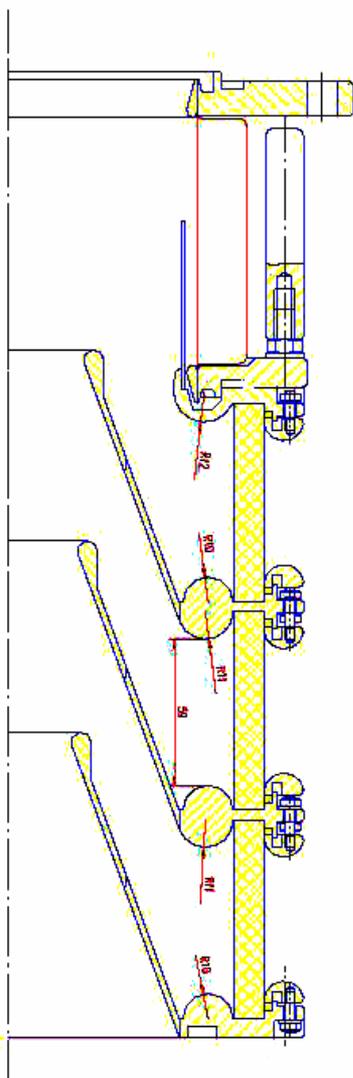
# Особенности конструирования ускорительных трубок

Экранирование областей повышенного поля

Снижение поля в тройных точках

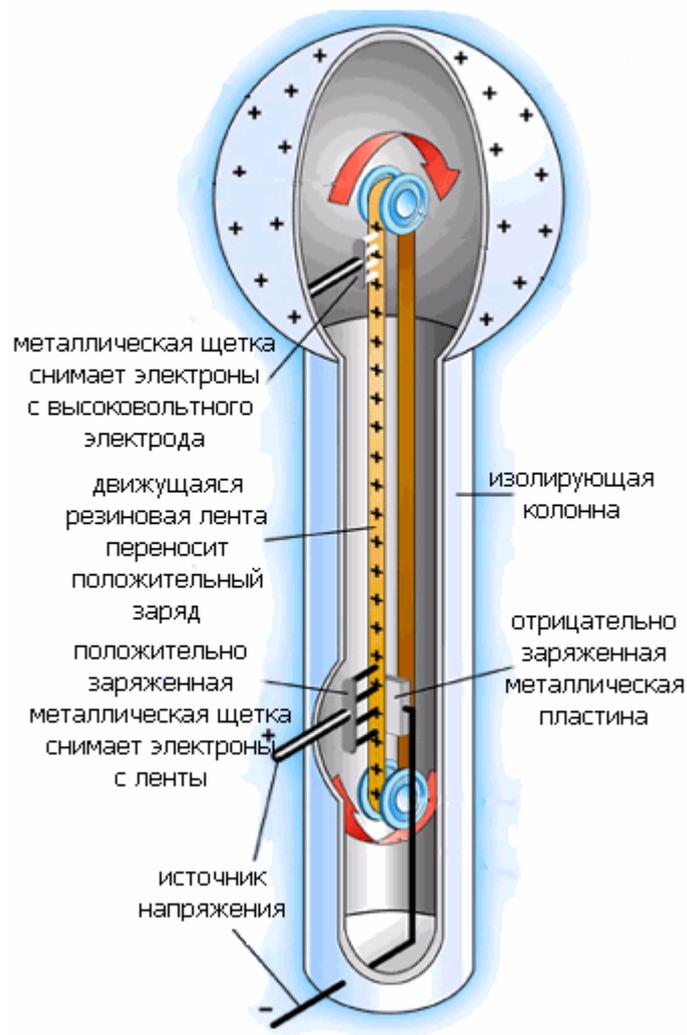
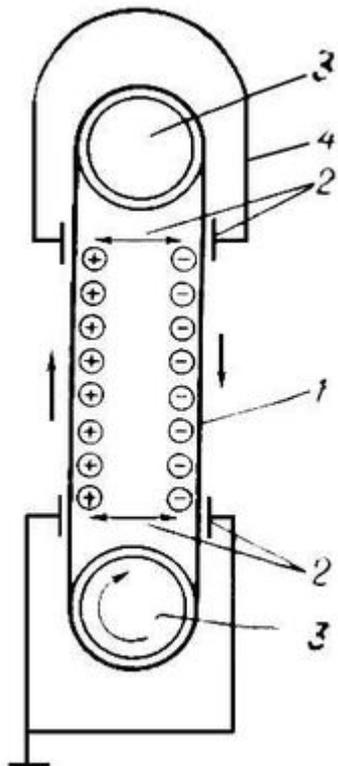
Защита поверхности изоляторов

Принудительный разнос потенциалов



# Получение высоких напряжений

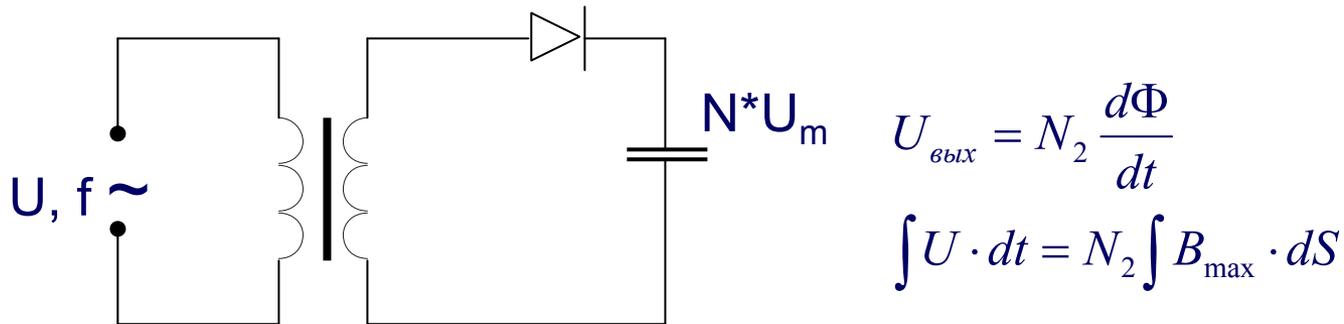
## Генератор Ван де Графа



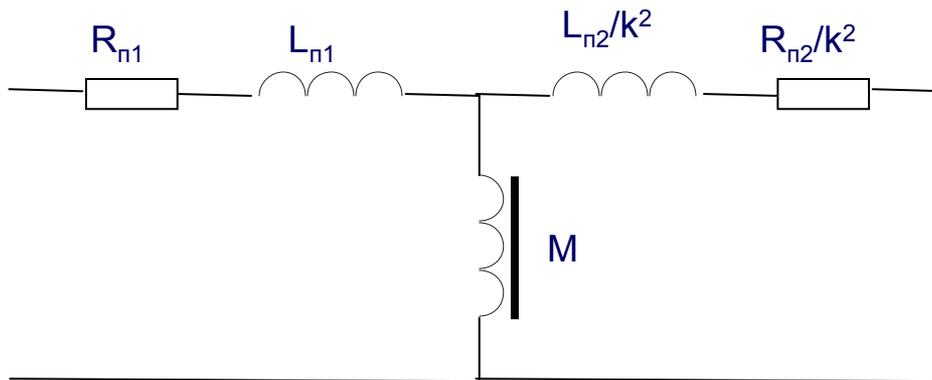
Напряжение – до 25 МВ

# Получение высоких напряжений

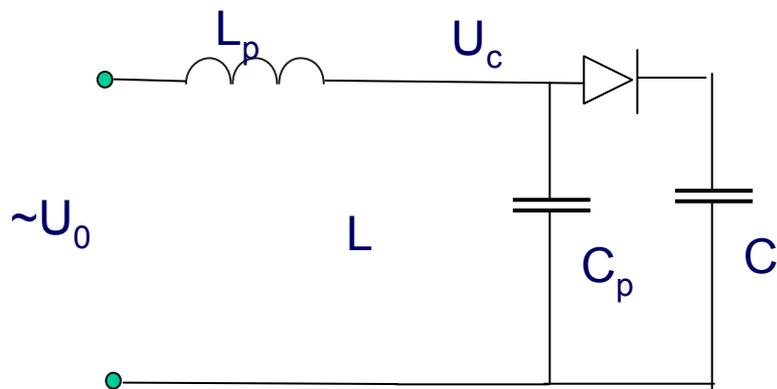
## Трансформаторы



## Эквивалентная схема трансформатора



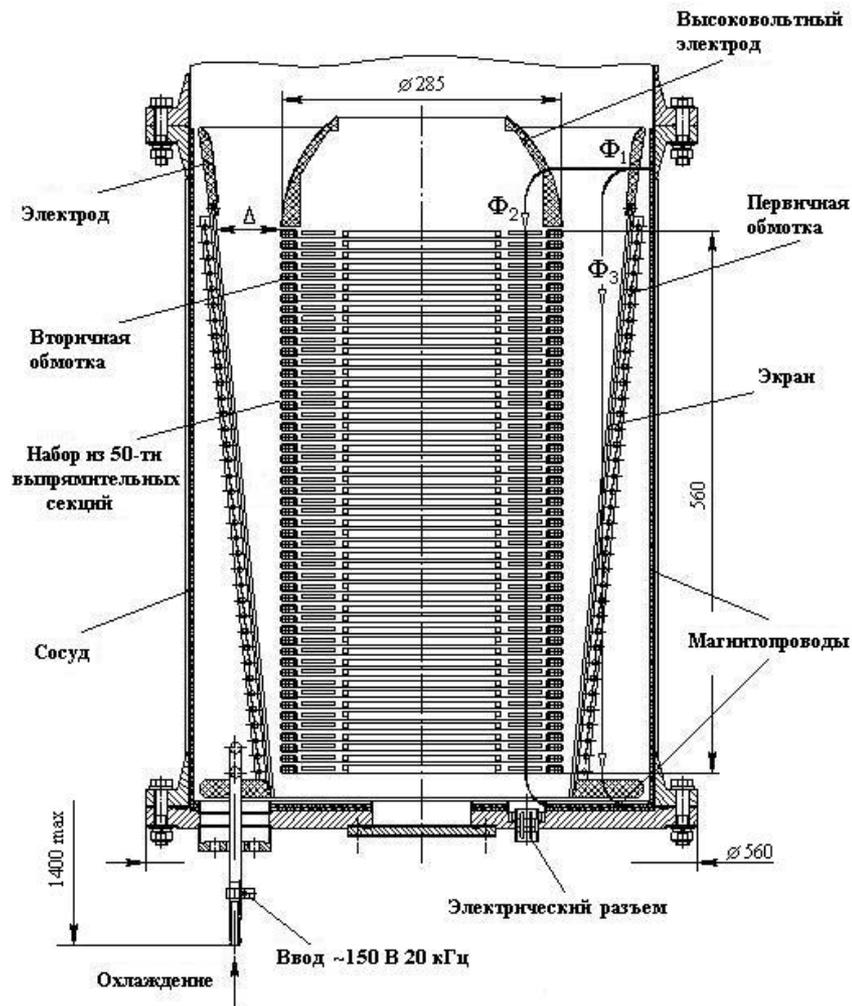
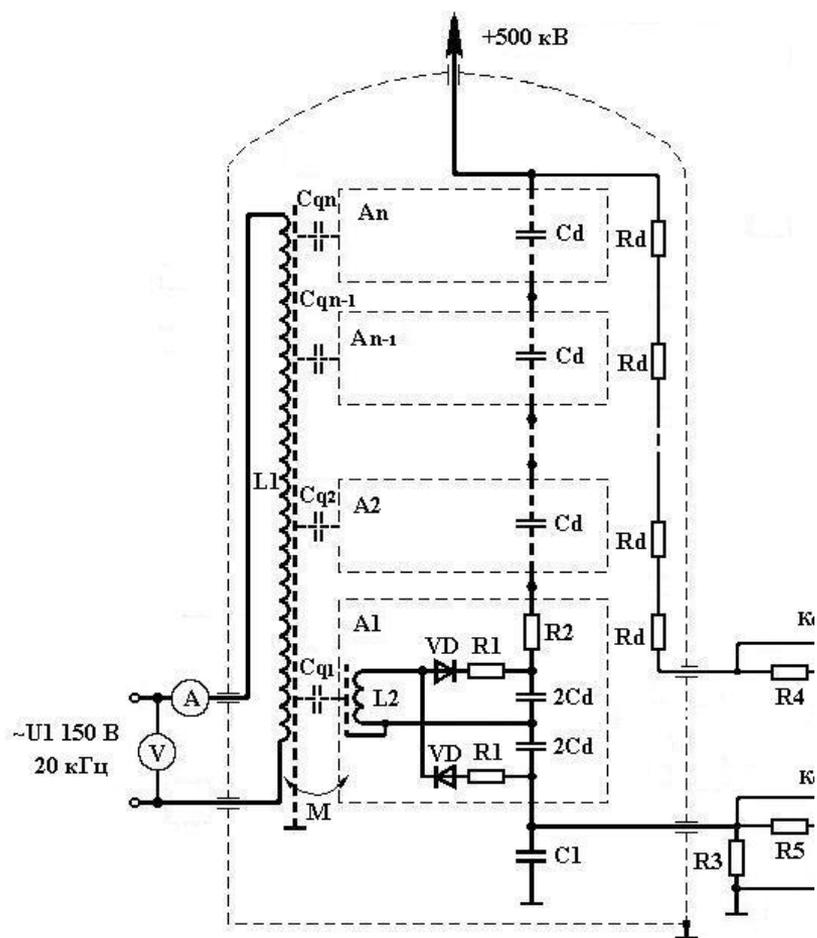
# Использование напряжения повышенной частоты (20 кГц) Опасность резонансов



$$R = \omega L_p - \frac{1}{\omega C_p}$$

$$U_c = U_0 \frac{\omega C_p}{\omega^2 L_p C_p - 1}$$

## Секционирование вторичной обмотки

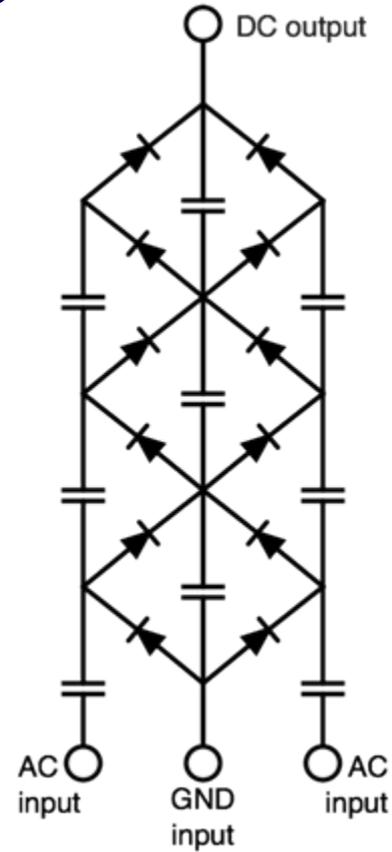
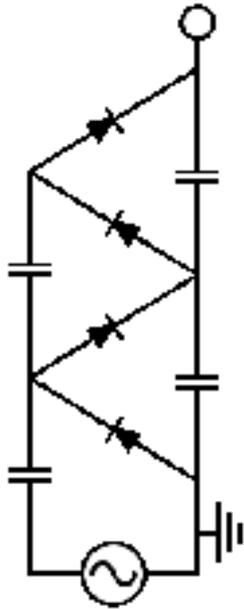


Изоляция – элегаз ( $SF_6$ )

Использование напряжения повышенной частоты (20 кГц)

# Каскадный генератор

Схема Кокрофта-Уолтона



$$U_{\text{вых}} = N \cdot U_{\text{max}}$$

$$\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} \left( \frac{1}{3} N^3 + \frac{1}{2} N^2 + \frac{1}{6} N \right)$$

$$U_{\sim} = \frac{I}{f \cdot C} \left( \frac{N(N+2)}{2} \right)$$

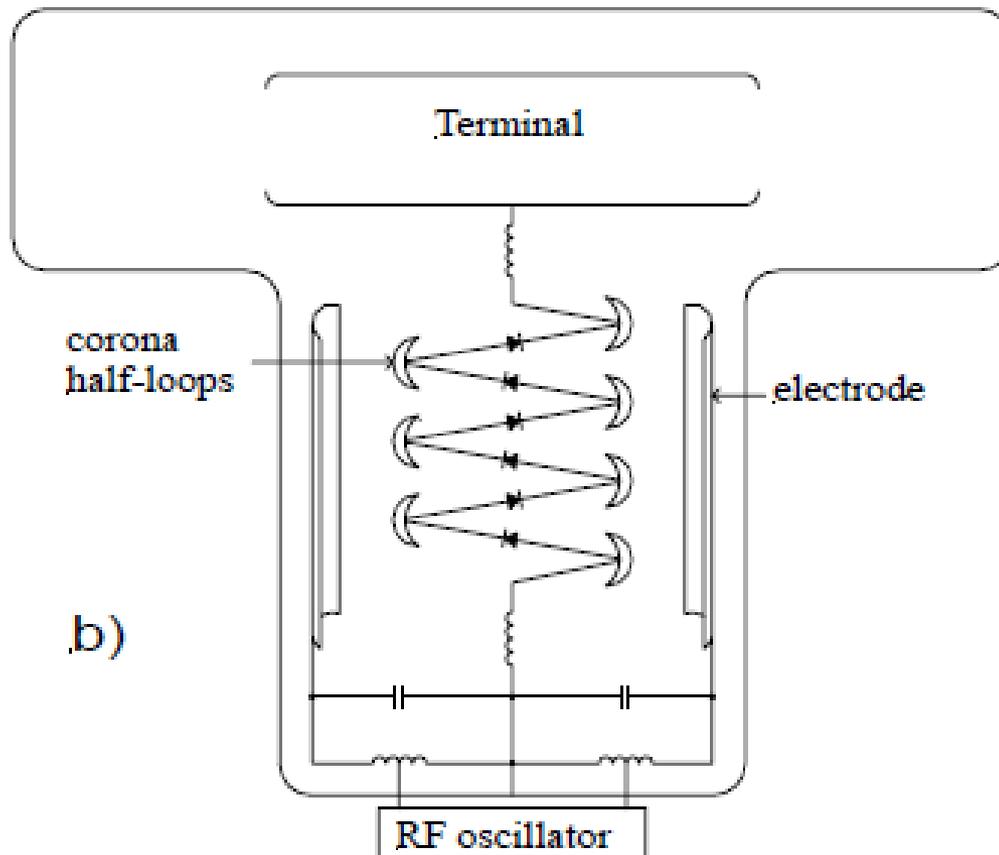
$$U_{\text{вых}} = N \cdot U_{\text{max}}$$

$$\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} \left( \frac{1}{6} N^3 + \frac{1}{4} N^2 + \frac{1}{12} N \right)$$

$$U_{\sim} = \frac{I}{f \cdot C} \frac{N}{2}$$

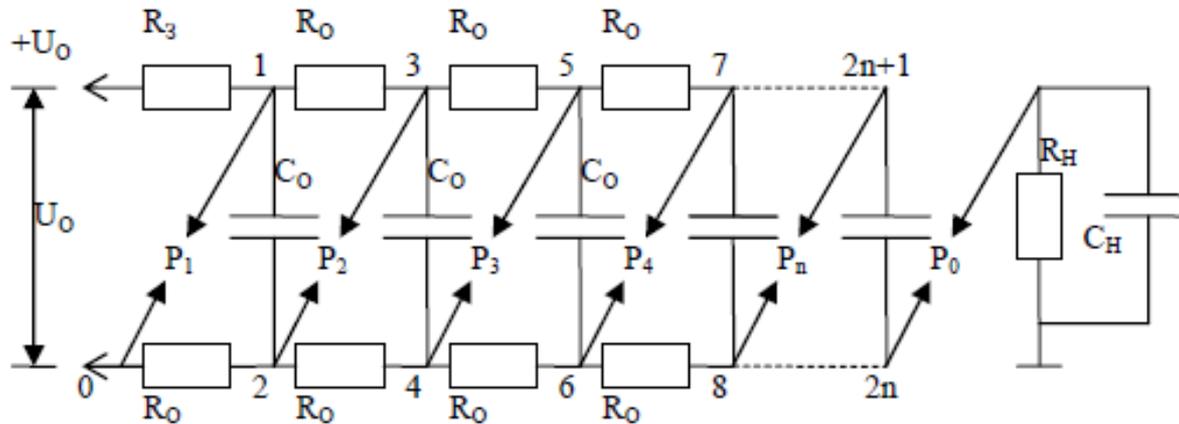
# Каскадный генератор

Динамитрон



# Генераторы импульсных напряжений

## Схема Аркадьева - Маркса

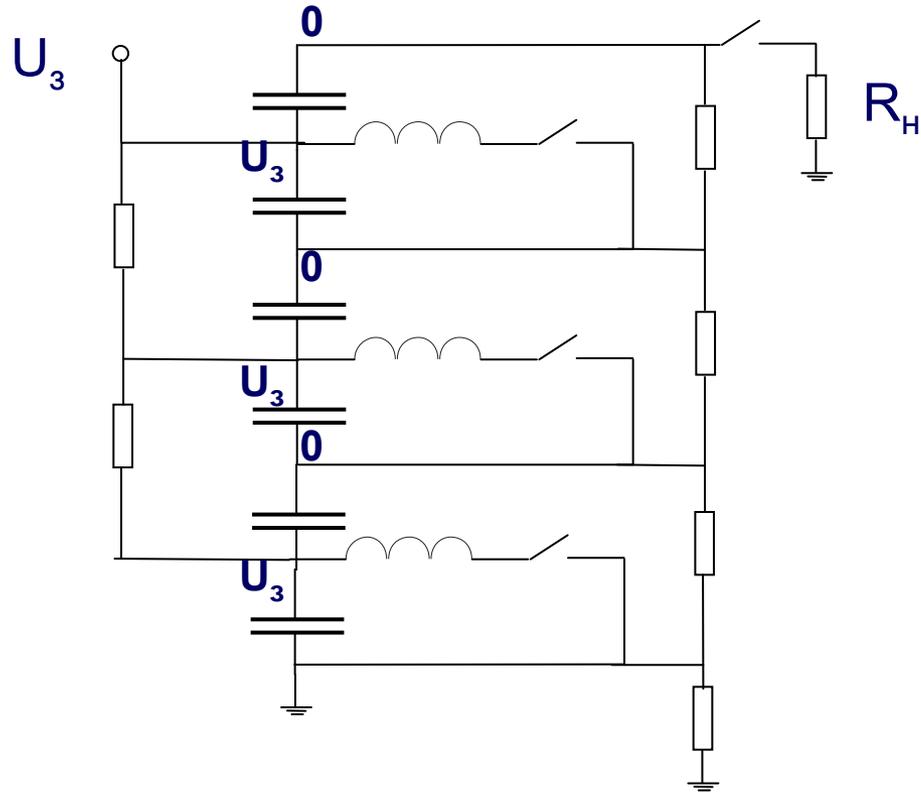


### Недостатки

- Разрядники в цепи конденсаторов (влияние индуктивности)
- Надежность разрядников

# Генераторы импульсных напряжений

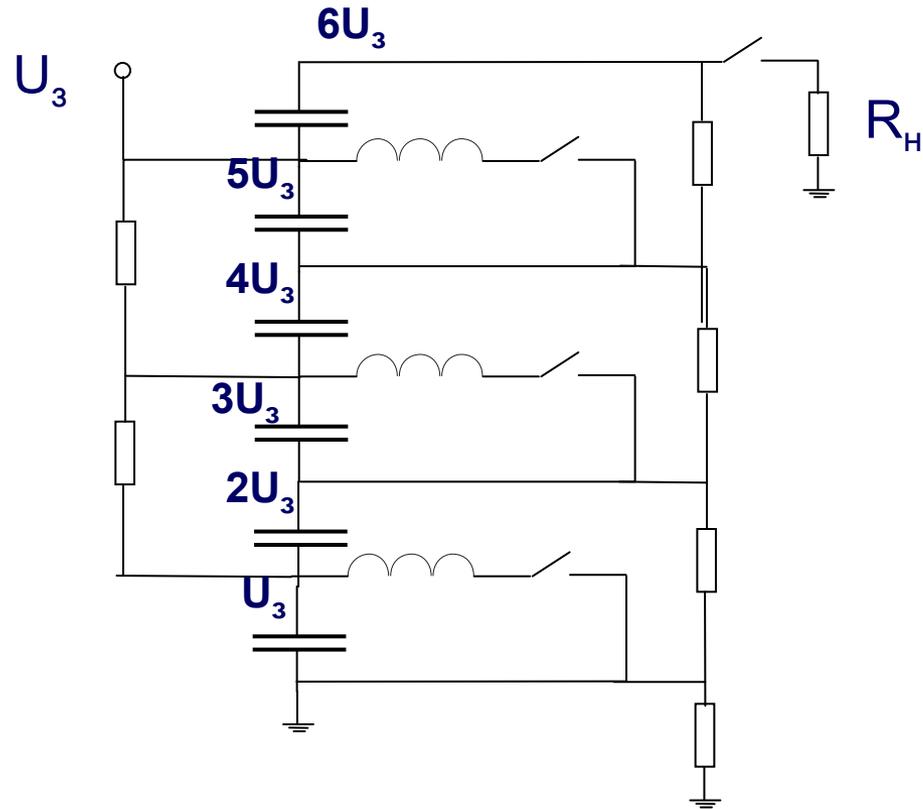
## Схема Фитча



- Разрядники вне основной цепи конденсаторов
- Полное число разрядников  $n/2+1$

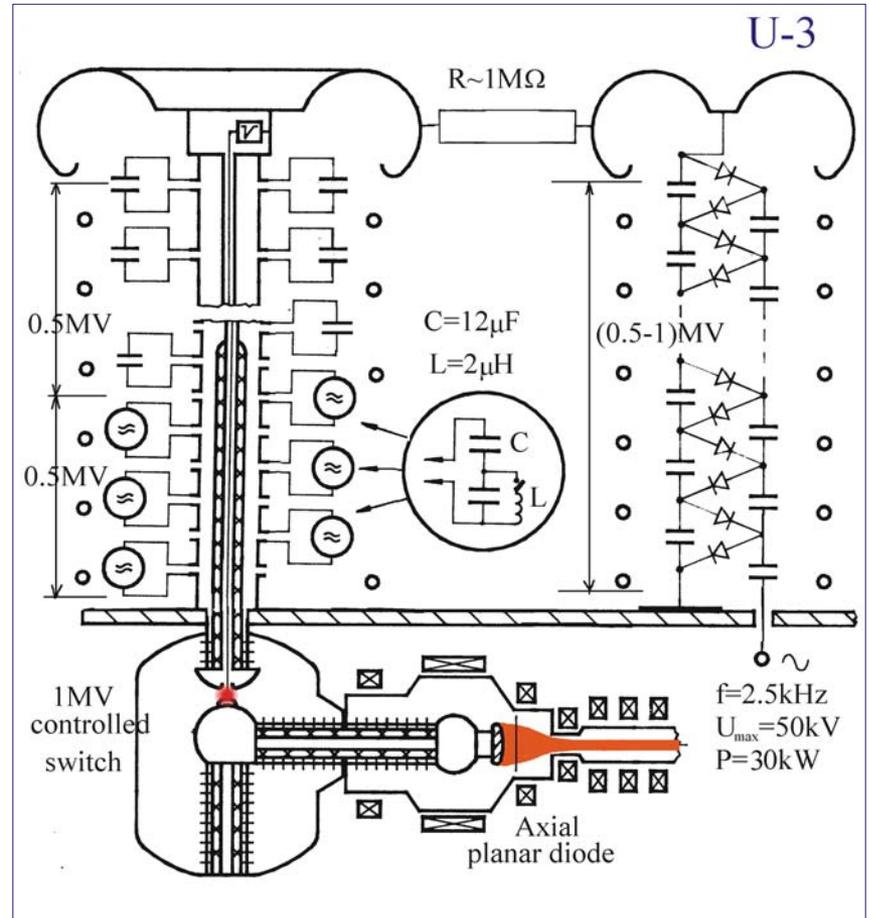
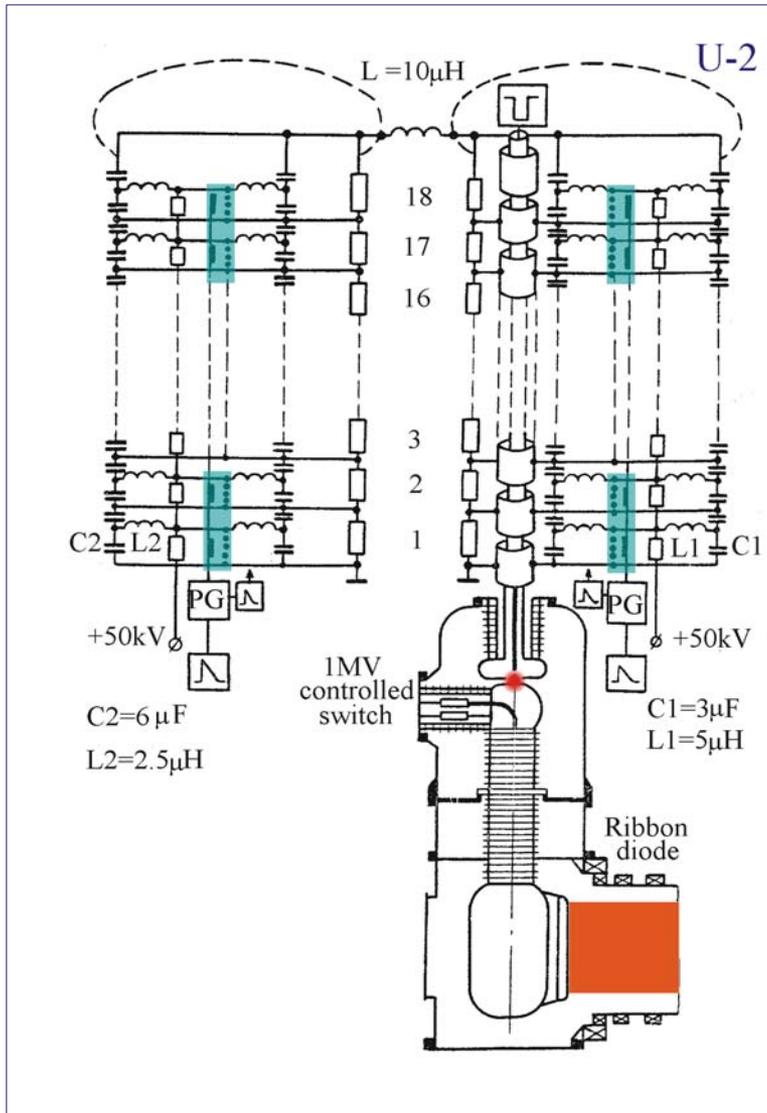
# Генераторы импульсных напряжений

## Схема Фитча

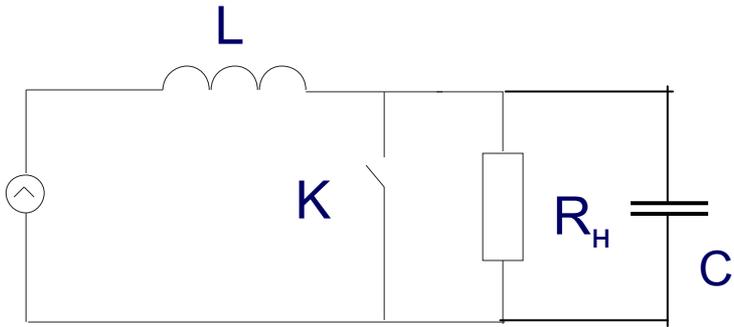


- Разрядники вне основной цепи конденсаторов
- Полное число разрядников  $n/2+1$

# Генераторы импульсных напряжений



# Генераторы импульсных токов



$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU_{\text{вых}}^2}{2}$$
$$U_{\text{вых}} = I\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Размыкатели:

- Механические
- Полупроводниковые
- Взрывающиеся проводники
- Вырождающийся сверхпроводник
- Плазменный (эрозионный) размыкатель

# Генераторы импульсных токов

Схемы с паузой тока

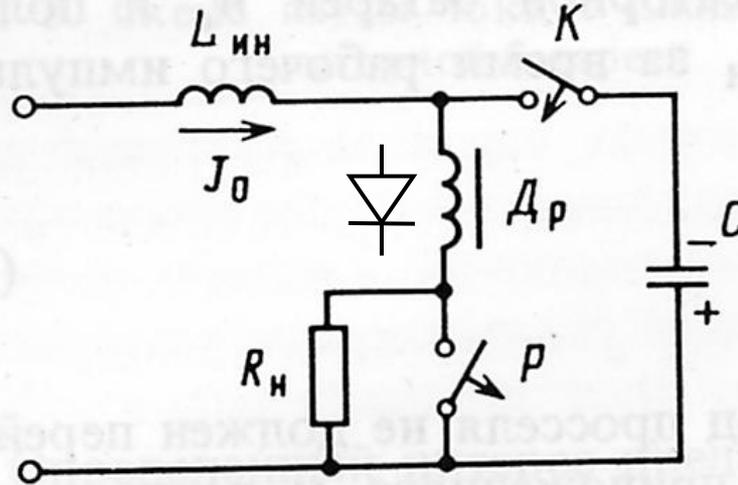
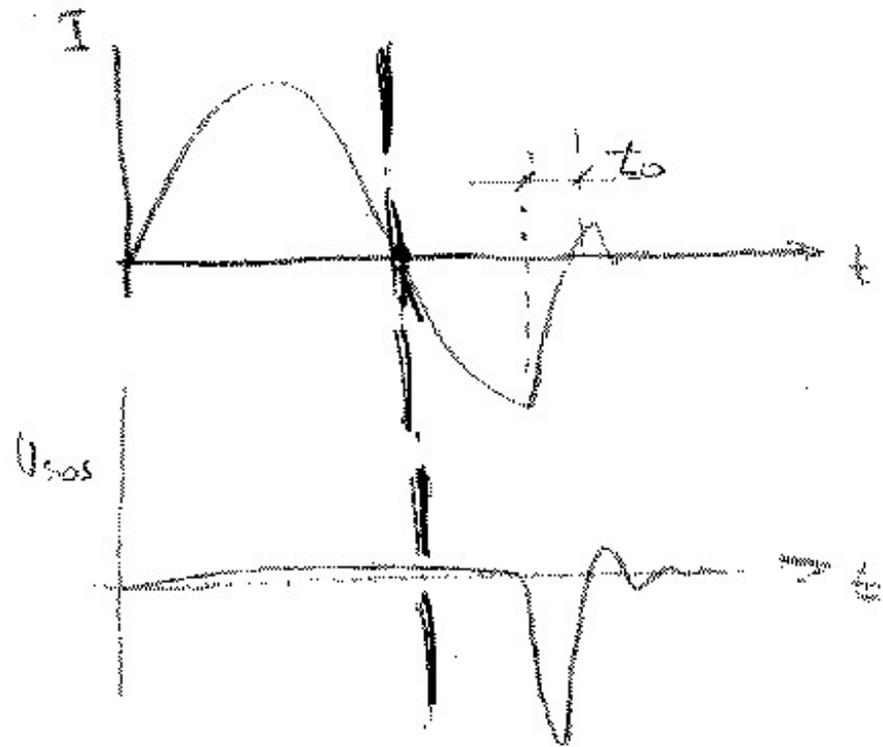
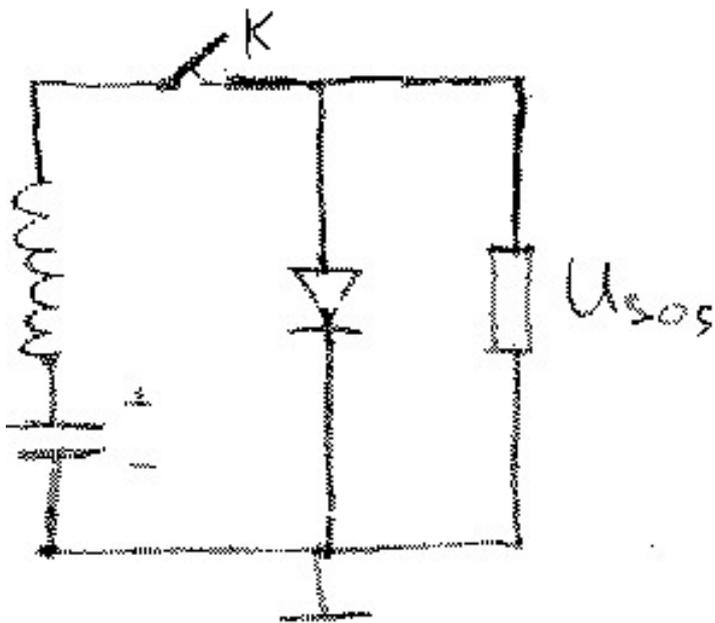


Рис. 3. Схема паузы тока с насыщающимся дросселем и конденсаторной батареей

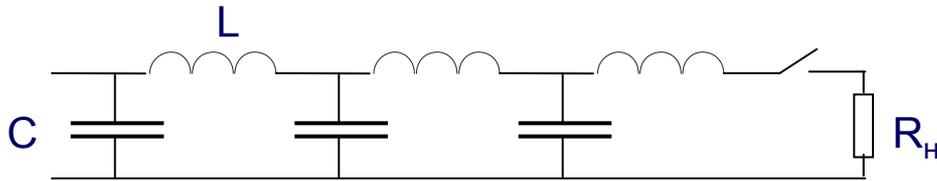
# Генераторы импульсных токов

Полупроводниковый размыкатель  
Диоды СДЛ, КЦ105



# Формирующие линии

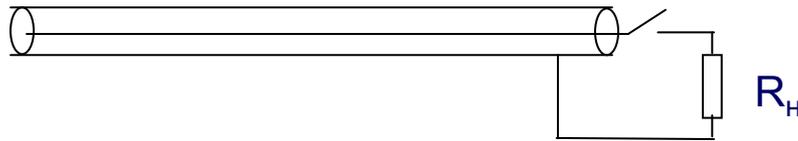
Получение прямоугольного импульса



$$R_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \tau = 2N \cdot \sqrt{LC} \quad U = 0.5 \cdot U_{зар}$$

# Формирующие линии

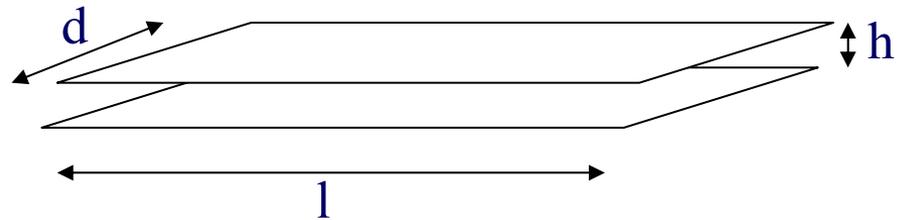
Линия с распределенными параметрами



$$R_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \sim \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{d}{h} \quad \tau = \frac{2c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \cdot l \quad U = 0.5 \cdot U_{зар}$$

Мощность на нагрузке

$$P = \frac{U_0^2}{4R_L}$$

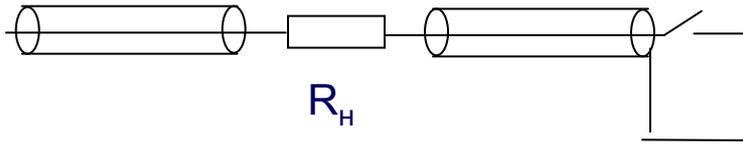


Кабель 25 - 75 Ом

Водяная линия – 0,5 – 5 Ом

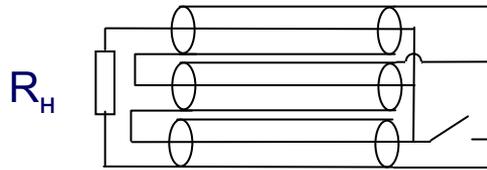
# Формирующие линии

Двойная формирующая линия

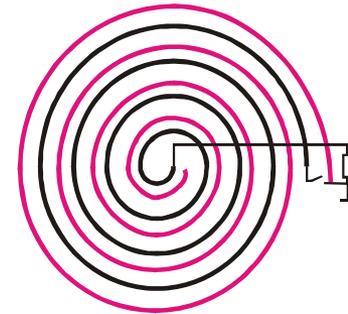


$$R_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \tau = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot l \quad U = U_{зар}$$

Кабельный трансформатор



Спиральный генератор

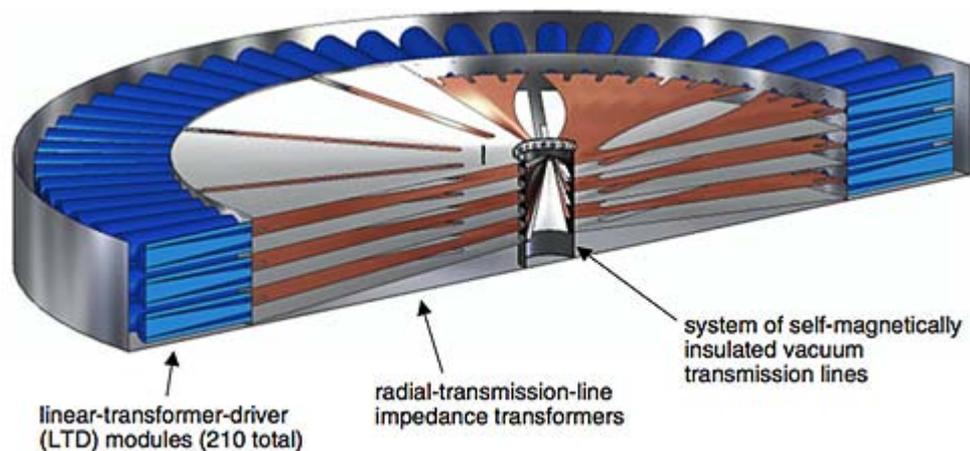
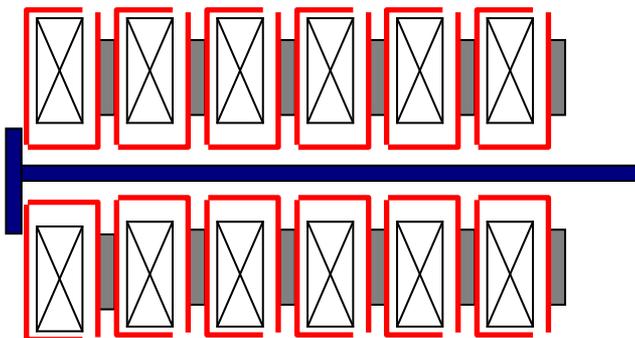


# LTD – linear transformer driver

Томск, Институт сильноточной электроники

Ячейка – конденсатор + разрядник с низкой индуктивностью  
100 кВ, 25 кА

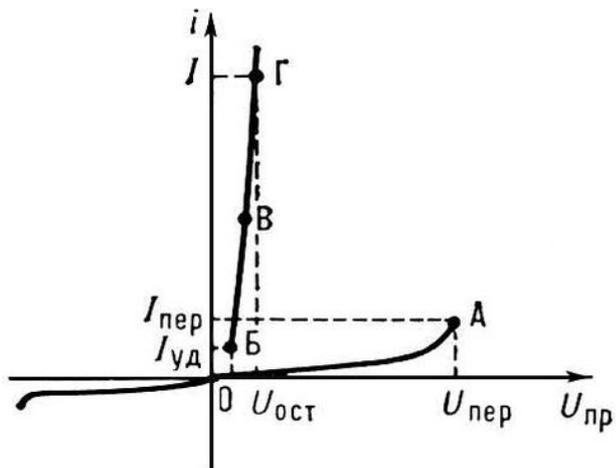
Параллельное и последовательное объединение ячеек – 6 МВ, 60  
МА



# Коммутаторы

Полупроводниковые  
-тиристоры

Время включения 1 -100 мкс,  $di/dt \sim 1 \text{ кА/мкс}$



-оптотиристоры (совместно с Nd лазером)  
10-30 нс, 10 кВ

-IGBT транзистор  
1200 В, 80 А,  $\sim 1 \text{ мкс}$

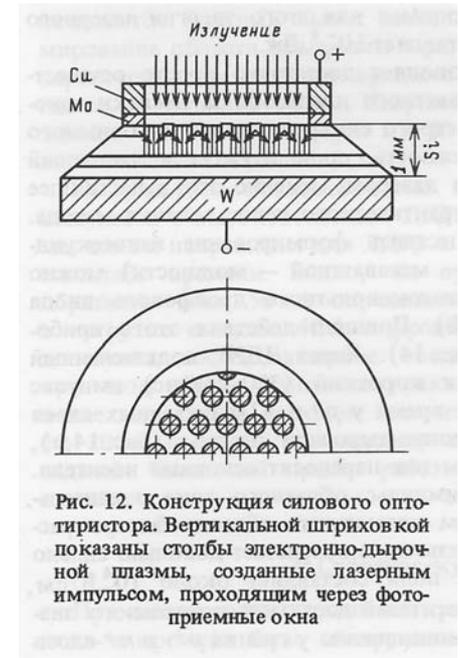
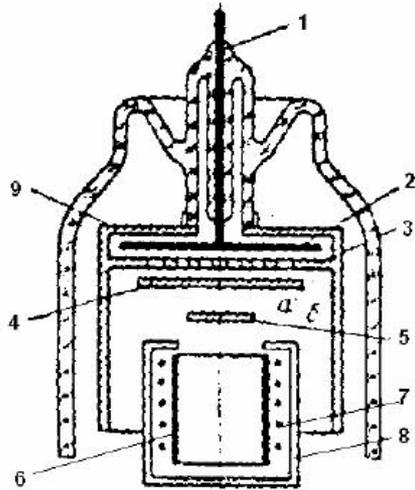


Рис. 12. Конструкция силового опто-тиристора. Вертикальной штриховкой показаны столбы электронно-дырочной плазмы, созданные лазерным импульсом, проходящим через фото-приемные окна

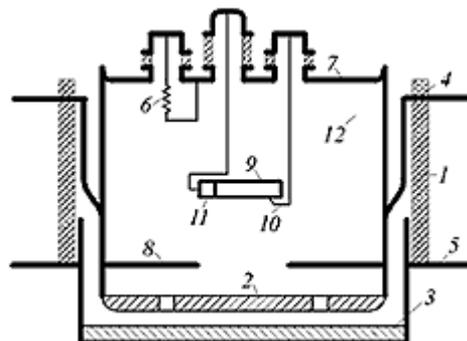
# Коммутаторы

-тиратрон 50 кВ, 5 кА, 50 нс  
требуется накал  
не допускается обратный ток



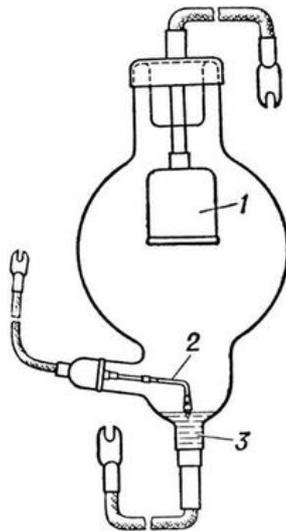
# Коммутаторы

-Псевдоискровой разрядник 10-50 кВ, 5-50 кА,  $10^{12}$  А/с  
не требуется накал



# Коммутаторы

Игнитрон 25 кВ, 100 кА, 1 мкс

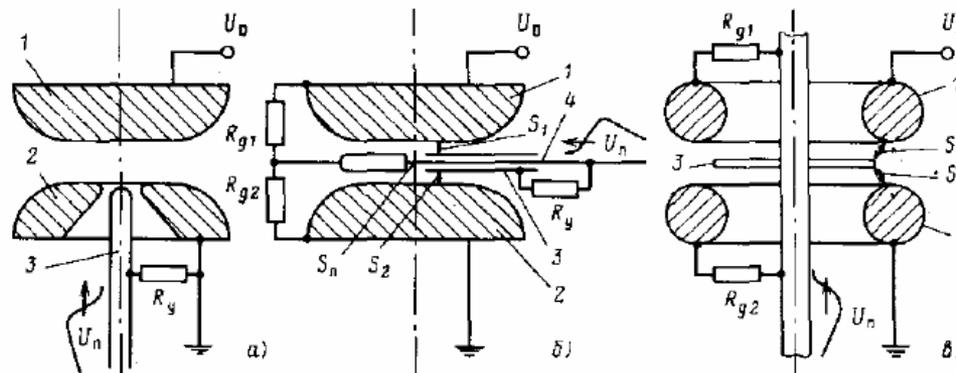


# Коммутаторы

-Разрядники

$t \sim 1$  нс,  $I \sim 100$  кА,  $U$  1-1000 кВ

Для повышения электрической прочности заполняются газом при высоком давлении



# Коммутаторы

## Многозачорные разрядники

