Системы питания физических установок

Основные потребители энергии

Магнитное поле

Система нагрева (ускорения частиц)

Технологические системы

Характер потребления энергии

Импульсный

Импульсно-периодический

Постоянный

Потребление энергии плазменной установкой

-Питание магнитной системы

ГОЛ-3: 2,5 МДж / 10 мс

ИТЭР 15 ГДж

-Питание системы создания плазмы и омического нагрева

Токамак Т-10 – 0,3 МА *1 В = 0,3 МВт

-Питание систем нагрева

-Электронные и ионные пучки

ГОЛ-3: 30 кА * 1 МВ = 30 ГВт

Пучки нейтралов

ГДЛ 6 * 1 МВт = 6 МВт

Генераторы ВЧ и СВЧ излучения

~несколько МВт

Источники энергии

-Промышленная сеть

-Накопители энергии

-Емкостные

-Индуктивные

-Механические

-Химические

Питание от промышленной сети

Мощность – сотни мегаватт

Не требуется дополнительный накопитель энергии

Необходима подводящая линия

Согласование с энергетическими службами

(Москва: 50-100 тыс.руб./кВт, Новосибирск : 10 тыс.руб./кВт)

1936 год – предложение использования энергии московского энергоузла для зажигания DD смеси

Токамак COMPASS-D

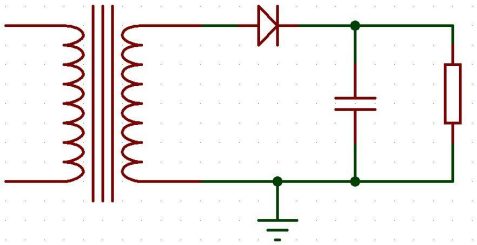
50 МВт * 2 с = 100 МДж

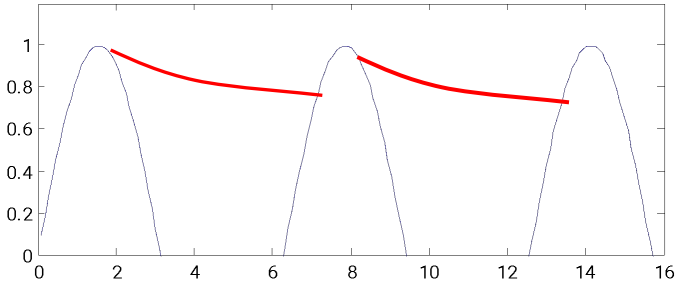
Culham – сеть 33 кВ

Прага – ??

Выпрямители

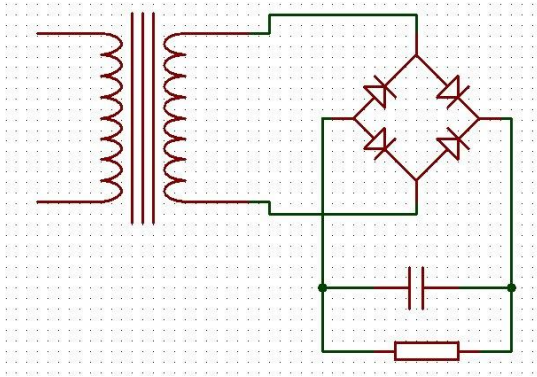
Однополупериодная схема

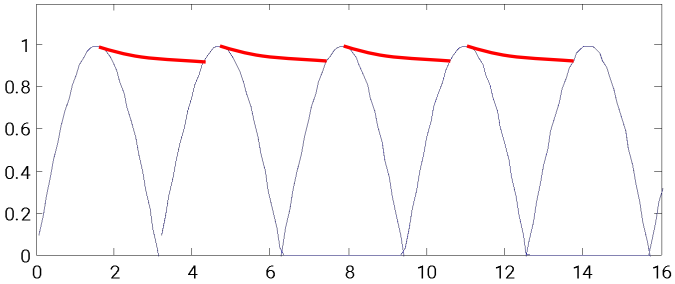




Двойное обратное напряжение на диодах
Большие пульсации
Нескомпенсированный магнитный поток через сердечник

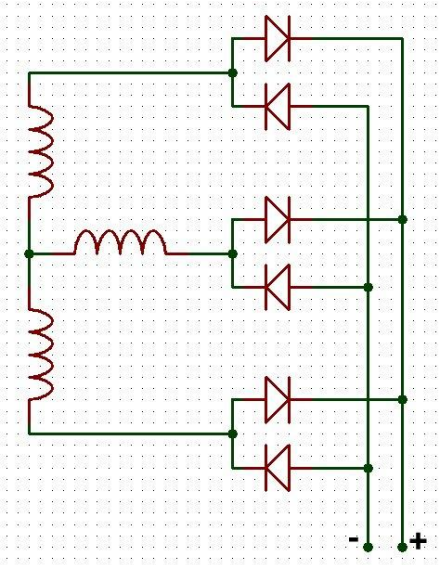
Двухполупериодная схема

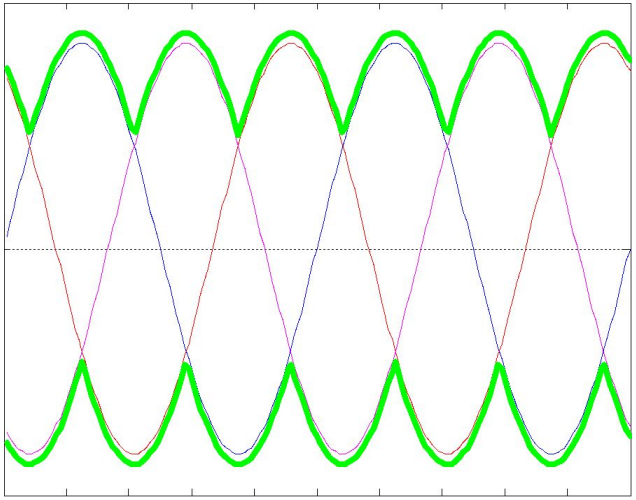


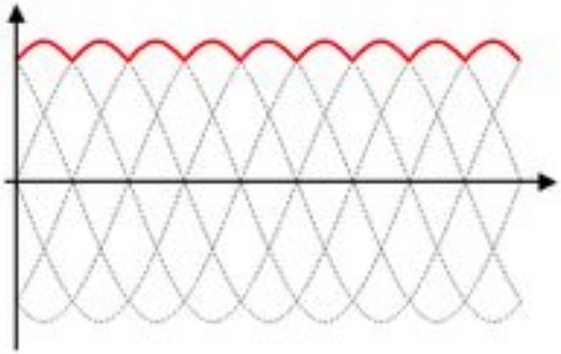


Трехфазный выпрямитель (схема Ларионова)

Пульсации – около 6%, 300 Гц

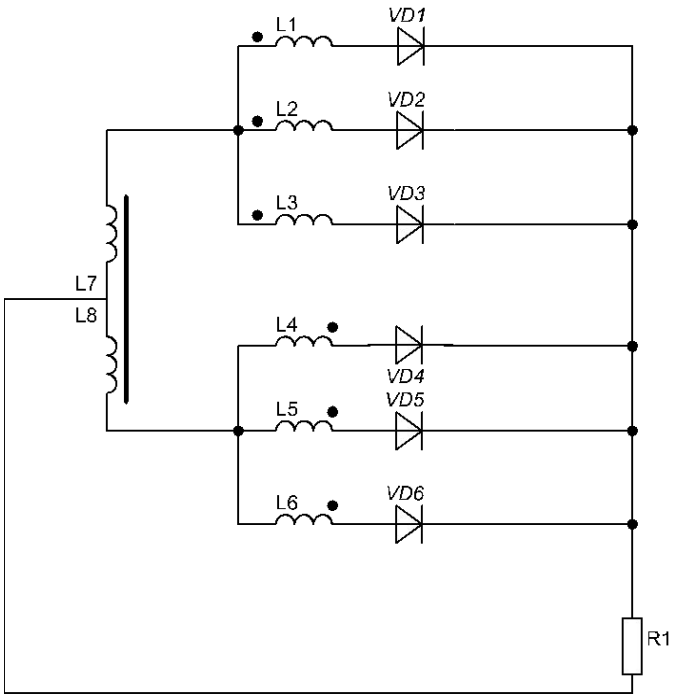


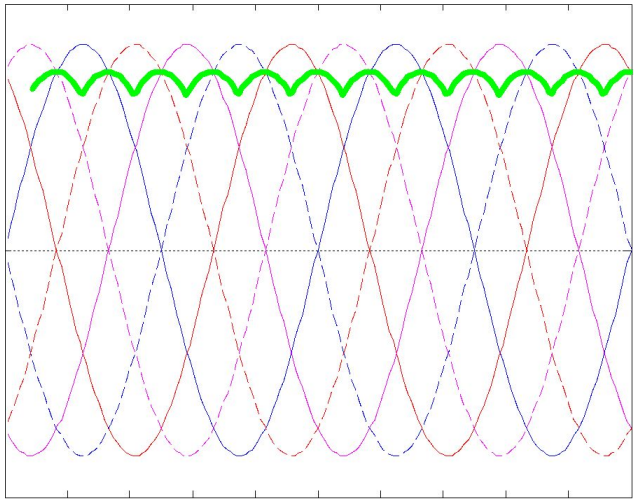




Трехфазный выпрямитель (схема с уравнительным реактором)

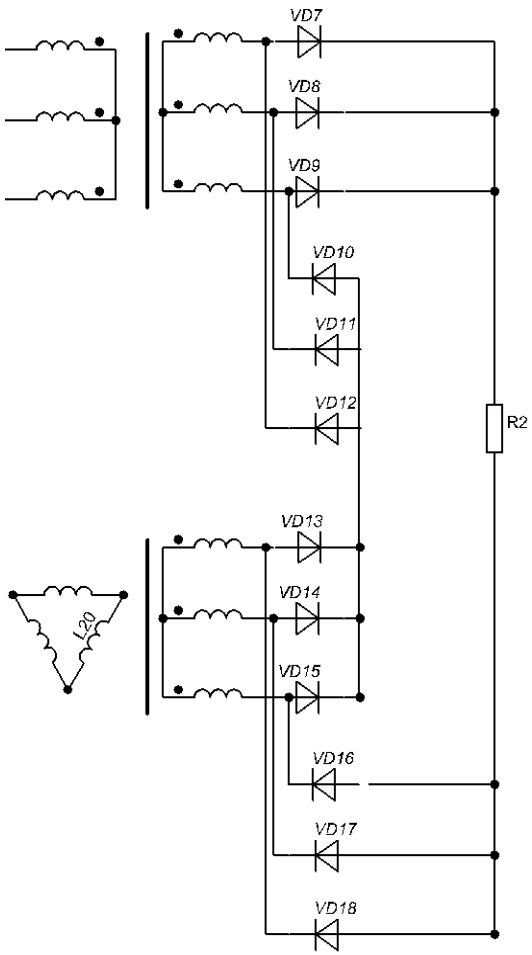
Пульсации – около 6%, 300 Гц
Используется в цепях низкого напряжения

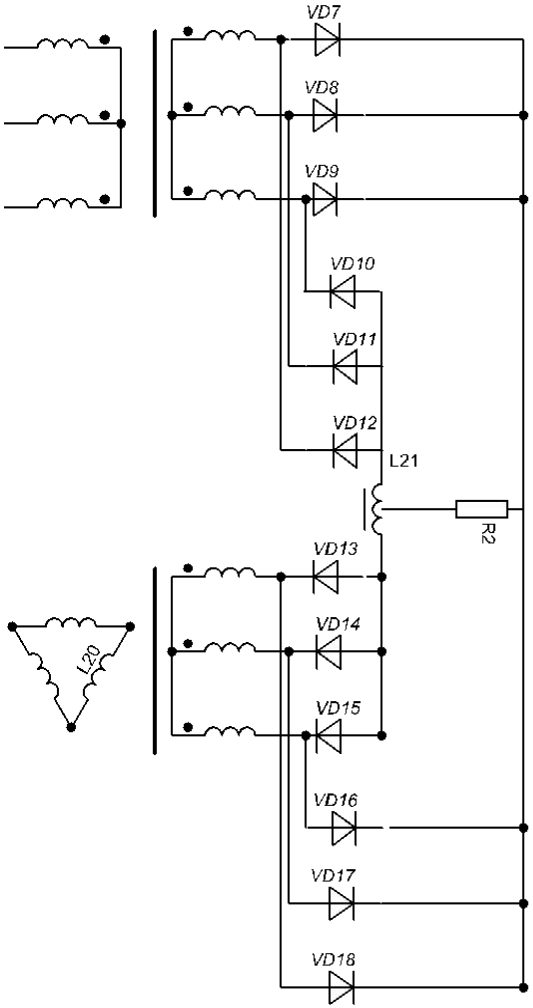




Трехфазный выпрямитель (двенадцатипульсная схема)

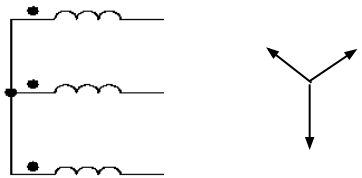
Пульсации –600 Гц



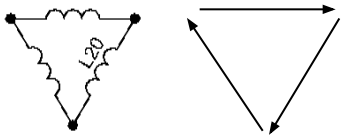


Соединение обмоток в зигзаг

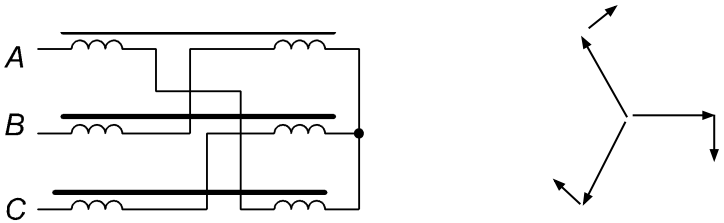
Звезда



Треугольник



Зигзаг



Регулировка и стабилизация напряжения

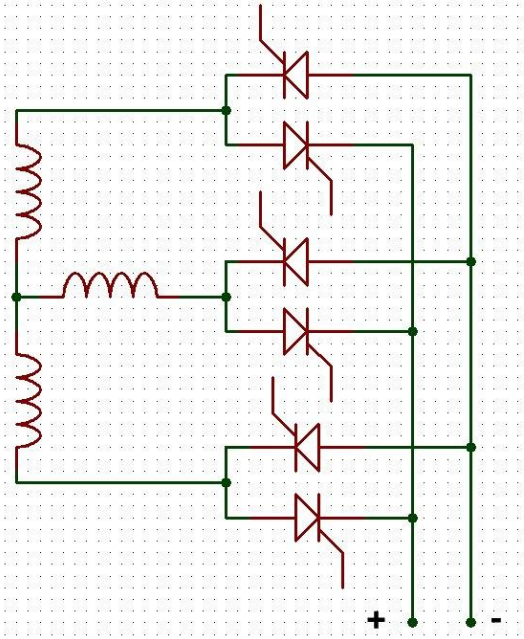
Автотрансформатор

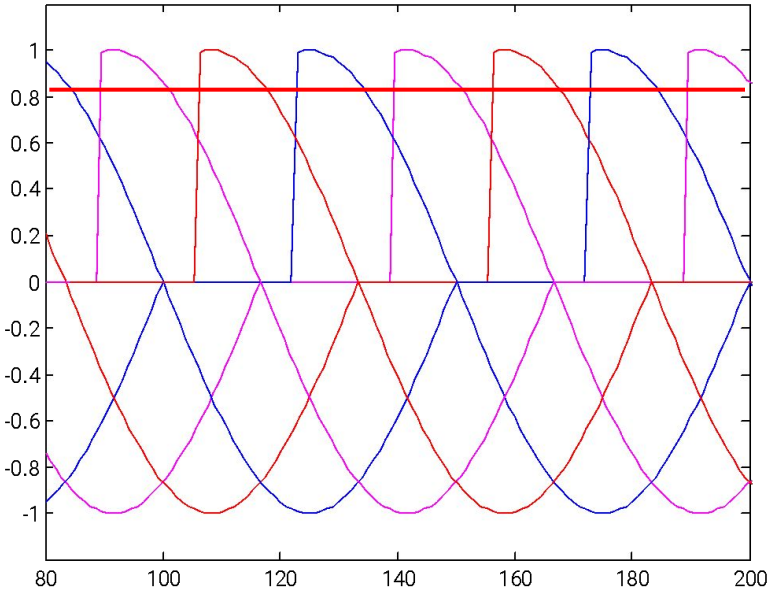
Мотор – генераторная пара

Дроссель с насыщением

Тиристорные (фазовые) схемы регулирования

Пара тиристоров открывается в нужный момент времени (в нужной фазе)

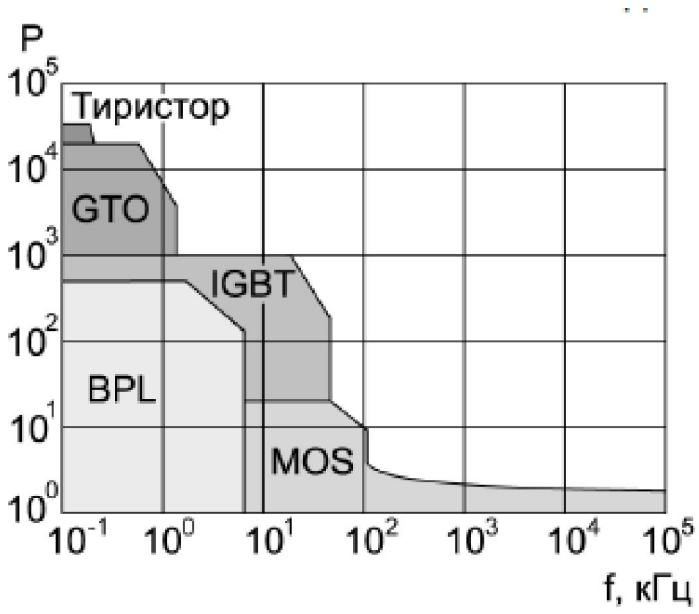




Транзисторные схемы преобразования

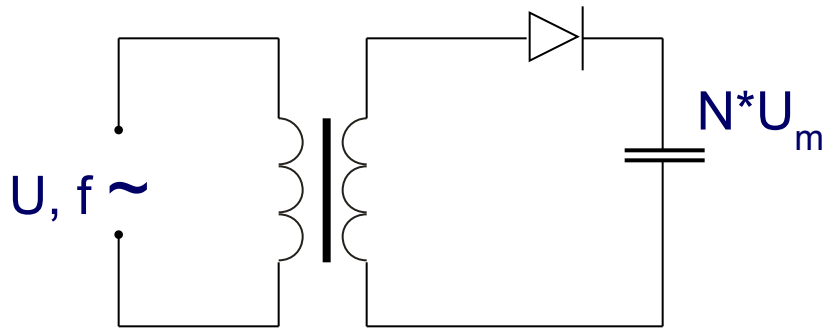
MOFSET – КМОП транзистор

IGBT – биполярный транзистор с изолированным затвором
1200 В, 80 А, ~1 мкс



Использование повышенной частоты

Быстрые ключи позволяют использовать повышенную частоту (до 500 кГц)



Сечение сердечника трансформатора

$$\int U \cdot dt = N_2 \int B_{\max} \cdot dS$$

$$S \sim \frac{U}{N_2 \cdot B_{\max} \cdot f}$$

Емкость конденсатора фильтра

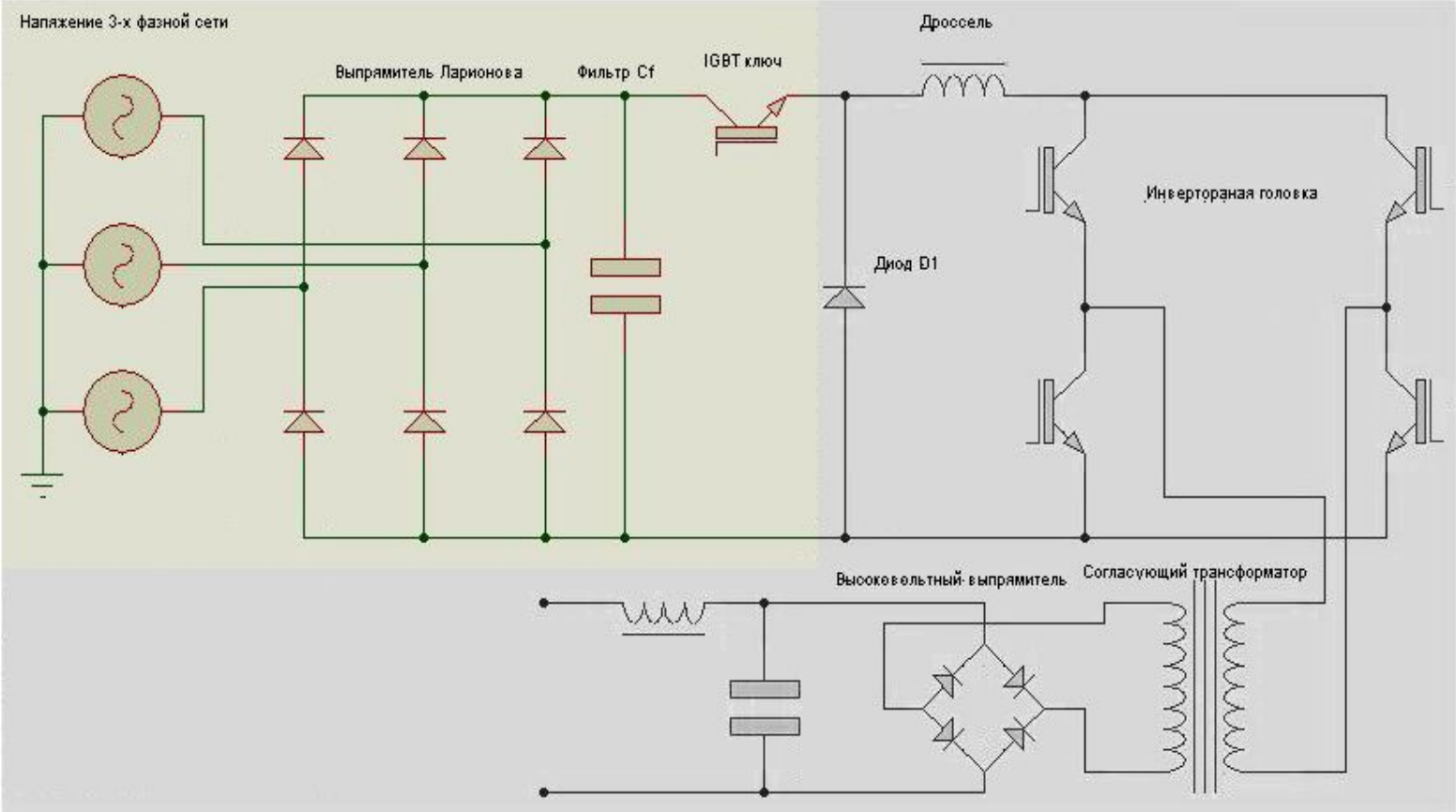
$$\frac{dU}{dt} = \frac{U}{RC}$$

$$C \sim \frac{1}{R \cdot f}$$

Разрешенные частоты

18 кГц +- 7,5%
22 кГц +- 7,5%
44 кГц +- 10%
66 кГц + 12% - 10%
440 кГц +- 2,5%

Принцип работы:



Конденсаторные накопители энергии

Накопленная энергия

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot V \sim 0.3\ Дж/см^3$$

Диэлектрики:

- Масло, касторка
- Бумага, пленки
- Керамика
- Оксидные пленки
- Вода ε=80

Обозначения конденсаторов:

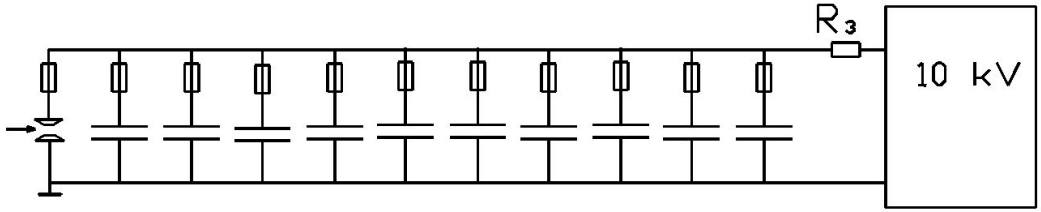
Имп. конденсатор	ИМ – 5-150	(5 kВ, 150 μф)
М – масляный	ИМ – 100-0,1	
К- касторка	ИК – 6-150	
С- саволовые	ИК – 50-3(6,9)	
(ядовитая жидк.)	ИК – 100-0,4	
	ИС – 5-200	

Эксплуатация конденсаторных батарей

Конденсаторная батарея ГОЛ-3:
15 МДж
ИК 6–150 - 2.7 кДж – 5000 шт

Секционирование
Ограничение времени зарядки (касторка)
Предотвращение обратного заряда
Самозаряд конденсаторов

Разделение конденсаторов предохранителями



Системы зарядки

Зарядка через токоограничивающий резистор

КПД 50%, время зарядки t=3-5 RC

$$P = U_n \frac{(U_n - U)}{R_з}$$

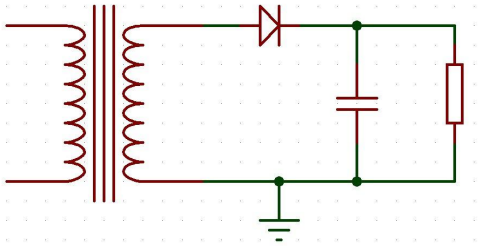
Зарядка от источника тока

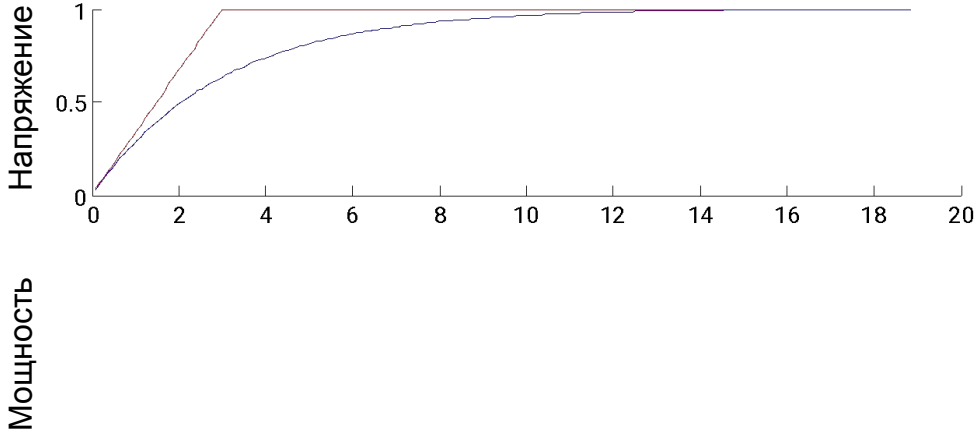
Высокий КПД

Постоянная скорость зарядки

Мощность увеличивается в ходе зарядки

$$P = I \cdot U$$





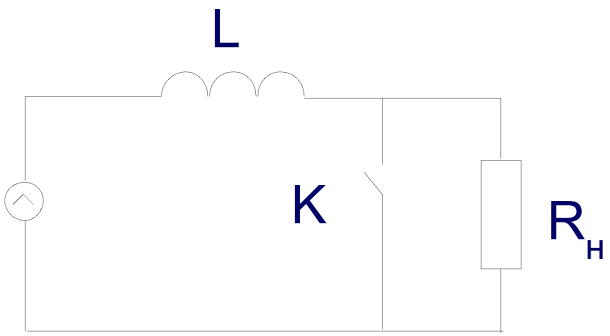
Время

Индуктивные накопители

Накопленная энергия $W = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} \cdot V \sim 10$Дж/см^3

Время заряда t<<L/R

$$U_н = L\frac{dI}{dt}$$



Размыкатели:

-Механические

-Полупроводниковые

-Взрывающиеся проводники

-Вырождающийся сверхпроводник

-Плазменный (эрозионный) размыкатель

Индуктивные накопители

Схемы с паузой тока

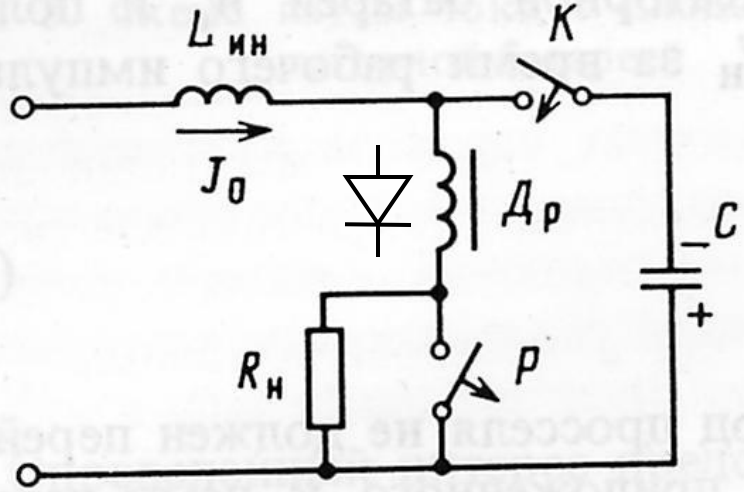
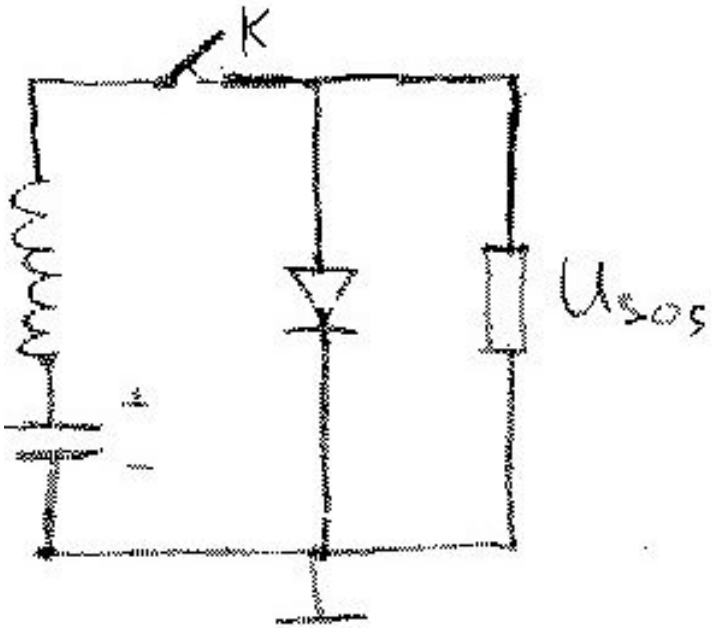
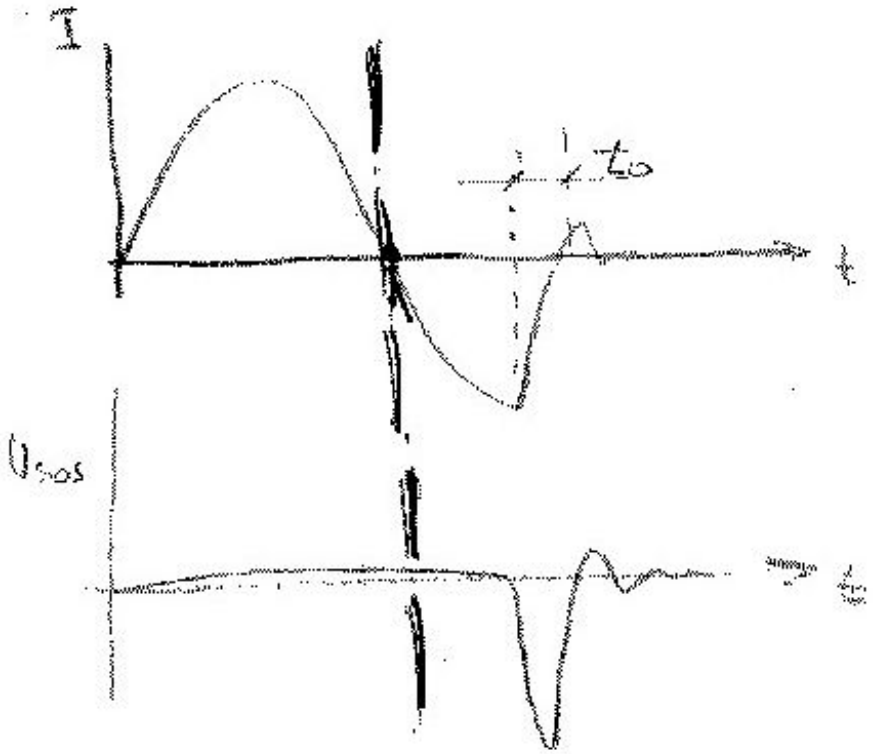


Рис. 3. Схема паузы тока с насыщающимся дросселем и конденсаторной батареей

Индуктивные накопители

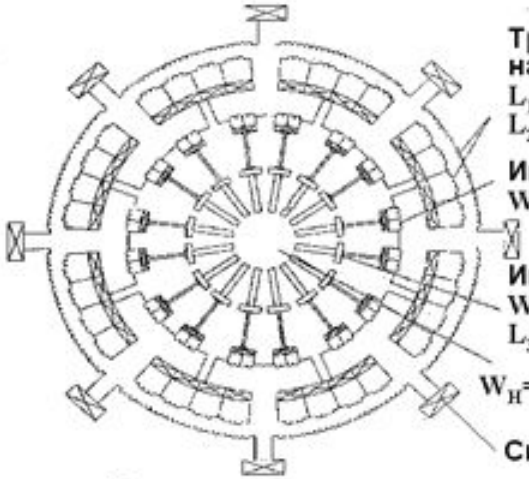
Полупроводниковый размыкатель
Диоды СДЛ, КЦ105





Индуктивные накопители

Система питания токамака ТСП 900 МДж, 830 кА



Трансформаторный индуктивный накопитель
L_1=80 мГн, W_1=900 МДж, I_1=150 кА
L_2=0,4 мГн, W_2=600 МДж, I_2=1,7 кА

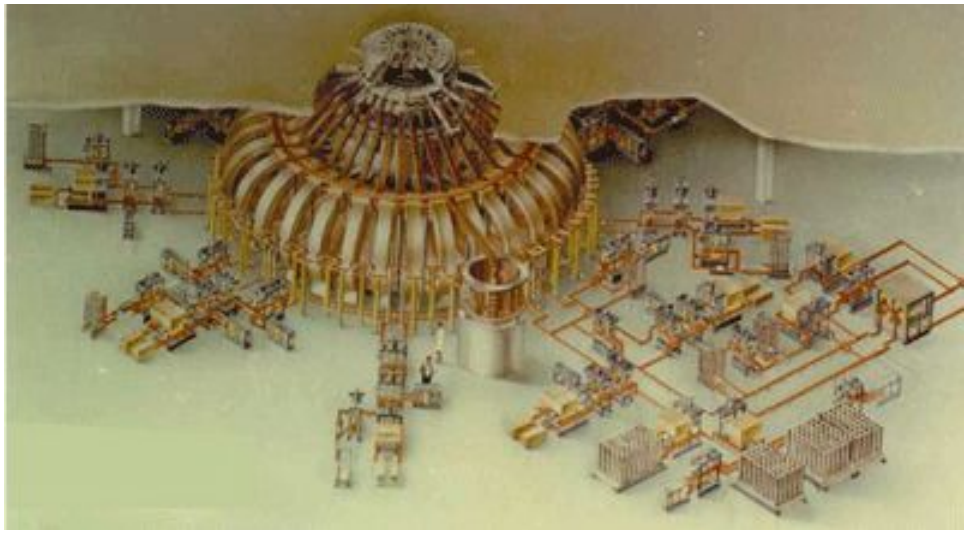
Индуктивный накопитель
W=340 МДж, I=2,79 МА

Индуктивный накопитель
W=120 МДж, I=4,84 МА
L_3=12 мкГн, 16 секций ($L_{1/16}$=0,8 мкГн)

$W_Н$=50 МДж, $I_Н$=50 МА, $U_Н$=10 МВ, τ=100 нс

Система коммутации

Количество:
- **размыкателей – 160 шт., (128 одноступенчатых);**
- **замыкателей – 392 шт.;**
- **нелинейных сопротивлений – 96 шт.**



Сверхпроводящий накопитель

0,5 МДж
соленоид

Основные параметры:

Запасенная энергия, МДж 0,5
Минимальное время перекачки энергии, с 1,8
Рабочий ток, А 1550
Время первоначального заряда, мин 5
Индукция в центре при 1550 А, Тл 3,4
Индуктивность, Гн 7
Внутренний диаметр соленоида, мм 400
Внешний диаметр соленоида, мм 550
Длина соленоида, мм 580

Инерционные накопители

Накопленная энергия $W = \frac{J\omega^2}{2} =\sim 50 - 500$ Дж/см^3

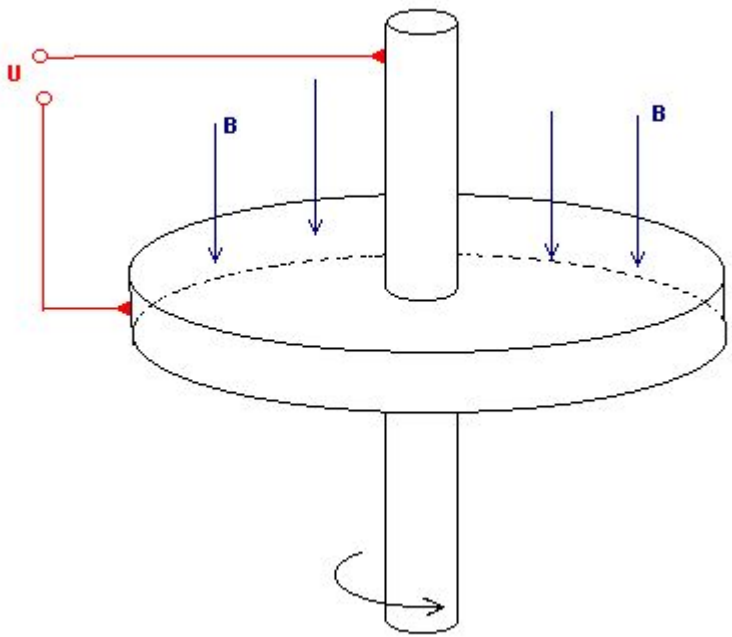
$J = \sum mr^2$ Момент инерции

$\frac{W}{V} \sim \sigma_{тек}$ 500 Дж/см^3 – 50 кг/мм^2

Инерционные накопители

Униполярная машина (диск Фарадея)

$$F = e\left[\vec{V} \times \vec{B}\right] = e\vec{E} \sim \frac{U}{R}$$



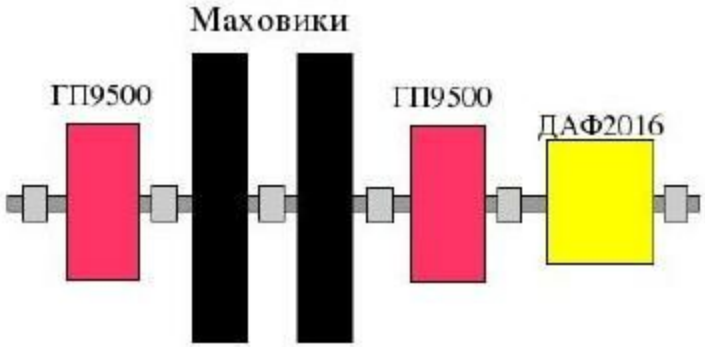
Недостатки:

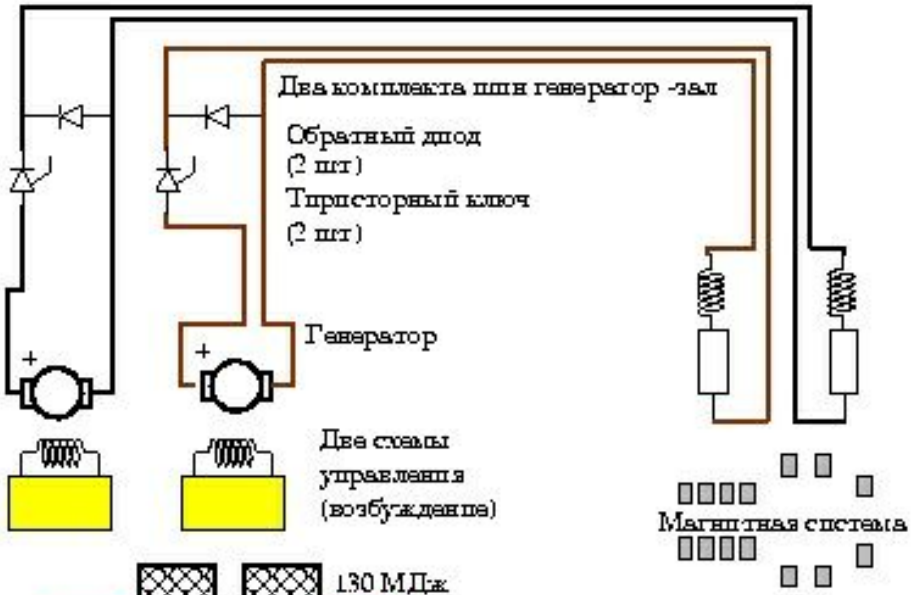
-скользящие контакты

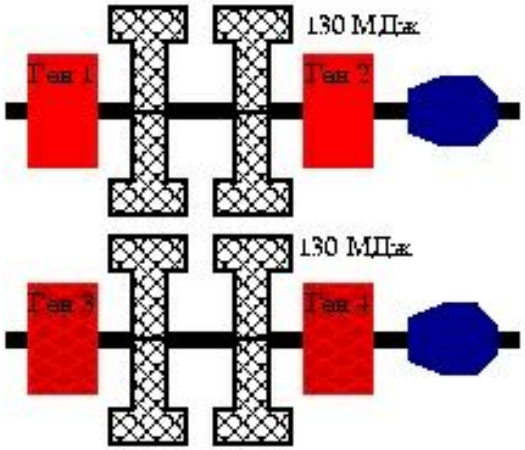
-большие токи при низком напряжении

Инерционные накопители

Накопитель АМБАЛ-М
350 МДж, 25 кА, 930 В
Снимаемая энергия 130 МДж
Маховик 60 тонн



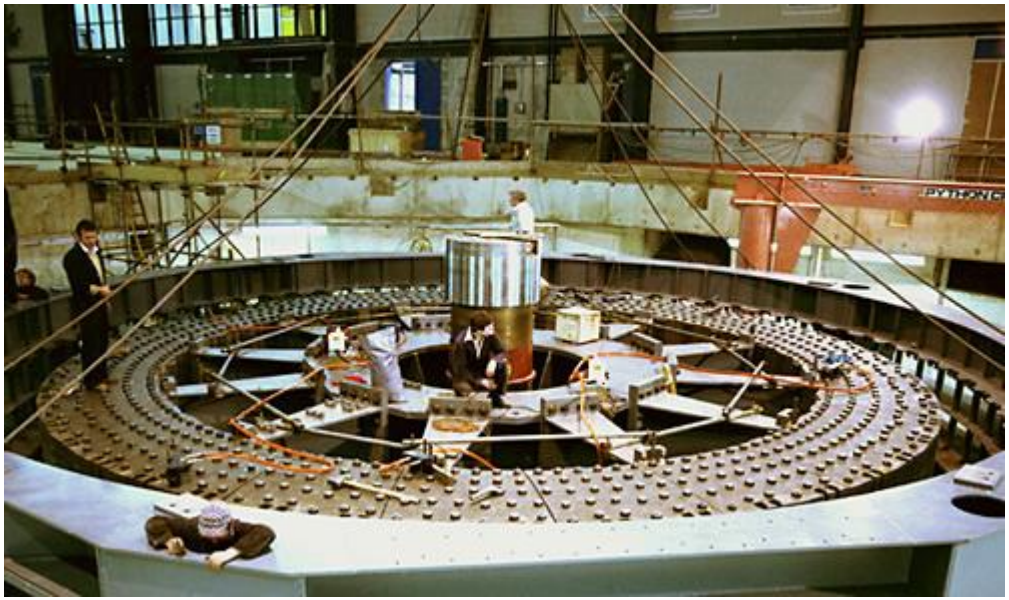


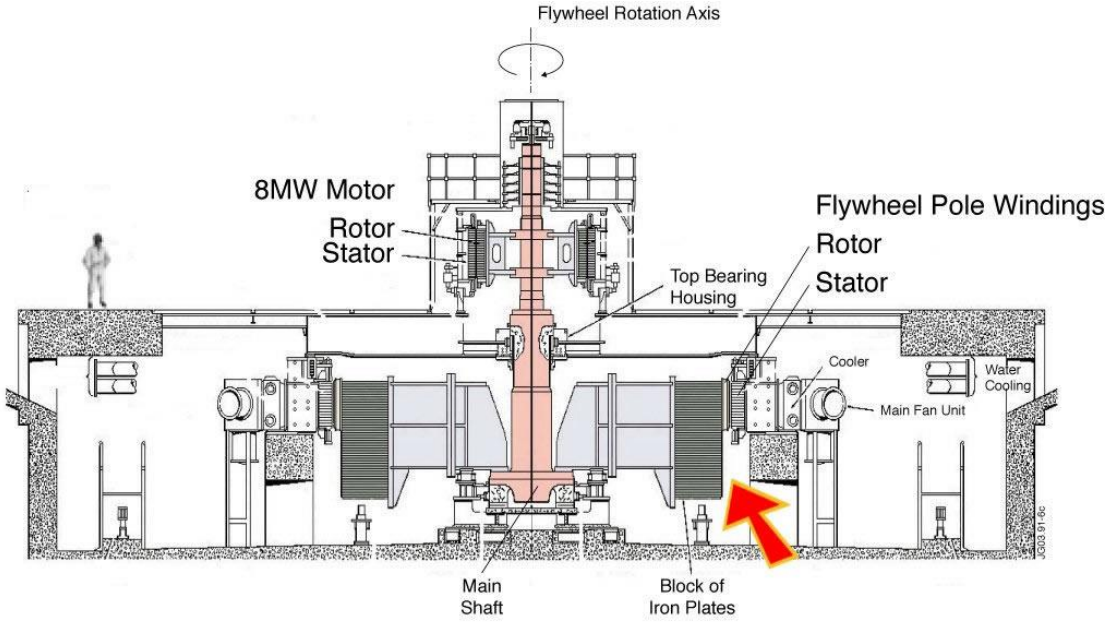


Два агрегата, 4 генератора.

Накопитель токамака JET

Снимаемая энергия 4 ГДж
Маховик 775 тонн

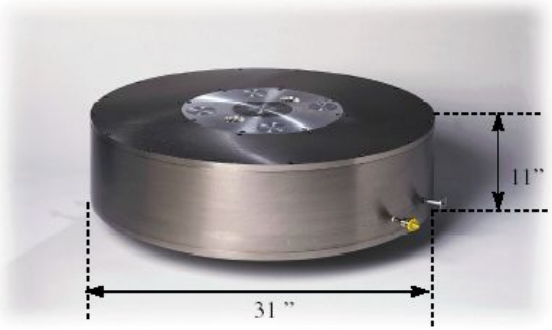




Нетрадиционные накопители

Суперконденсаторы (ионисторы)
3,3 Ф, 75 В – 10 кДж (5 Дж/см^3)

Модульные инерционные накопители
5 МДж, 4 Дж / см^3



Химические накопители энергии
500 Дж / см^3
(1 кг тротила – 4,2 МДж)