
Твердотельный модулятор клистроны комплекса «СКИФ»

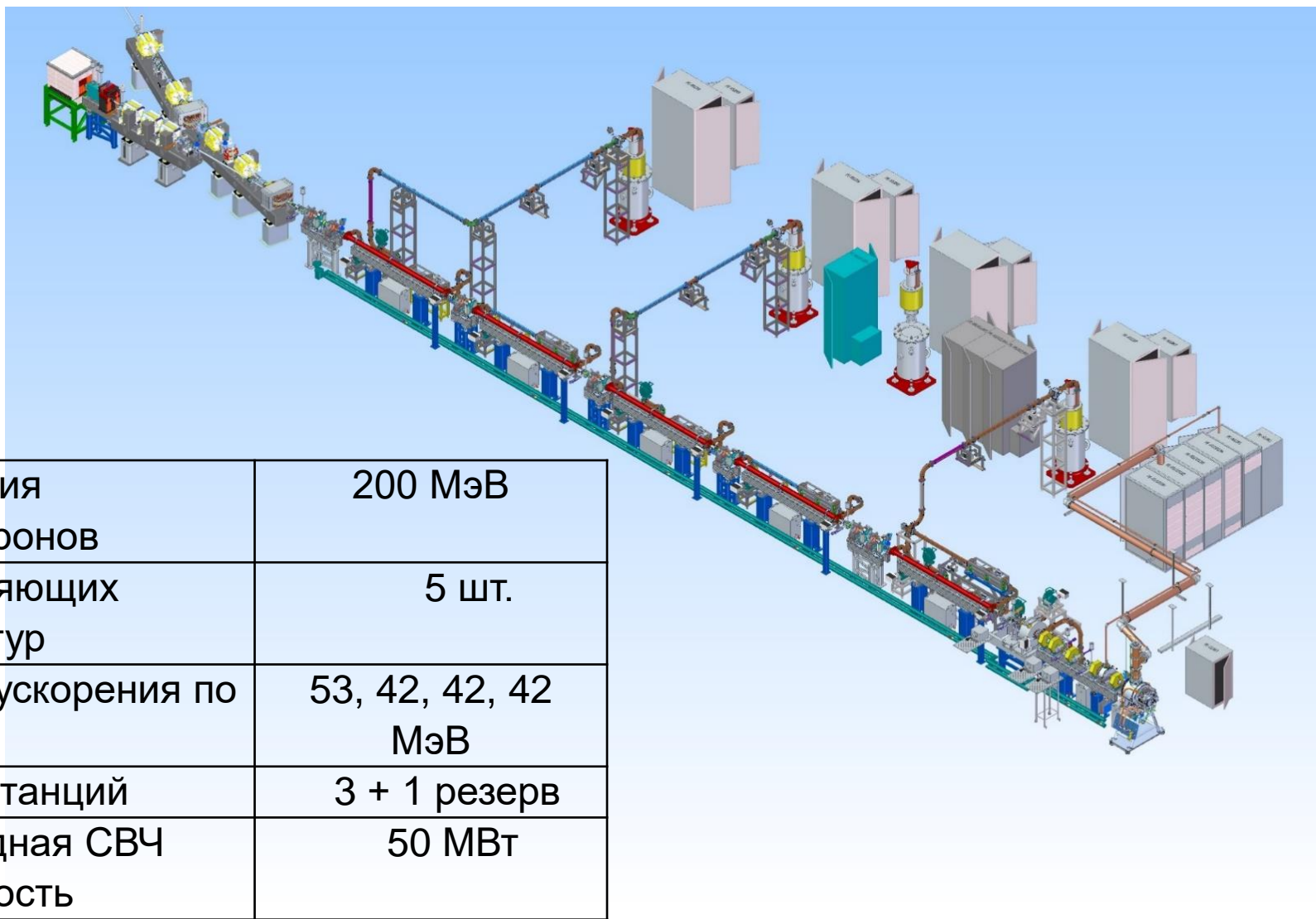
П.А. Бак

ОУС_ИЯФ СО РАН

Май, 2024



Структура инжектора ЦКП «СКИФ»



Энергия электронов	200 МэВ
Ускоряющих структур	5 шт.
Темп ускорения по УС:	53, 42, 42, 42 МэВ
СВЧ станций	3 + 1 резерв
Выходная СВЧ мощность	50 МВт

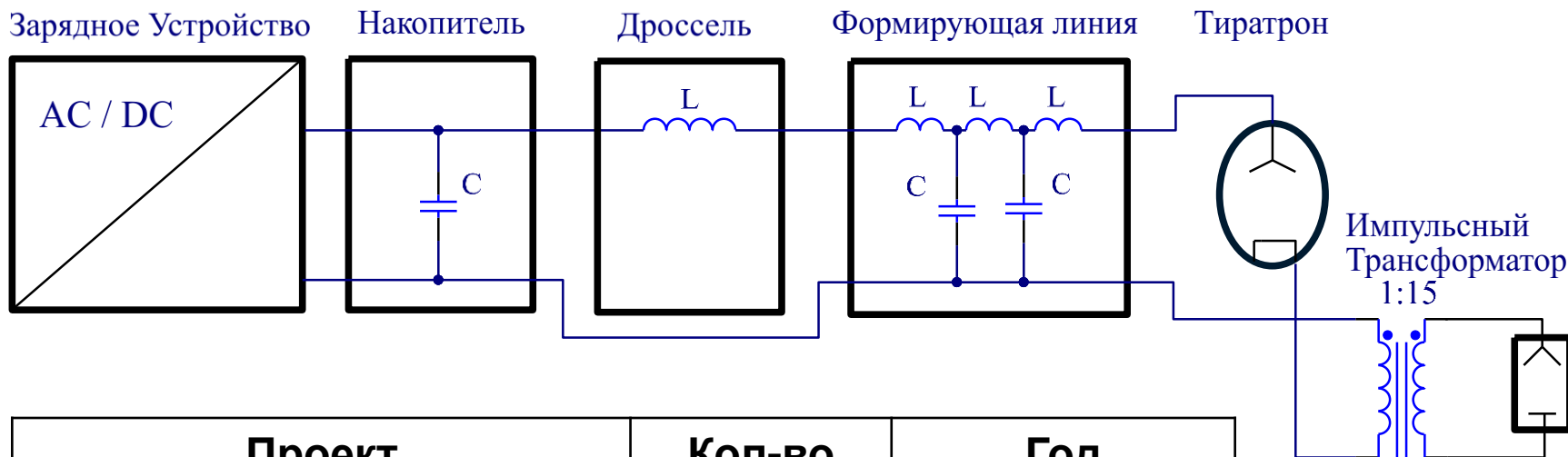


Спецификация модулятора клистрона

Параметр	Е3730А	ИЯФ(5045)	Ед. изм.
Напряжение клистрона	325	350	кВ
Ток клистрона	400	400	А
Длительность импульса СВЧ	2.5	2.5	мкс
Частота следования импульсов	1 - 5	1 - 5	Гц
Нестабильность вершины импульса	< 2		%
Импеданс нагрузки	812	875	Ом
Джиттер	+/- 20		нс
Средняя мощность модулятора	3250	3500	Вт
Ток накала клистрона	20	30	А
Напряжение накала клистрона	20	25	В



Модулятор резонансного типа

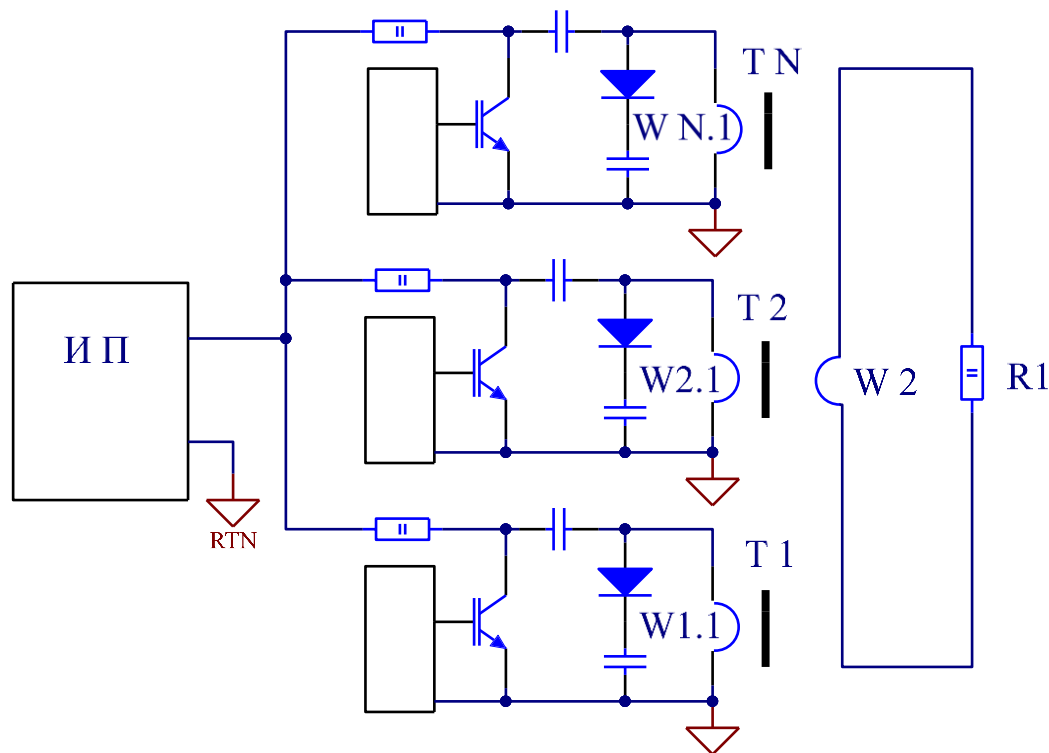


Проект	Кол-во	Год
ЛУЭ-2000 ХФТИ, СССР	50	1970
SLC SLAC, USA	254	1980
ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН	4	1990

Достоинства	Доступность к реализации, Устойчивость к перегрузкам.
Недостатки	Малый ресурс тиратрона, Высоковольтность, Габариты.



Модулятор индукционного типа (одинвитковый)



$$\varepsilon = -W \times \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

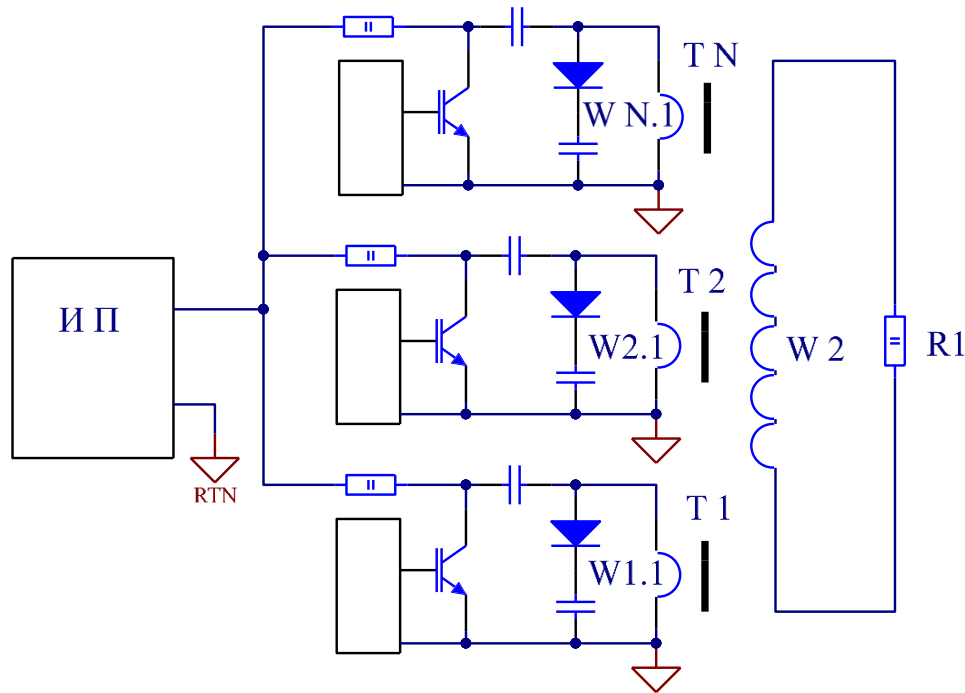
$$W1=W2=1$$

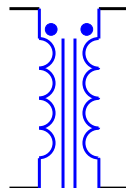
$$\varepsilon_{w2} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \times N$$

Разработки в 2000 г.
В SLAC (USA), KEK (Japan)



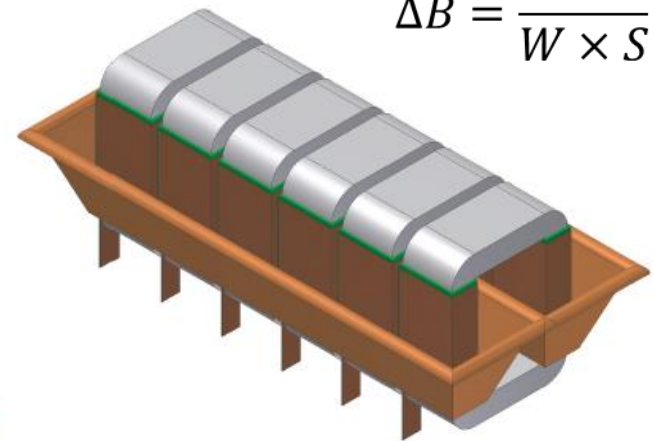
Модулятор индукционного типа (многовитковый)



$W1 = 10$		$W2 = 100$
$U1 = 10 \text{ кВ}$		$U2 = 100 \text{ кВ}$
$I1 = 1 \text{ кА}$		$I2 = 100 \text{ А}$

$$\varepsilon_{W2} = - \left(W2 \times \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \times N$$

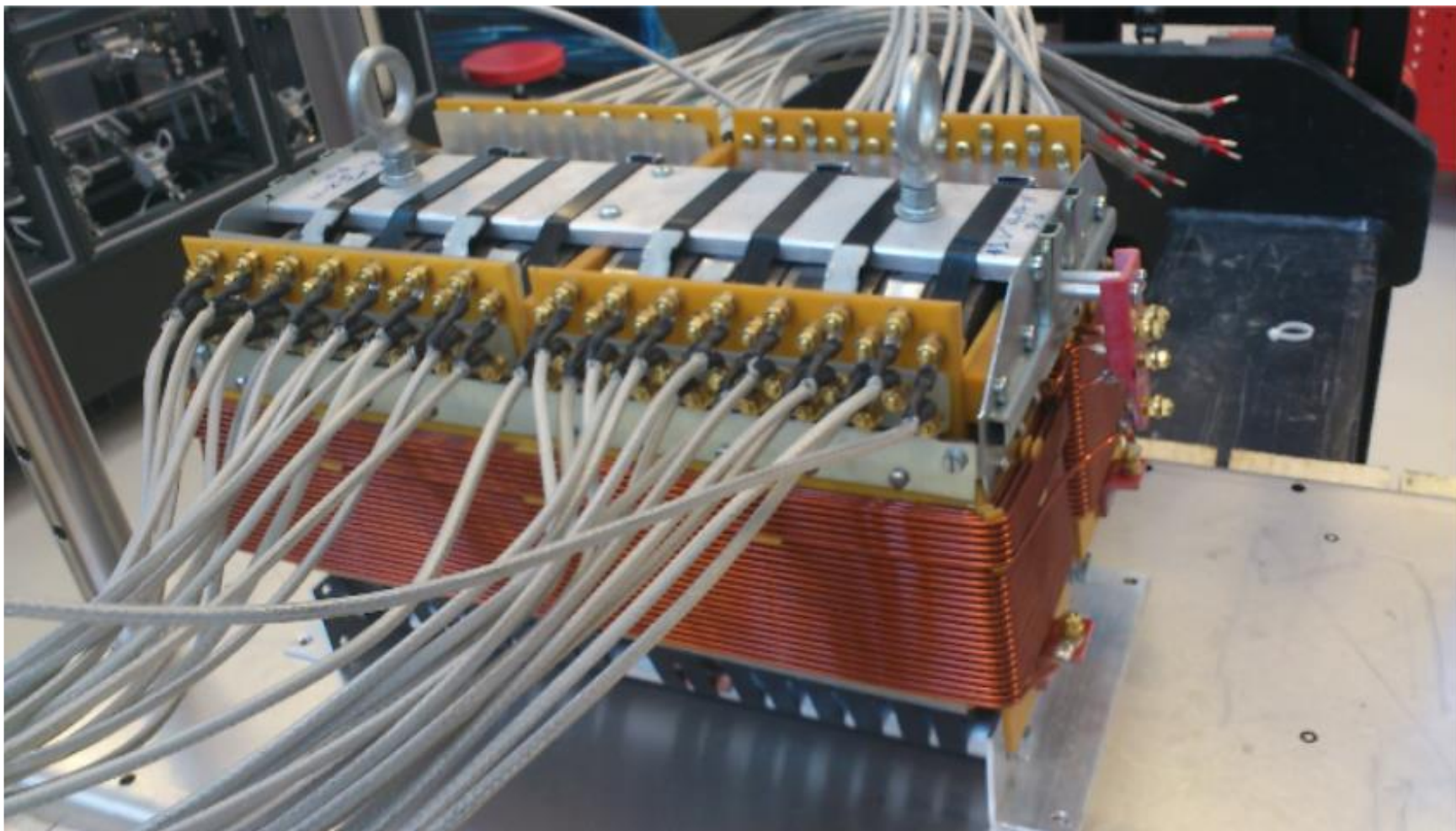
$$\Delta B = \frac{U \times t}{W \times S}$$



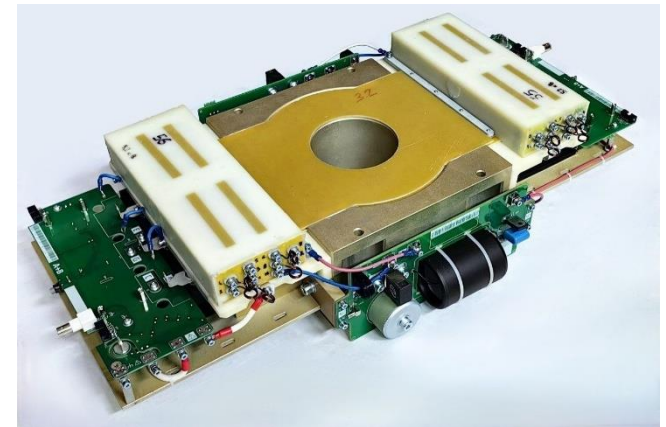
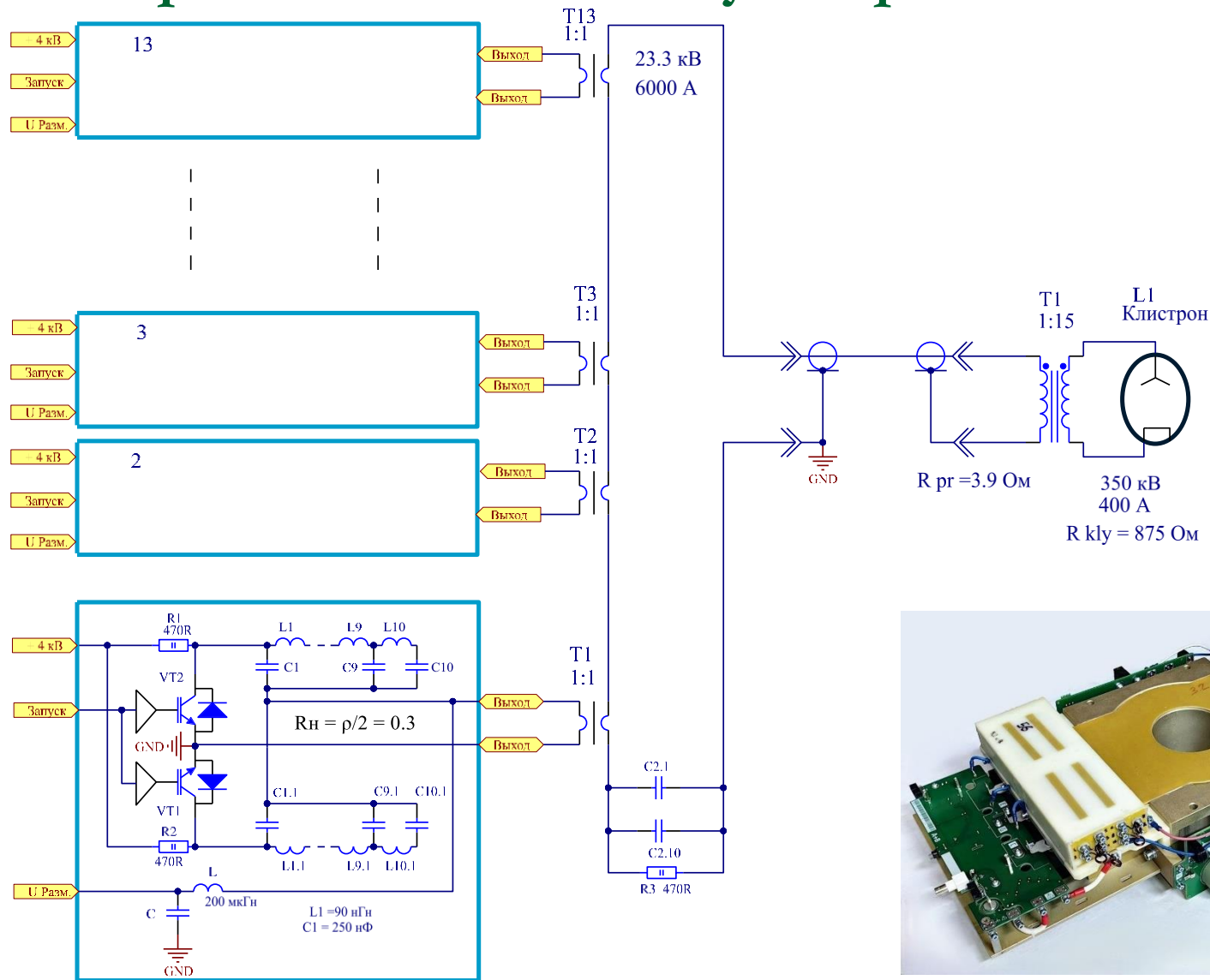
Разработан в 2001г. ScandiNova



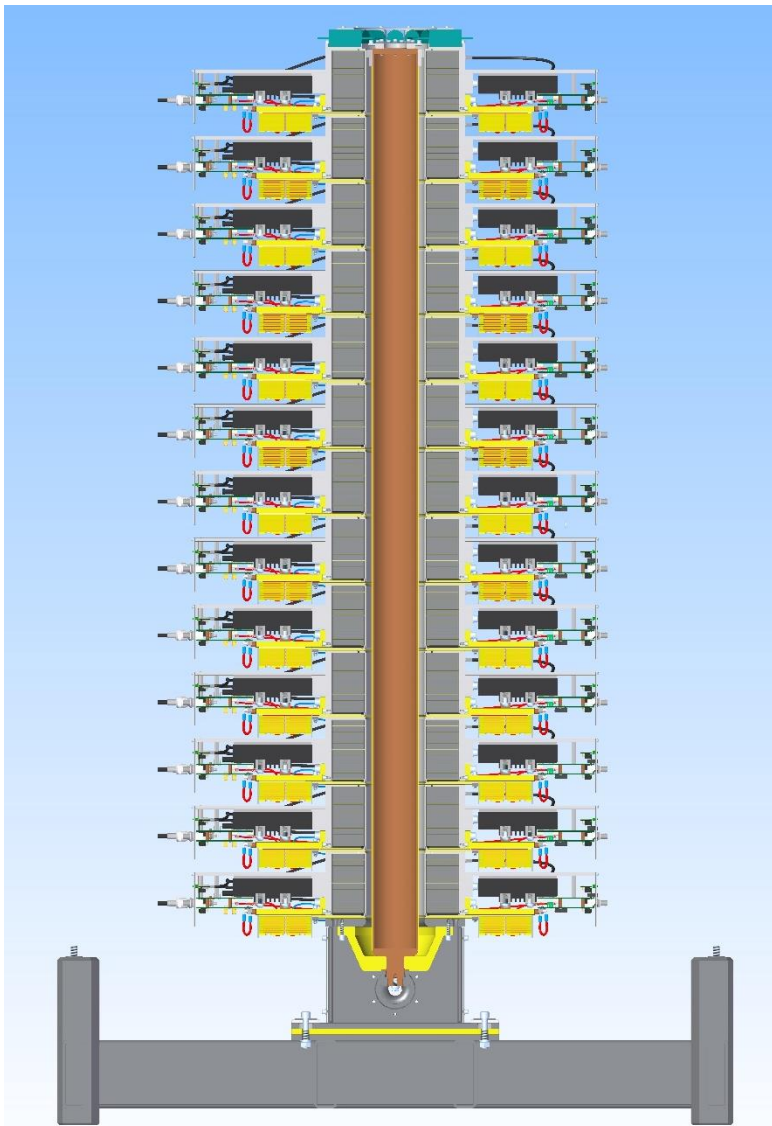
Сплит трансформатор (ScandiNova)



Электрическая схема модулятора



Модель силового модуля модулятора

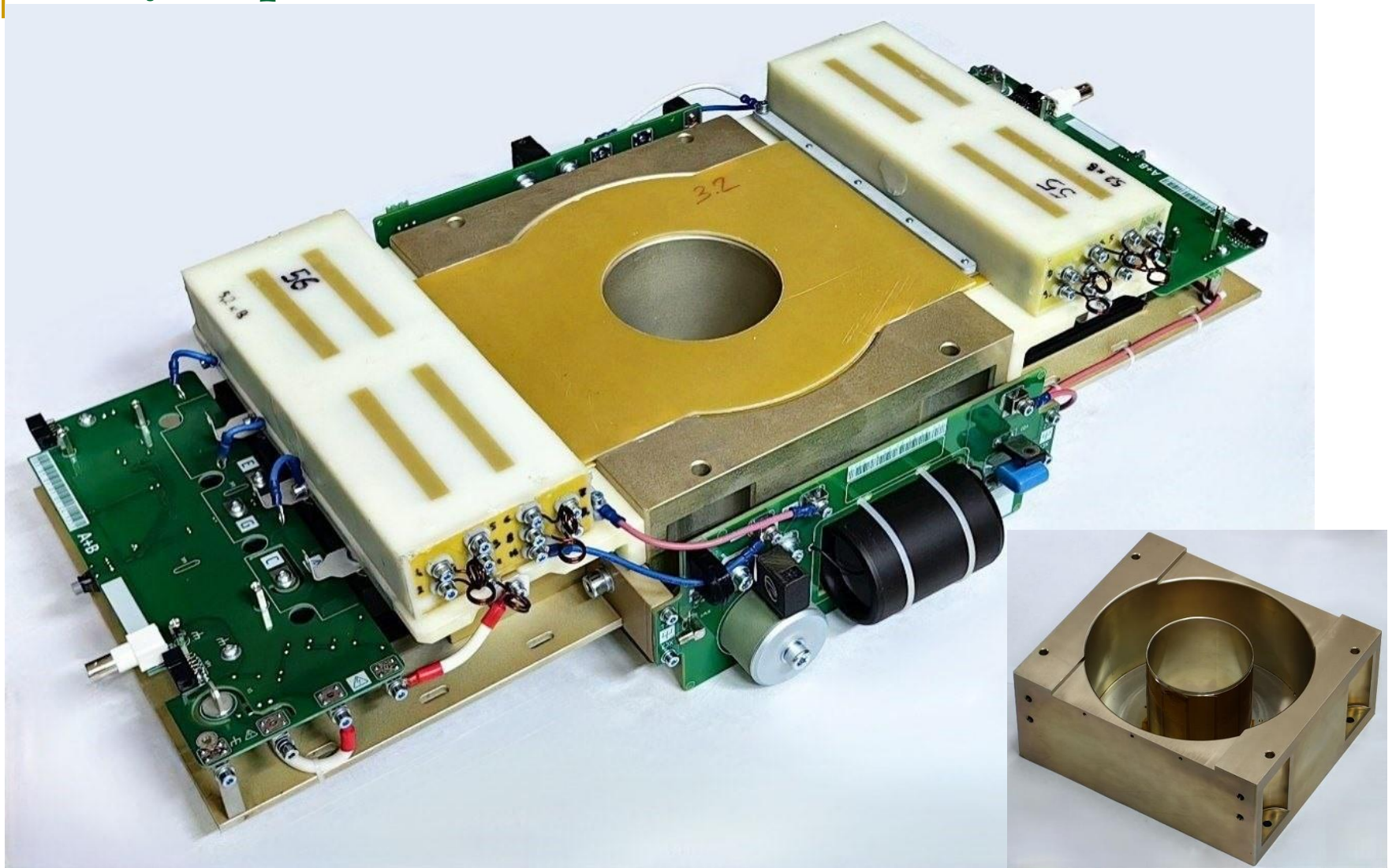


Исходные требования:

- Индуктивность разрядной цепи < 70 нГн
- Защита по току IGBT пассивная;
- Минимально допустимый запас энергии накопителя.



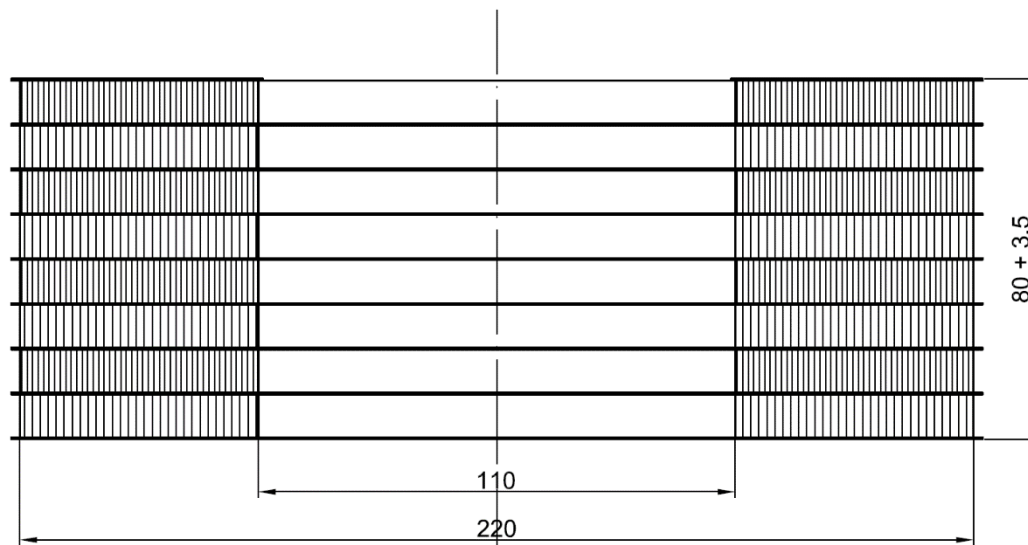
Индукторная секция



Магнитопровод индуктора

$$\Delta B = \frac{U \cdot T}{W \cdot S \cdot k}$$

$$\Delta B = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 3.5 \cdot 10^{-6}}{3.7 \cdot 10^{-3} \cdot 0.88} = 2.15 \text{ Тл}$$



Параметр	Ед. изм.	Значение
Материал		3425
Толщина x Высота ленты	мм	0.1 x 10
Магнитная индукция, B_{\max}	Тл	1.82
Коэрцитивная сила	А/м	56
Изоляция слоев		Изофлекс 191



Формирующая линия

$$R = 0.6 \text{ Ом}$$

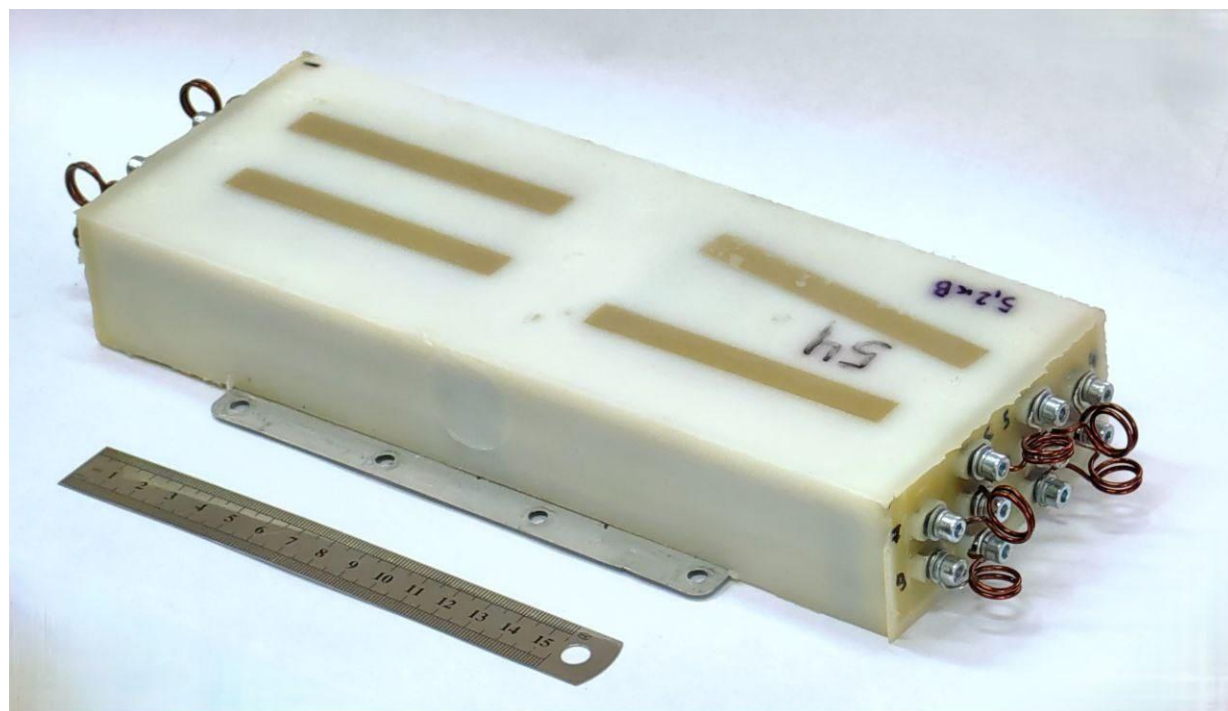
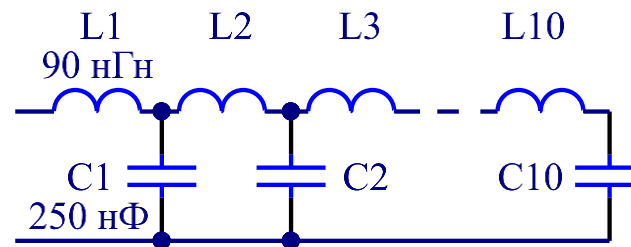
$$C = 250 \text{ нФ}$$

$$L = 90 \text{ нГн}$$

$$N = 10$$

$$T = 3.3 \text{ мкс}$$

$$T = 2,2 \cdot N \cdot \sqrt{LC}$$

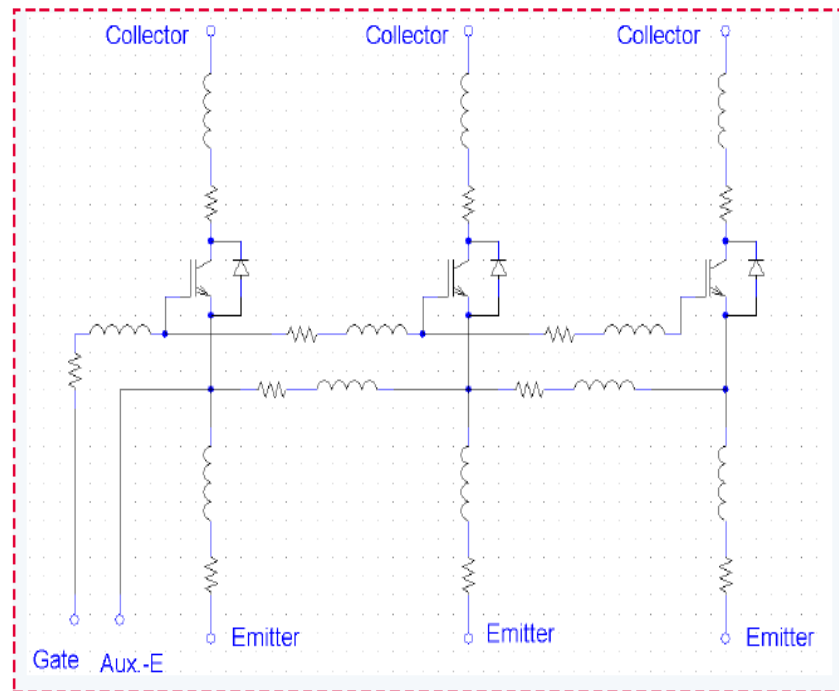
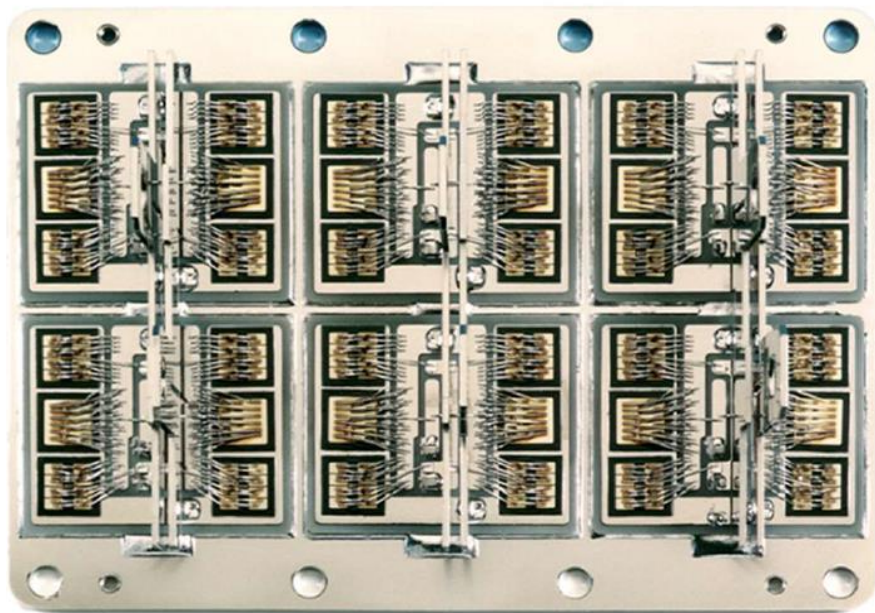


Объем – 0.85 л

Удельная плотность энергии - 24 Дж/л



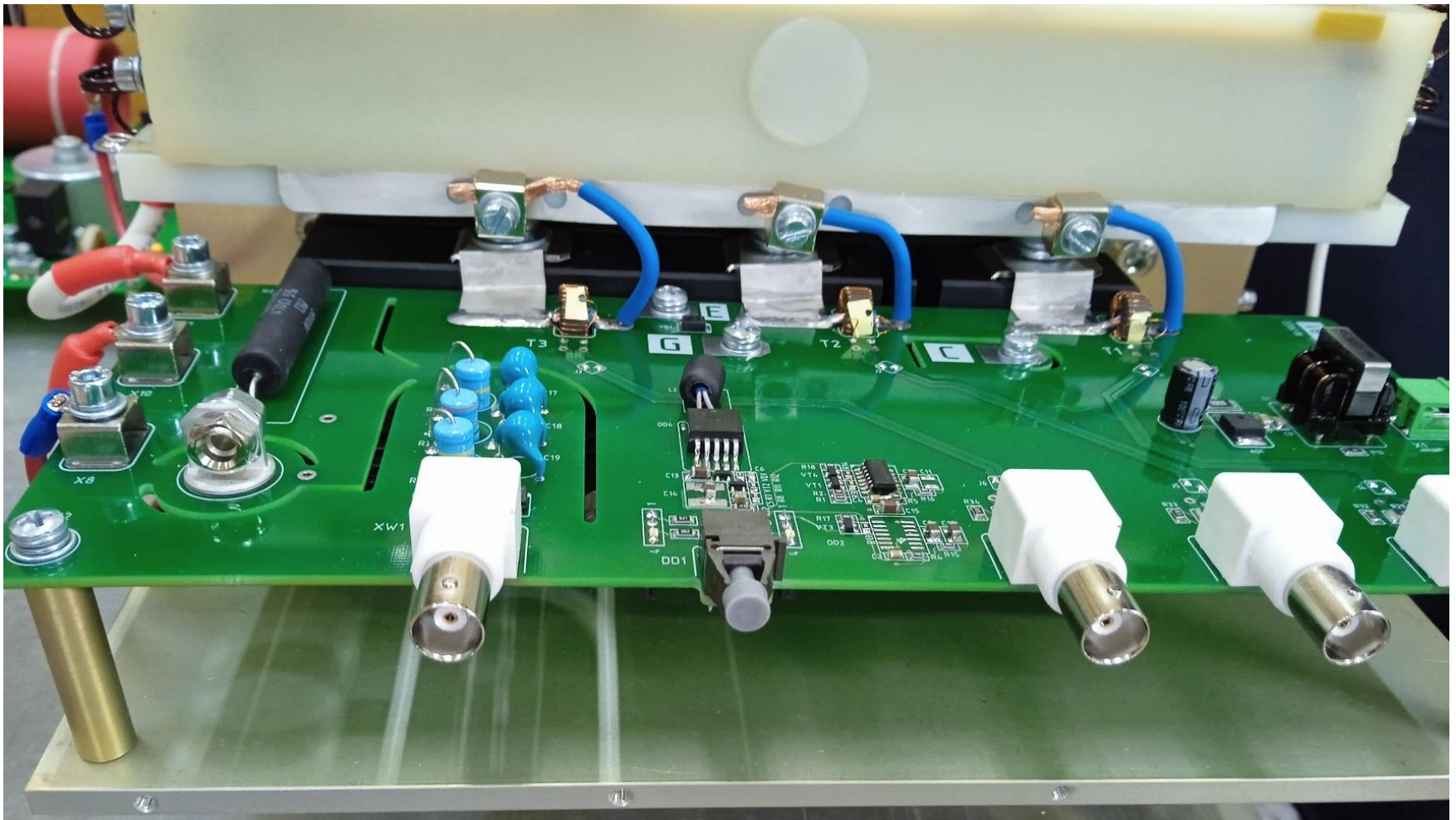
Силовой ключ



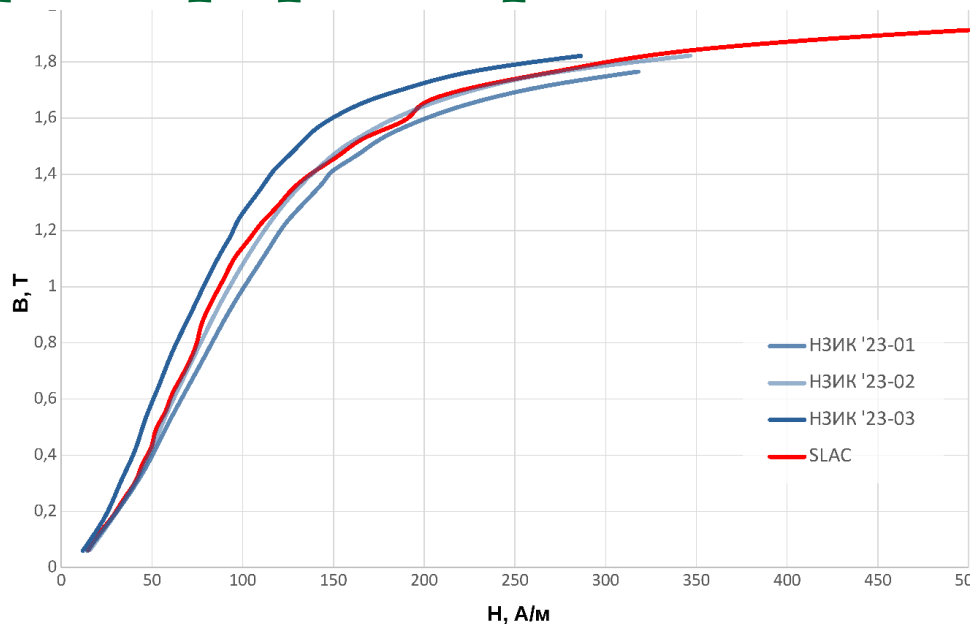
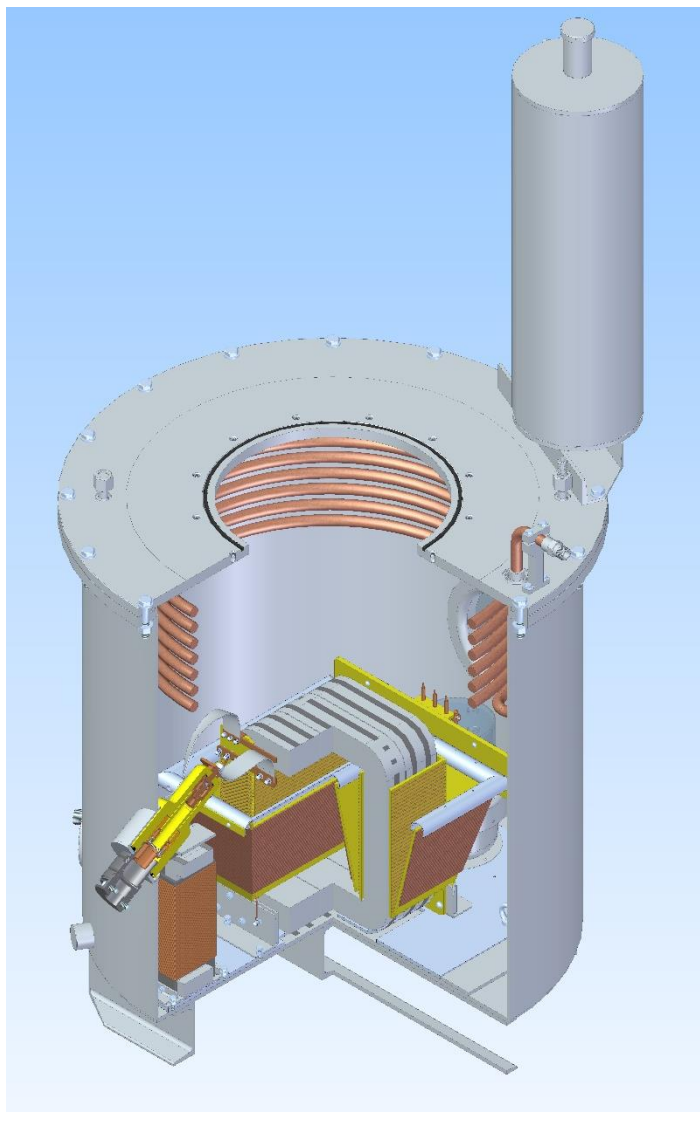
Напряжение коллектор-эмиттер	4500	B
Постоянный ток коллектора	1200	A
Заряд затвора	39.5	мкКл
Ток короткого замыкания	6900	A



Балансировка токов IGBT



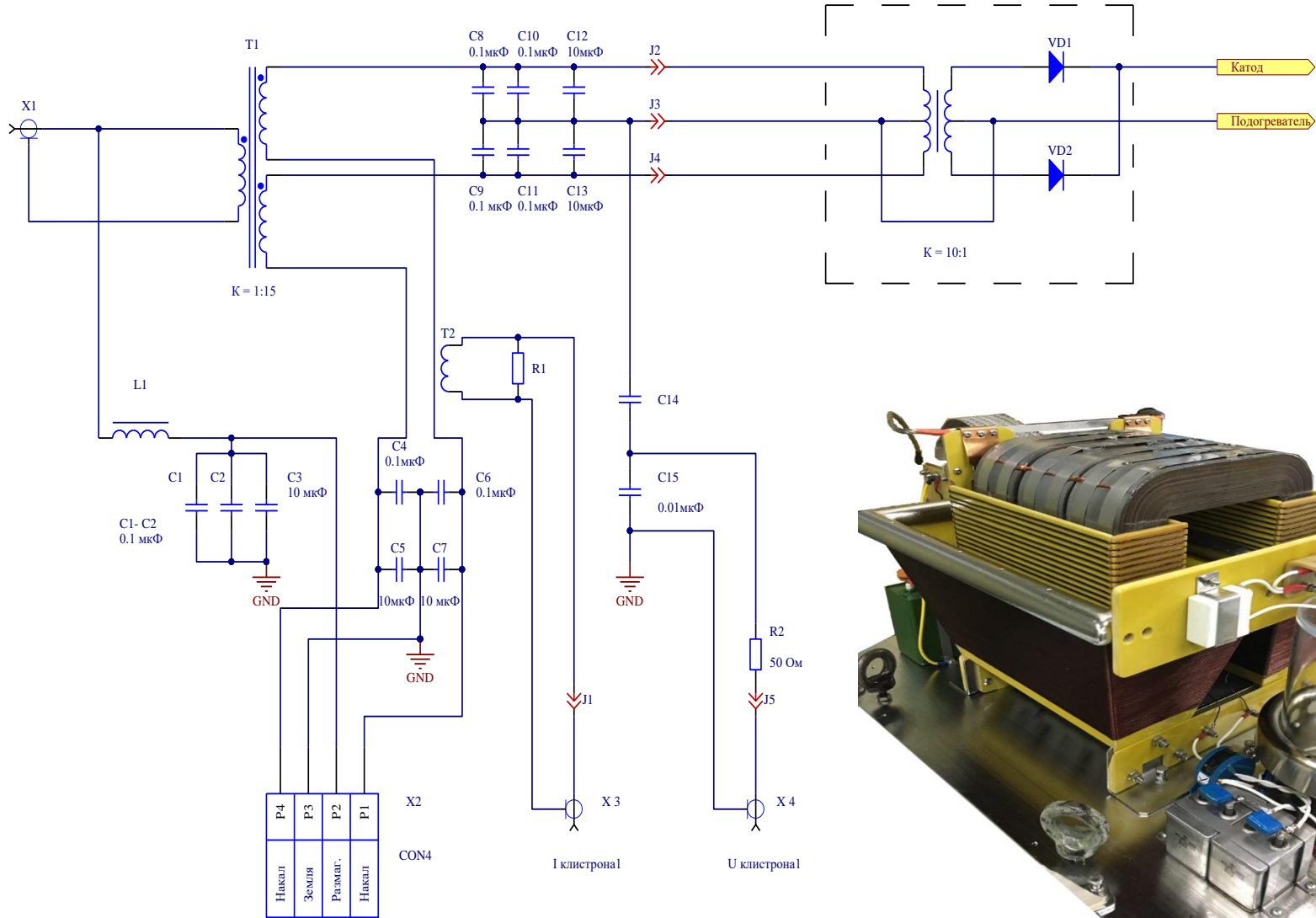
Бак импульсного трансформатора



Индуктивность намагничивания	110	мГн
Индуктивность рассеивания (вторичная обмотка)	630	мкГн
Емкость трансформатора	102	пФ
Площадь сечения магнитопровода	95	см ²



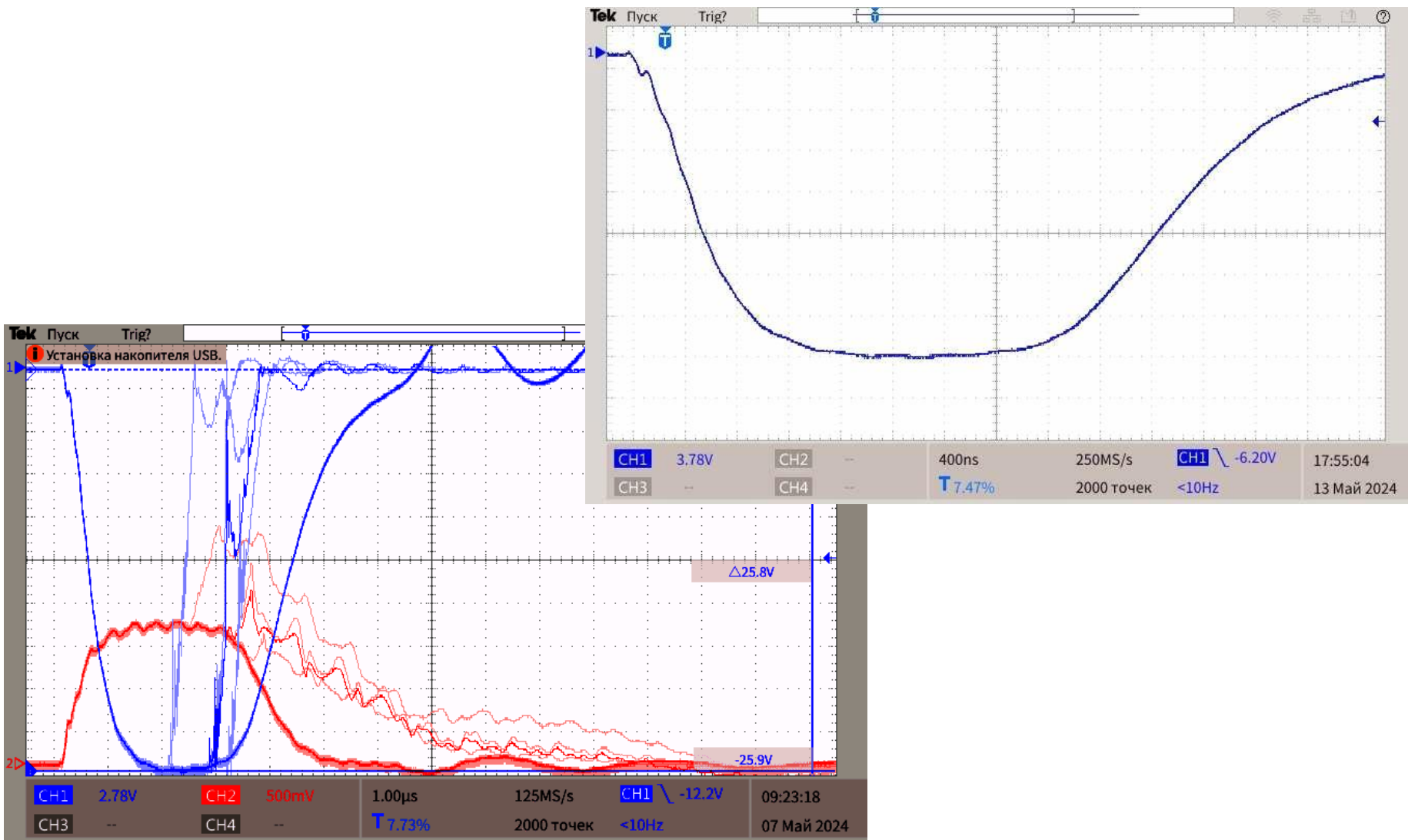
Бак импульсного трансформатора



Модулятор «СКИФ»

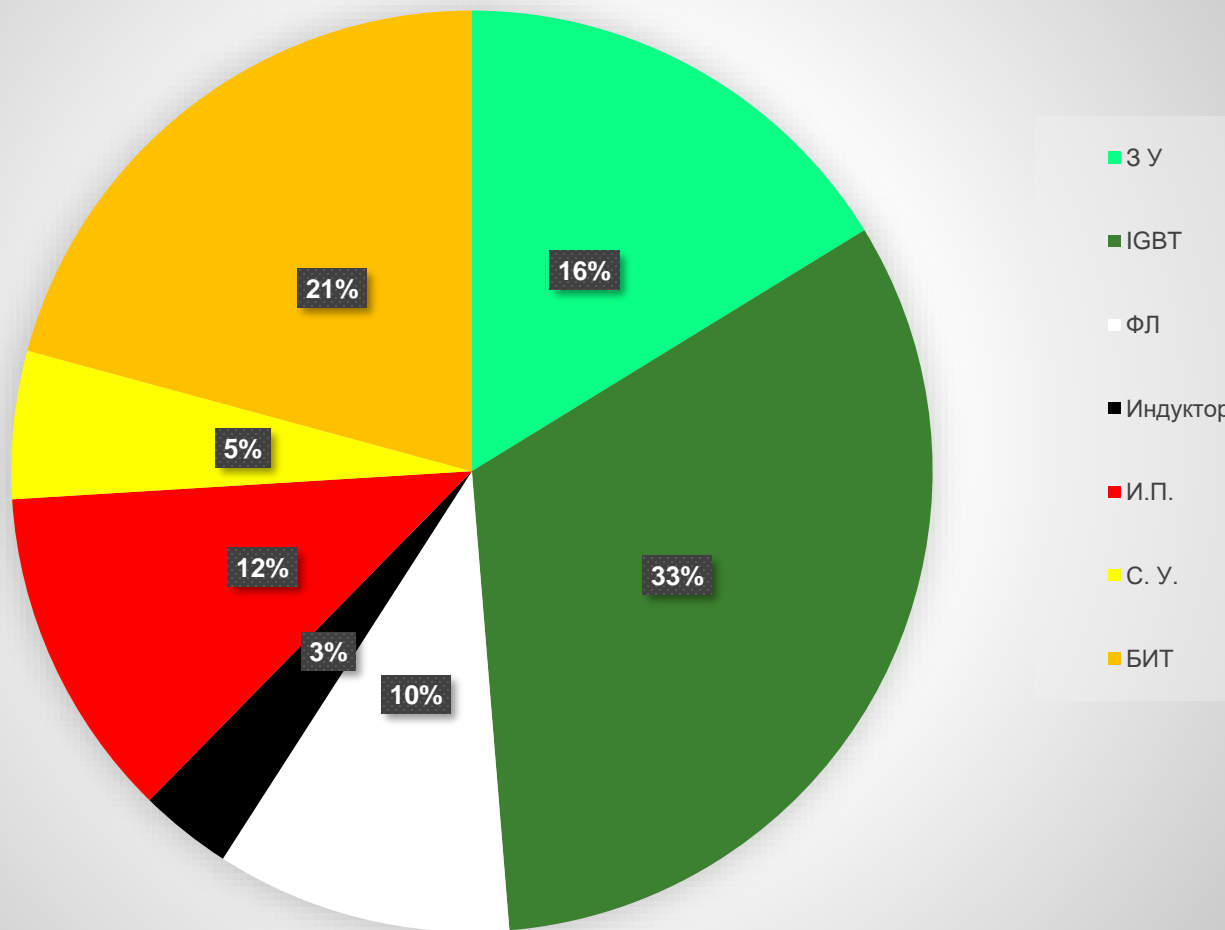


Импульсы на клистроне



Распределение расходов

Материальные расходы



Спасибо
за внимание

