

# Сверхпроводящие Генераторы СИ для СКИФа

Шкаруба В.А.



## Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

Сверхпроводящие вставные устройства (вигглеры и ондуляторы) – ключевые устройства для генерации СИ на СКИФ, в отличие от поворотных магнитов

Зафиксированные потребности СКИФ на сверхпроводящие вставные устройства:

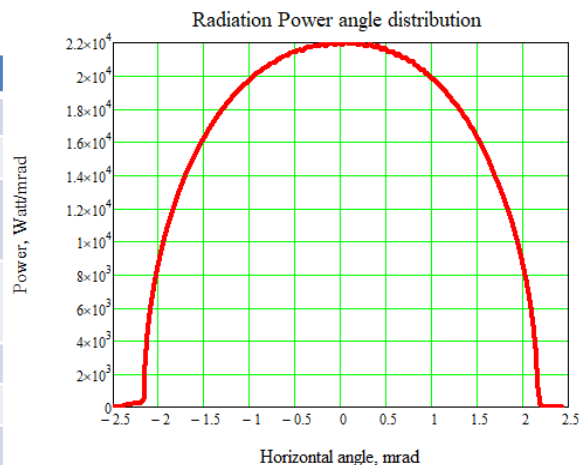
Вид вставного устройства	I очередь	II очередь	Итого:
Вигглер (4Тл, 33.7 мм)	2	2	4
Ондулятор (1.25 Тл, 15.6 мм)	3	6	9



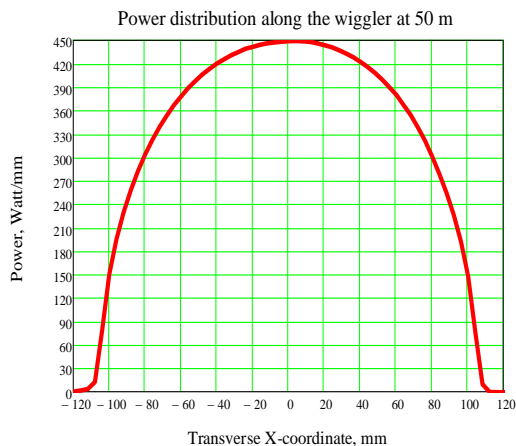
# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

## Параметры СП Вигглера:

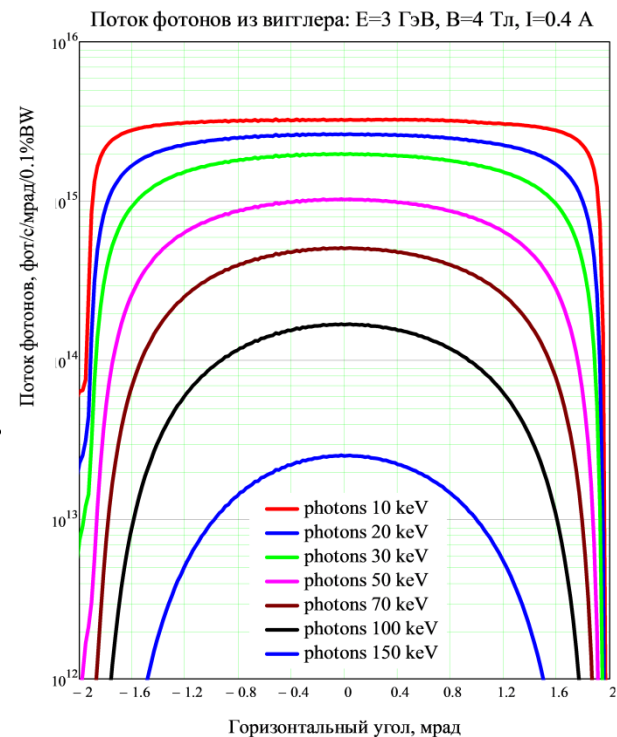
Номинальное магнитное поле, Тл	<b>4</b>
Период вигглера, мм	<b>33.7</b>
Вертикальная апертура для пучка, мм	<b>6</b>
Горизонтальная апертура для пучка, мм	60 мм
Межполюсный зазор, мм	8
Число периодов	<b>60</b>
Число основных полюсов	120
Число полюсов $\frac{3}{4}$	2
Число полюсов $\frac{1}{4}$	2
Магнитная длина, мм	~2120
Длина магнита, мм	~2220
Длина между фланцами	<b>~2840</b>
Высота от пола, мм	2146
Ток в обмотке, А	350
Мощность излучения (B=4 Т, I=0.4 А, E=3 GeV), кВт	<b>75.9</b>
Горизонтальный угол излучения, мрад	<b>± 2.2</b>
Критическая энергия квантов, КэВ	24



Распределение излучаемой мощности из вигглера по горизонтальному углу



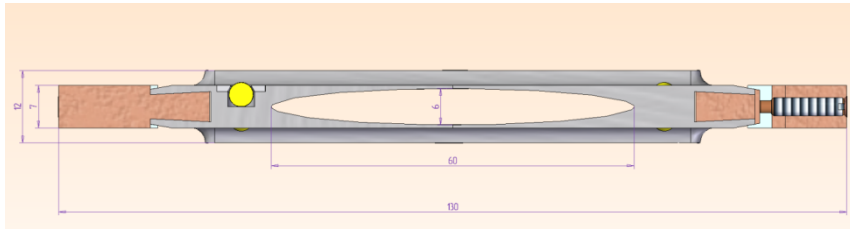
Распределение мощности излучения по горизонтали на расстоянии 50 м



Спектрально-угловое распределение потока фотонов

# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФ

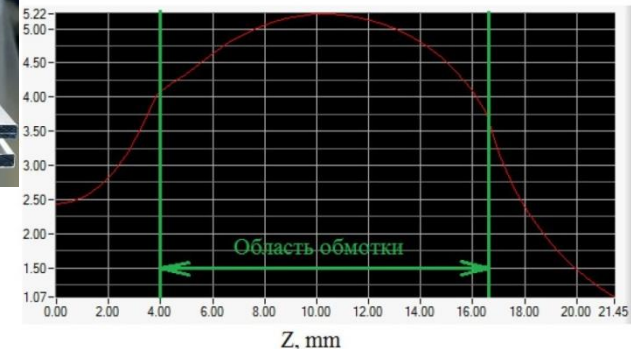
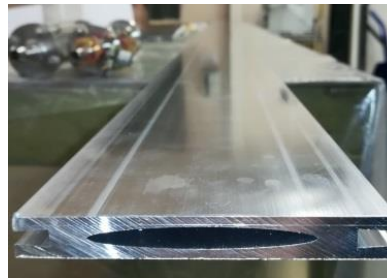
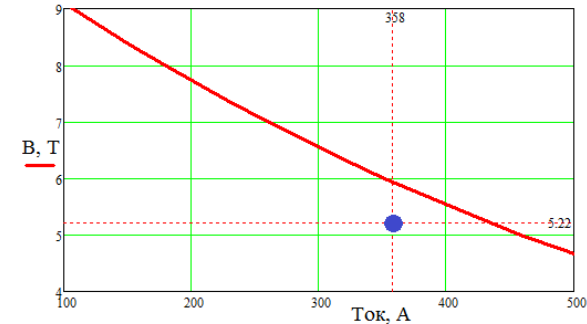
- Требование оптимизации потока фотонов одновременно на 30 кэВ, 50 кэВ и 70 кэВ: можно удовлетворить при использовании вивглера с косвенным охлаждением).



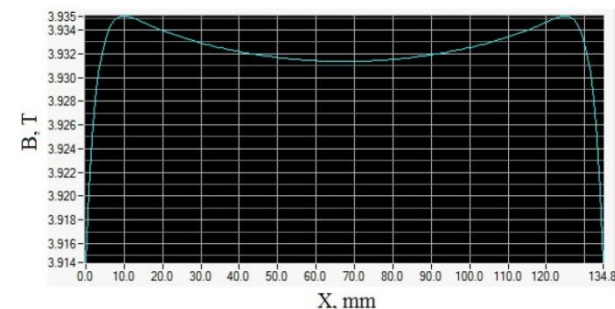
Параметры обмоток СП Вивглера СКИФ:

Номинальное магнитное поле, Тл	4
Период вивглера, мм	33.7
Вертикальная апертура для пучка, мм	6
Горизонтальная апертура для пучка, мм	60 мм
Межполюсный зазор, мм	8
Диаметр провода с изоляцией, мм	0.55
Критический ток провода в 7 Тл, А	260
Число витков в слое	22/23
Высота обмотки, мм	12.8
Ширина железного полюса, мм	9.1
Длина железного полюса, мм	150
Число слоёв в основной обмотке (1 секция)	8
Ток в обмотке, А	350
Обмотка 3/4, слоёв	12
Ток в обмотке 3/4, А	175
Обмотка 1/4, слоёв	4
Ток в обмотке 1/4, А	175
Магнитная длина, мм	~2120
Длина магнита, мм	~2220

Расположение рабочей точки относительно критической кривой провода



Вертикальное распределение магнитного поля в наиболее нагруженной области обмотки



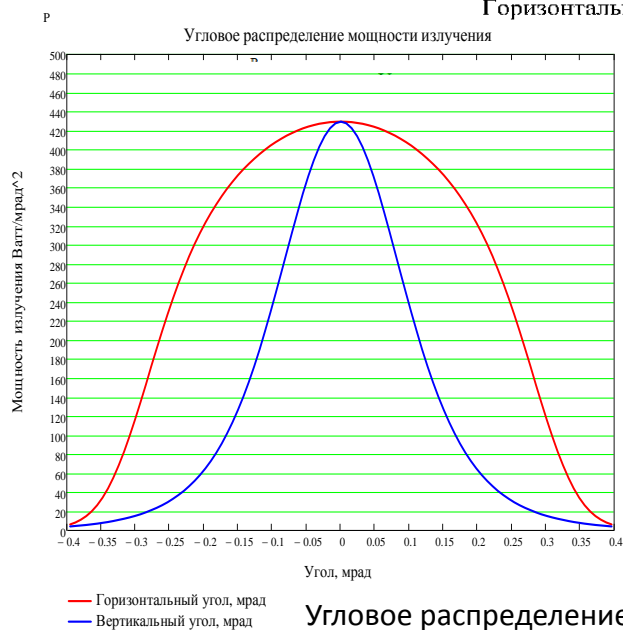
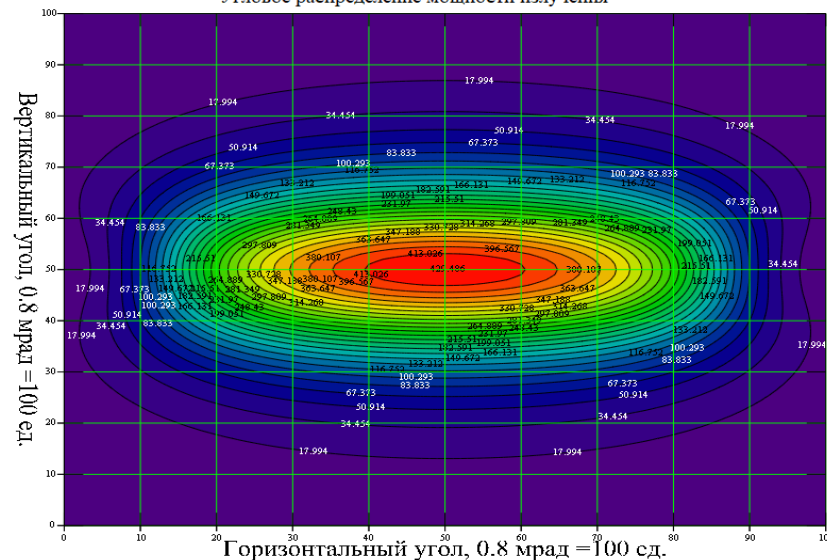
Поперечное распределение магнитного поля

# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

## Параметры СП Ондулятора:

Номинальное магнитное поле, Тл	<b>1.25</b>
Период вигглера, мм	<b>15.6</b>
Вертикальная апертура для пучка, мм	<b>6</b>
Горизонтальная апертура для пучка, мм	60 мм
Межполюсный зазор, мм	8
Число периодов	<b>128</b>
Магнитная длина, мм	~1997
Длина магнита, мм	~2170
Длина между фланцами	<b>~2840</b>
Высота от пола, мм	2146
Ток в обмотке, А	500
Мощность излучения (В=4 Т, I=0.4 А, E=3 GeV), кВт	<b>7.18</b>
Горизонтальный угол излучения, мрад	<b>± 0.4</b>

Угловое распределение мощности излучения



Угловое распределение мощности излучения

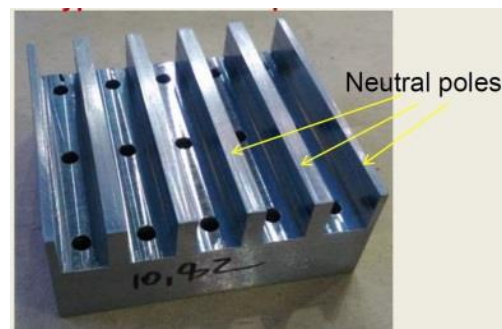
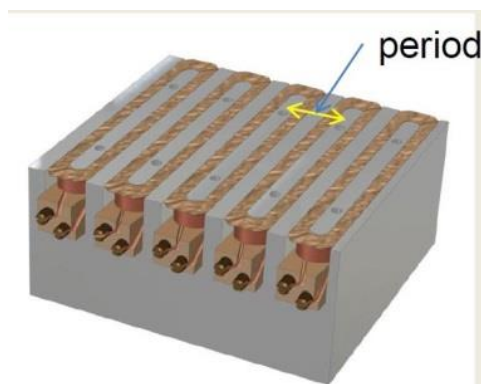
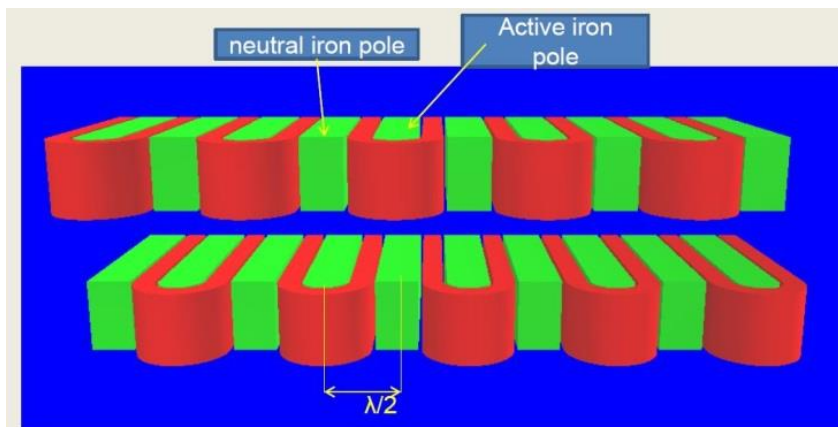
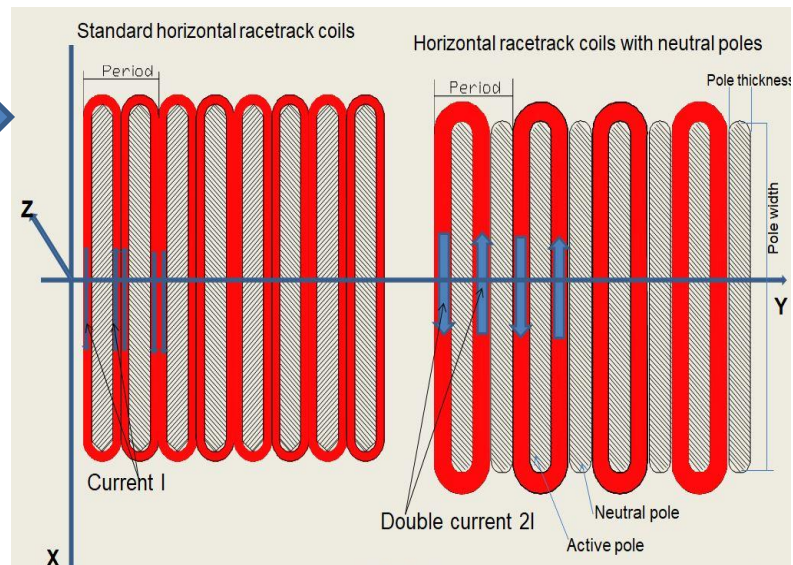
# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФ

## Сверхпроводящий ондулятор с нейтральными полюсами

Чередующиеся нейтральные и активные полюса (две соседних обмотки соединены вместе и замкнуты на одну сторону)

### Преимущества структуры с нейтральными полюсами:

- ❑ Вдвое меньше обмоток (хотя обмотки вдвое толще);
- ❑ Отсутствие сил раздвигающих обмотки (силы направлены внутрь обмотки) - не нужно дополнительное бандажирование;
- ❑ Обеспечивается точность периода (обмотки вставляются в пазы каркаса)

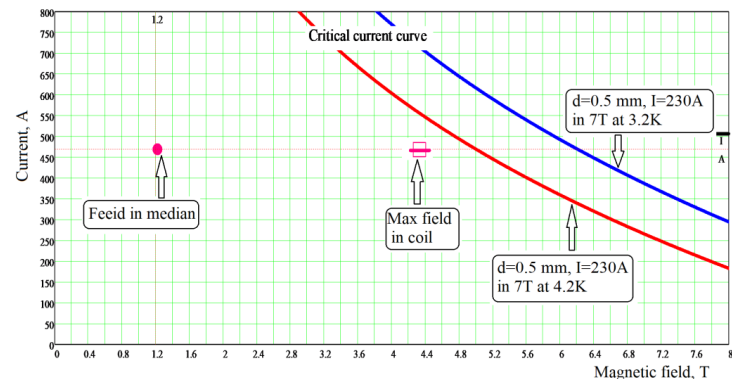


# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

- ❑ Идёт работа над контрактом с DLS по сверхпроводящему ондулятору.
- ❑ Создан и испытан 40-периодный прототип. Получено поле **1.2 Тл**.
- ❑ Пути повышения поля до требуемого **1.25 Тл**:
  1. Изготовление керна из железа типа VACOFLUX 27 с индукцией насыщения 2.4 Тл (аналог пермендюр)
  2. Улучшение критических параметров провода при понижении температуры до ~3 К
  3. Использование с/п провода с улучшенными параметрами (265 А в 7 Тл вместо 250 А)

## Основные параметры 40-периодного прототипа:

Магнитное поле, Тл	1.2
Период, мм	15.6
Магнитный зазор, мм	8
Число периодов	40
Ток, А	470
Диаметр провода, мм	0.55
Число витков в слое	12/11
Число слоёв	7
Толщина железного керна, мм	4.39
Ширина обмотки, мм	146
Критический ток провода в 7 Тл, А	250
Соотношение Cu/NbTi	0.42



Положение рабочей точки относительно критической кривой провода (1.2 Тл на медиане) для 4.2 и 3.2 К

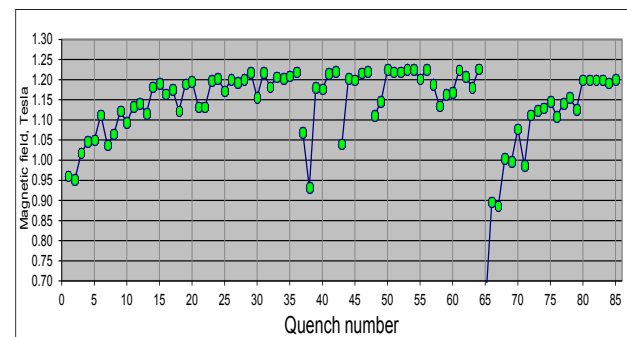
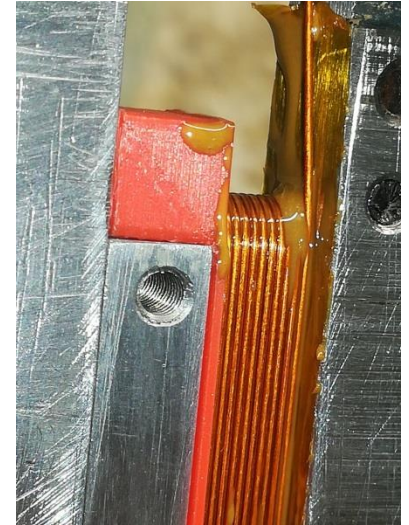


График тренировки 40-полюсного прототипа в жидком гелии

# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

Работа с прототипом сверхпроводящего ондулятора для DLS:

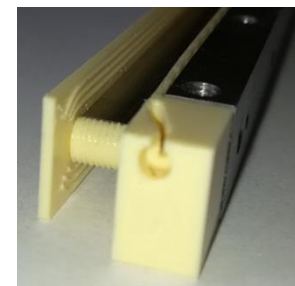
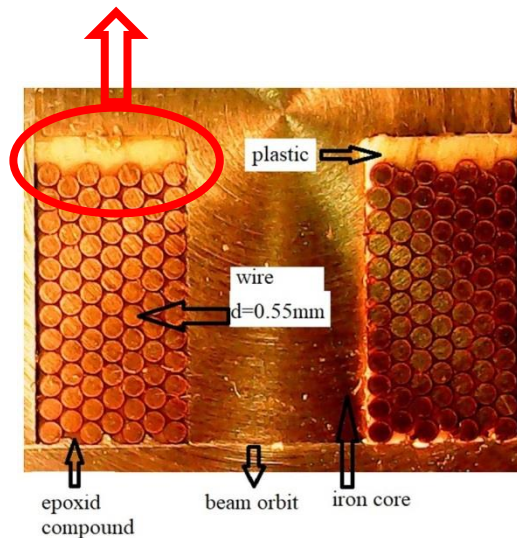
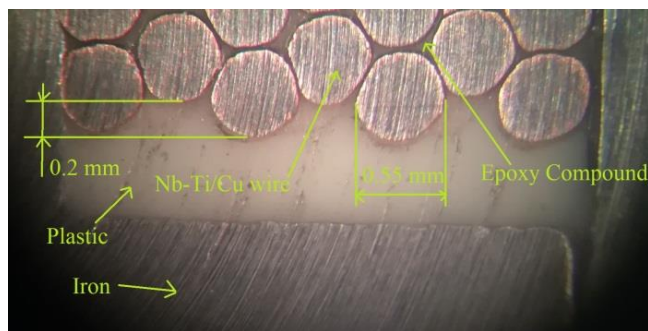
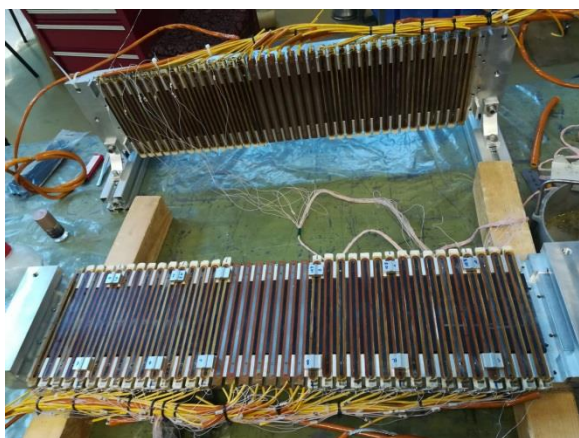




# Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

## Отработка технологии изготовления обмоток:

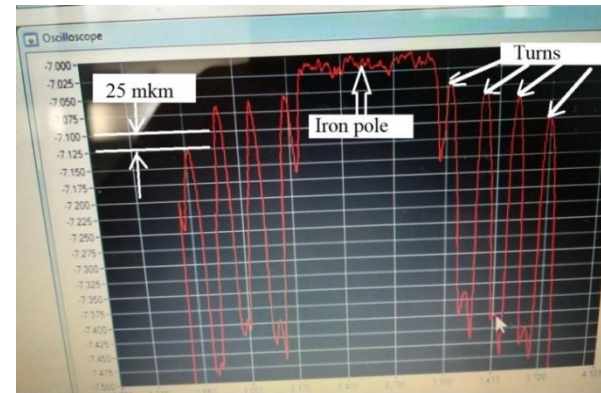
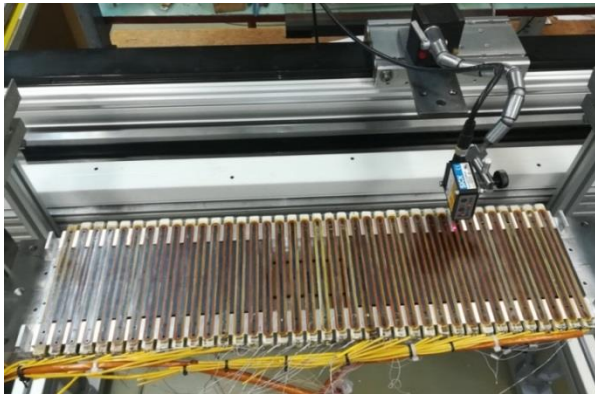
- ❑ Требование на точность изготовления 10-20 мкм (в том числе для положения витков внутри обмотки) для фазовой ошибки  $< 3^\circ$ ;
- ❑ Использование 3-D принтера для изготовления пластиковых деталей;



## Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФа

### Минимизация фазовой ошибки ондулятора:

- ❑ Шаг 1. Фазовая ошибка с катушками, расположенными в порядке изготовления  $\sim 8.2^\circ$
- ❑ Шаг 2. Измерение положения витков внутри обмотки с помощью лазерного микрометра: Среднее положение витков внутри обмотки относительно поверхности железного керна нестабильно (20-60 мкм), неравномерность магнитного зазора (величина зазора определяется большей частью витками с током). При этом точность изготовления железных кернов 10 мкм.
- ❑ Обмотки были перераспределены для обеспечения равномерного магнитного зазора между витками с током вдоль магнита. Фазовая ошибка уменьшилась до  $\sim 4.4^\circ$

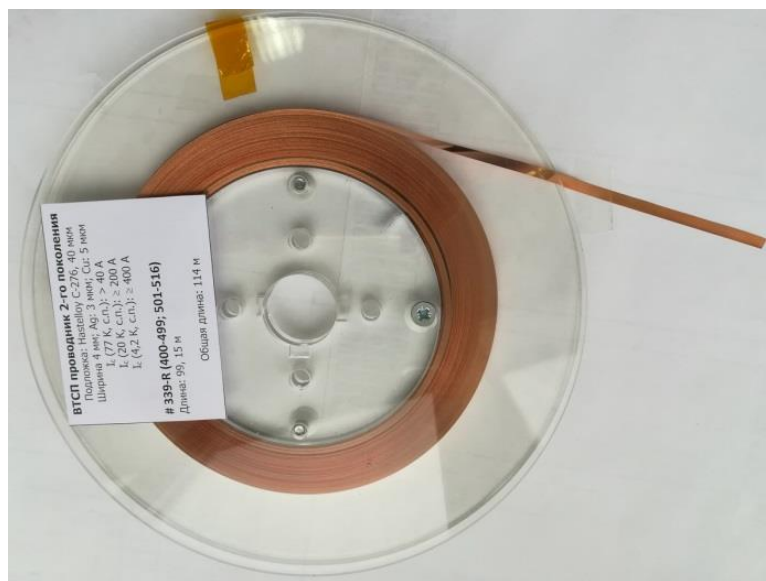


- ❑ Шаг 3. Использование дополнительных локальных корректирующих токов  $\sim 5$  А ( $\sim 1\%$  от основного тока 500 А. Типичное отличие поля между полюсами также  $\sim 1\%$ ;
- ❑ Использование 1 корректирующего источника на  $\sim 10$  катушек достаточно для снижения фазовой ошибки до  $\sim 2.8^\circ$ ;

## Сверхпроводящие генераторы СИ для СКИФ

### Минимизация фазовой ошибки:

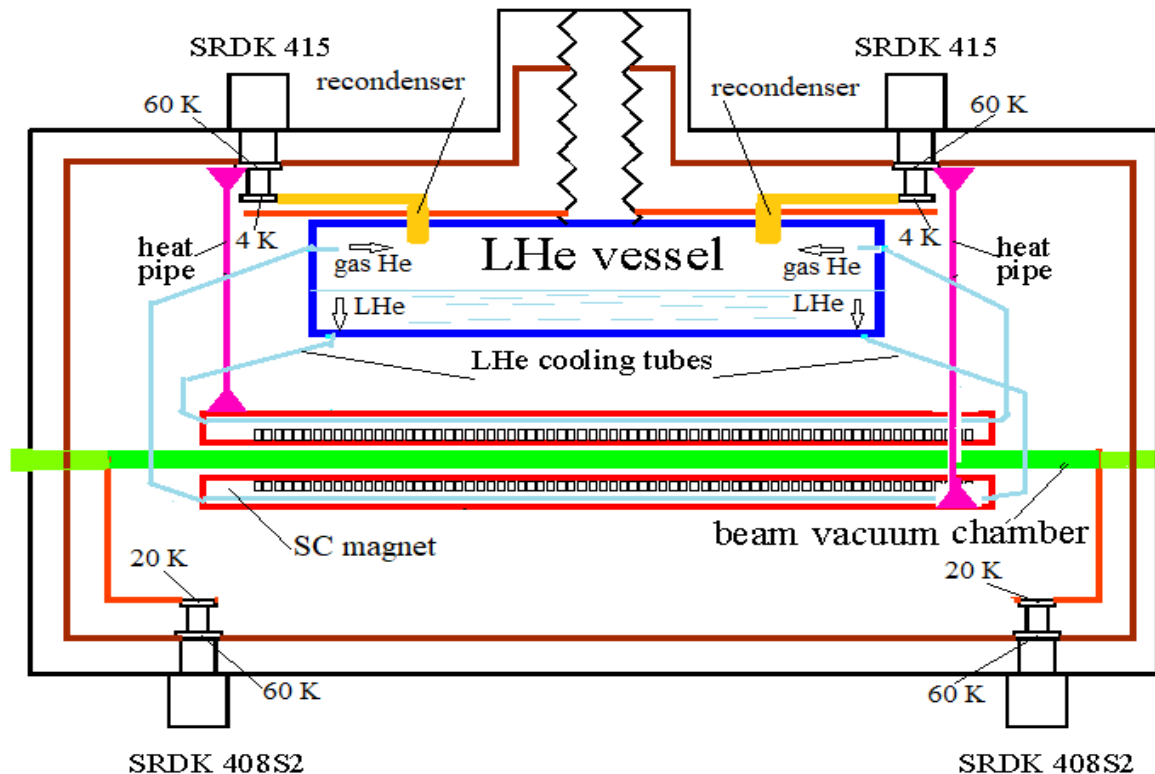
- ❑ Использование корректирующих источников значительно снижает требования к точности изготовления обмоток
- ❑ Проблема: Как ввести дополнительные токи в сухой криостат?
- ❑ Предложение: Использовать ВТСП провода с последовательным перехватом тепла на ступени криокулеров. Основная нагрузка на наружную ступень.



ВТСП провод ( $I_{max}$  100 А)

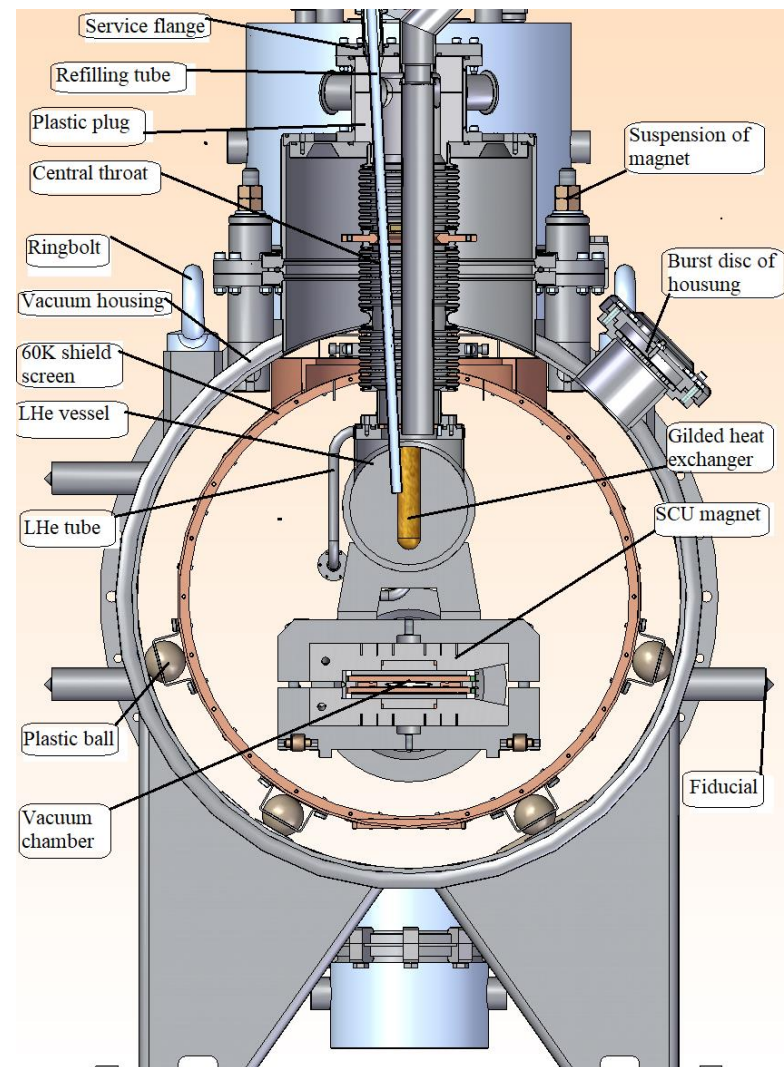
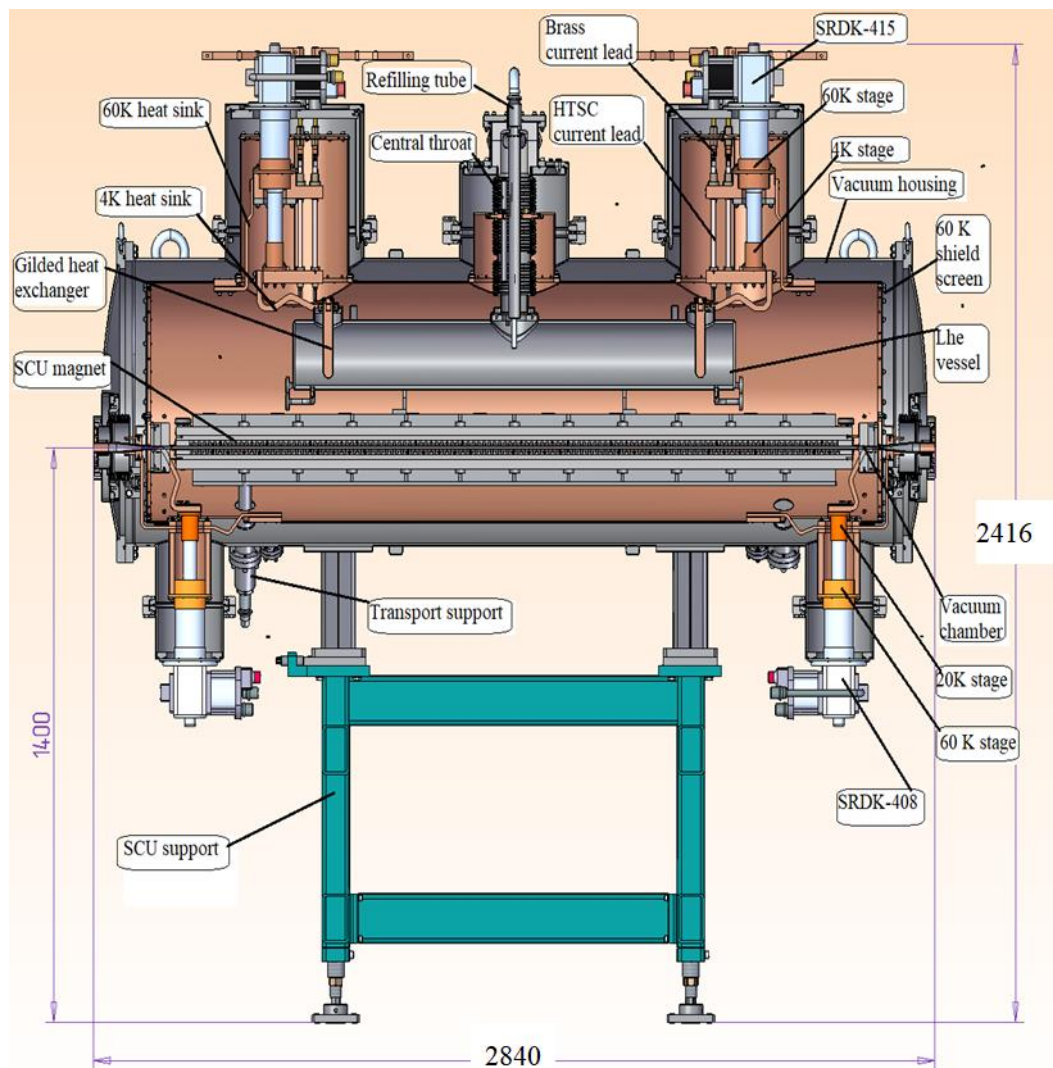
## Вставное устройство с косвенным охлаждением

- ❑ Для уменьшения магнитного зазора и увеличения поля из зазора удаляется камера гелиевого сосуда - вигглер с косвенным охлаждением
- ❑ Охлаждение жидким гелием, циркулирующим по каналам внутри магнита.
- ❑ Гелий охлаждается в сосуде вне магнита
- ❑ Предварительное охлаждение от 60К ступени через азотные тепловые трубки сифонного типа. Тепловой мост размыкается после 64 К (замерзание азота).



## Вставное устройство с косвенным охлаждением

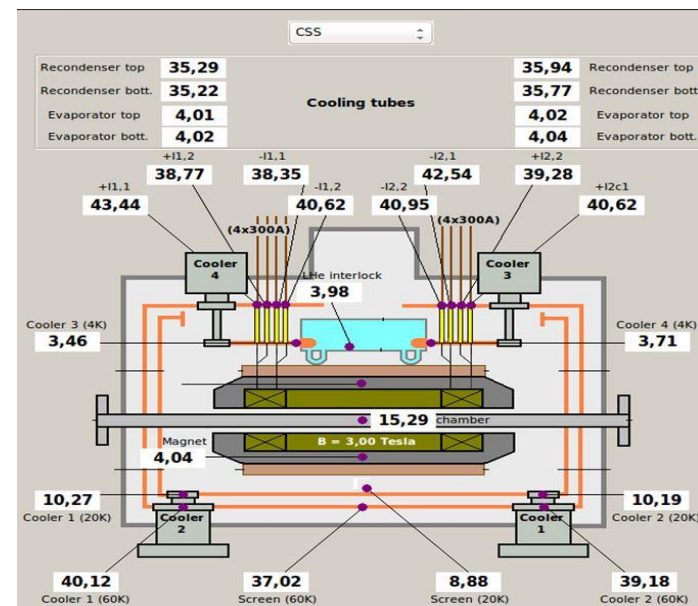
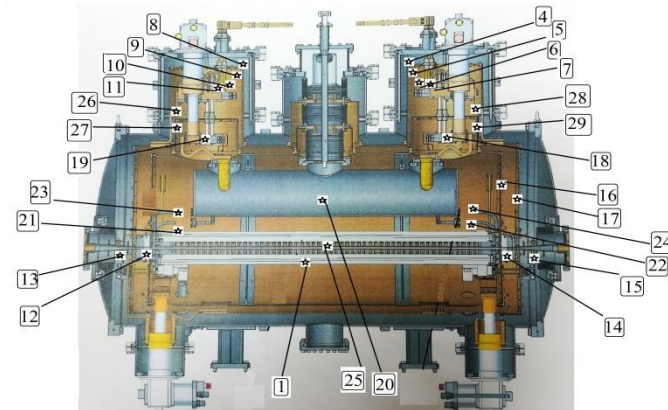
**Концепция охлаждения:** последовательный перехват всех притоков тепла на ступени 60К, 20К и 4К для минимизации притока тепла в магнит:



## Вставное устройство с косвенным охлаждением

Тепловой баланс вигглера с косвенным охлаждением:

	Наружный (60К) экран, Вт	Внутренний (20К) экран, Вт	Магн ит 4.2К, Вт
Тепловое излучение	8	0	0.03
Центральная горловина	2.5	0	0.06
Вакуумная камера (снаружи)	5.3	0.25	0.04
Подвески	0.5	0.05	0.01
Токовводы (теплопроводность)	50	0	0.3
Токовводы (нагрев током)	50	0	0.3
Диагностические провода	5	0.1	0.01
Вакуумная камера (токи изображения)	0	10	0.2
<b>Итого:</b>	<b>121.3</b>	<b>12.4</b>	<b>0.95</b>
Мощность ступеней кулеров	210	25	3



- Избыточная мощность идёт на переохлаждение гелия - рост уровня поля;
- Соответствующее понижение давления в гелиевом сосуде - буферный объем экономит гелий при квенче.



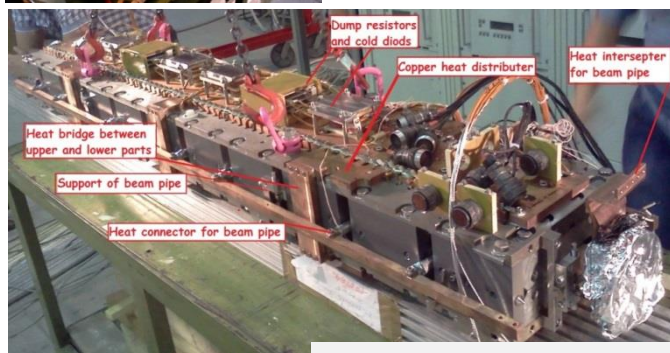
# Вставное устройство с косвенным охлаждением

Опыт создания вигглеров с косвенным охлаждением: 3Тл CLIC вигглер-затухатель и два 3.5 Тл вигглера КИСИ

Storage ring, location, year	CLIC dumping ring (ANKA, Germany), 2015	Kurchatov SRS, Moscow, 2019
Magnetic Field, T	<b>3</b>	<b>3.5</b>
Period, mm	<b>51</b>	<b>48</b>
Magnetic gap, mm	18	14
Vacuum gap, mm	13	10
Number of poles	68+4	50+4
Cold mass, kg	700	700
Ramping time, min	< 5	<5
Beam heat load (acceptable), W	50	50



Assembling of 54-pole indirect cooling 3.5 Tesla wiggler for KSRS, (March 2019)



72-pole indirect cooling 3Tesla wiggler for CLIC dumping ring (2015)



## Проектирование и изготовление

- Для оптимизации работы все основные элементы будут унифицированы:
- Все корпуса криостатов и внутренние элементы будут иметь одинаковый размер.
- Магниты всех вигглеров - одинаковые. Магниты всех ондуляторов - одинаковые.
- Вакуумные камеры одинаковые. Уже изготовлены методом экструзии 20 м. Фильтры сохранились..
- Можно запускать изготовление всей серии вставных устройств первой очереди одновременно (140 т. н/ч).

Организация дополнительного намоточного участка в ЭП-1 - обязательное условие!

- Проблема с источниками питания (Потребность ~30 штук)
- Главное требование - устойчивая работа на чисто индуктивную нагрузку
- Danfisik, который наладил выпуск таких источников, в настоящее время плохо себя чувствует. Хотя и мы и «выдавили» из них коммерческое предложение (цена одного 40 к\$).
- Источники Веремеенко ВЧ-300 пока не закончили этап апгрейда. Это оптимальный вариант.

ВСТАВНЫЕ УСТРОЙСТВА	2020				2021				2022				2023			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Расчеты и моделирование основных систем																
Конструирование основных систем																
Создание стендов																
Изготовление и испытание прототипов																
Создание рабочих чертежей																
Закупка материалов, оборуд. и комплектуюц.																
Изготовление криостатов (5 шт.)																
Изготовление магнитов (5 шт.)																
Намотка сверхпроводящих обмоток																
Разработка и создание системы управления																
Изготовление (покупка) источников питания																
Сборка магнитов и испытание в жидком гелии																
Изготовление вакуумных камер промежутков																
Сборка ондулятора 1-1																
Испытание ондулятора 1-1																
Сборка ондулятора 1-2																
Испытание ондулятора 1-2																
Сборка вигглера 1-3																
Испытание вигглера 1-3																
Сборка ондулятора 1-4																
Испытание ондулятора 1-4																
Сборка вигглера 1-5																
Испытание вигглера 1-5																
Нормо-часы, тыс. (всего 140)		5	5	5	5	20	20	20	20	20	20					
Закупки, млн. руб. (всего 175)		25	25	25	25	25	25	25								





**Спасибо за внимание!**

