

# Сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы для СКИФ

Шкаруба В.А.

ИЯФ СО РАН, Новосибирск



## Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

- ❑ Основные устройства генерации СИ - сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы;
- ❑ Сверхпроводимость - большие поля при минимальном периоде (чем на постоянных магнитах) и больше полюсов для увеличения интенсивности.  $I \propto N$  (вигглер) и  $I \propto N^2$  (ондулятор);
- ❑ Позволяет получать характеристики излучения на «малых» накопителях (~3ГэВ) как на ~6ГэВ;
- ❑ В **вигглере** угол отклонения траектории на каждом полюсе намного больше угла естественного расхождения пучка  $1/\gamma$  и спектр излучения непрерывный;
- ❑ В **ондуляторе** эти углы сравнимы, наблюдается интерференция излучения из всех полюсов и энергия излучения перераспределяется по гармоникам с высокой интенсивностью;
- ❑ **Условием** же появления интерференции является **высокая точность изготовления** магнитной структуры ондулятора;
- ❑ **Критерием** этого является величина **фазовой ошибки**, которая должна быть **менее 3 градусов**.

### Основные параметры сверхпроводящих ВИГГЛЕРОВ первой очереди СКИФ:

		Магнитное поле, Тл	Период, мм	Число периодов	Межполюсный зазор, мм	Вертикальная апертура для пучка, мм	Мощность излучения, кВт
Вигглер	СКИФ,	4.5	48	18	7	5	39
станция 1-5							
Вигглер	СКИФ,	2.7	27	74	7	5	33
станция 1-3							

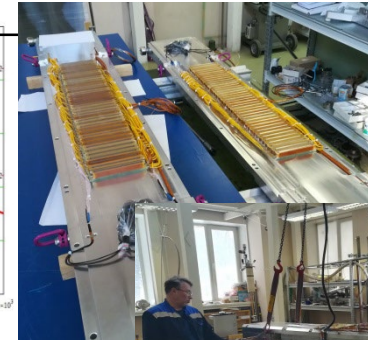
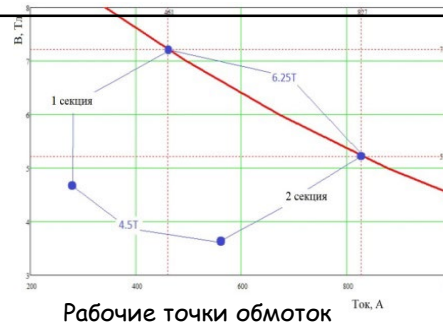


# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

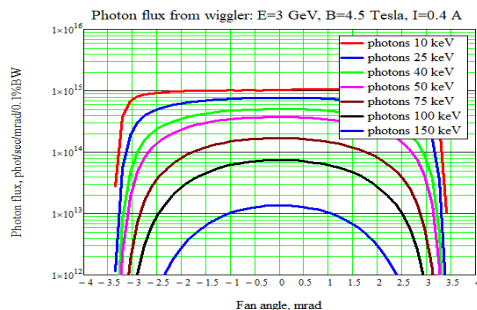
## Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4.5 Тл для станции 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

- ❑ Вигглеры. Жёсткость квантов ( $\epsilon_c \propto B$ ) + широкий угол ( $\gg 1/\gamma$ ). Если нужна широкая область засветки и жёсткий рентген (до ~150 кэВ). Материаловедение, геологии биомедицина;
- ❑ Расплата - нужно вырезать из широкого спектра узкий диапазон, остальную мощность отсекают; Ограничение по мощности - разрушение алмазных окон и рентгеновской оптики канала вывода;
- ❑ Оптимизировано под высокое поле (4.5 Тл), т.к. основной нагрев - поглощение мягкой части спектра;
- ❑ Изготовлен и испытан в жидком гелии полноразмерный 40-полюсный магнит; **Получено поле ~4.6 Тл** (февраль 2023).

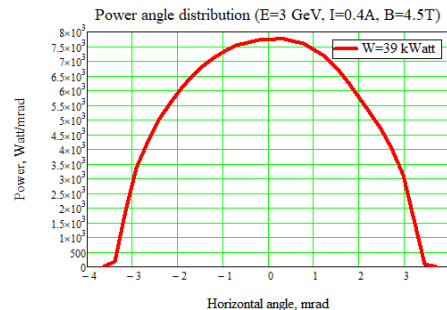
Параметры	
Номинальное магнитное поле, Тл	<b>4.5 (4.6)</b>
Период вигглера, мм	<b>48</b>
Межполюсный зазор, мм	<b>7</b>
Вертикальная апертура для пучка, мм	<b>5</b>
Горизонтальная апертура для пучка, мм	<b>40</b>
Число периодов	<b>18</b>
Число основных полюсов	<b>36</b>
Число полюсов $\frac{3}{4}$	<b>2</b>
Число полюсов $\frac{1}{4}$	<b>2</b>
Магнитная длина, мм	<b>~950</b>
Длина между фланцами	<b>~2700</b>
Ток в обмотке, А	<b>350</b>
Мощность излучения (B=4.5 Тл, I=0.4 А, E=3 ГэВ), кВт	<b>39</b>
Горизонтальный угол излучения, мрад	<b>± 3.5</b>



Вигглер в процессе сборки



Спектрально-угловое распределение потока фотонов



Угловое распределение мощности излучения



Вигглер перед испытанием

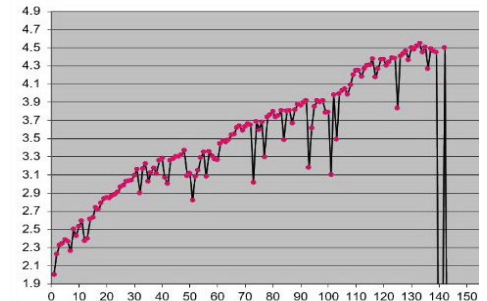


График тренировки прототипа вигглера 1-5

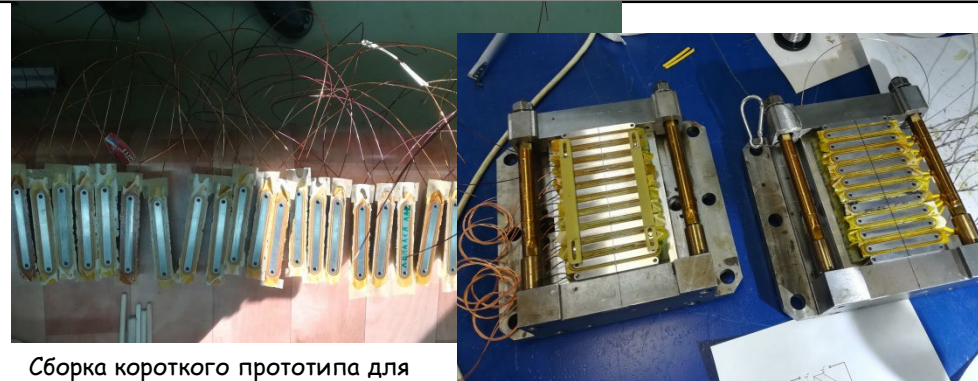


# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

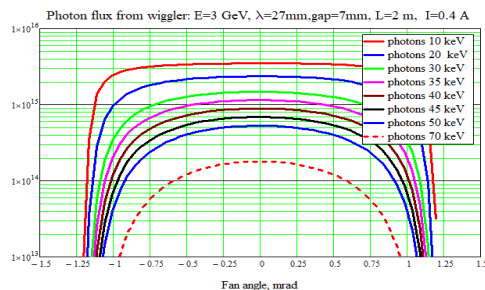
## Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и полем 2.7 Тл для станции 1-3 «Быстропротекающие процессы»

- ❑ Для «рентгеновского кино» в условиях импульсных ударных нагрузок (взрыв) с временами от пс до мс (1 сгусток - 1 «кадр») - максимальное количество фотонов/сгусток в диапазоне 20 кэВ - 70 кэВ;
- ❑ Вигглер, т.к. ондулятор с высокими гармониками до ~70 кэВ сегодня технически недоступен;
- ❑ Так же есть ограничение по мощности ~30 кВт;
- ❑ Параметры (уровень поля 2.7 Тл период 27 мм) - рекордные. Ближайший - 119-полюсный с полем 2.1 Тл и периодом 30 мм, установленный на накопителе ALBA;
- ❑ Испытан короткий прототип в жидком гелии (2 марта 2023). Получено поле 3.06Тл.

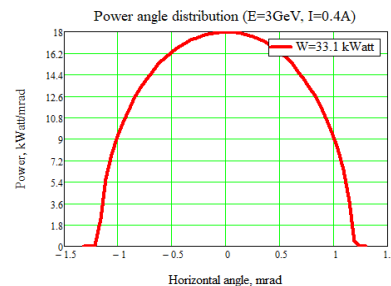
Параметры	Вигглер 1-3
Номинальное магнитное поле, Тл	2.7
Период вигглера, мм	27
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Число периодов	74
Число основных полюсов	148
Число полюсов $\frac{3}{4}$	2
Число полюсов $\frac{1}{4}$	2
Магнитная длина, мм	~2000
Длина между фланцами	~2700
Ток в обмотке, А	820
Мощность излучения (В=2.7 Тл, I=0.4 А, E=3 Гэв), кВт	33.1
Горизонтальный угол излучения, мрад	$\pm 1.2$



Сборка короткого прототипа для испытания в жидком гелии



Спектрально-угловое распределение потока фотонов



Угловое распределение мощности излучения

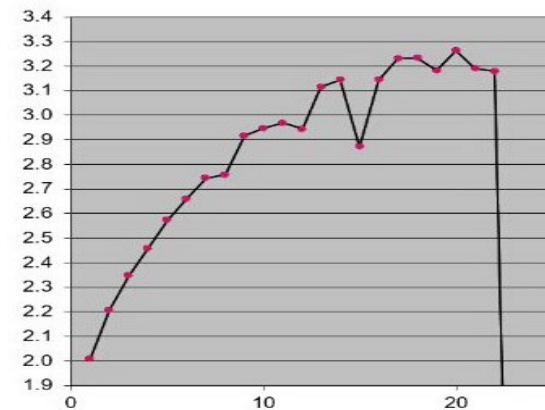


График тренировки прототипа вигглера 1-3

## Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

- ❑ Критерием качества ондулятора, является величина фазовой ошибки, характеризующая отличие магнитного поля реального устройства от идеального синусоидального поля, которая должна быть  $< 3$  градусов;
- ❑ На современных источниках СИ (СКИФ), имеющих малый эмиттанс и энергетический разброс, близких к дифракционному пределу, большая величина фазовой ошибки ограничивает яркость излучения на высоких гармониках и не использовать возможности накопителя;
- ❑ Для обеспечения  $\Phi O < 3$  градусов - разброс геометрических размеров обмоток и неточности их установки в каркасе магнита  $< 10 - 20$  мкм.

### Основные параметры сверхпроводящих ОНДУЛЯТОРОВ первой очереди СКИФ:

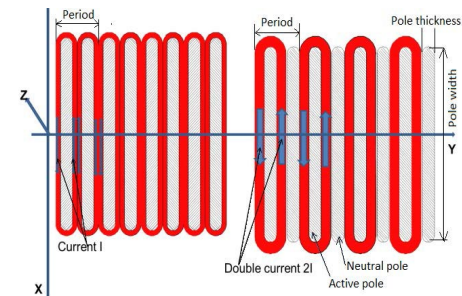
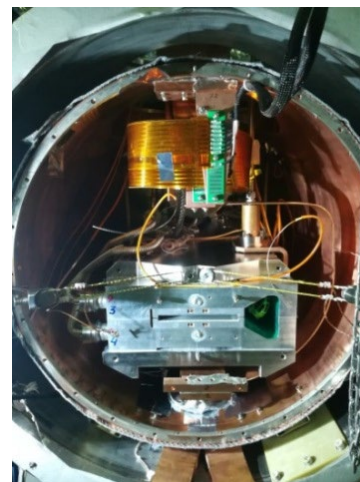
Вид вставного устройства, номер станции	Магнитное поле, Тл	Период, мм	Число периодов	Горизонтальный угол излучения, мрад	Мощность излучения, кВт
Ондулятор, станция 1-1 «Микрофокус»	1.25	15.6	128	$\pm 0.32$	7.66
Ондулятор, станция 1-2 «Структурная диагностика»	1.25	15.6	128	$\pm 0.32$	7.66
Ондулятор, станция 1-4 «EXAFS-спектроскопия»	1.6	18	111	$\pm 0.46$	11.75

# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

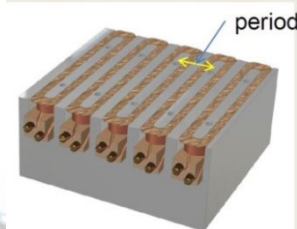
Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл для Станции 1-1 «Микрофокус» и станции 1-2 «Структурная диагностика»

- ❑ Был создан полноразмерный прототип с полем 1.2 Тл с зазором 8 мм, проведён цикл испытаний и магнитных измерений;
- ❑ Конструкция с чередующимися нейтральными и активными полюсами

Параметры	Ондуляторы 1-1 и 1-2
Номинальное магнитное поле, Тл	1.25
Период вигглера, мм	15.6
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Число периодов	128
Магнитная длина, мм	~2000
Длина между фланцами	~2700
Ток в обмотке, А	~440
Мощность излучения (В=1.25 Т, I=0.4 А, E=3 ГэВ), кВт	7.66
Горизонтальный угол излучения, мрад	± 0.32
Среднеквадратичная фазовая ошибка, град	<3
Максимальное значение параметра отклонения	K ~1.89



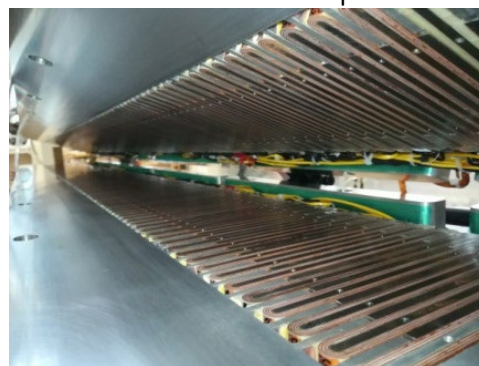
Конструкция ондулятора с нейтральными и активными полюсами



Сверхпроводящий ондулятор установлен в криостат косвенного охлаждения



Внешний вид криостата ондулятора в процессе магнитных измерений



Сверхпроводящие катушки установлены в магнит ондулятора

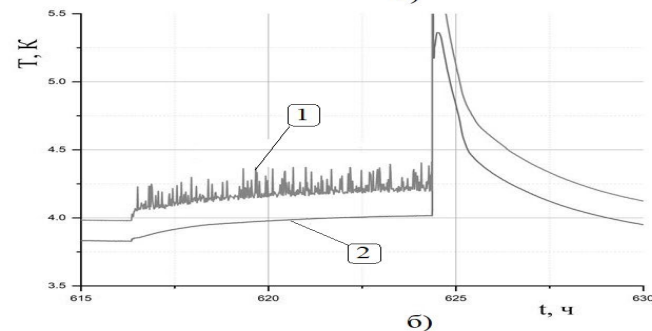
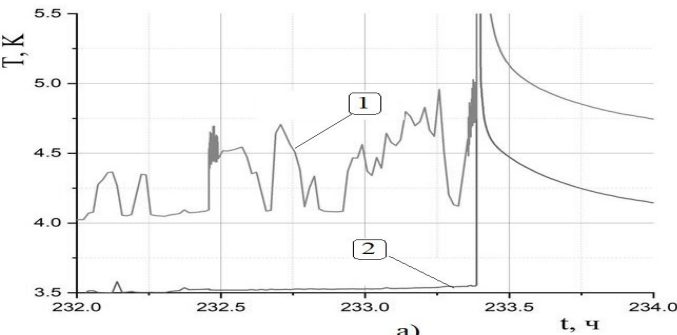


Магнитная система сверхпроводящего ондулятора в сборе

# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

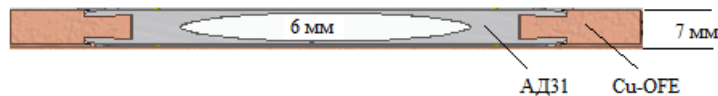
## Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл для Станции 1-1 «Микрофокус» и станции 1-2 «Структурная диагностика»

- ❑ Требуемая величина поля 1.2 Тл в стационарном режиме не получена (только 1.15 Тл). При этом при быстром подъёме достигается поле 1.26 Тл(!).
- ❑ Возможная причина - **перегрев сварных контактов** до 5 К при долговременной работе с током ~450 А (без тока температура магнита 3.7 К). Магнит «сухой», охлаждение только через теплопроводность.
- ❑ Обнаружен эффект «пульсации температуры» на контактах между катушками с частотой раз в 4 - 6 секунд, которые начинаются с порогового тока ~260 А и приводят к росту температуры и последующему срыву сверхпроводимости. При снижении тока - пульсации пропадают. Предположение: скачки магнитного потока внутри соединений сверхпроводящих проводов. Предложенное решение - дополнительное принудительное **охлаждение контактов** тепловым перехватом. Результат: уровень температур на контакте снизился до 4.3 К, что обеспечило стабильную работу на поле 1.22 Тл

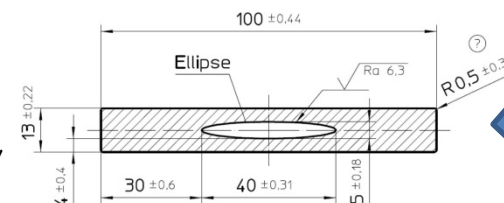


Эффект «пульсации температуры» на контактах между катушками до и после перехвата тепла.

- ❑ Уменьшение магнитного зазора с 8 до 7 мм на ондуляторах СКИФ повысит уровень поля до 1.25 Тл при тех же токах в обмотках.
- ❑ Уменьшение зазора ухудшает режим охлаждения вакуумной камеры при нагреве СИ и токами изображения (не хватает сечения).
- ❑ Предложено использовать **полностью медную камеру**, методом экструзии (была комбинированная экструдированный алюминий и медные вставки) (Германия).
- ❑ Формовка эллипса из медной трубы и пайка теплопроводов (Импортозамещение ИЯФ)

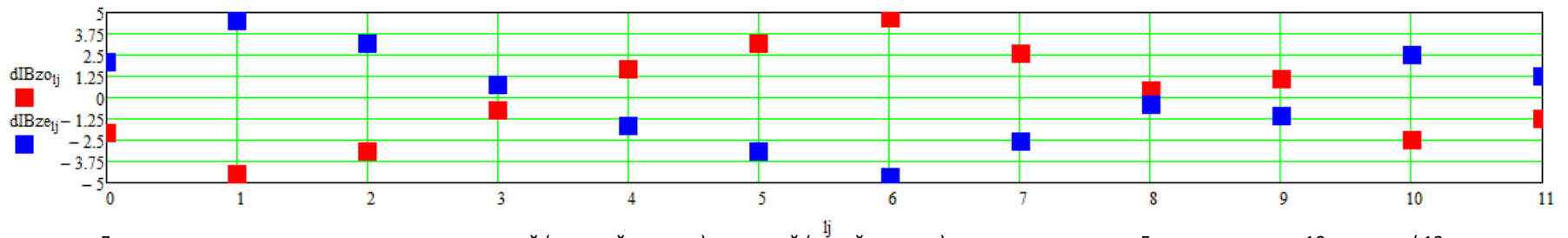


Конструкция вакуумной камеры пучка



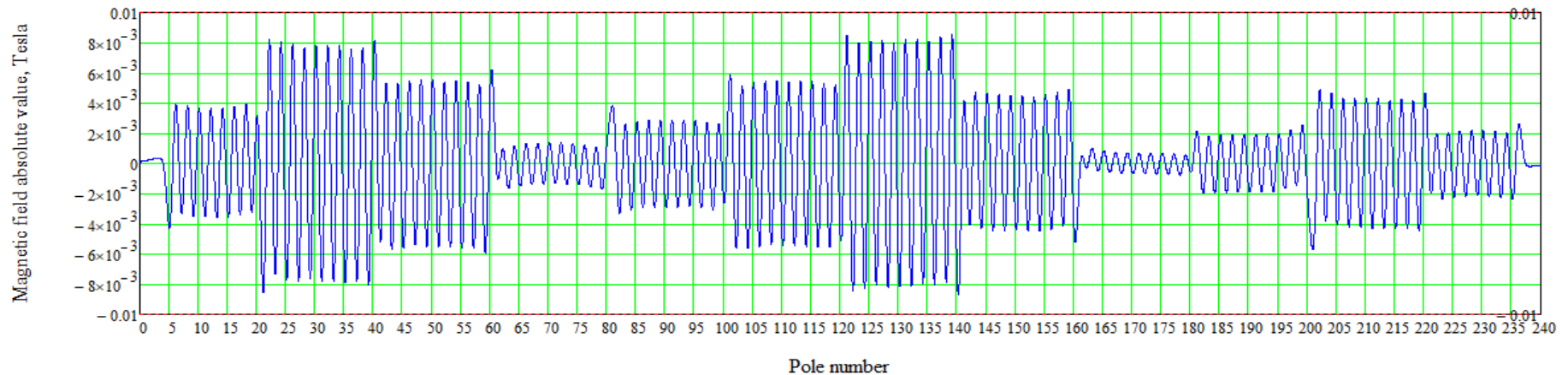
## Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

- ❑ Предпринятые шаги по улучшению технологии намотки катушек не дали гарантированного качества. **Фазовая ошибка** >  $3^\circ$  (на основе магнитных измерений датчиком Холла);
- ❑ Использование **корректирующих токов** (~ 24 участка из 10 полюсов каждой) - 12 в верхней и 12 в нижней половине) вводятся в криостат через комбинированные вводы из ВТСП ленты и медных проводов.
- ❑ Стратегия подбора корректирующих токов:
  - ❑ **Коррекция величины поля** вдоль всего ондулятора изменяя поля в расположенных друг напротив друга группах полюсов навстречу друг другу,- выравнивается общий уровень магнитного поля вдоль всего ондулятора.
  - ❑ **Коррекция орбиты** электронного пучка с помощью тех же групп полюсов, то теперь создавали поля направленные в одну сторону таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение орбиты на каждом полюсе.



Дополнительные токи в группах полюсов нижней (красный квадрат) и верхней (синий квадрат) половинах магнита. Группы состоят из 10 полюсов ( 12 групп в нижней и 12 групп в верхней половинах) . Количество источников питания 24 . Максимальный ток коррекции 5А. Основной ток ~500 А.

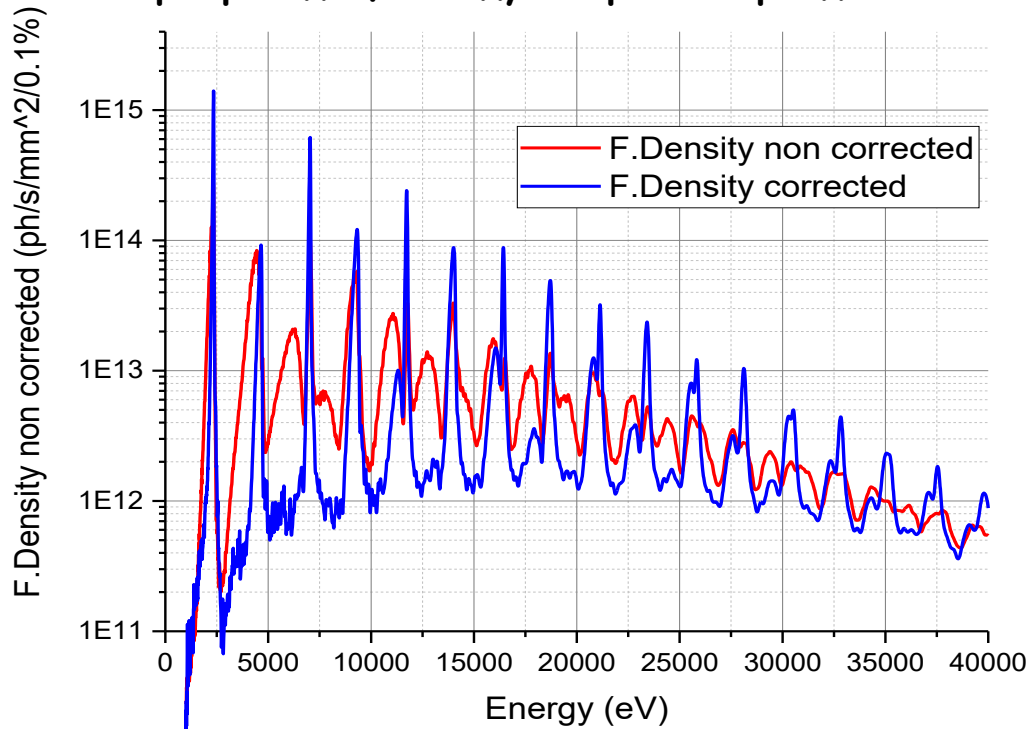
Добавки поля в полюсах



Дополнительное поле вдоль ондулятора после подключения токов коррекции величины поля.

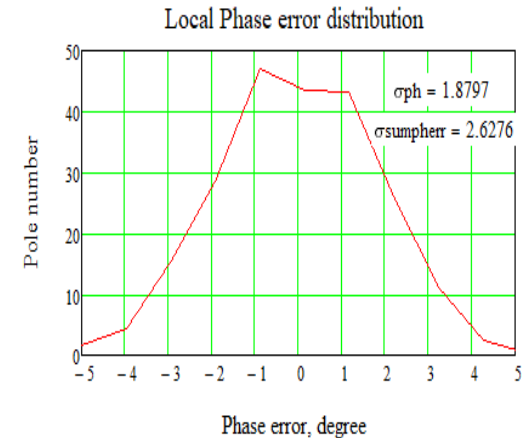


## Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

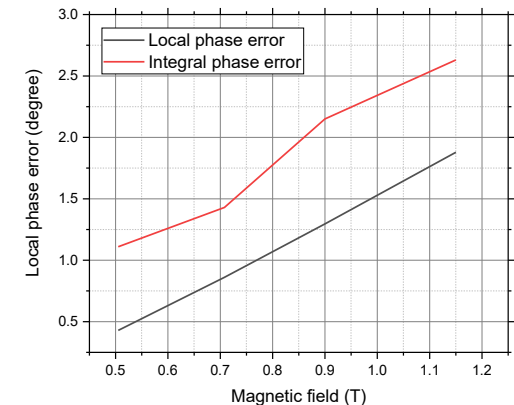


Спектр сверхпроводящего ондулятора с включённой коррекцией фазовой ошибки

- ❑ Вывод: предложен метод коррекции величины фазовой ошибки путём разбиения обмоток на группы и независимой запитки каждой группы корректирующим током величиной  $\sim 1\%$  от номинального.
- ❑ Предложен алгоритм коррекции фазовой ошибки, при котором токи коррекции являются суперпозицией токов, отдельно корректирующих величину поля и орбиту.
- ❑ Такой подход позволяет получать требуемую фазовую ошибку даже с катушками не самого хорошего качества намотки.
- ❑ Была решена техническая проблема ввода большого количества корректирующих токов ( $\sim 20$  источников по 3-5 А) без дополнительного нагрева магнита через комбинированные вводы из ВТСП ленты и медных проводов.



Распределение локальной фазовой ошибки с включённой коррекцией



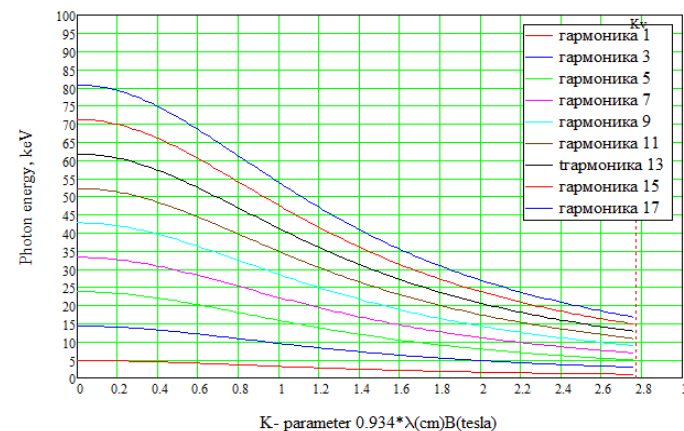
Зависимость локальной и интегральной фазовой ошибки для рабочего диапазона магнитных полей ондулятора

# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

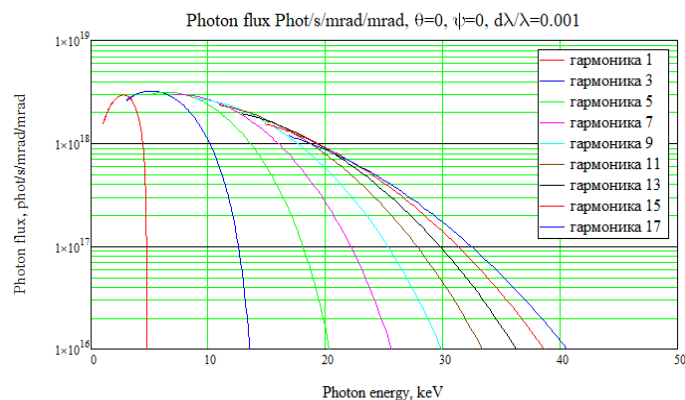
## Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 18 мм и полем 1.6 Тл для Станции 1-4 «EXAFS-спектроскопия»

- Конструкция аналогична;
- Запуск этого ондулятора - апрель 2024.

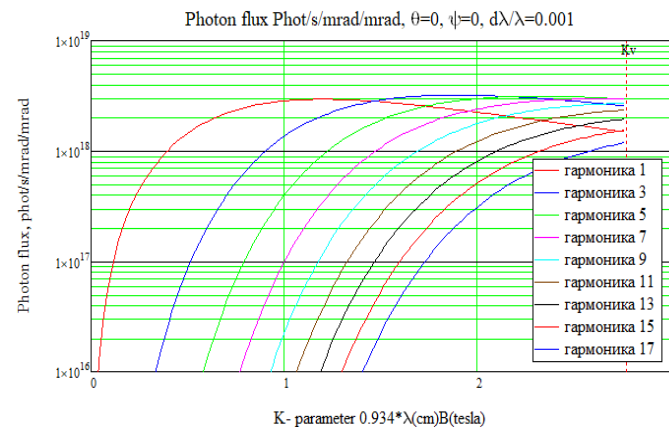
Параметры	
Номинальное магнитное поле, Тл	1.6
Период вигглера, мм	18
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Число периодов	111
Магнитная длина, мм	~2000
Длина между фланцами	~2700
Ток в обмотке, А	~440
Мощность излучения ( $B=1.25$ Т, $I=0.4$ А, $E=3$ GeV), кВт	11.75
Горизонтальный угол излучения, мрад	$\pm 0.46$
Среднеквадратичная фазовая ошибка, град	<3
Максимальное значение параметра отклонения	$K \sim 2.7$



Зависимость энергий фотонов для разных гармоник излучения от параметра отклонения K



Спектральный поток фотонов при изменении поля в ондуляторе от нуля до максимального рабочего поля



Поток фотонов для разных гармоник излучения в зависимости от параметра отклонения K

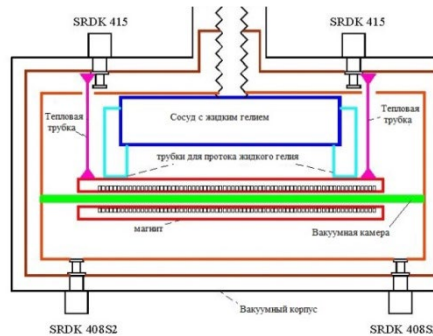


# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

## Криогенная система сверхпроводящих вставных устройств

- ❑ Криостат с косвенным охлаждением, расход гелия нулевой. 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).
- ❑ Остаточное давление в гелиевом сосуде 0.5 бар, температура магнита ~ 3.5 К.
- ❑ Может работать автономно в течение нескольких лет внутри биозащиты.

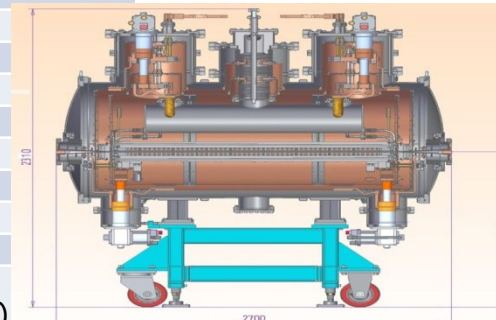
Параметры	Величина
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Магнитная длина, мм	~2000
Длина между фланцами	~2700
Высота от пола, мм	1200



Принцип работы криостата с косвенным охлаждением



	Наружный экран (60 К), Вт	Внутренний экран (20 К), Вт	Гелиевый сосуд (4 К), Вт
Тепловое излучение	8	0.05	0.0002
Центральная горловина	2.5	0.3	0.06
Сильфоны вакуумной камеры	5.3	0.25	0.04
Система подвесок	0.5	0.1	0.01
Токовводы (теплопроводность)	50	0	0.3
Нагрев токовводов током	50	0	0.3
Измерительные провода	5	0.1	0.01
Лайнер	10	10	0.2
Общий приток	131.3	10.8	0.92
Охлаждающая мощность криокулеров	180 (при 50 К)	15 (при 20 К)	3 (при 4.2 К)


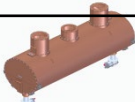

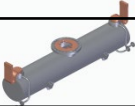

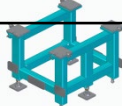







Конструкция криостата



# Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

Степень готовности систем сверхпроводящих вставных устройств:

Наружный корпус	Готовность в 2023	
Медные экраны	Готовность в 2023	
Блоки токовводов	Готовность в 2023	
Гелиевый сосуд	Готовность в 2023	
Газоотвод	Готовность в 2023	
Подставки	Готовность в 2023	
Медные вакуумные камеры <del>Wieland (Германия)</del>	Импортозамещение - изготовление в ИЯФ 2023	
Металл (медь и нержавейка)	Все закуплено. На складе ЭП.	
Алюминиевые плиты АД31	Все закуплено. На складе ЭП.	
Криокулеры <del>Sumitomo</del> Pride Cryogenics (Китай)	Все закуплено	
Источники питания <del>DANFYSIK (400 А, 12 В)</del>	Импортозамещение - изготовление в ИЯФ 2023	
Источники питания корректоров фазовой ошибки ондуляторов <del>TDK-Lambda</del> (Китай)	Все закуплено. На складе в лаборатории.	

## Изготовление сверхпроводящих обмоток

- Создано параллельно (кроме участка на территории криогенной станции) ещё 2 участка для намотки (На территории ЭП-1 - уже запущен, В 10 здании - потребуется ещё 1-2 месяца),



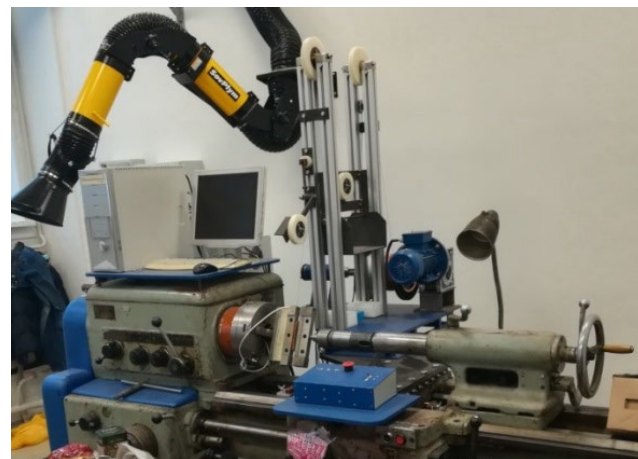
Участок намотки сверхпроводящих катушек на территории Криогенной станции (существует с 90-х годов)



Участок намотки сверхпроводящих катушек на территории ЭП-1.



Участок намотки сверхпроводящих катушек на территории 10 здания. Планируется запуск в эксплуатацию в **марте 2023**



Внешний вид намоточного станка, переоборудованного из токарного. Навесное оборудование, приводы, автоматизация и система контроля закоротки разработаны силами лаборатории 8-2

## Список публикаций Лаб 8-2 за 2022-2023 годы:

1. В.А.Шкаруба, А.В.Брагин, А.А.Волков, А.И.Ерохин, А.В.Зорин, Ф.Т.Казанцев, Т.В.Каноник, Н.А.Мезенцев, А.Н.Сафронов, А.А.Седов, О.А.Тарасенко, С.В.Хрущев, В.М.Цуканов. **Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл.** ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, том 87, № 5, 2023, стр.623-630.
2. В.М.Цуканов, С.В.Хрущев, А.А.Волков, А.В.Зорин, Т.В.Каноник, Н.А.Мезенцев, В.А.Шкаруба. **Магнитные измерения сверхпроводящего ондулятора датчиками холла.** ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, том 87, № 5, 2023, стр.662-666.
3. С.В.Хрущев, В.М.Цуканов, В.А.Шкаруба, Н.А.Мезенцев, А.Н.Сафронов. **Криогенная система сверхпроводящего ондулятора, основанная на косвенном охлаждении.** ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, том 87, № 5, 2023, стр.656-661.
4. Т.В.Каноник, В.А.Шкаруба, А.А.Волков, А.И.Ерохин, А.В.Зорин, Ф.Т.Казанцев, Н.А.Мезенцев, О.А.Тарасенко, С.В.Хрущев, В.М.Цуканов. **Коррекция фазовых ошибок сверхпроводящего ондулятора.** ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, том 87, № 5, 2023, стр.636-641.
5. А.В.Зорин, Н.А.Мезенцев, В.А.Шкаруба, В.М.Цуканов, А.А.Волков, О.А.Тарасенко, Т.В.Каноник, Ф.Т.Казанцев. **Методы минимизации магнитных интегралов в сверхпроводящих вставных устройствах.** ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, том 87, № 5, 2023, стр.631-635.

# Спасибо за внимание!

