

Сверхпроводящие ондуляторы: статус и перспективы

Шкаруба В.А.

10-11.03.2022, Научная сессия ИЯФ СО РАН



- 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 полюсов и энергий излучения перераспределяется в гармоники.
- 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:

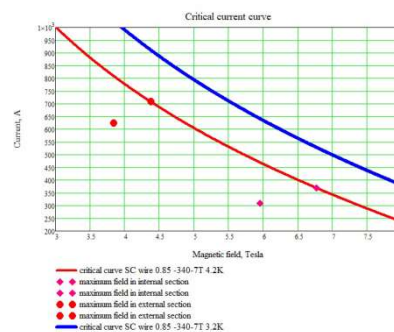
	Магнитное поле, Тл	Период, мм	Число периодов	Межполюсный зазор, мм	Вертикальная апертура для пучка, мм	Мощность излучения, кВт
Вигглер ANSTO (Австралия)	4.5 (4.7)	48	40	8	6	46
Вигглер SOLARIS (Краков)	4.0 (4.2)	48	26	10	8	14.2
Вигглер СКИФ, станция 1-5	4.5	48	18	7	5	39
Вигглер СКИФ, станция 1-3	2.7	27	74	7	5	33.1



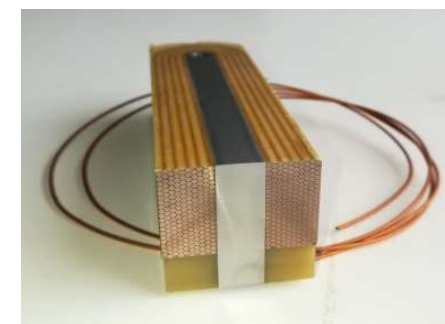
Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4.7 Тл для ANSTO (Австралия)

- ❑ Испытан в жидком гелии короткий 10-полюсный прототип (24 марта 2021);
- ❑ Получено поле 4.82 Тл;
- ❑ Полноразмерный готовится к испытаниям в жидком гелии

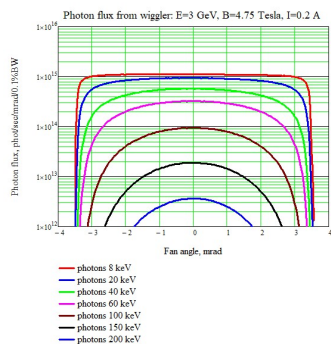
Параметры	
Номинальное магнитное поле, Тл	4.5
Период вигглера, мм	48
Межполюсный зазор, мм	8
Вертикальная апертура для пучка, мм	6
Горизонтальная апертура для пучка, мм	60
Число периодов	40
Число основных полюсов	80
Число полюсов $\frac{1}{4}$	2
Число полюсов $\frac{1}{2}$	2
Магнитная длина, мм	~2100
Длина между фланцами	~2700
Ток в обмотке, А	624
Мощность излучения (B=4.5 Тл, I=0.4 А, E=3 ГэВ), кВт	46
Горизонтальный угол излучения, мрад	± 3.5



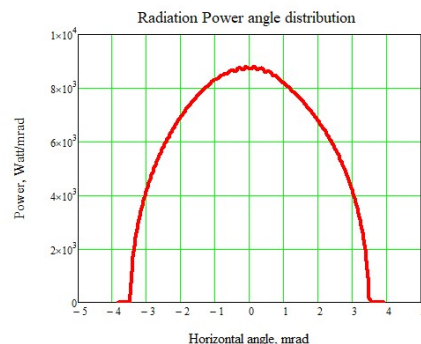
Рабочие точки обмоток центрального полюса



Разрез катушки для проверки качества



Спектрально-угловое распределение потока фотонов



Угловое распределение мощности излучения



Вигглера ANSTO (сборка)

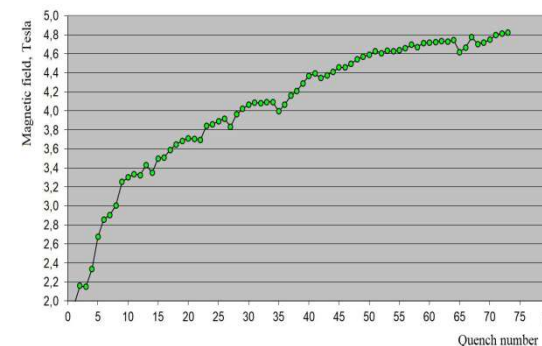


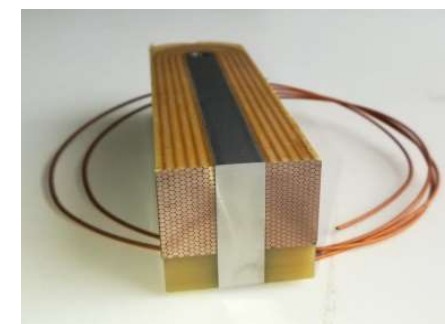
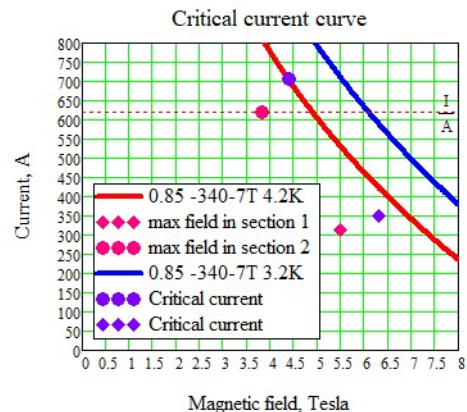
График тренировки прототипа вигглера ANSTO



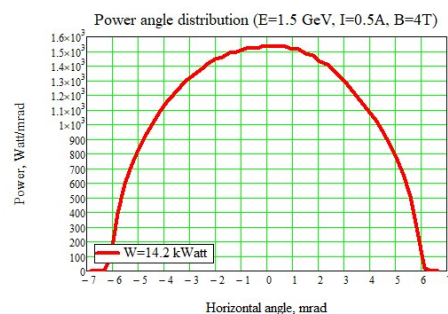
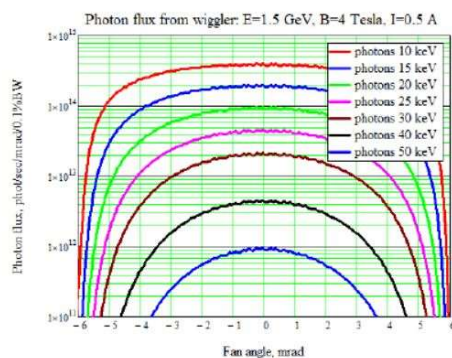
Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4.2 Тл для SOLARIS (Краков)

- Испытан в жидком гелии короткий 10-полюсный прототип (29 марта 2021);
- Получено поле 4.35 Тл;

Параметры	
Номинальное магнитное поле, Тл	4.2
Период вигглера, мм	48
Межполюсный зазор, мм	10
Вертикальная апертура для пучка, мм	8
Горизонтальная апертура для пучка, мм	60
Число периодов	26
Число основных полюсов	52
Число полюсов $\frac{3}{4}$	2
Число полюсов $\frac{1}{4}$	2
Магнитная длина, мм	~1485
Длина между фланцами	~2030
Ток в обмотке, А	620
Мощность излучения (B=4.5 Тл, I=0.4 А, E=3 ГэВ), кВт	14.2
Горизонтальный угол излучения, мрад	± 6



Разрез катушки для проверки качества



Сборка прототипа вигглера SOLARIS

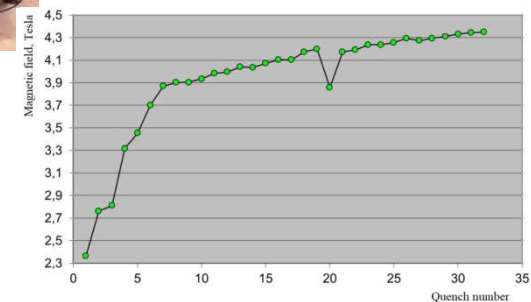


График тренировки прототипа вигглера SOLARIS

Спектрально-угловое распределение потока фотонов

Угловое распределение мощности излучения

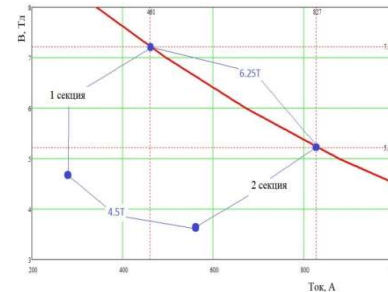


Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

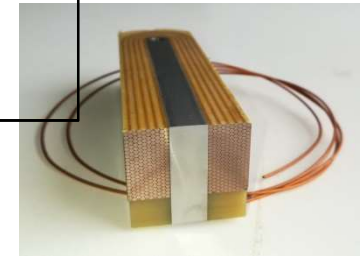
Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4.5 Тл для станции 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

- ❑ Изготовлен и испытан в жидком гелии короткий 10-полюсный прототип;
- ❑ Получено поле 5.12 Тл;
- ❑ Разрабатывается конструкция полноразмерного магнита, идёт намотка остальных катушек.

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



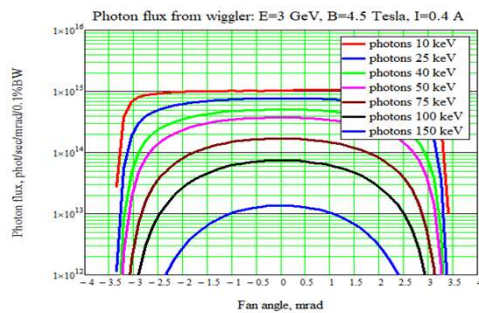
Рабочие точки обмоток центрального полюса



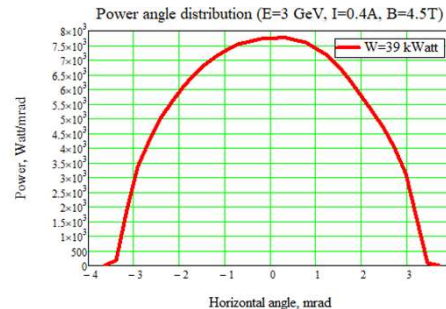
Разрез катушки для проверки качества



Готовые сверхпроводящие катушки



Спектрально-угловое распределение потока фотонов



Угловое распределение мощности излучения



Прототип вигглера

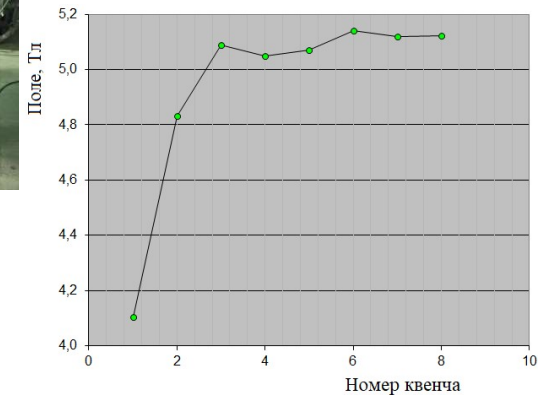


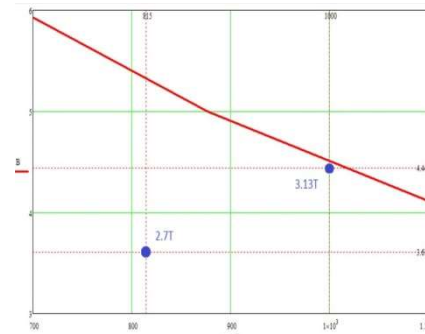
График тренировки прототипа вигглера 1-5

Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

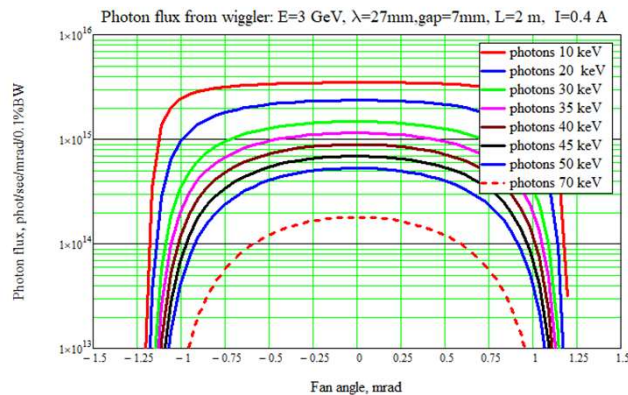
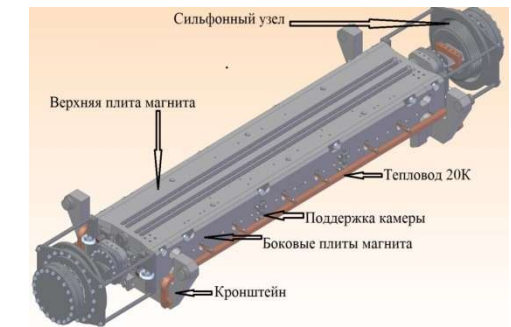
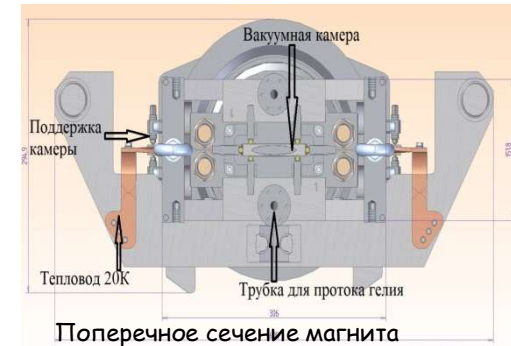
Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и полем 2.7 Тл для станции 1-3 «Быстропротекающие процессы»

- ❑ Разработана конструкция сверхпроводящих полюсов, идет изготовление катушек
- ❑ Конструкция магнита - в проработке.

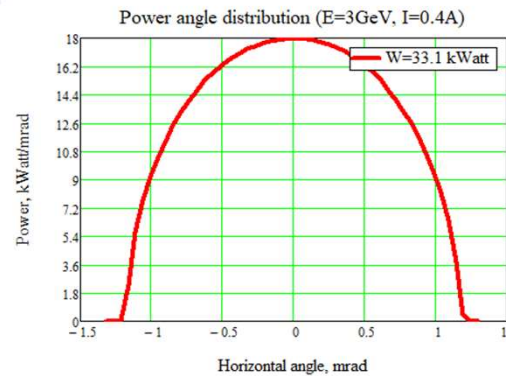
Параметры	Вигглер 1-3
Номинальное магнитное поле, Тл	2.7
Период вигглера, мм	27
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Число периодов	74
Число основных полюсов	148
Число полюсов $\frac{3}{4}$	2
Число полюсов $\frac{1}{4}$	2
Магнитная длина,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



Рабочая точка обмотки центрального полюса



Спектрально-угловое распределение потока фотонов



Угловое распределение мощности излучения

Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

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	1.25	15.6	128	± 0.32	7.66
Ондулятор, станция 1-2	1.25	15.6	128	± 0.32	7.66
Ондулятор, станция 1-4	1.6	18	111	± 0.46	11.75

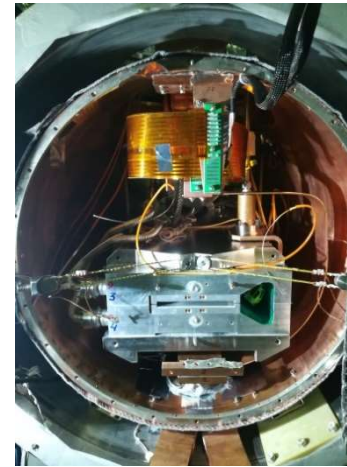


Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

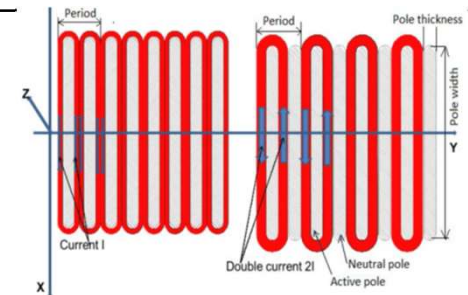
Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл для Станции 1-1 «Микрофокус» и станции 1-2 «Структурная диагностика»

- ❑ В качестве полноразмерного прототипа можно рассматривать ондулятор для DLS с чередующимися нейтральными и активными полюсами;
- ❑ В настоящий момент проводятся приёмочные испытания и магнитные измерения.

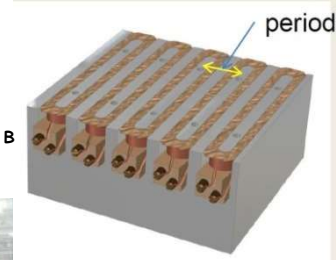
Параметры	Ондуляторы 1-1 и 1-2
Номинальное магнитное поле, Тл	1.25
Период вигглера, мм	15.6
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Число периодов	128
Магнитная длина, мм	~2000
Длина между фланцами	~2700
Ток в обмотке, А	~440
Мощность излучения ($B=1.25$ 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	$K \sim 1.89$



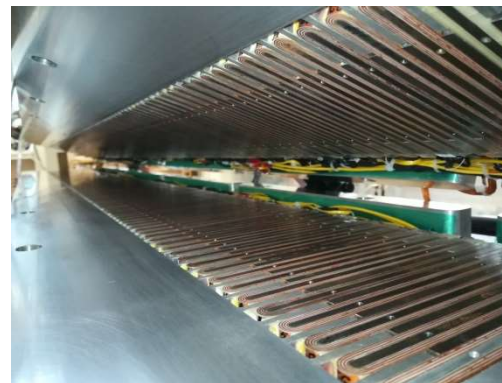
Сверхпроводящий ондулятор установлен в криостат косвенного охлаждения



Конструкция ондулятора с нейтральными и активными полюсами



Внешний вид криостата ондулятора в процессе магнитных измерений



Сверхпроводящие катушки установлены в магнит ондулятора

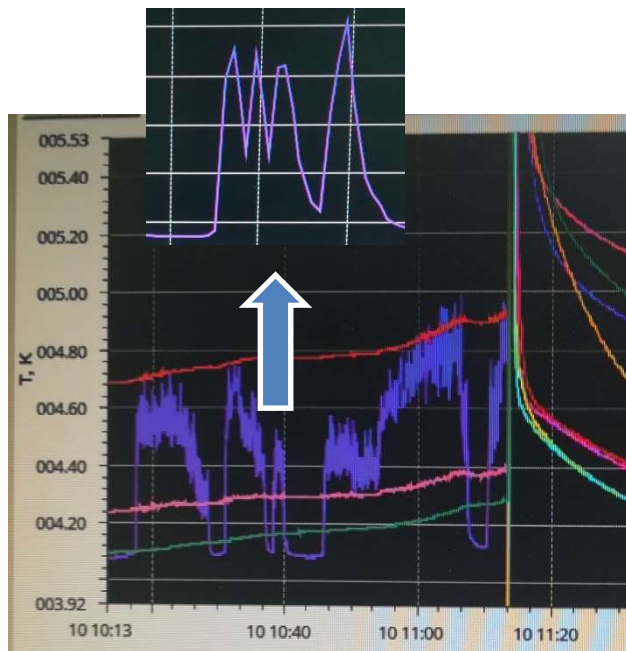


Магнитная система сверхпроводящего ондулятора в сборе

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 периодических скачков из сверхпроводящего в несверхпроводящее состояние.
- ❑ Предложенное решение - дополнительное принудительное **охлаждение контактов** тепловым перехватом.

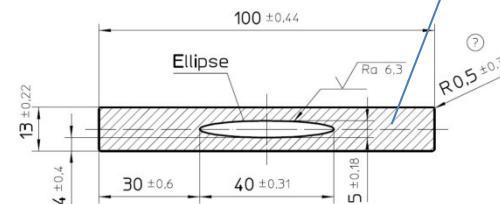


Эффект «пульсации температуры» на контактах между катушками

- ❑ Решение для СКИФ: **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**, изготовленную методом экструзии (была комбинированная экструдированный алюминий и медные вставки).

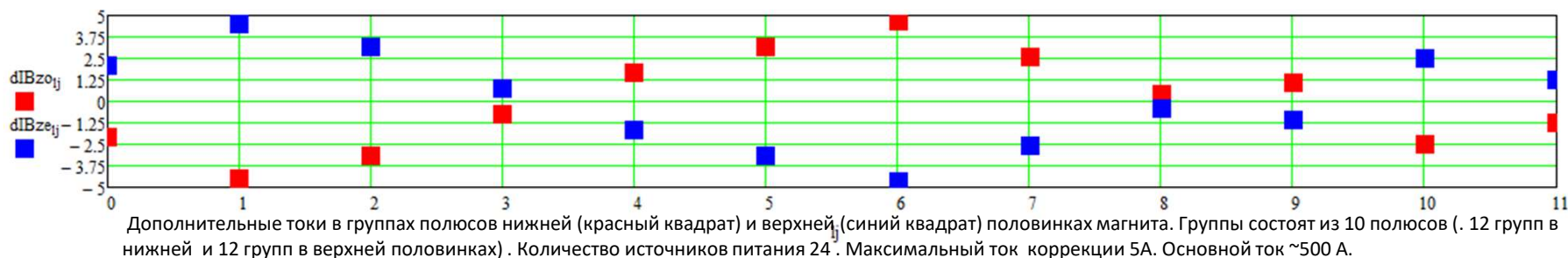


Конструкция вакуумной камеры пучка

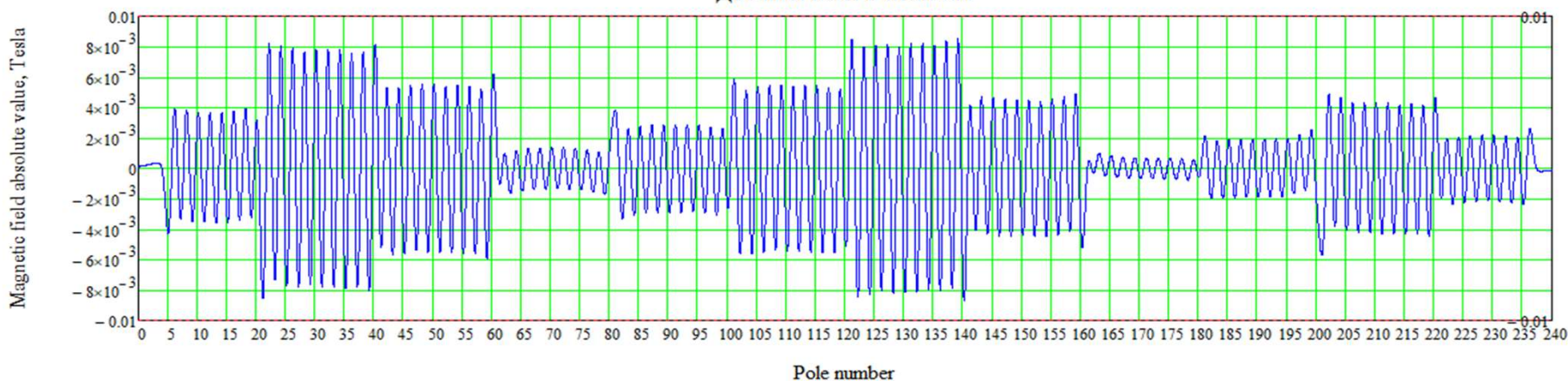


Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

- ❑ Попытки по улучшению технологии намотки катушек не дали результата. **Фазовая ошибка** $> 3^\circ$ (на основе магнитных измерений датчиком Холла);
- ❑ Использование **корректирующих токов** (~ 24 участка из 10 полюсов каждый) - 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. Было показано, что одновременно увеличивая или уменьшая токи в расположенных друг напротив друга группах полюсов удаётся выравнивать уровень магнитного поля вдоль всего ондулятора.
- ❑ **Коррекция орбиты** электронного пучка с помощью тех же групп полюсов, то теперь уже дополнительные токи создавали поля направленные в одну сторону таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение орбиты на каждом полюсе.

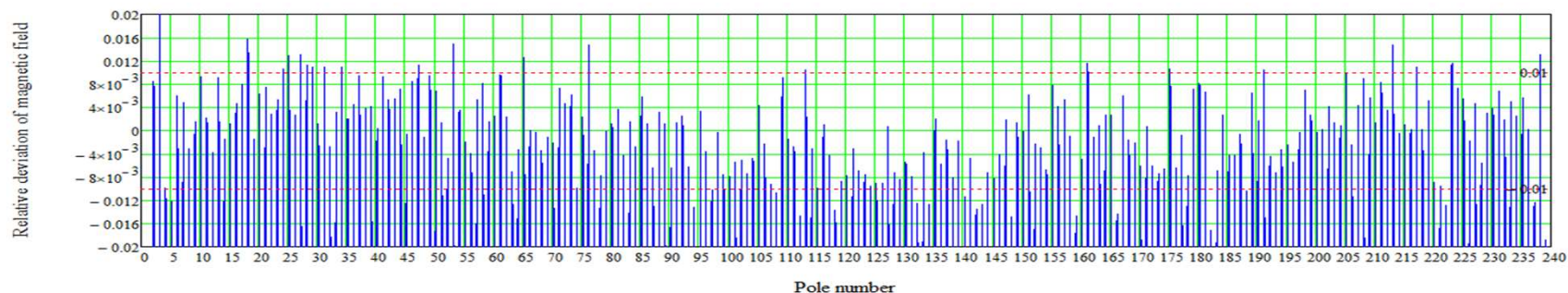


Добавки поля в полюсах



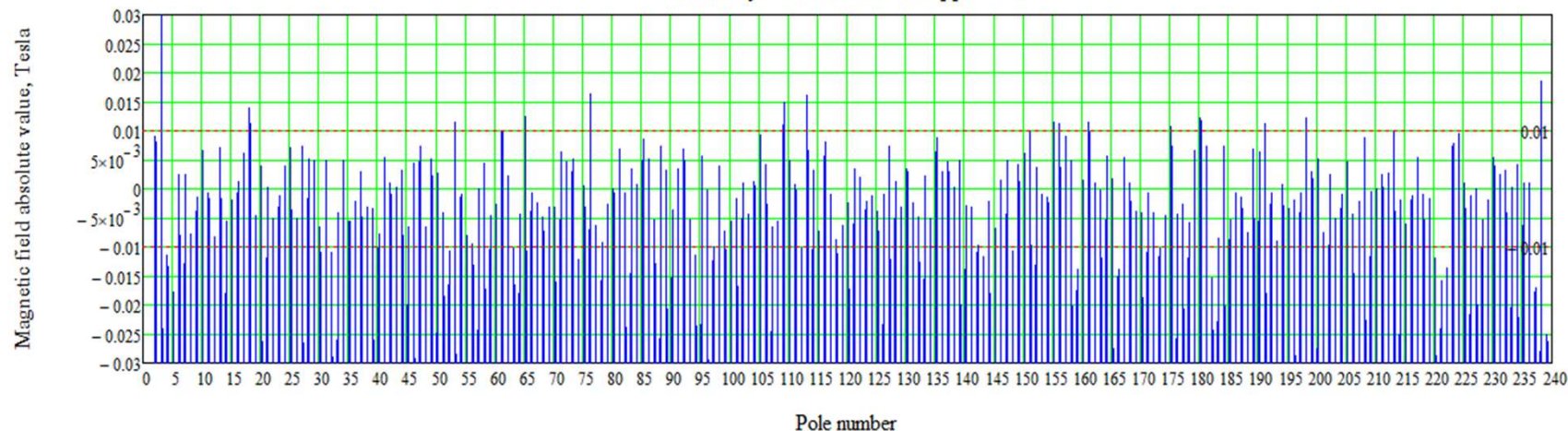
Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

- ❑ Стратегия подбора корректирующих токов:
- ❑ **Коррекция величины поля** вдоль всего ондулятора. Было показано, что одновременно изменяя токи так, чтобы поля в расположенных друг напротив друга группах полюсов увеличивались или уменьшались навстречу друг другу, выравнивается общий уровень магнитного поля вдоль всего ондулятора.
- ❑ **Коррекция орбиты** электронного пучка с помощью тех же групп полюсов, но теперь дополнительные токи создают поля направленные в одну и ту же сторону таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение орбиты на каждом полюсе.



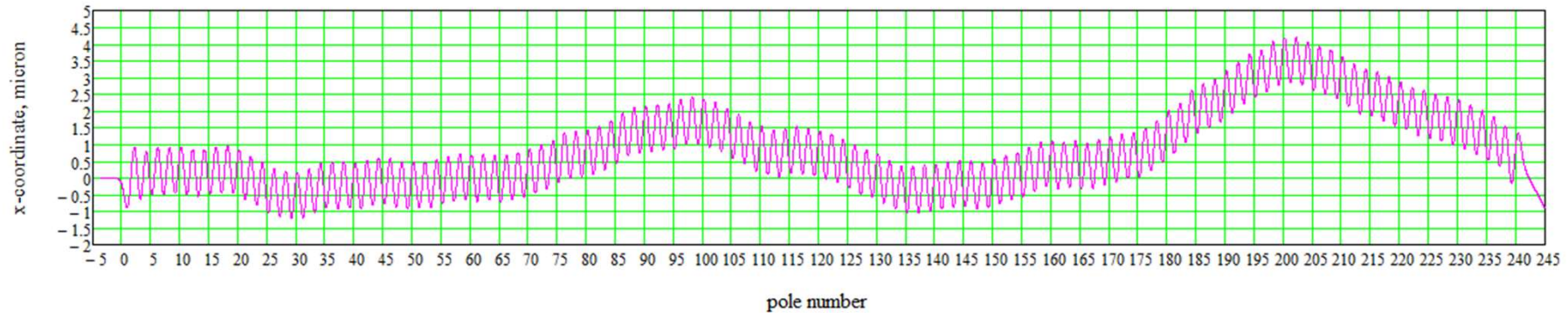
Относительное изменение модулей поля на каждом полюсе вдоль ондулятора до и после **коррекции величины поля**

Максимумы поля после коррекции

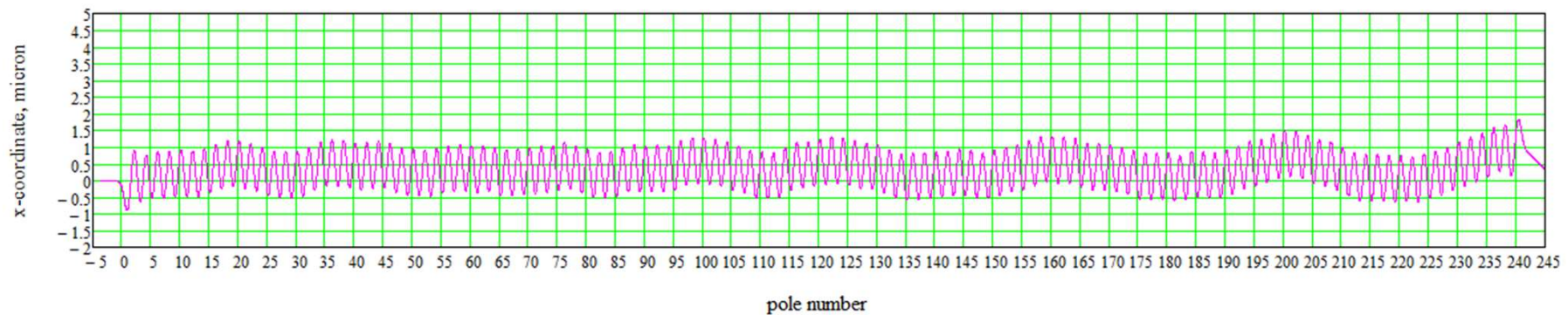


Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

- **Коррекция орбиты** электронного пучка с помощью тех же групп полюсов, но теперь дополнительные токи создают поля направленные в одну и ту же сторону таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение орбиты на каждом полюсе.

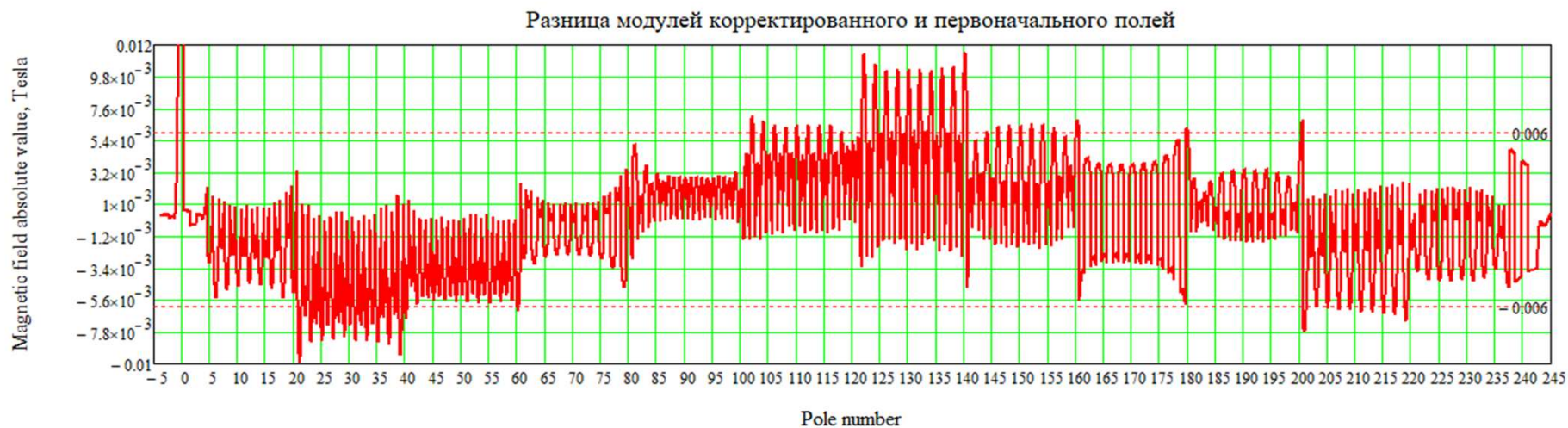


Орбита в магнитном поле ондулятора после коррекции только величины поля для $E=3\text{ГэВ}$ (отклонение $\sim 5\text{ мкм}$)

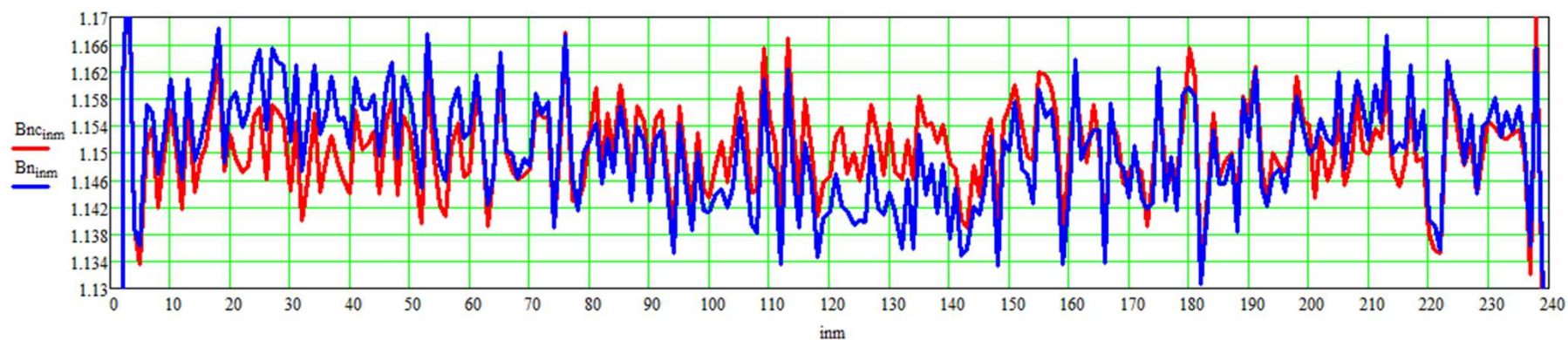


Орбита в магнитном поле ондулятора после **коррекции поля** и **коррекции орбиты**. Для коррекции орбиты используются те же группы полюсов, что и для выравнивания поля. Отличие состоит в том, что создаются добавки поля направленные в одну и ту же сторону таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение орбиты на каждом полюсе (отклонение $\sim 1\text{ мкм}$).

Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

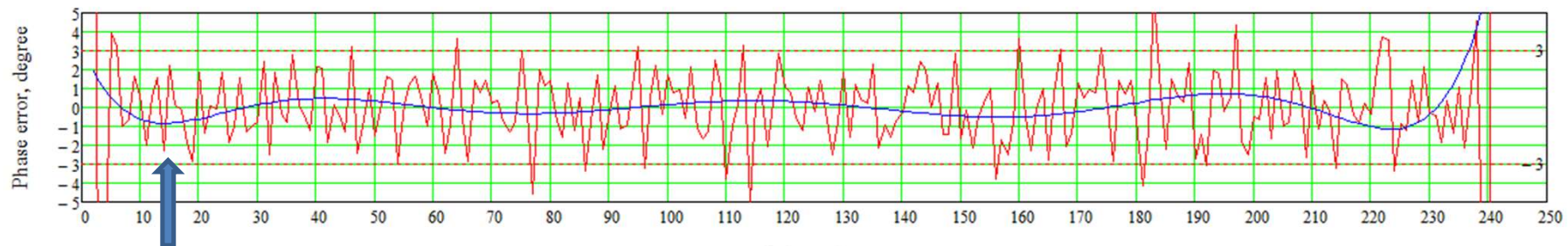
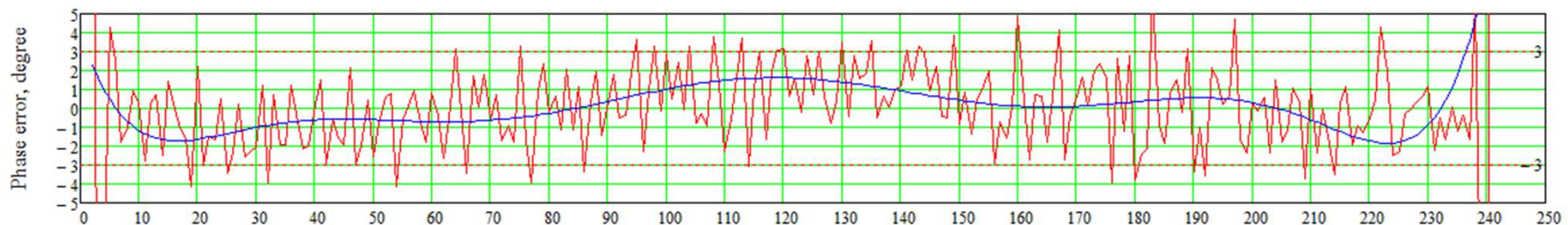


Результирующие добавки поля после коррекции величины поля и орбиты пучка $E=3\text{ГэВ}$



Отличие модулей максимумов поля на всех полюсах до коррекций (синяя кривая) и после всех коррекций (красная кривая)

Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

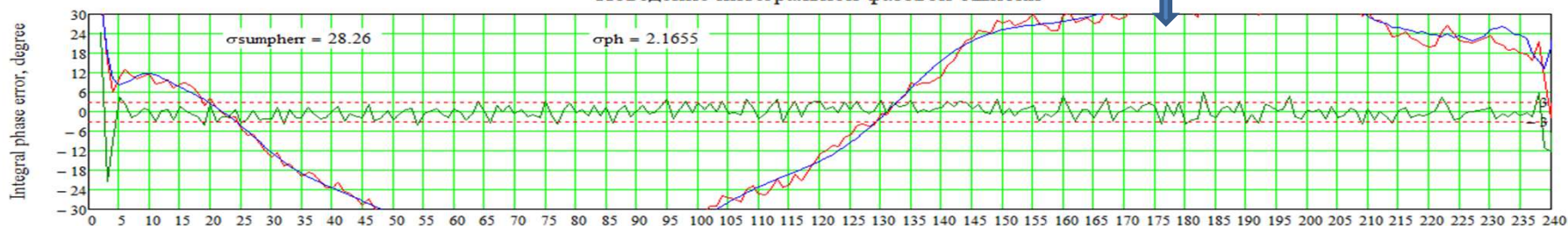


Поведение локальной фазовой ошибки до и после всех коррекций поля

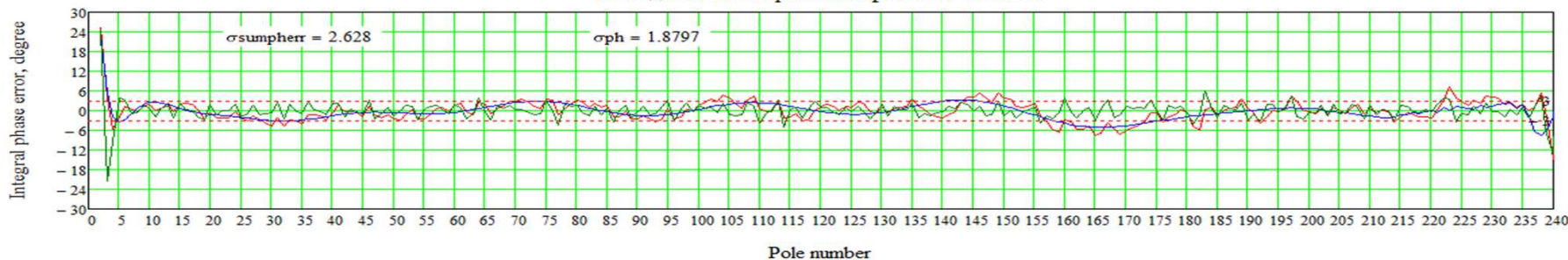
Pole number

Поведение интегральной фазовой ошибки до и после всех коррекций поля

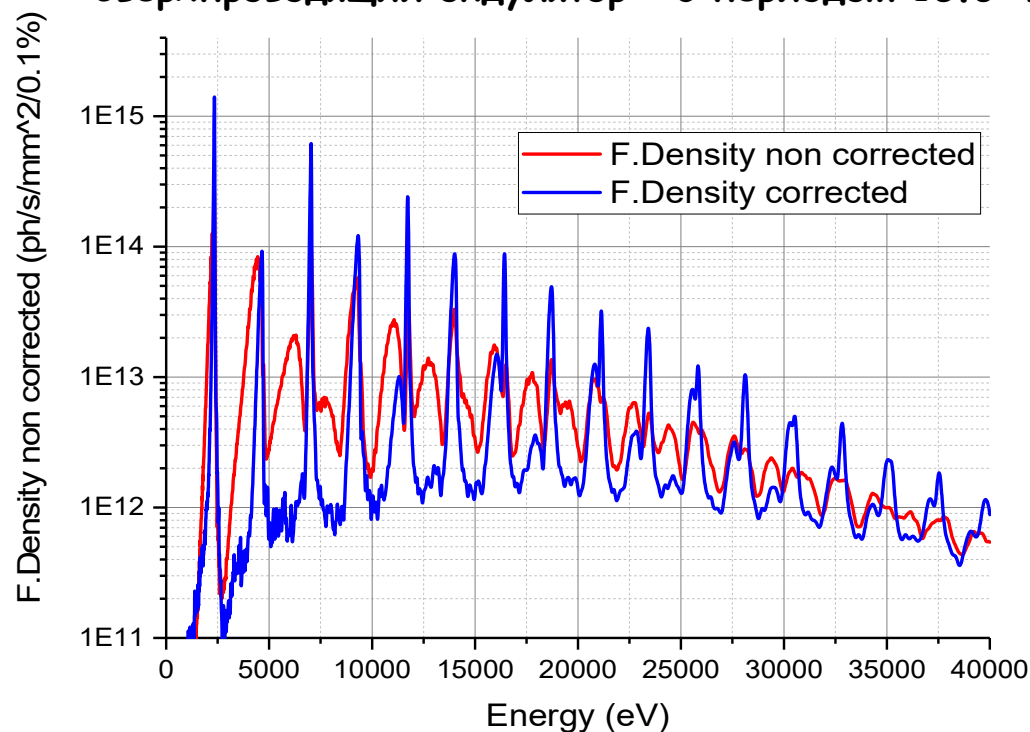
Поведение интегральной фазовой ошибки



Поведение интегральной фазовой ошибки

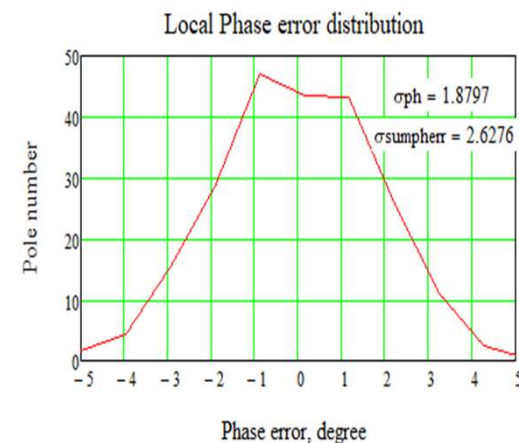


Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл

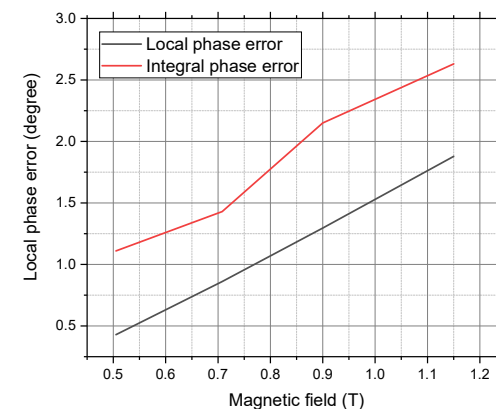


Спектр сверхпроводящего ондулятора с включённой коррекцией фазовой ошибки

- ❑ 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 (~ 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



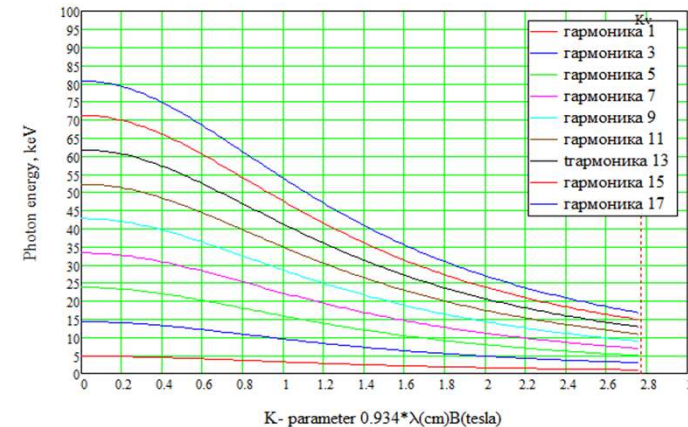
Зависимость локальной и интегральной фазовой ошибки для рабочего диапазона магнитных полей ондулятора

Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

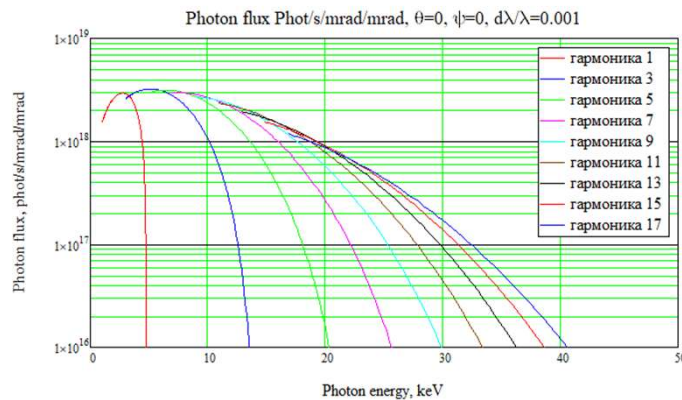
Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 18 мм и полем 1.6 Тл для Станции 1-4 «EXAFS-спектроскопия»

- Конструкция требует полностью новых чертежей и новых технологических приспособления и т. д.
- Поэтому запуск этого ондулятора - в последнюю очередь (декабрь 2023)

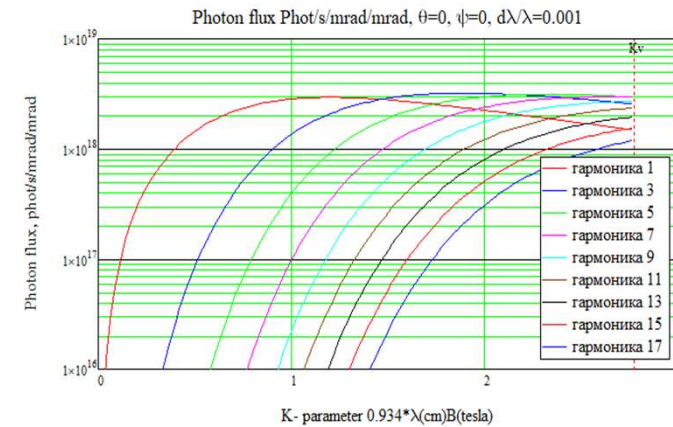
Параметры	
Номинальное магнитное поле, Тл	1.6
Период вигглера, мм	18
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	40
Число периодов	111
Магнитная длина, мм	~2000
Длина между фланцами	~2700
Ток в обмотке, А	~440
Мощность излучения ($B=1.25$ Т, $I=0.4$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

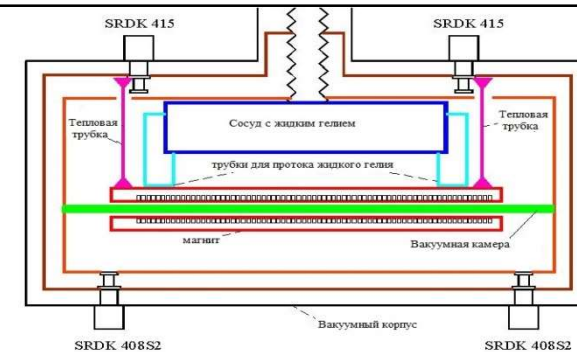


Сверхпроводящие вставные устройства для СКИФ

Криогенная система сверхпроводящих вставных устройств

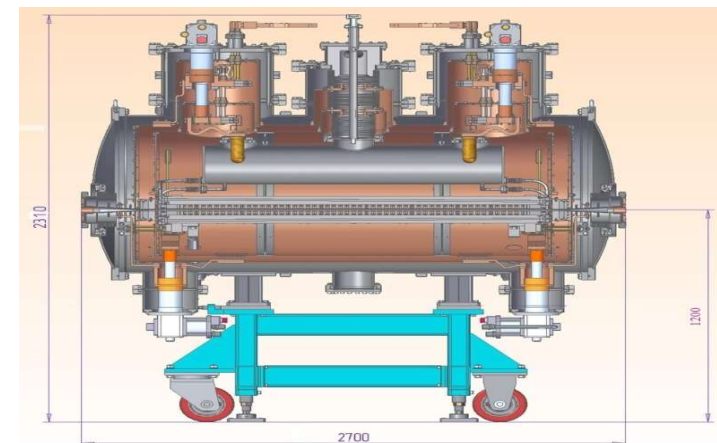
- ❑ Криостат с косвенным охлаждением, расход гелия нулевой. Охлаждение жидким гелием, циркулирующим по каналам внутри магнита. Гелий охлаждается в сосуде вне магнита.
- ❑ Предварительное охлаждение от 60К ступени через азотные тепловые трубки сифонного типа. Тепловой мост размыкается после 64 К (замерзание азота).
- ❑ Остаточное давление в гелиевом сосуде 0.5 бар, температура магнита ~ 3.5 К.
- ❑ Все 5 криостатов одинаковые.

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 с косвенным охлаждением

Спасибо за внимание!

