

Сверхпроводящие ондуляторы: статус и перспективы

Шкаруба В.А.



Действующие контракты Лаб.8-2 по сверхпроводящим вставным устройствам:

| | Источник СИ | Параметры | Срок сдачи | Стоимость, млн.руб. |
|---|-----------------|------------------------------------------|--------------|---------------------|
| 1 | DELTA, Germany | Вигглер, В=7 Тл, Период = 127 мм | Октябрь 2020 | 72 |
| 2 | DLS, UK | Ондулятор, В=1.2 Тл, Период = 15.6 мм | Июнь 2021 | 68 |
| 3 | AS, Australia | Вигглер, В=4.5 Тл, Период = 48 мм | Декабрь 2021 | 90 |
| 4 | SOLARIS, Poland | Вигглер, В=4 Тл, Период = 48 мм | Февраль 2022 | 84 |

Действующие контракты Лаб.8-2:

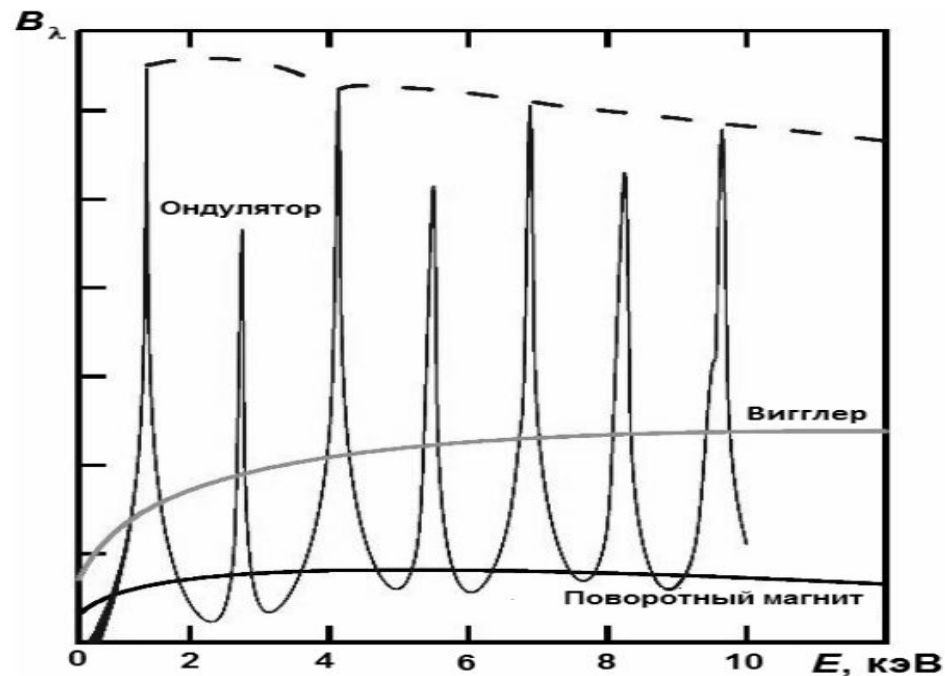
| | Место назначение | Название | Срок сдачи | Стоимость |
|---|------------------|------------------------|------------|---------------|
| 1 | FAIR, Дармштадт | Магнит СВМ | 2024 | ~ 5 млн. Евро |
| 2 | ЦЕРН | Система вывода энергии | 2020 | 20 млн.руб |
| | | | | |

Сверхпроводящие ондуляторы

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

Запланированные сверхпроводящие вставные устройства для источника СКИФ:

| Вид вставного устройства | I очередь | II очередь | Итого: |
|-----------------------------|-----------|------------|--------|
| Вигглер (4Тл, 35 мм) | 2 | 2 | 4 |
| Ондулятор (1.2 Тл, 15.6 мм) | 3 | 6 | 9 |

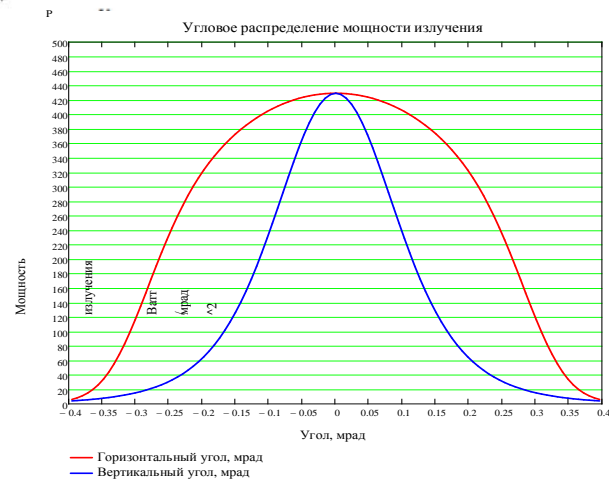
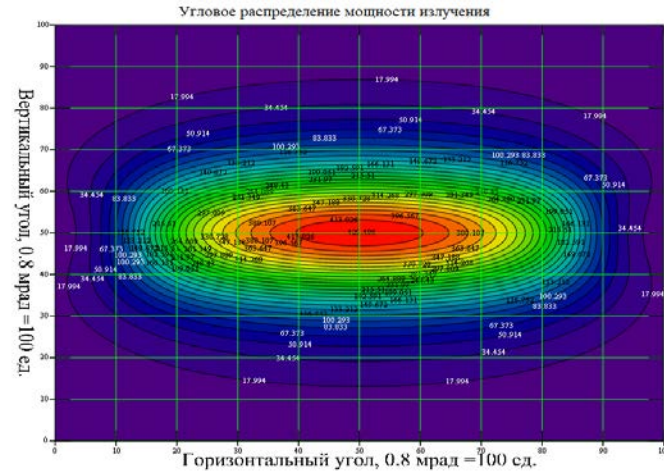


Сверхпроводящие ондуляторы

Сверхпроводящий ондулятор для источника СИ DLS, UK:

Параметры СП Ондулятора:

| | |
|---------------------------------------------------|--------------|
| Номинальное магнитное поле, Тл | 1.2 |
| Период вигглера, мм | 15.6 |
| Вертикальная апертура для пучка, мм | 6 |
| Горизонтальная апертура для пучка, мм | 60 мм |
| Межполюсный зазор, мм | 8 |
| Число периодов | 119 |
| Магнитная длина, мм | ~1997 |
| Длина магнита, мм | ~2170 |
| Длина между фланцами | ~2840 |
| Высота от пола, мм | 2146 |
| Ток в обмотке, А | 500 |
| Мощность излучения (B=4 Т, I=0.4 А, E=3 GeV), кВт | 7.18 |
| Горизонтальный угол излучения, мрад | ± 0.4 |



Угловое распределение мощности излучения

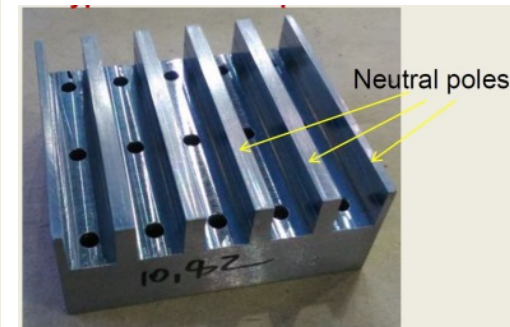
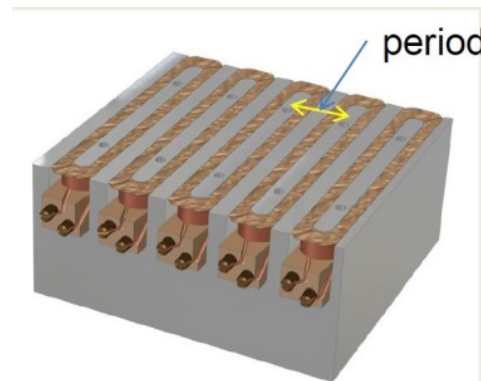
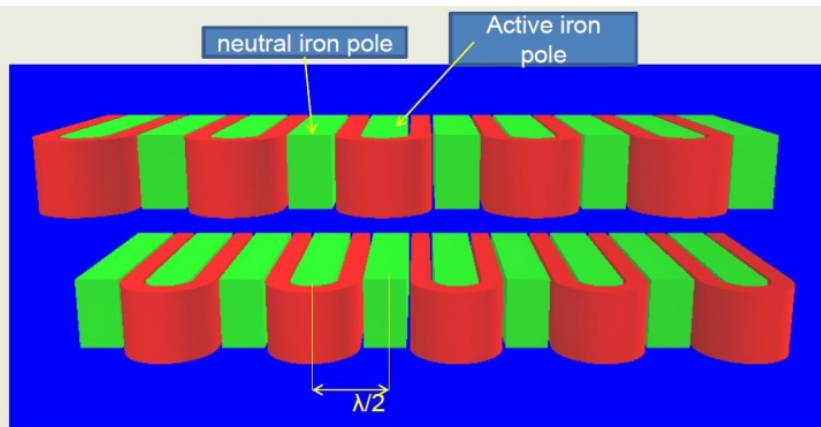
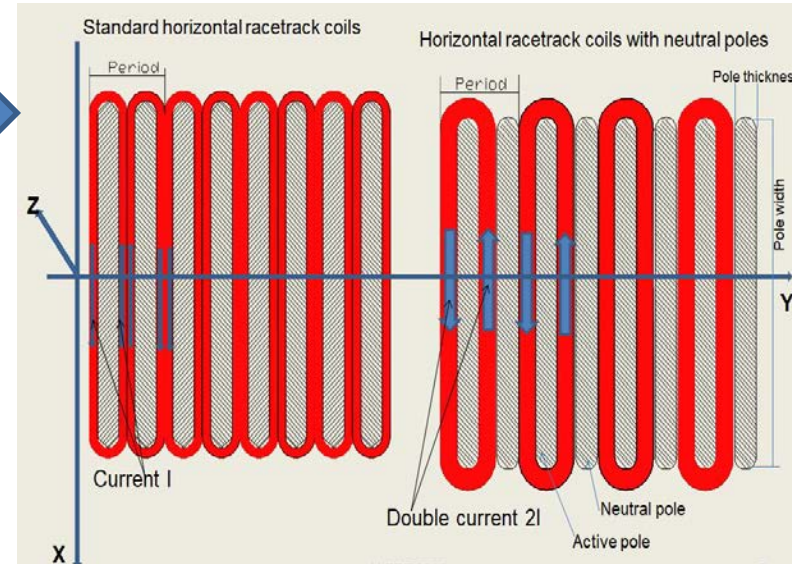
Сверхпроводящие ондуляторы

Сверхпроводящий ондулятор с нейтральными полюсами

Чередующиеся нейтральные и активные полюса (две соседних обмотки с со-направленными токами объединены в одну толстую обмотку и замкнуты поочередно на одну либо на другую сторону)

Преимущества структуры с нейтральными полюсами:

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

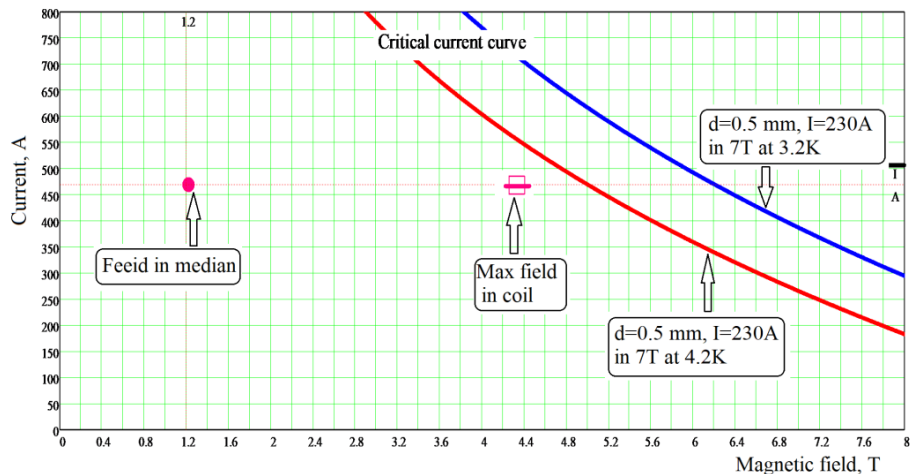


Сверхпроводящие ондуляторы

Магнитная система сверхпроводящего ондулятора

Основные параметры магнитной системы:

| | |
|---------------------|-------|
| Магнитное поле, Тл | 1.2 |
| Период, мм | 15.6 |
| Магнитный зазор, мм | 8 |
| Число периодов | 119 |
| Магнитная длина, мм | ~2000 |
| Ток, А | 450 |
| Диаметр провода, мм | 0.55 |
| Число витков в слое | 12/11 |
| Число слоёв | 7 |
| Ширина обмотки, мм | 146 |
| Крит. ток 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

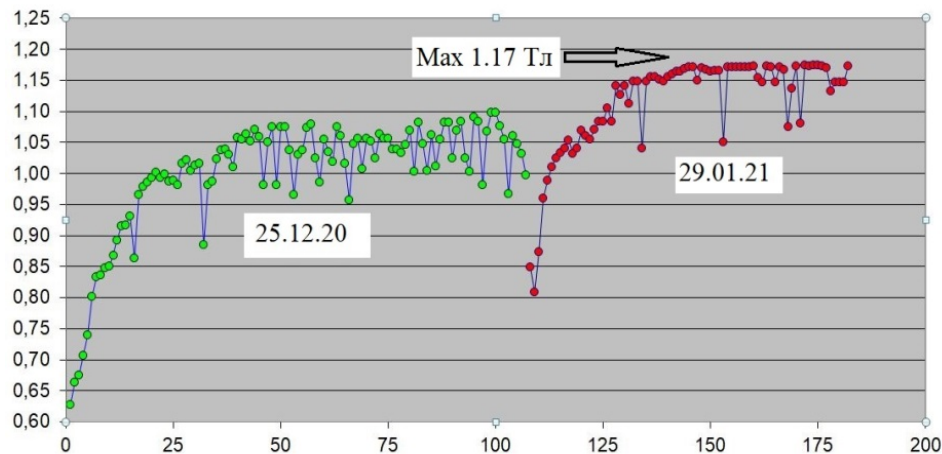
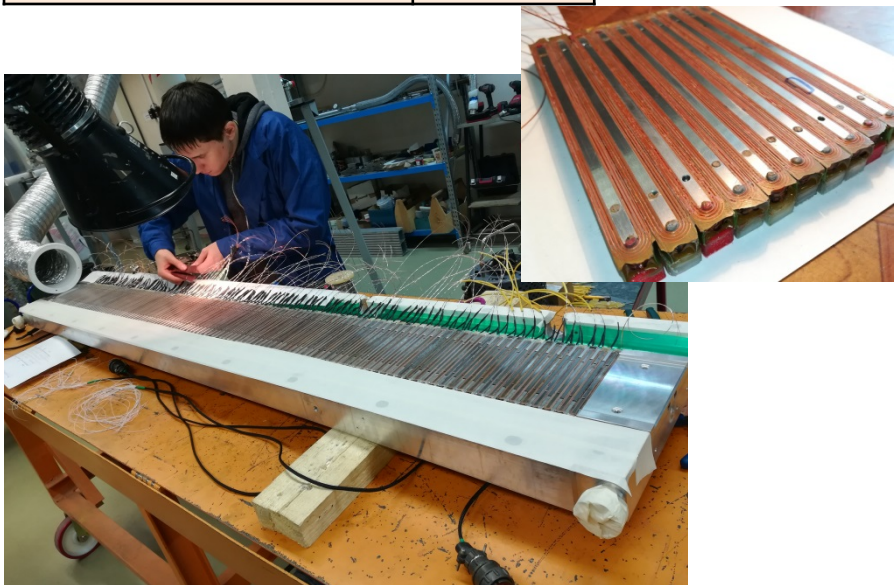


График тренировки 119-периодного ондулятора в жидком гелии

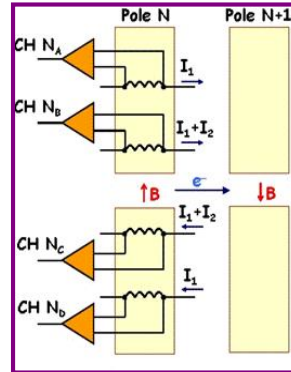


Сверхпроводящие ондуляторы

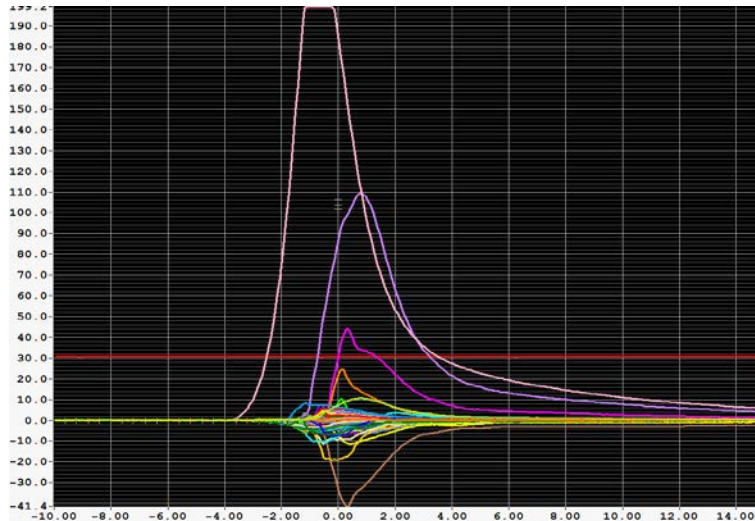
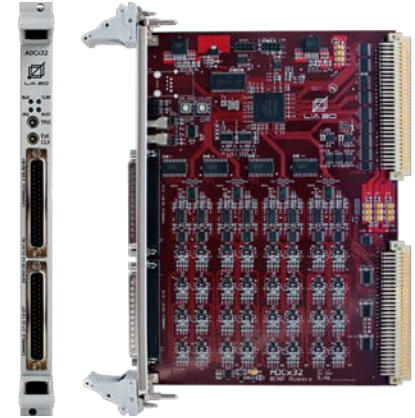
Новые цифровые многоканальные осциллографы для регистрации напряжений на сверхпроводящих обмотках при срыве сверхпроводимости (А.М.Батраков и Ко)

Параметры системы регистрации срывов

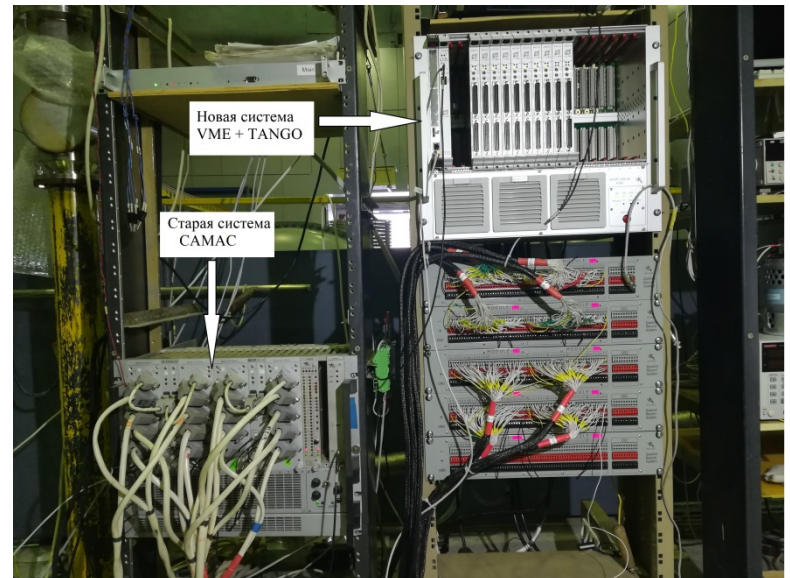
Применяемые модули **ADCx32 + ADCx32 RIO**
Количество каналов - **$32 \cdot 10 = 320$**
Входной диапазон - **± 200 В**
Синфазный сигнал - **до ± 350 В**
Защита **до ± 600 В**
Разрядность АЦП - **12 бит**
Быстродействие - **от 8 мкс/канал до 1 мс/канал**
Память - **520 кслов/канал**
Формфактор модулей - **6U VME BINP**



Способ съёма сигналов с обмоток полюсов



Напряжения на обмотках ондулятора при срыве сверхпроводимости, измеренные новыми блоками цифровых многоканальных осциллографов в стандарте VME под управлением TANGO (разработка А.М.Батраков и Ко)

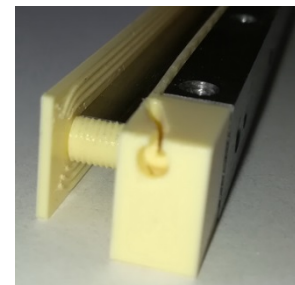
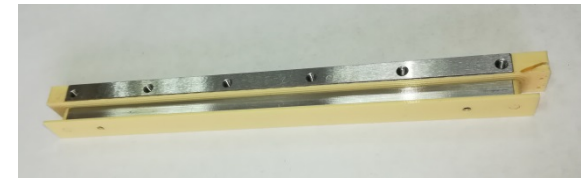
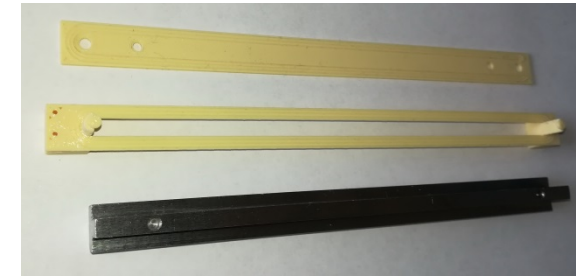
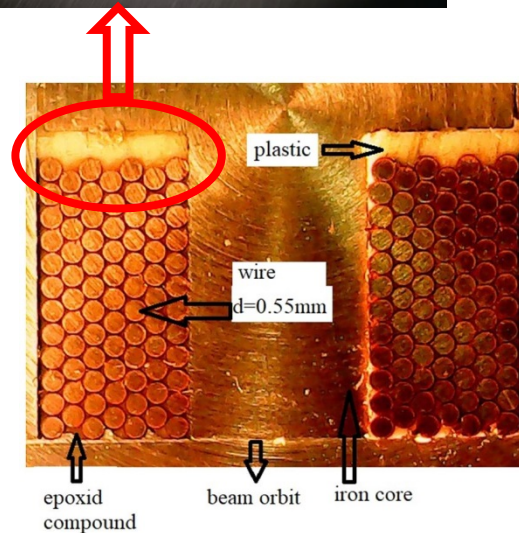
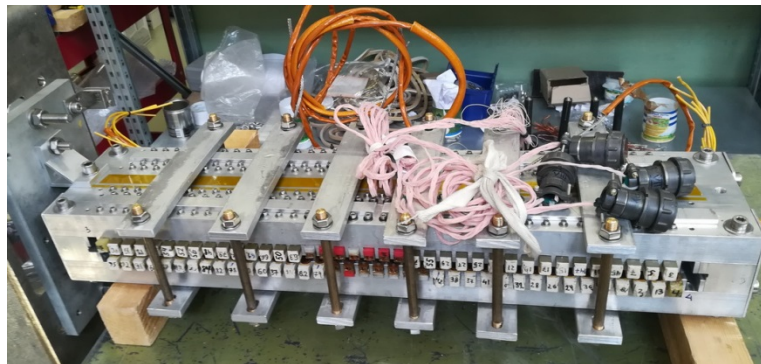
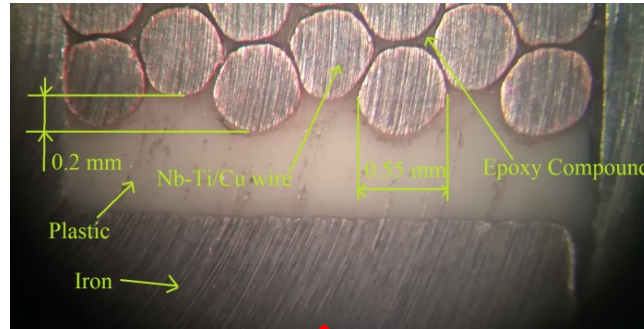
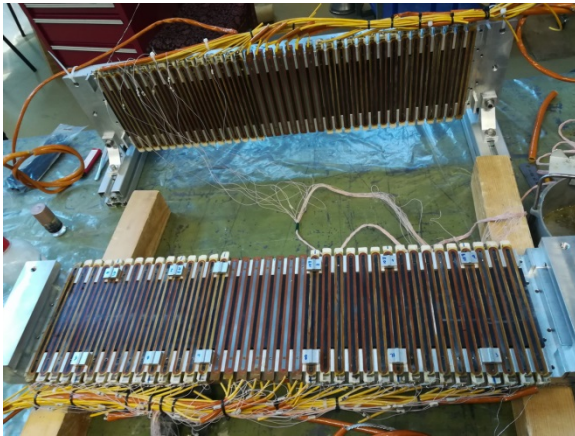


Сверхпроводящие ондуляторы

Минимизация фазовой ошибки сверхпроводящего ондулятора:

Отработка технологии изготовления обмоток:

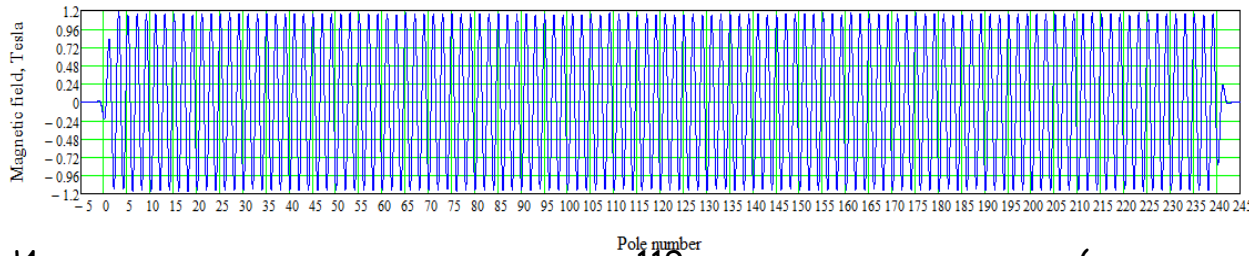
- Требование на точность изготовления **10-20 мкм** (в том числе для положения витков внутри обмотки) для фазовой ошибки $<3^\circ$;
- Использование 3-D принтера для изготовления пластиковых деталей;



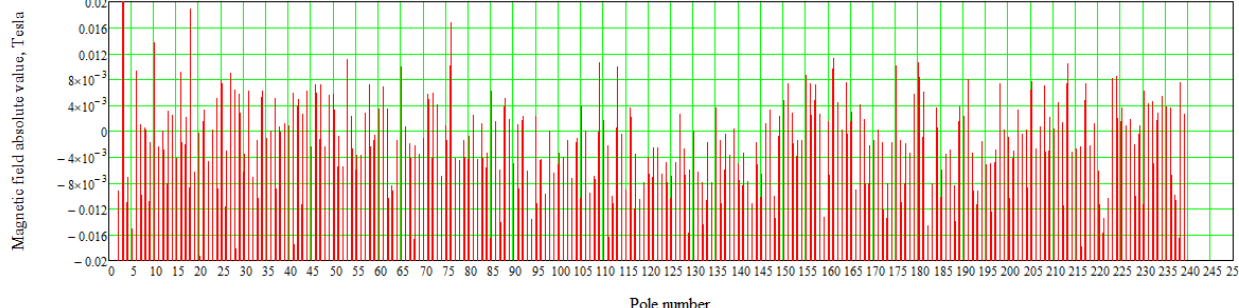
Сверхпроводящие ондуляторы

Минимизация фазовой ошибки сверхпроводящего ондулятора:

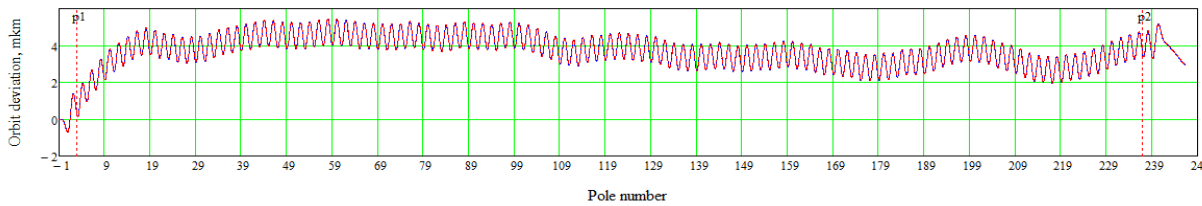
- ❑ Фазовая ошибка с катушками без коррекции $\sim 3^\circ$
- ❑ Использование дополнительных локальных корректирующих токов ~ 5 А ($\sim 1\%$ от основного тока 500 А). Типичное отличие поля между полюсами также $\sim 1\%$;
- ❑ Использование 1 корректирующего источника на группу из ~ 20 катушек достаточно для снижения фазовой ошибки до $\sim 2^\circ$;



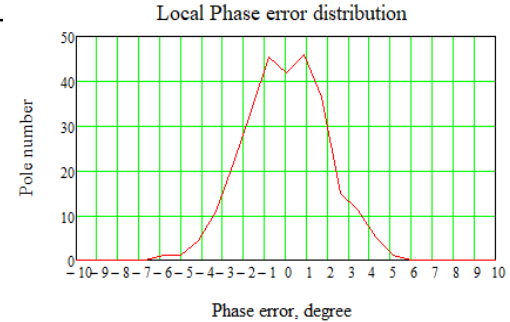
Измеренное магнитное поле вдоль оси 119-периодного ондулятора (с коррекцией)



Магнитное поле (модуль, увеличенный масштаб) вдоль оси 119-периодного ондулятора



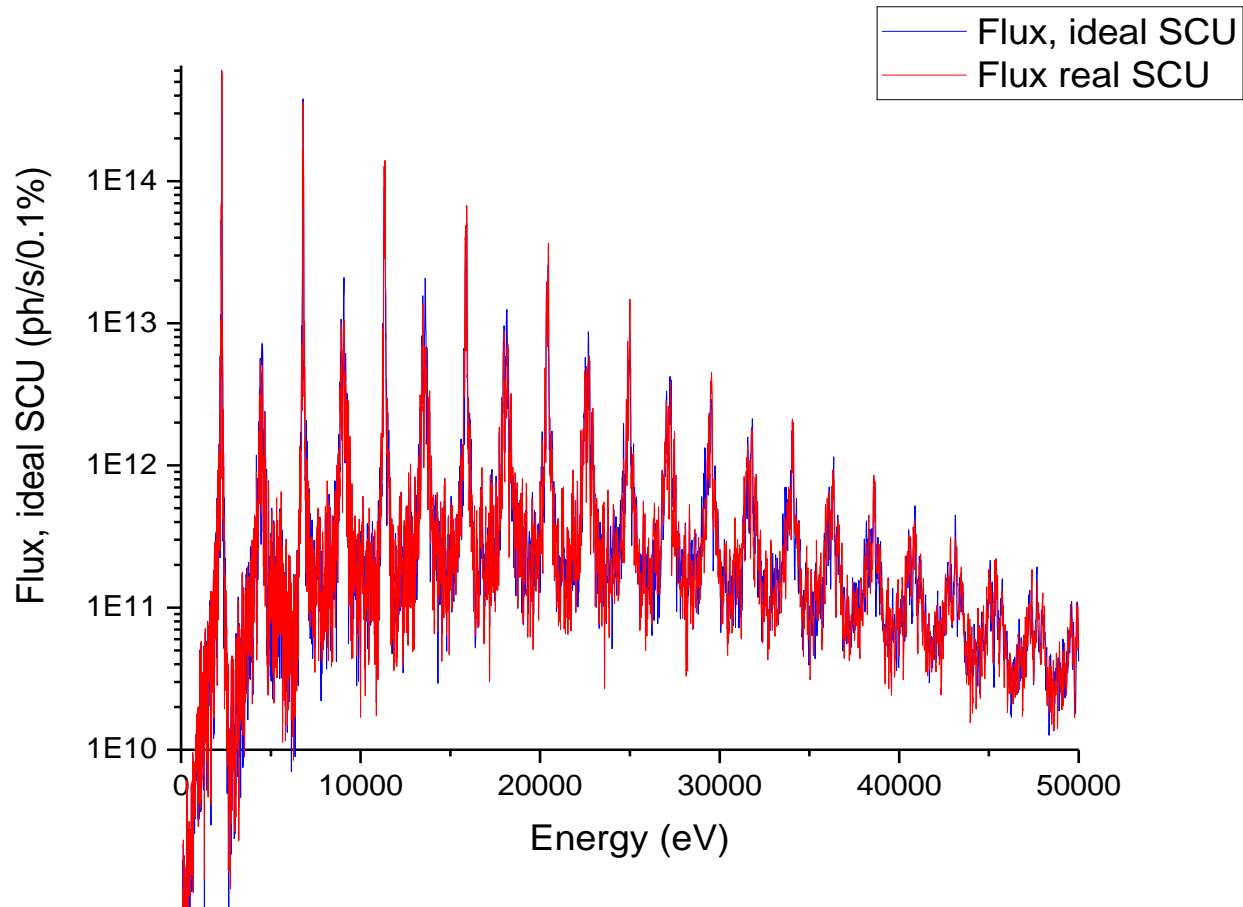
Траектория пучка вдоль оси 119-периодного ондулятора



Сверхпроводящие ондуляторы

Минимизация фазовой ошибки сверхпроводящего ондулятора:

- Спектр излучения ондулятора DLS (по результатам магнитных измерений датчиком Холла в жидком гелии, январь 2021). Расчёт в программе SPECTRA.



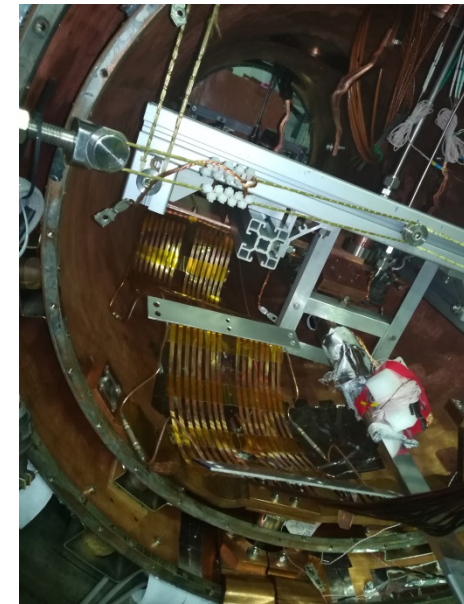
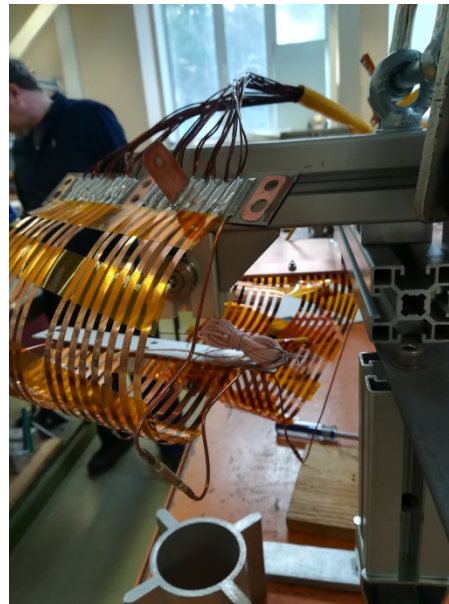
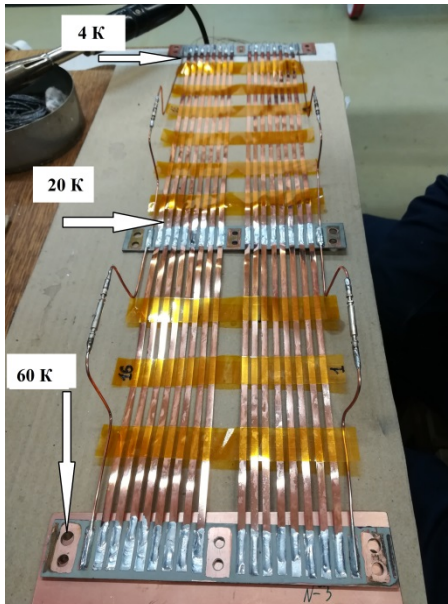
Сверхпроводящие ондуляторы

Минимизация фазовой ошибки сверхпроводящего ондулятора: Ввод корректирующих токов в обмотки ондулятора

- ❑ Проблема: Как ввести дополнительные токи в сухой криостат?
- ❑ Предложено: Использовать ВТСП провода с последовательным перехватом тепла на ступени криокулеров 60К, 20К и 4 К.
- ❑ Основная тепловая нагрузка на наружную ступень 60К через медные провода оптимального сечения.
- ❑ Система ввода токов успешно протестирована.



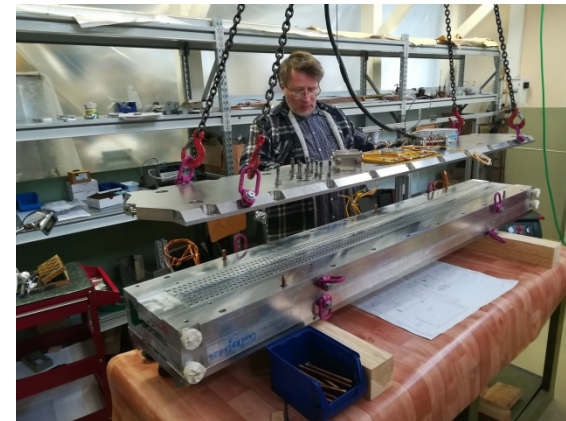
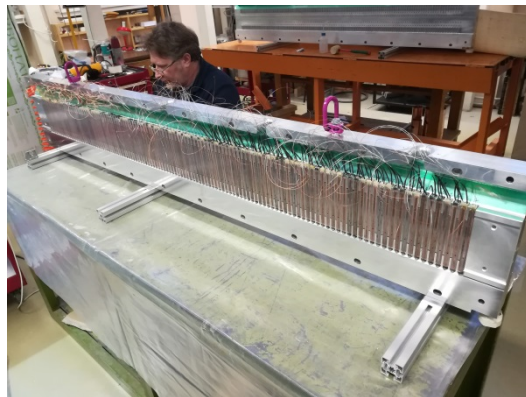
ВТСП провод (I_{max} 100 А)



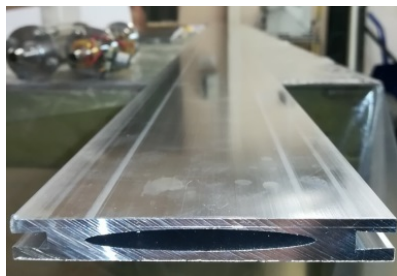
Система ввода корректирующих токов в ондулятор в «сухом» криостате

Сверхпроводящие ондуляторы

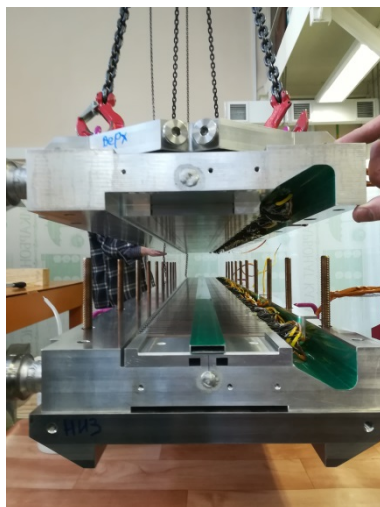
Сборка сверхпроводящего ондулятора для DLS:



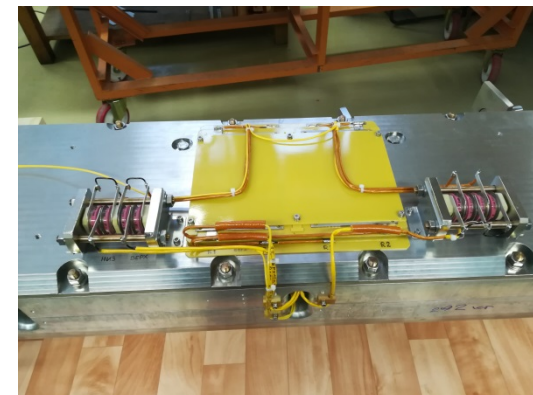
Этапы сборки полноразмерного сверхпроводящего ондулятора.



AL 6063 вакуумная камера



Испытание в криостате с жидким гелием



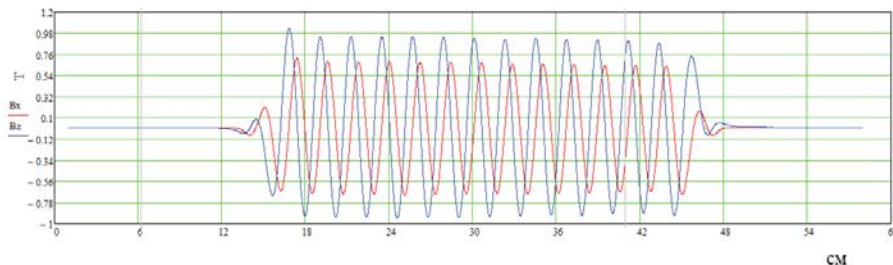
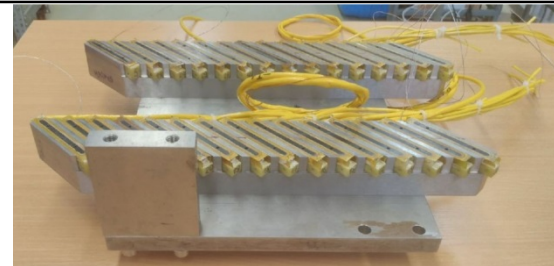
Система защиты обмотки при квенче

Сверхпроводящие ондуляторы. Перспективные разработки.

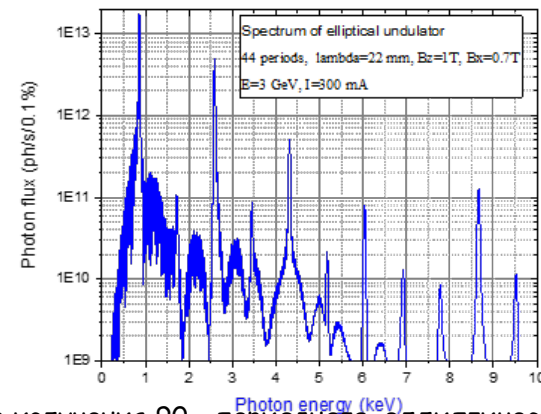
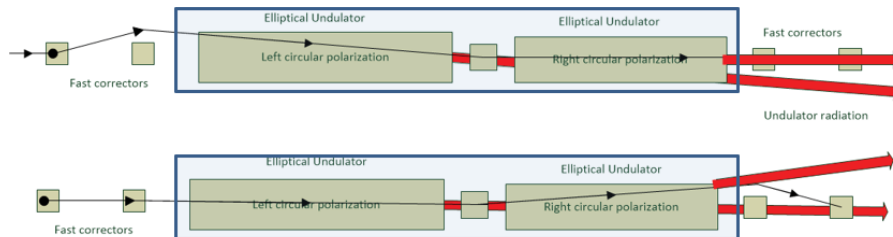
Короткий прототип сверхпроводящего эллиптического ондулятора:

- Предложена и реализована на коротком прототипе конструкция эллиптического ондулятора на основе обмоток периодом с 15.6 мм, расположенных сверху и снизу перпендикулярно между собой и под углом 45 градусов к оси ондулятора.
- Изготовлен короткий прототип с периодом 22 мм и соотношением компонент магнитного поля 1/0.7 Тл
- Продемонстрирована работоспособность и проведены магнитные измерения в жидком гелии

| Параметры эллиптического ондулятора | |
|------------------------------------------|------|
| Вертикальное магнитное поле B_z , Тл | 1 |
| Горизонтальное магнитное поле B_x , Тл | 0.7 |
| Период, мм | 22 |
| Верт/гор апертура для пучка, мм | 6/60 |
| Магнитный зазор, мм | 8 |



Измеренное магнитное поле B_z/B_x 12 - периодного прототипа эллиптического ондулятора



Спектр излучения 90 - периодного эллиптического ондулятора

Предложена схема двух последовательных эллиптических ондуляторов с быстрым переключением поляризации корректором. Можно использовать для изучения магнитного дихроизма

[1] P.Kanonik, S.Shrushev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A.Volkov, A.Zorin, A.Erokhin, A.Bragin. Superconducting elliptical undulator. AIP Conference Proceedings 2299, 020013 (2020).

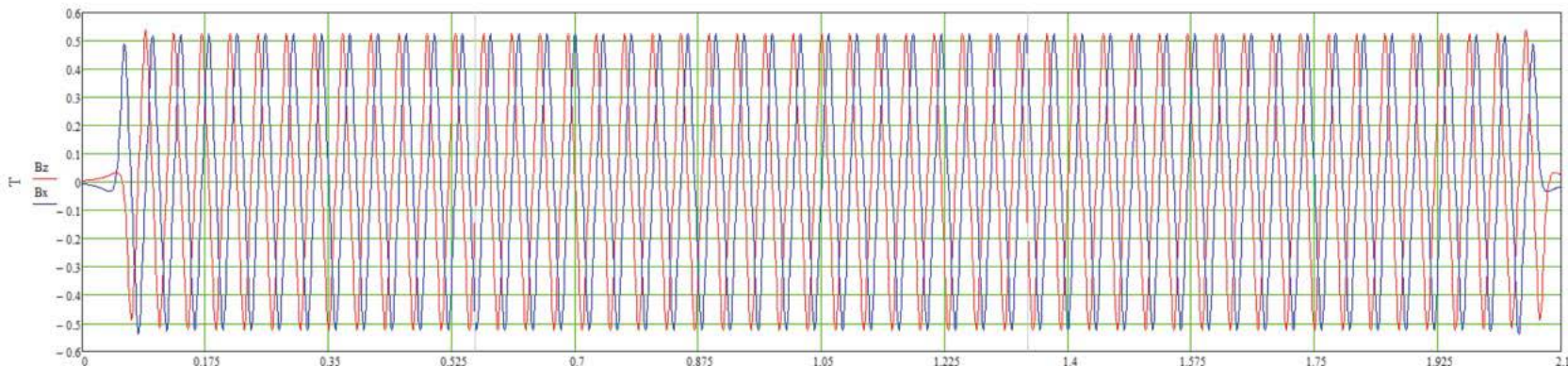
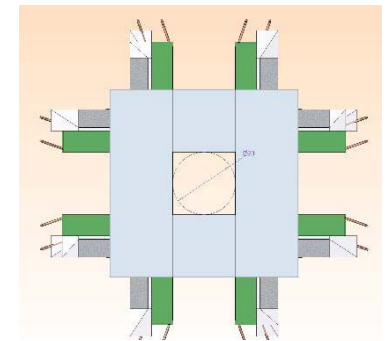
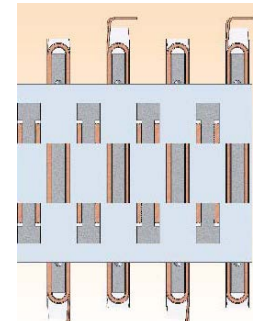
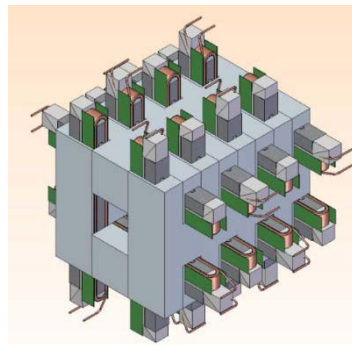


Сверхпроводящие ондуляторы. Перспективные разработки.

Сверхпроводящий ондулятор изменяемой поляризацией:

- Предложена конструкция сверхпроводящего ондулятора с изменяемой поляризацией, представляющая собой два планарных ондулятора с периодом 15.6 мм, повернутых между собой на 90 градусов и вставленных друг в друга.
- Запитываются независимыми токами, что позволяет создавать либо эллиптический ондулятор с различным соотношением компонент магнитного поля, либо планарные ондуляторы с линейной поляризацией излучения по вертикали и по горизонтали

| Параметры | Значения |
|---------------------------------------------|-------------|
| Номинальное вертикальное. поле B_z , Тл | -0.5 - +0.5 |
| Номинальное горизонтальное. поле B_x , Тл | -0.5 - +0.5 |
| Период, мм | 40 |
| Фазовая ошибка, град | < 3 |
| Вертикальная/горизонтальная апертура | 16/16 |
| Межполюсной зазор, мм | 20 |
| Число периодов | 50 |
| Магнитная длина, мм | 2200 |
| Длина от фланца до фланца, мм | 2840 |



Распределение магнитного поля B_z/B_x на 50 - периодном спиральном ондуляторе

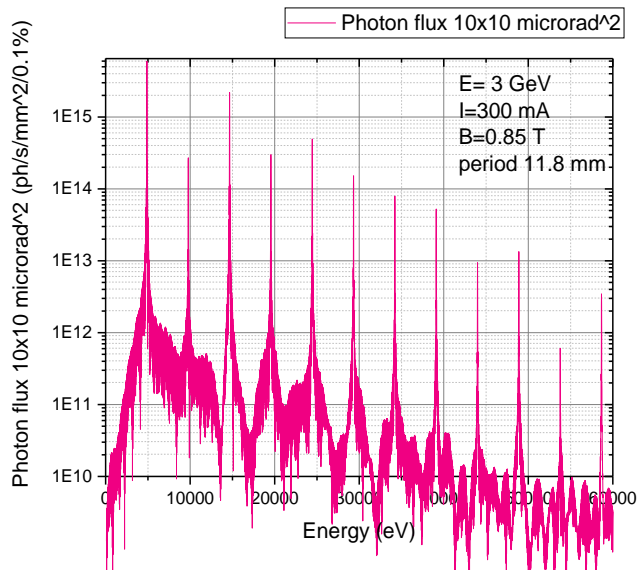
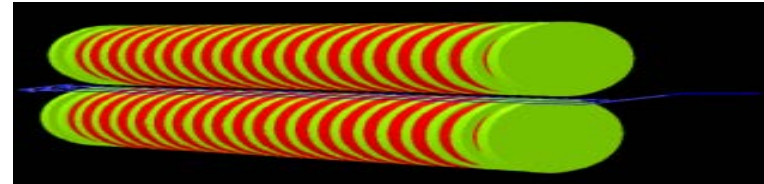
[1] P.Kanonik, S.Khrushev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A.Volkov, A.Zorin, A.Erokhin, A.Bragin. Superconducting undulator with variable configuration of magnetic field. AIP Conference Proceedings 2299, 020014 (2020).

Сверхпроводящие ондуляторы. Перспективные разработки.

Сверхпроводящий короткопериодный ондулятор с вертикальным рэйстреком:

- Предложена конструкция короткопериодного ондулятора по классической схеме вертикального рейстрека.
- Период 11.8 мм и поле 0.8 Тл. Число полюсов на 2 м ~160.

| Параметры | |
|-----------------------------|------|
| Период, мм | 11.8 |
| Полная длина, м | ~2 |
| Число периодов | 160 |
| Магнитное поле | |
| - межполюсный зазор 7 мм, Т | 0.8 |
| - межполюсный зазор 6 мм, Т | 0.85 |
| Фазовая ошибка, град | <3 |
| сп провод, диаметр мм | 0.56 |



Публикации Лаб. 8-2 за 2020 год:

1. В.А.Шкаруба, А.В.Брагин, А.А.Волков, А.И.Ерохин, А.В.Зорин, В.Х.Лев, Н.А.Мезенцев, А.Н.Сафронов, В.М.Сыроватин, О.А.Тарасенко, С.В.Хрущев, В.М.Цуканов, Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН, Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 567–575.
2. V.A.Shkaruba, A.V.Bragin, A.A.Volkov, A.I.Erokhin, A.V.Zorin, V.Kh.Lev, N.A.Mezentsev, A.N.Safronov, V.M.Syrovatin, O.A.Tarasenko, S.V.Khrushchev, V.M.Tsukanov, Superconducting multipole wigglers for generating synchrotron radiation at the Budker Institute of Nuclear Physics. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 542–547.
3. V. Shkaruba, A. Bragin, A. Erokhin, Ye. Gusev, P. Kanonik, S. Khrushchev, V. Lev, N. Mezentsev, A. Safronov, O. Tarasenko, V. Tsukanov, A. Volkov, A. Zorin. Superconducting 3 Tesla 54-pole indirect cooling wigglers with a period of 48 mm for Kurchatov synchrotron radiation source. AIP Conference Proceedings 2299, 020005 (2020).
4. S. Khrushchev, P.Kanonik, V.Lev, N.Mezentsev, A.Safronov, V.Shkaruba, V.Tsukanov, A.Volkov, A.Zorin. Magnetic measurements in small aperture of indirect cooling wiggler. AIP Conference Proceedings 2299, 020012 (2020).
5. V.M.Tsukanov, S.V.Khrushchev, N.A.Mezentsev, A.N.Safronov, V.A.Shkaruba. Development of indirect cooling cryogenic system with nitrogen and helium heat pipes for superconducting insertion devices at BINP. AIP Conference Proceedings 2299, 020018 (2020).
6. P.Kanonik, S.Shrushev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A.Volkov, A.Zorin, A.Erokhin, A.Bragin. Superconducting elliptical undulator. AIP Conference Proceedings 2299, 020013 (2020).
7. P.Kanonik, S.Khruschev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A.Volkov, A.Zorin, A.Erokhin, A.Bragin. Superconducting undulator with variable configuration of magnetic field. AIP Conference Proceedings 2299, 020014 (2020).
8. F.Kazantsev, P.Kanonik. Pulsed wire field measurements of 38-period superconducting undulator prototype. AIP Conference Proceedings 2299, 020015 (2020).



Спасибо за внимание!

