



Успешный запуск первого в мире лазера на свободных электронах на основе ондулятора с переменным периодом

Докладчик: **Н.А. Винокуров**



Успешный запуск первого в мире лазера на свободных электронах на основе ондулятора с переменным периодом

О.А. Шевченко, Н.А. Винокуров, Я.В. Гетманов, Я.И. Горбачёв, В.В. Кубарев, Л.Э. Медведев, М.А. Щеглов, С.С. Середняков, В.Г. Ческидов, С.В. Тарарышкин, А.М. Батраков, И.В. Ильин, К.С. Штро, Получение генерации на первом в мире лазер на свободных электронах на основе ондулятора с переменным периодом. Доложено на 14 Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц (20-25 сентября 2022 г., г. Алушта, Крым). Будет опубликовано в журнале «Письма в ЭЧАЯ», том 20, выпуск 4 за 2023 г.



Я. И. Горбачёв проводит измерения и настройку ОПП перед установкой на Новосибирский ЛСЭ.



Аннотация

Ондуляторы широко применяются как в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ), так и в современных источниках синхротронного излучения.

Перестройка длины волны ондуляторного излучения за счёт изменения периода ондулятора имеет ряд преимуществ. В частности, изменение периода в ондуляторе с переменным периодом (ОПП) не приводит к сильному изменению амплитуды поля. Поэтому, используя такой ондулятор, можно получить гораздо больший диапазон перестройки длины волны, чем в обычно используемых ондуляторах с переменным полем. ОПП на постоянных магнитах оригинальной конструкции был разработан и изготовлен в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Использование этого ондулятора на установке «Новосибирский ЛСЭ» позволило получить рекордно большой (от 15 до 120 микрон, то есть в 8 раз) диапазон перестройки длины волны излучения. Таким образом, практически доказана перспективность использования ОПП для генерации электромагнитного излучения.



Ондулятор – это магнитная система, создающая пространственнопериодическое знакопеременное поперечное магнитное поле. В таком поле релятивистские (т. е. высокой энергии) электроны движутся по слабо изогнутой синусоидальной либо спиральной траектории. Ondулятор впервые предложен В. Л. Гинзбургом в 1947 г.

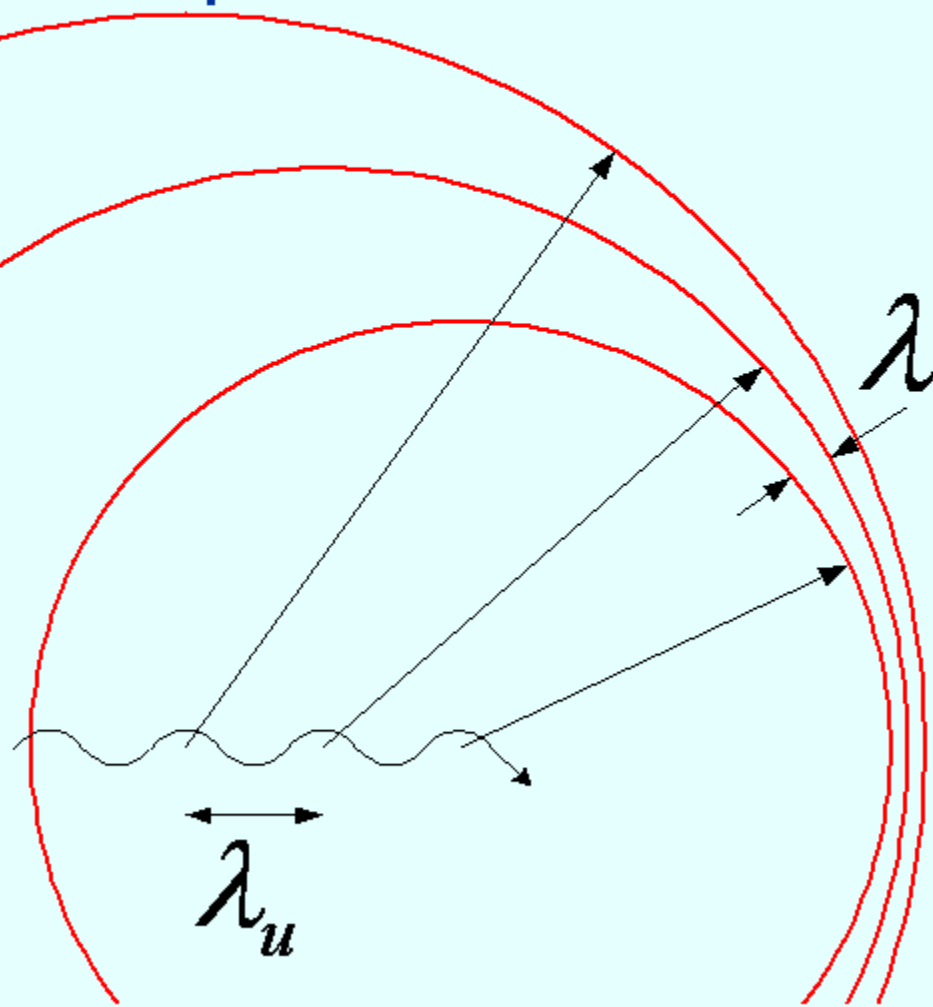


Траектория электрона в плоском ондуляторе.

Волновые фронты, расходящиеся из различных точек максимального ускорения (максимумов магнитного поля ондулятора). Длина волны излучения λ в направлении движения электрона минимальна.

$$\lambda = \lambda_u \left(1 - \frac{\bar{v}}{c} \cos \theta \right)$$

$$\approx \lambda_u \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{\theta^2}{2} \right)$$



Как менять длину волны ондуляторного излучения?

Изменение поля
 $K = eB\lambda_u / (2\pi mc^2) = 1.07 B(\text{Тл})\lambda_u(\text{см})$

Электромагнитный
ондулятор

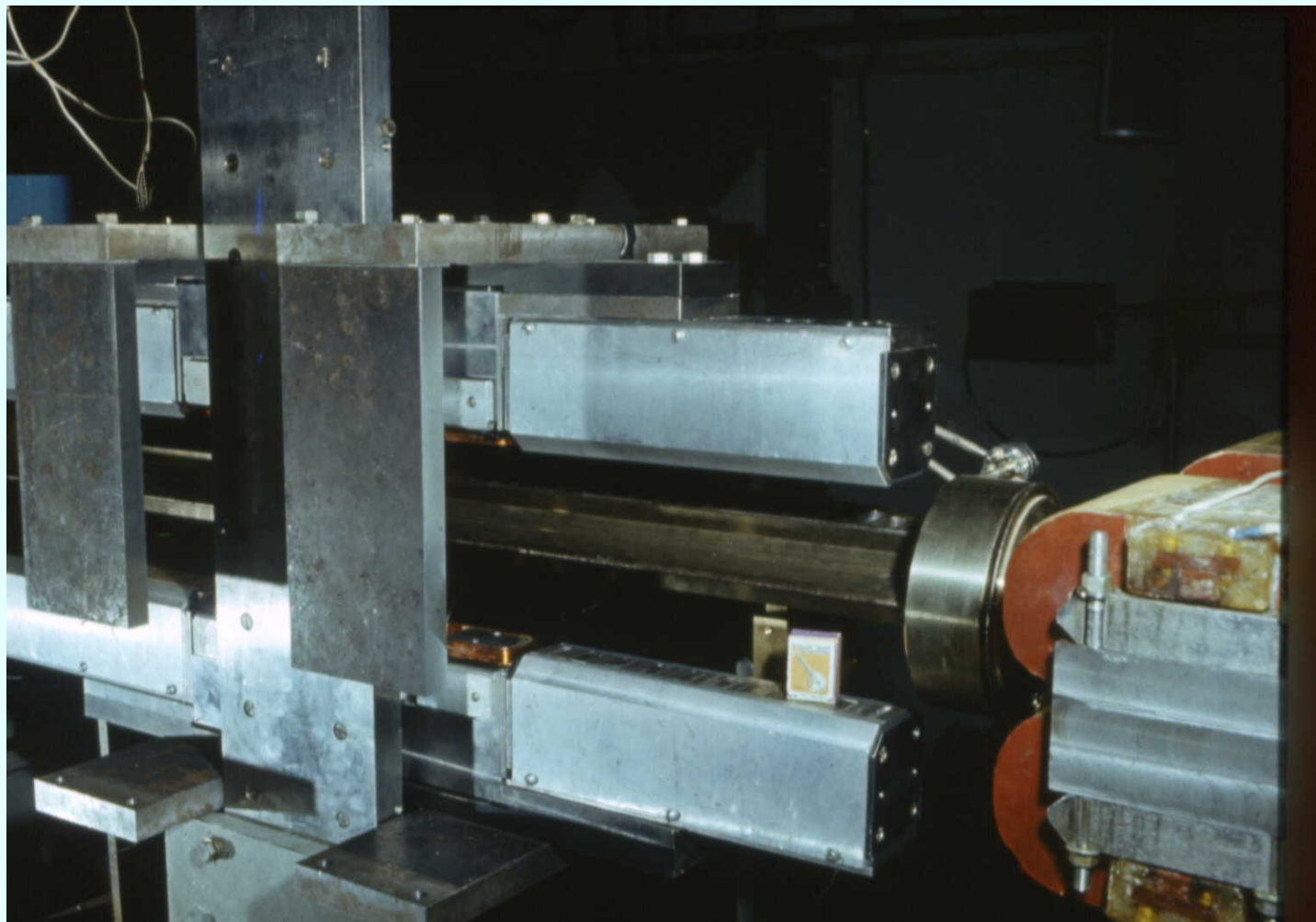
Ондулятор с
изменяемым зазором

Изменение энергии

Изменение периода

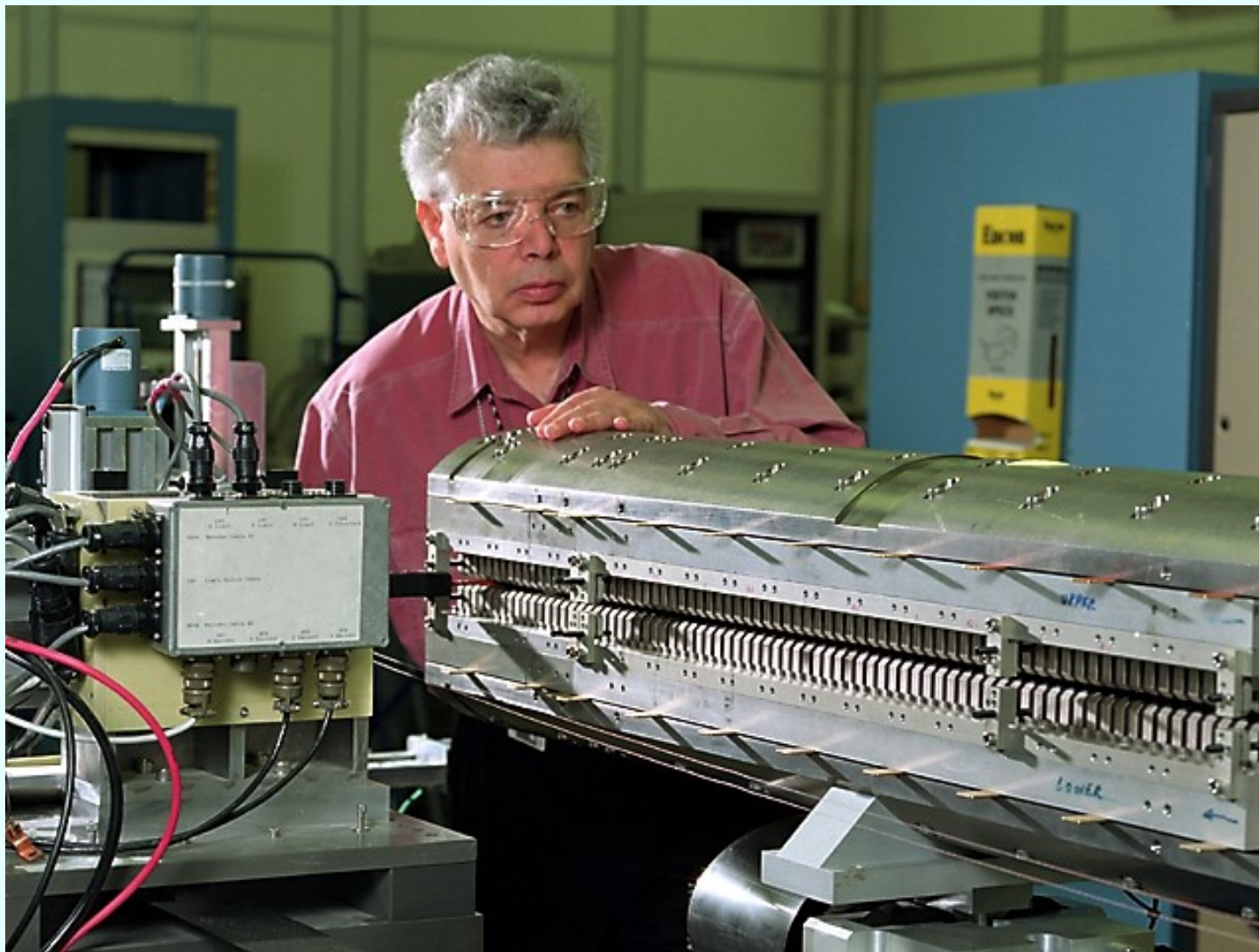
Ондулятор с
переменным
периодом

$$\lambda = \lambda_u \frac{1}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$



**Первый в мире гибридный ондулятор на постоянных магнитах (1983).
Работал на электронном накопителе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН.**

Э. М. Трахтенберг и первый ондулятор рентгеновского ЛСЭ LCLS



Предложение конструкции ондулятора с переменным периодом

PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 14, 040701 (2011)

Variable-period permanent magnet undulators

N. A. Vinokurov,^{1,2} O. A. Shevchenko,¹ and V. G. Tcheskidov¹

¹*Budker Institute of Nuclear Physics, 11 Academician Lavrentyev Prospect, 630090, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, 2 Pirogova, 630090, Novosibirsk, Russia*

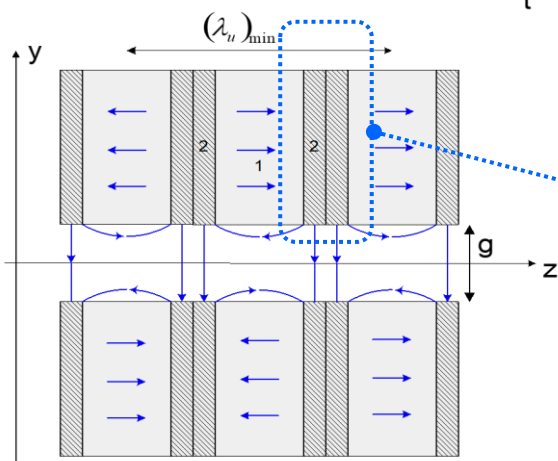
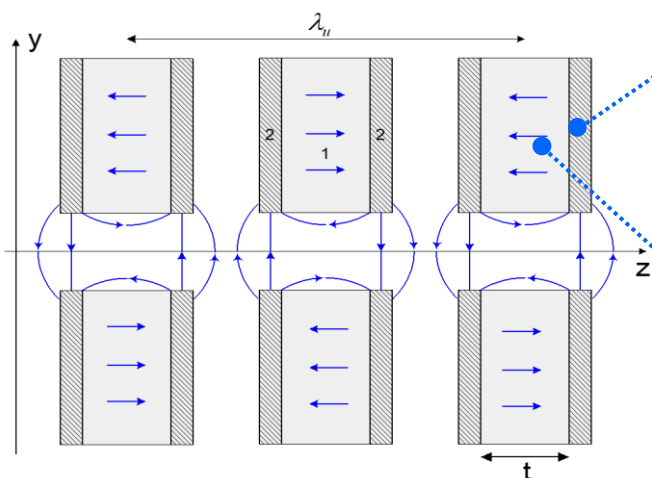
(Received 31 October 2010; published 1 April 2011)

To change the wavelength of undulator radiation, variation of the undulator magnetic field amplitude is frequently applied. Another option is changing the undulator period. A corresponding scheme is described. Both the period and number of periods can be changed. For a set of undulator sections (as in the x-ray free-electron lasers), the mechanical motion of the periods allows doing without phase shifters between the undulator sections. Magnetic field calculations for some undulator parameters of interest were performed. Numerous advantages of the new undulators (fixed gap, strong dependence of the undulator radiation wavelength on the period, relatively low field amplitude variation, and variable number of periods) look very attractive. The prospects for this new type of undulators are discussed.

DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.14.040701

PACS numbers: 07.85.Qe, 41.60.Cr

Гибридный ондулятор



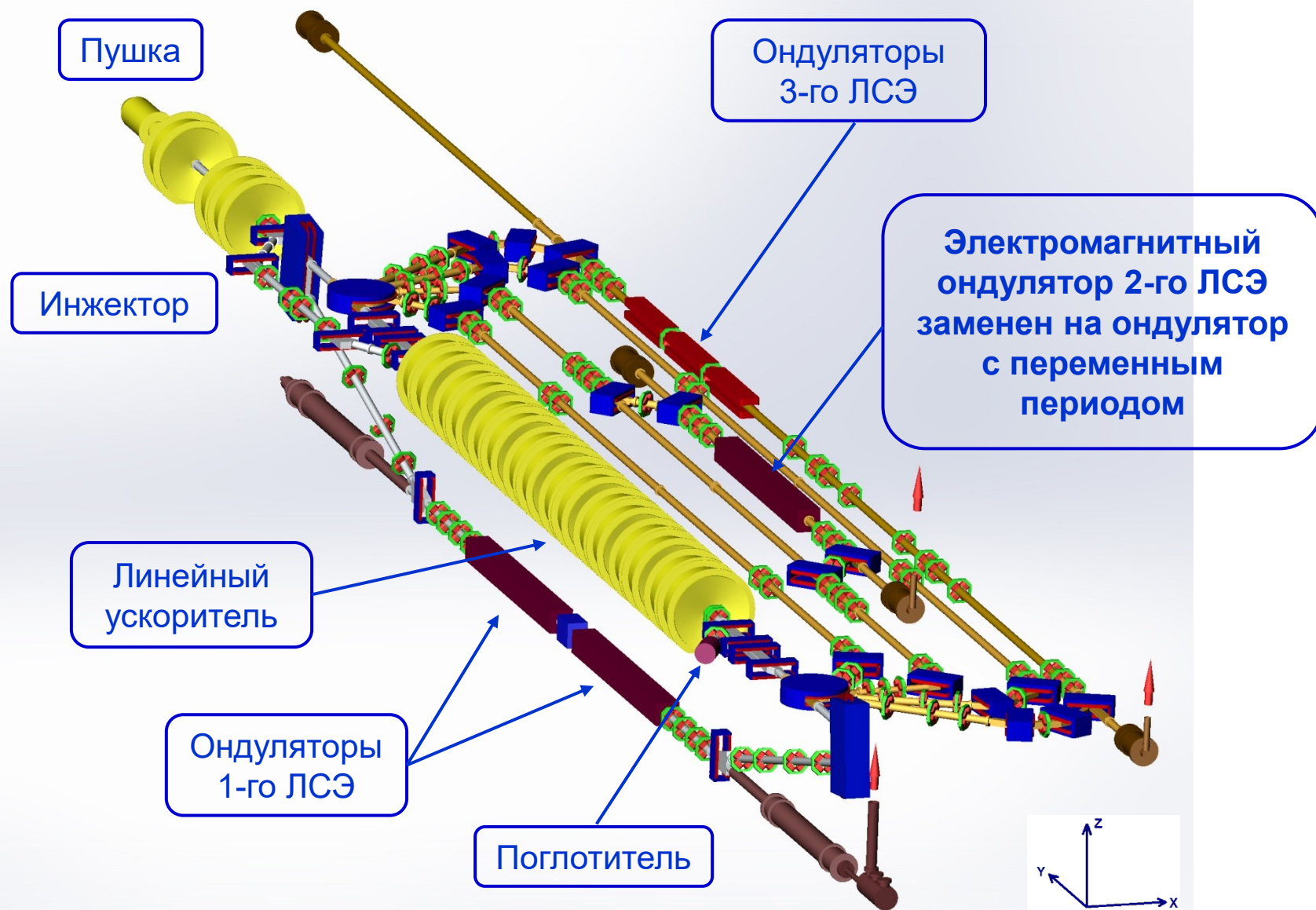
железо

**Железные полюса
гибридного ондулятора
разрезаются пополам.
Тогда между ними
действуют
расталкивающие силы.**

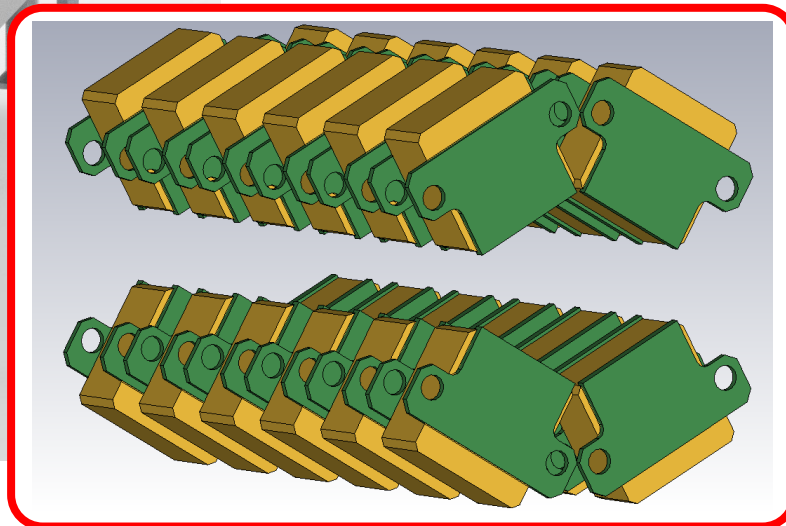
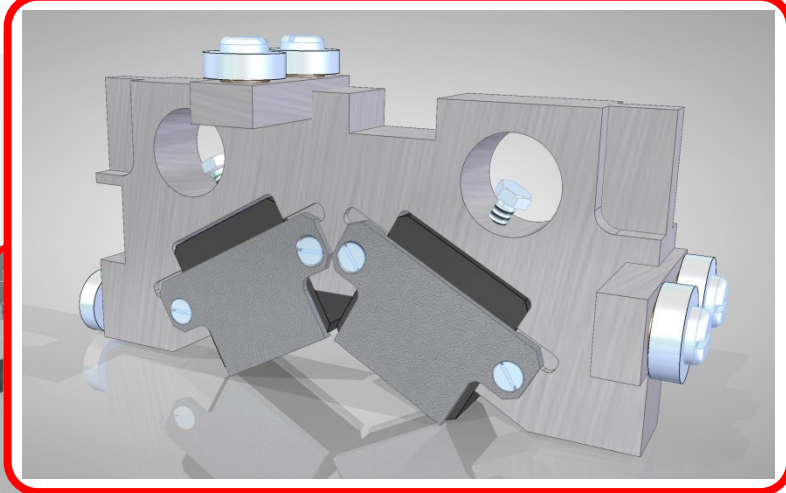
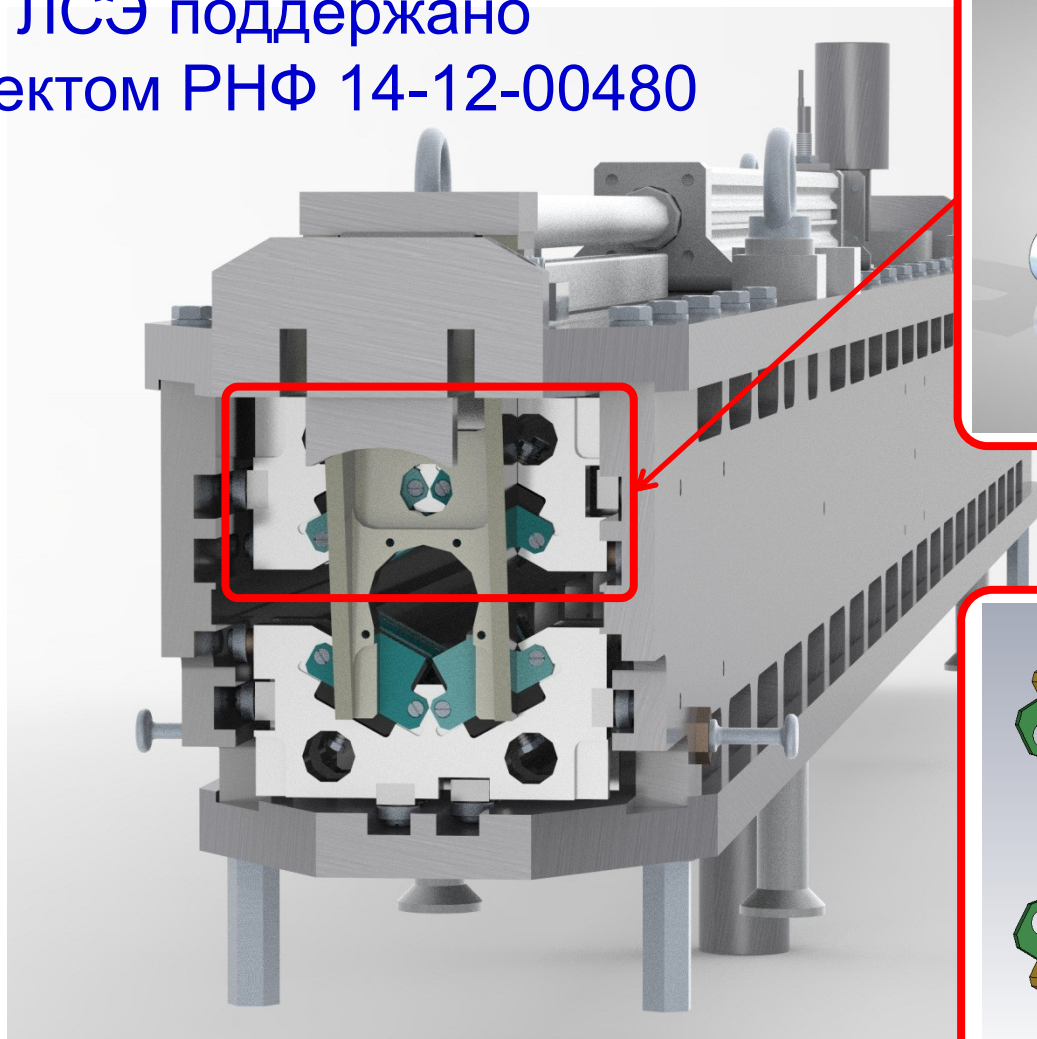
ПОСТОЯННЫЕ
МАГНИТЫ

Каждый полюс
разделен пополам

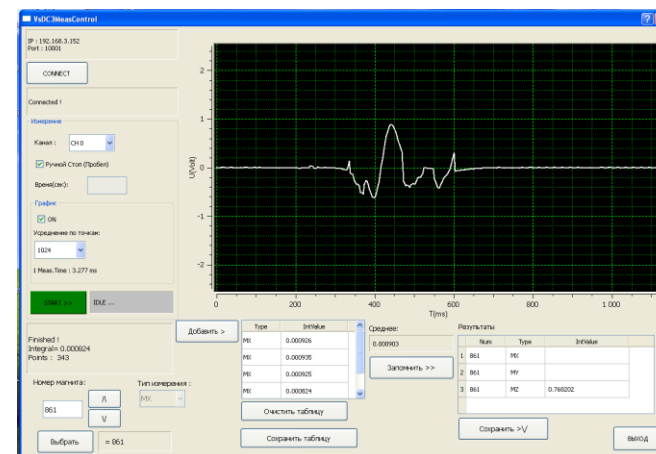
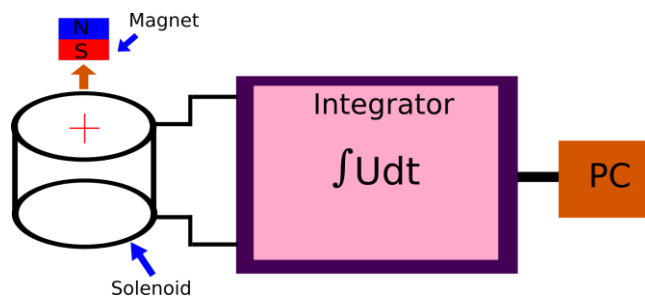
Новосибирский ЛСЭ



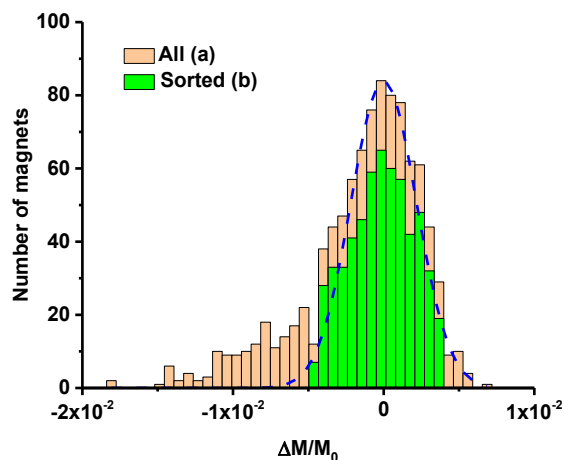
Изготовление ондулятора с
переменным периодом для
2-го ЛСЭ поддержано
проектом РНФ 14-12-00480



Сортировка магнитов и сборка кассет



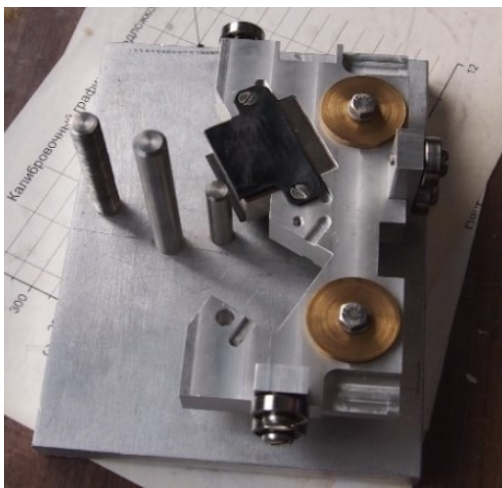
Магнитный момент определялся из интеграла ЭДС, наводимой в соленоиде при извлечении магнита. Измерялись все три компоненты момента.



После сортировки из **953** магнитов было выбрано **570**. Полученный в результате сортировки среднеквадратичный разброс основной компоненты магнитного момента составляет **0.22 %**.



Сортировка магнитов и сборка кассет



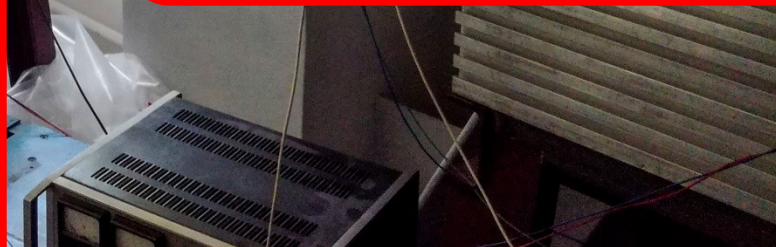
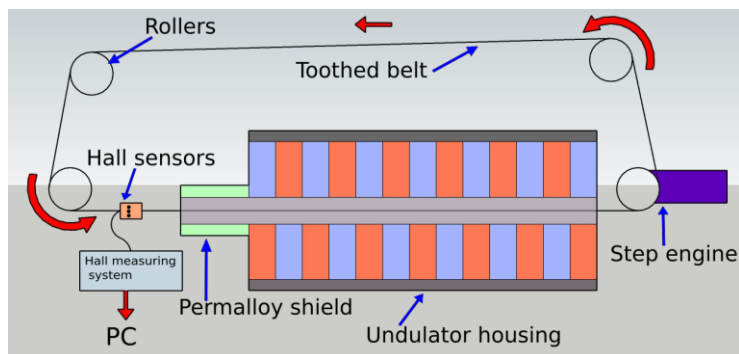
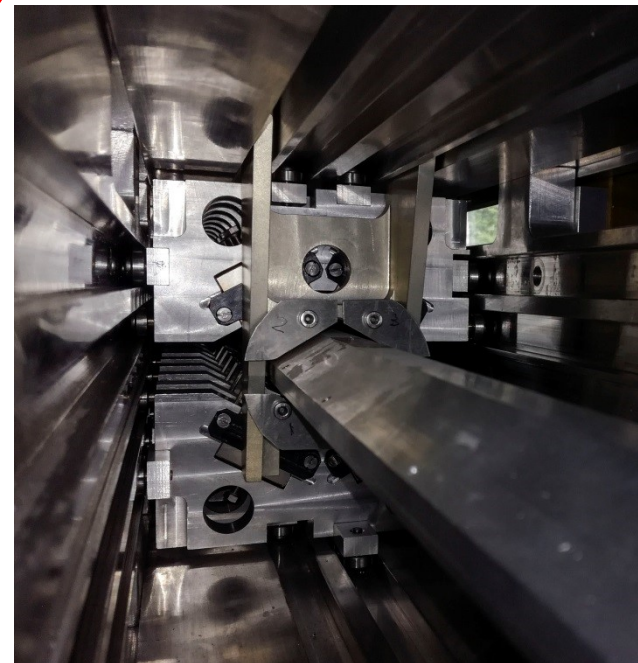
Для сборки кассет было разработано специальное приспособление, предотвращающее слипание магнитов.

Для удобства работы была изготовлена специальная система хранения магнитных блоков в сборе.

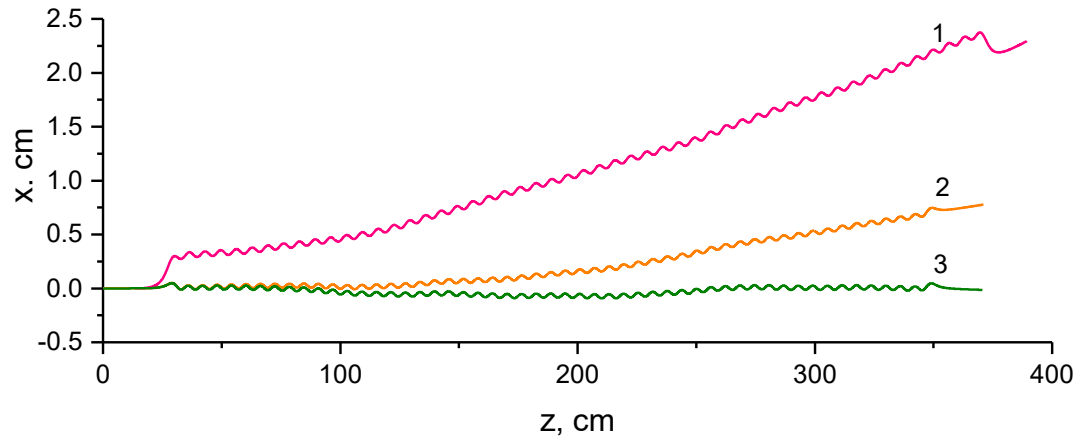
За счёт сил взаимного притяжения кассеты надёжно фиксируются в своих ячейках



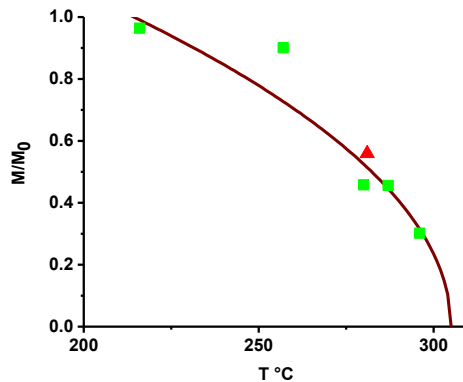
Измерения магнитного поля ондулятора



Компенсация интегралов магнитного поля



Траектория опорной частицы (22 МэВ) (1 – до коррекции, 2 – после коррекции поля на концах ондулятора, 3 – после компенсации внешнего поля)



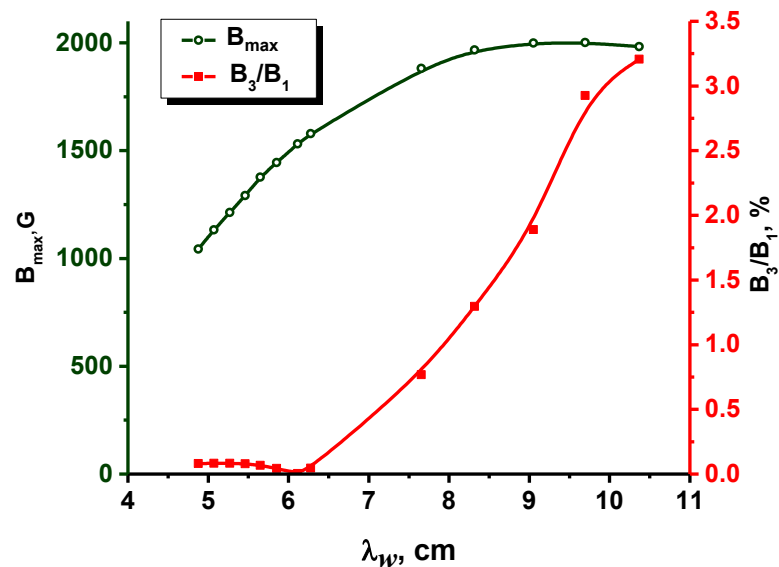
Остаточная намагниченность после нагрева

Для коррекции поля на концах ондулятора намагниченность магнитов в крайних кассетах была уменьшена в два раза путем нагрева до 280 градусов.

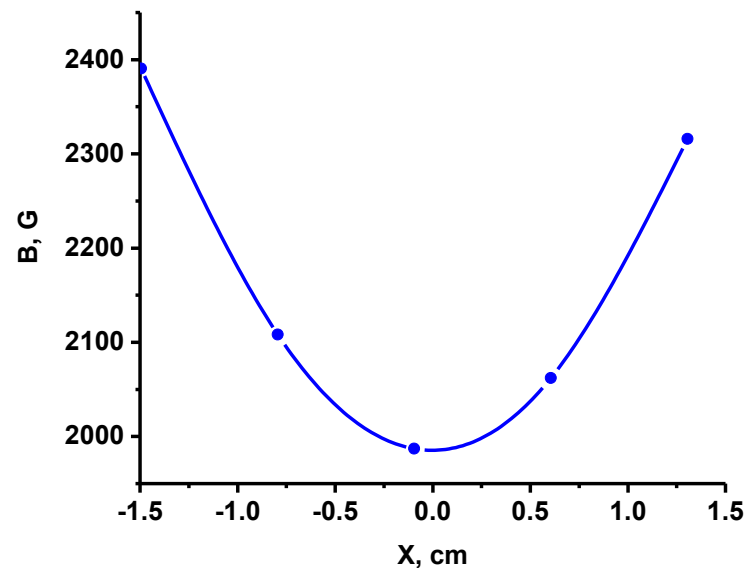
Для коррекции внешнего поля (которым, в основном, является поле Земли) используется распределённая корректирующая катушка



Магнитное поле в регулярной части ондулятора



Зависимость амплитуд 1-й и 3-й гармоник поля от периода

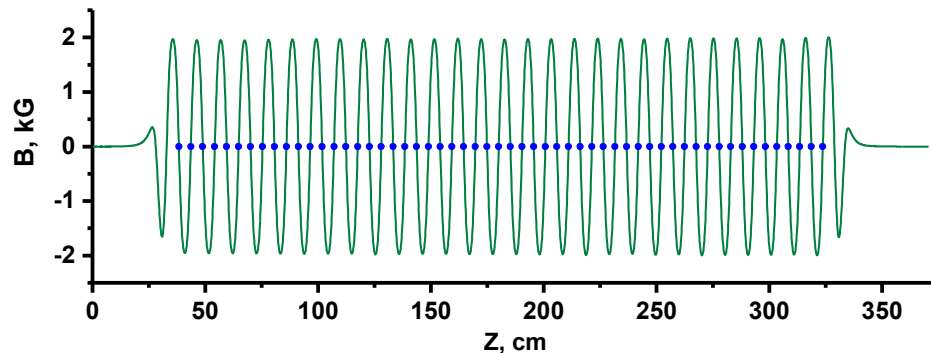
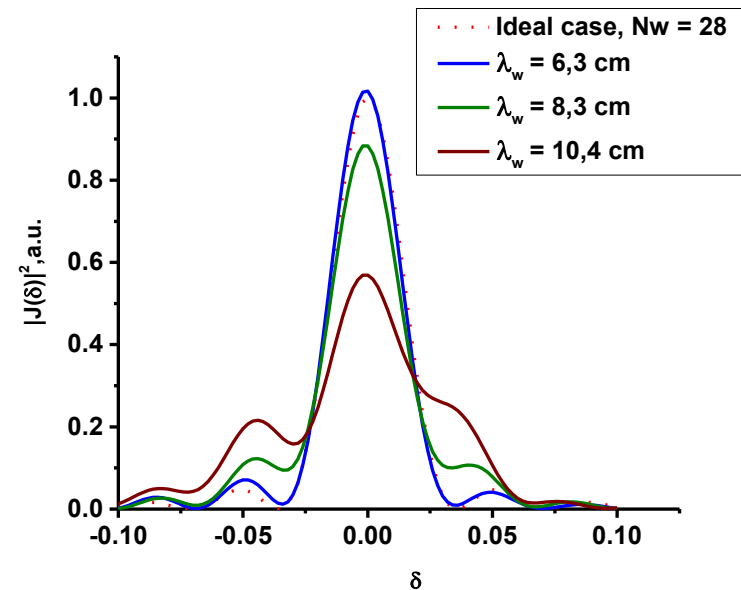
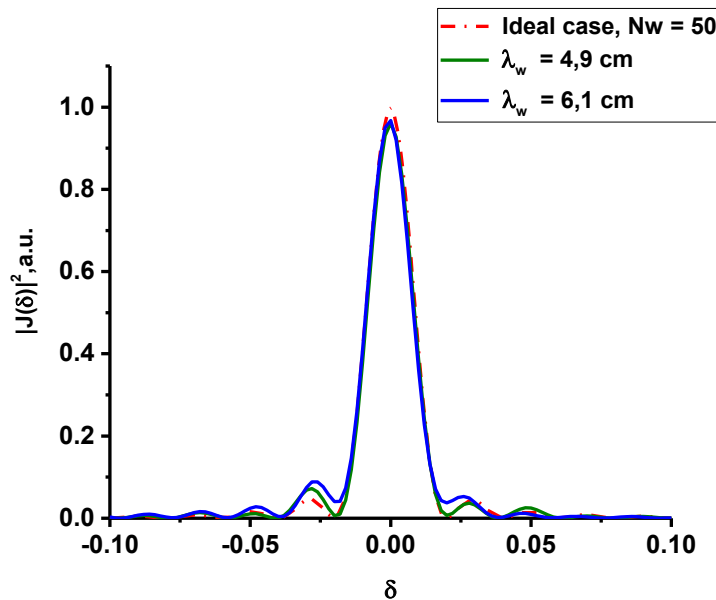


Зависимость амплитуды 1-й гармоники от поперечной координаты в случае максимального периода

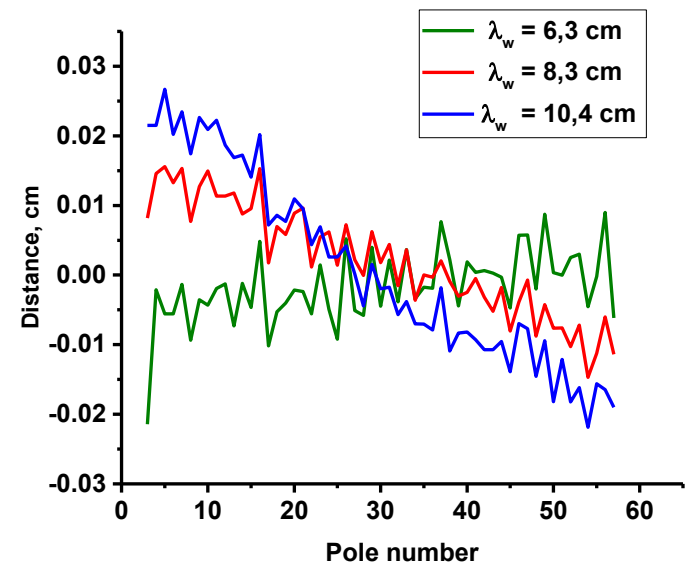
Результаты измерений хорошо согласуются с расчетами



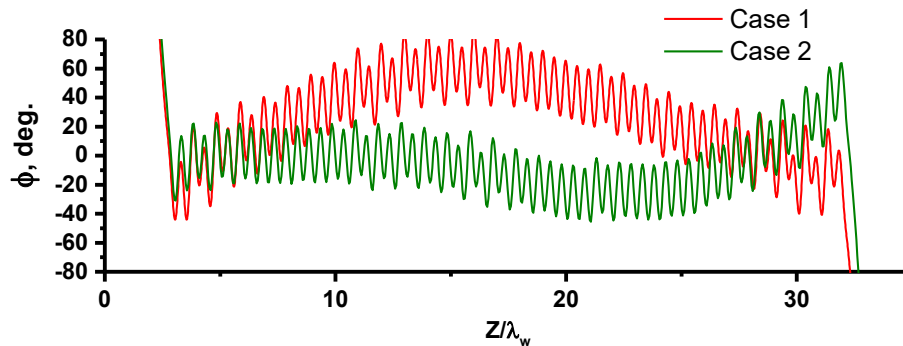
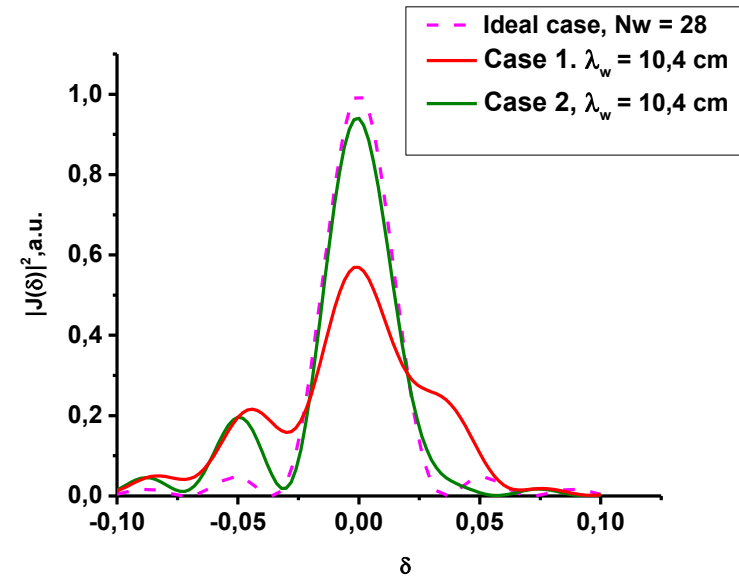
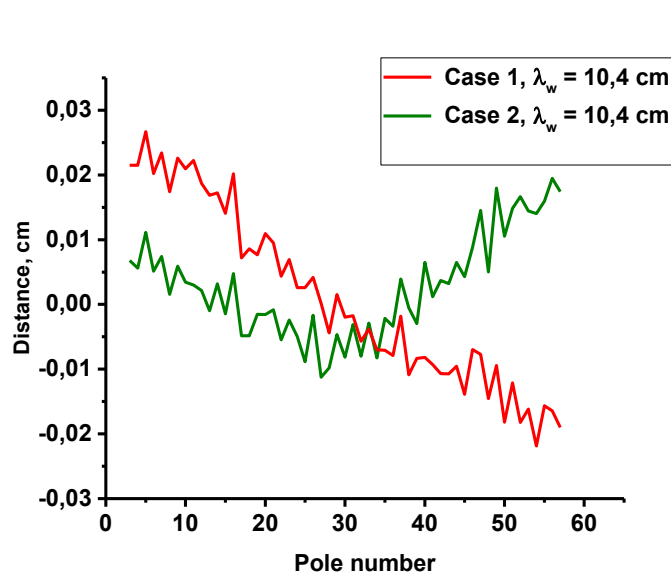
Расчетный спектр спонтанного излучения



Вычисление расстояний между соседними полюсами



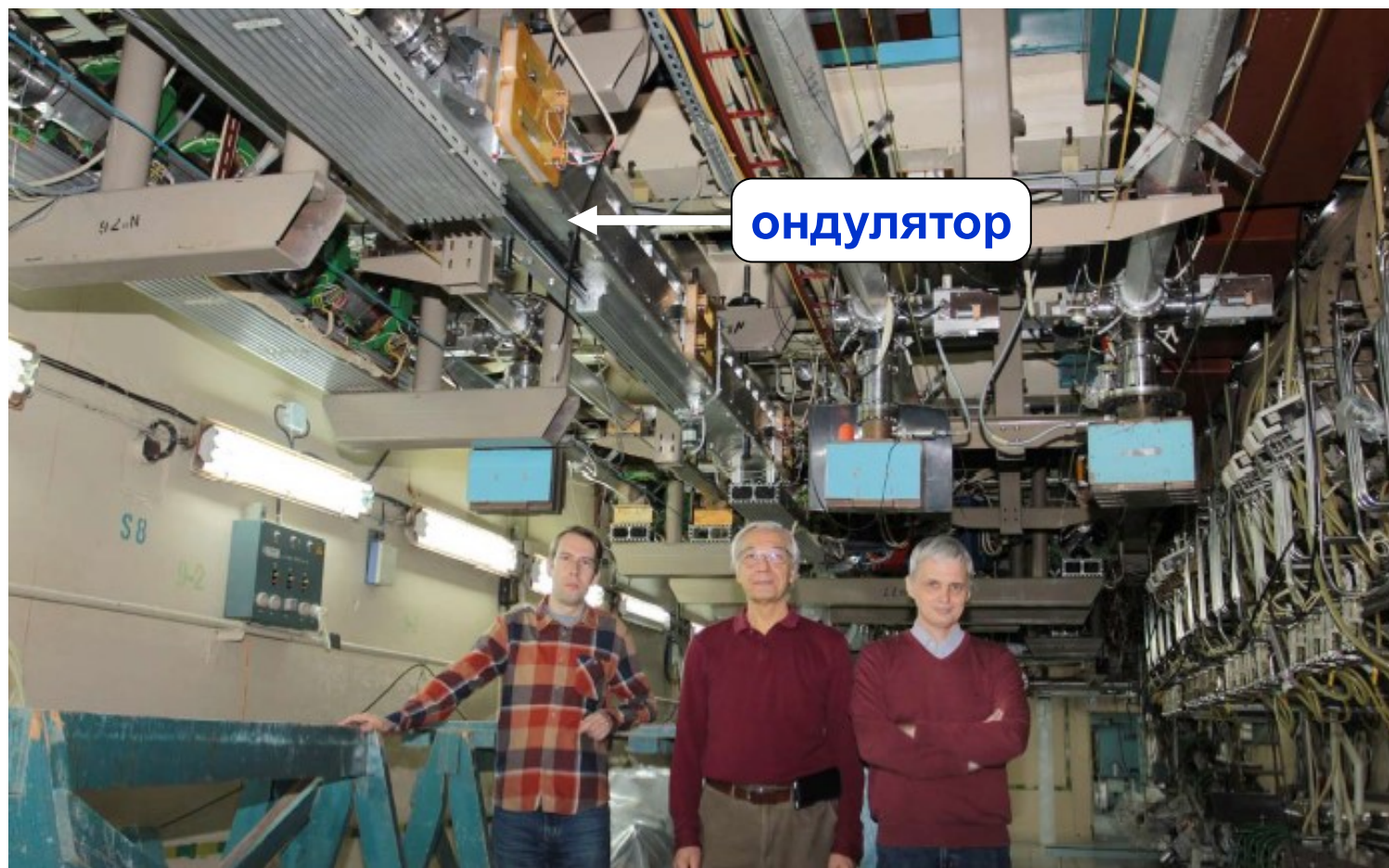
Решение проблемы деградации спектра для больших периодов



Вариант 1 – поочередное смещение
концов ондулятора

Вариант 2 – синхронное смещение
концов от минимального периода

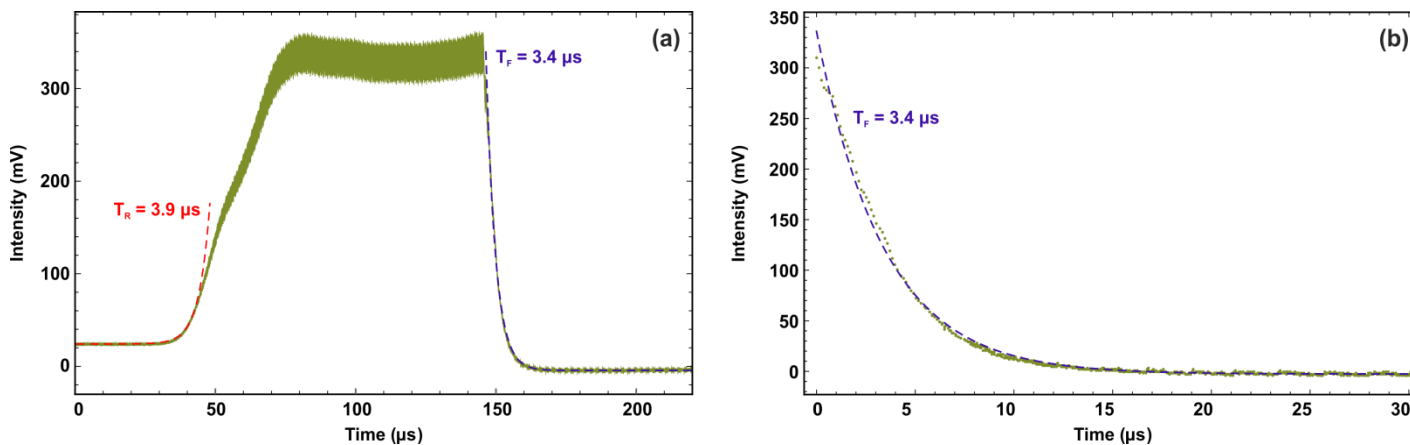




*Летом 2021 г. новый ондулятор установлен
на байпас 2-й дорожки Новосибирского ЛСЭ*



Измерение усиления и потерь излучения в оптическом резонаторе

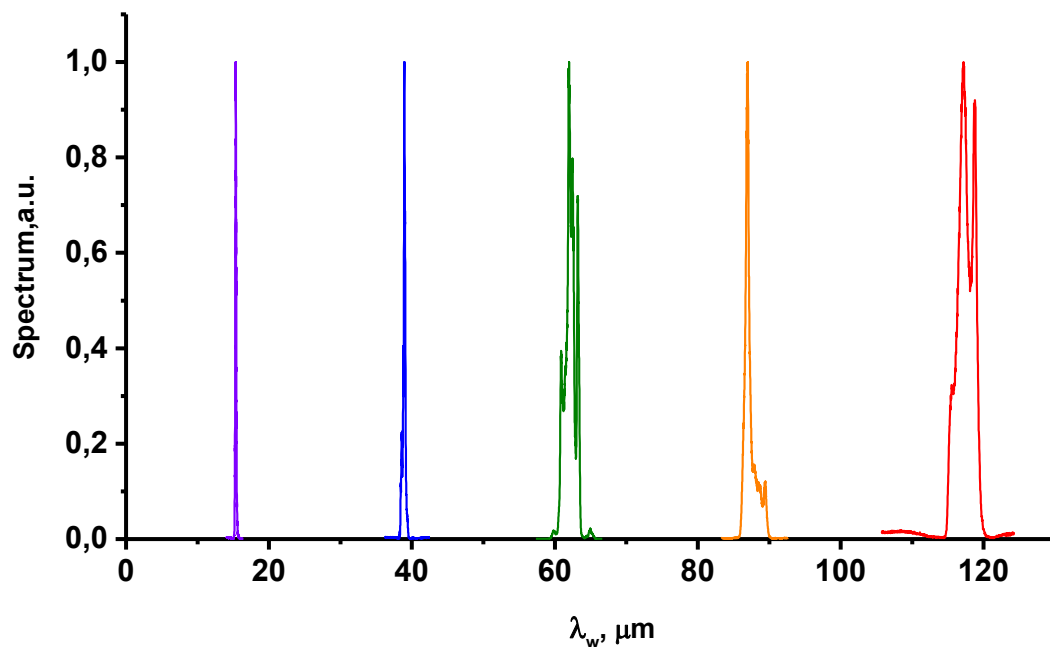


Сигнал с КРТ детектора
(используется режим модуляции мощности)

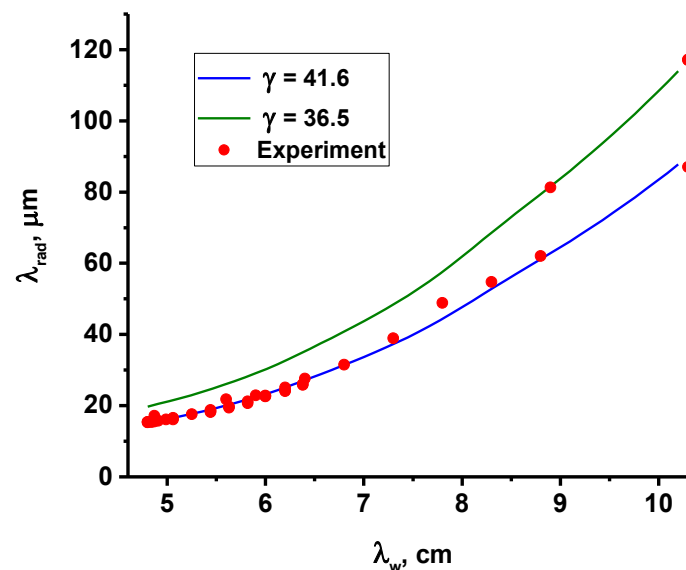
Измеренные потери на длине волны **15 мкм** составляют **3.8 %**,
коэффициент усиления в линейном режиме – **7.2 %**.



Диапазон перестройки длины волны излучения



Измеренные спектры излучения



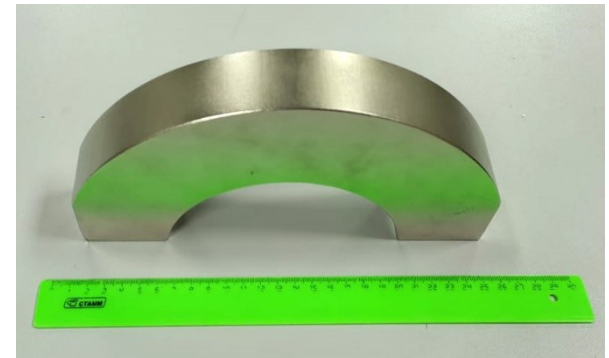
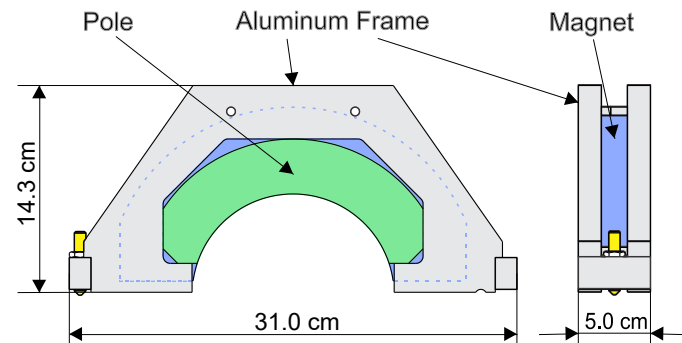
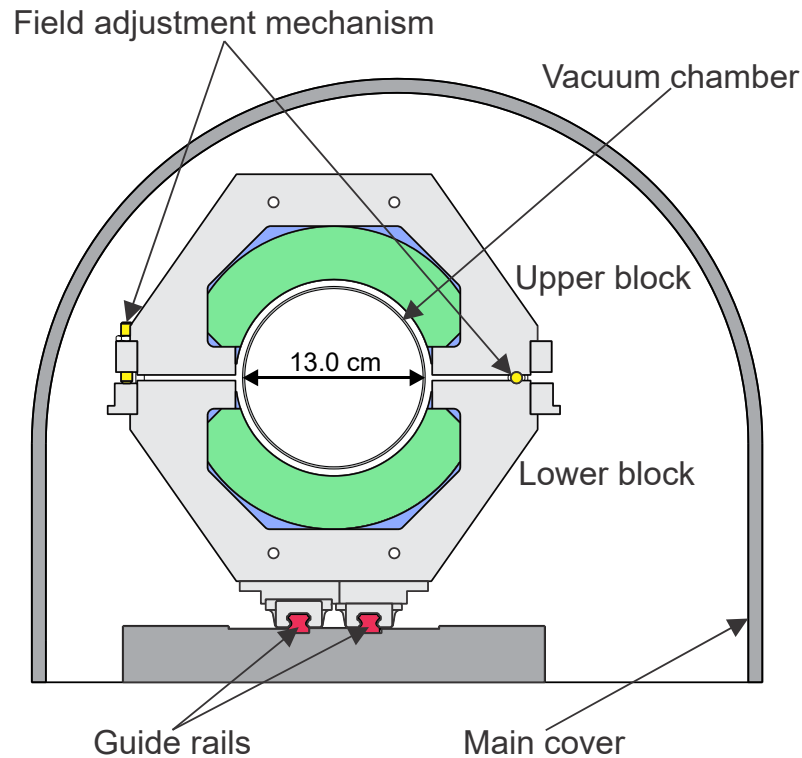
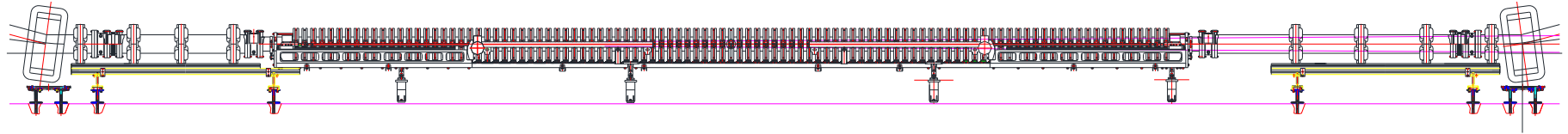
Зависимость длины волны от периода ондулятора

$$\lambda = \lambda_w \frac{1}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K(\lambda_w)^2}{2} \right) \quad \lambda_w \sim 4.8 \dots 10.4 \text{ cm}$$
$$K \sim 0.46 \dots 2$$

Экспериментально продемонстрированный диапазон перестройки длины волн составляют от **15** до **120** микрон.



Следующий ондулятор с переменным периодом - для 1-го ЛСЭ (в экспериментальном производстве ИЯФ)



Спасибо за внимание!

