

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

Е.И. Антохин, А.М. Батраков, П.Д. Воблый,
Н.И. Зубков, Ю.М. Колокольников,
Е.Г. Мигинская, А.В. Уткин, В.М. Цуканов

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
1 И 2 ИНТЕГРАЛОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

ИЯФ-2002-46

НОВОСИБИРСК
2002

**Измерительная система
1 и 2 интегралов магнитных полей**

*Е.И. Антохин, А.М. Батраков, П.Д. Воблый,
Н.И. Зубков, Ю.М. Колокольников,
Е.Г. Мигинская, А.В. Уткин, В.М. Цуканов*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, СО РАН
630090, Новосибирск

Описана измерительная система для измерения 1 и 2 интегралов магнитного поля в ондуляторе, которая позволяет измерять $\int B \, ds$ с точностью $<3 \text{ Гс}\cdot\text{см}$ и $\int B^2 \, ds$ с точностью $<500 \text{ Гс}\cdot\text{см}^2$. Время одного измерения составляет ~ 15 секунд.

**Measurement system
for first and second integrals of magnetic field**

*E.I. Antokhin, A.M. Batrakov, P.D. Vobly,
N.I. Zubkov, Yu.M. Kolokolnikov,
E.G. Miginskaya, A.V. Utkin, V.M. Tsukanov*

Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS
630090, Novosibirsk

Measurement system for magnetic field first and second integrals in undulator is described. The system provides measurements of first integral with accuracy of $3 \text{ Gs}\cdot\text{cm}$ and second integral with accuracy of $500 \text{ Gs}\cdot\text{cm}$. The time for single measurement is about 15 seconds.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

Введение

В PSI (Paul Sherrer Institute, Виллиген, Швейцария) построен источник синхротронного излучения SLS (Swiss Light Source) на энергию 2.4 ГэВ, периметром 280 м, током пучка 0.4 А.



Рис. 1. Эллиптический ондулятор.

В ИЯФ СО РАН были изготовлены для SLS два квазипериодических эллиптических ондулятора с периодом 212 мм, вертикальным магнитным полем до $B_v = 0.5$ Т и горизонтальным до $B_h = 0.22$ Т, длина каждого составляет $L = 4.5$ м (рис. 1), которые должны обеспечивать следующие режимы работ.

1. Два ондулятора, имеющие по 21 периоду каждый, работают совместно как один ондулятор с 42 периодами. При этом взаимную фазировку излучения обеспечивают расположенные между ними корректоры, см. рис. 2.
2. Включение в квазипериодическом режиме ондуляторов.

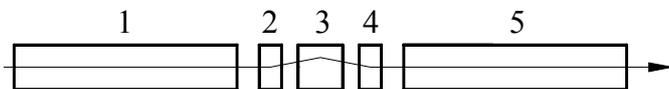


Рис. 2. 1, 5 – ондуляторы, 2, 3, 4 – корректоры.

Для этого в каждом третьем полюсе ондулятора магнитное поле делают на 15 – 20% меньше чем в других. В этом режиме существенно подавляются первые кратные гармоники Синхротронного Излучения на выходе из монохроматора.

3. Работа с быстрой сменой поляризации Синхротронного Излучения Рис. 3.



Рис. 3. 1, 2, 4, 5, 7, 8 – корректоры, 3, 6 – ондуляторы, 9 – щелевой затвор, 10 – рентгеновские зеркала, 11 – место пересечения пучков СИ разной поляризации.

Для этого, с помощью корректоров 1 и 2, пучок электронов поднимают над обычной траекторией их движения, пропускают его через первый ондулятор 3, где он излучает лево поляризованное СИ. С помощью корректоров 4 и 5, пучок электронов опускают под их обычную траекторию движения, где он проходит через второй ондулятор 6 и излучает право-поляризованное СИ. После этого, корректора 7, 8 возвращают пучок электронов на их обычную траекторию движения. Специальный быстрый щелевой затвор 9 пропускает либо право поляризованное, либо

левополяризованное Синхротронное Излучение. СИ из первого ондулятора при помощи рентгеновских зеркал 10 сводят с СИ из второго ондулятора на изучаемом объекте.

Особенностью SLS являются жёсткие требования на то, что бы новые элементы конструкций не вносили изменений в траекторию движения электронов по кольцу синхротронного накопителя вне этих конструкций. Предъявляемые требования были сформулированы следующим образом:

а) 1 интеграл поля

$$B l = \int_0^L B \cdot dl \leq 20 \text{ Гс} \cdot \text{см} ,$$

б) 2 интеграл поля

$$B l^2 = \int_0^L dl \int_0^l B \cdot dl \leq 2000 \text{ Гс} \cdot \text{см}^2 .$$

Смысл этих требований заключается в том, что 1 интеграл отвечает за угловое отклонение электронов от начальной траектории на выходе ондулятора

$$\psi = \frac{e \cdot \int_0^L B \cdot dl}{E} ,$$

а 2 интеграл за смещение электронов от начальной траектории

$$\Delta = \frac{e \cdot \int_0^L dl \cdot \int_0^l B \cdot dl}{E} .$$

Чтобы такой длинный ондулятор ($L = 4.5$ м) удовлетворял этим требованиям, нужна тонкая настройка его токовых режимов с постоянным контролем параметров 1 и 2 интегралов магнитного поля. Обычными измерениями с помощью датчиков Холла этого сделать невозможно, так как их погрешность при измерении 1 интеграла на длине 4.5 м будет ~ 100 Гс·см, а время одного измерения ~ 1.5 часов. В связи с этим, была создана измерительная система 1 и 2 интегралов магнитных полей (ИС), которая

позволяет измерять Bl с точностью <3 Гс·см и Bl^2 с точностью <500 Гс·см² за время ~ 15 секунд.

1. Методы измерений

1.1. Измерение 1-го интеграла магнитного поля в ондуляторе

Если поместить длинную проводящую рамку в магнитное поле (см. рис. 4), и перемещать как целое одну из её длинных сторон поперёк магнитного поля, то на концах рамки будет наводиться напряжение:

$$U(x, \dot{x}) = -\mu_0 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \cdot \frac{d(\int B \cdot dS)}{dt} = -\mu_0 \cdot \frac{d(\int_{x_0}^x dx \cdot \int_0^L B \cdot dl)}{dt}.$$

Проинтегрировав это напряжение по времени, получим:

$$U_{и}(x) = \int_{t_0}^{t_1} U \cdot dt = -\mu_0 \cdot \int_{x_0}^x dx \cdot \int_0^L B \cdot dl.$$

Отсюда, находим 1 интеграл магнитного поля вдоль оси Y

$$Bl(x) = \frac{d(\int_{x_0}^x dx \cdot \int_0^L B \cdot dl)}{dx} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{dU_{и}(x)}{dx} = K_1 \cdot \frac{dU_{и}(x)}{dx}.$$

Таким образом, если натянуть две струны вдоль ондулятора, соединить их так, что бы получился рамочный контур, и одновременно переместить оба конца одной струны перпендикулярно магнитному полю, фиксируя перемещение, то по наведённому на контуре напряжению можно определить 1 интеграл магнитного поля вдоль ондулятора.

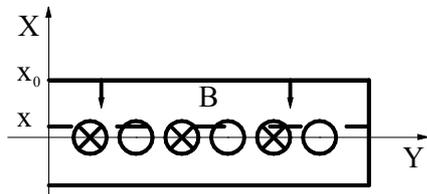


Рис. 4. Схема измерения 1-ого интеграла магнитного поля в ондуляторе.

1.2. Измерение 2-ого интеграла магнитного поля в ондуляторе

Если зафиксировать один конец струны, расположенный на выходе электронного пучка из ондулятора, а другой переместить на фиксированное расстояние перпендикулярно магнитному полю см. рис. 5, то на контуре наведётся напряжение:

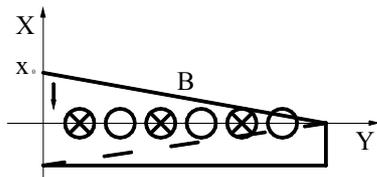


Рис. 5. Схема измерения 2-ого интеграла магнитного поля в ондуляторе.

$$U = -\mu_0 \cdot \frac{d(\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S})}{dt} = -\mu_0 \cdot \frac{d(\int_{-\varphi_0}^{\varphi_1} d\varphi \cdot \int_0^L \mathbf{B} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l})}{dt}.$$

Проинтегрировав это напряжение по времени, получим:

$$U_{\text{н}} = \int_{t_0}^{t_1} U \cdot dt = -\mu_0 \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} d\varphi \cdot \int_0^L \mathbf{B} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l}.$$

Интеграл $\int_0^L \mathbf{B} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l}$ полный эквивалент 2 интеграла магнитного поля.

$$\int_0^L \mathbf{B} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l} = \int_0^L (\int_0^1 \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l})' \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l} = (\int_0^1 \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}) \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \Big|_0^L + \int_0^L d\mathbf{l} \cdot \int_0^1 \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}.$$

Так как $(\int_0^1 \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}) \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \Big|_0^L$ равен нулю, то получаем:

$$\int_0^L \mathbf{B} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l} = \int_0^L d\mathbf{l} \cdot \int_0^1 \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mathbf{B} l^2.$$

Отсюда, находим 2 интеграл магнитного поля вдоль ондулятора.

$$\mathbf{B} l^2 = \frac{\int_{-\varphi_0}^{\varphi_1} d\varphi \cdot \int_0^L \mathbf{B} \cdot (\mathbf{L} - \mathbf{l}) \cdot d\mathbf{l}}{d\varphi} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dU_{\text{н}}}{d\varphi} = K_2 \cdot \frac{dU_{\text{н}}}{d\varphi}.$$

2. Общий вид установки и основные элементы

Для проведения измерений 1 и 2 интегралов магнитного поля ондулятора была сделана специальная измерительная система, блок схема которой приведена на рис. 6.

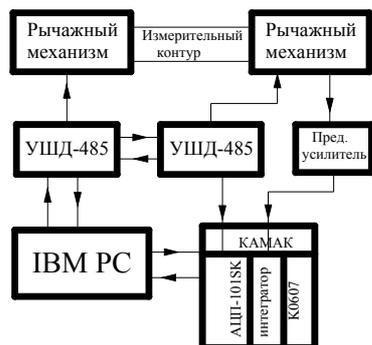


Рис. 6. Блок схема ИС.

Измерительный контур состоит из подвижной и неподвижной струны, изготовленных из СТЭФ шириной 10 мм, толщиной 0.5 мм и длиной 4800 мм с приклеенным к нему медным проводом. Измерительный контур содержит 40 витков, что позволило получить амплитуду сигнала в измерении $U \sim 16 \mu V$ при величине 1 интеграла магнитного поля ондулятора $Вl \sim 20 \text{ Гс}\cdot\text{см}$. Натяжение и перемещение струны осуществляется при помощи двух рычажных механизмов (рис. 7), каждый из которых приводится

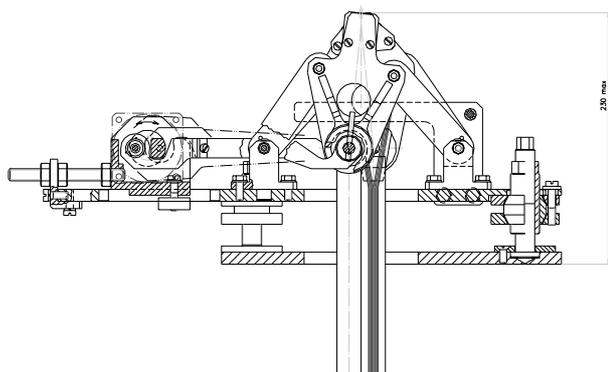


Рис. 7. Схема рычажного механизма

в действие шаговым двигателем ДИ-003. Рычажный механизм обеспечивает перемещение струны от 0 до 19.8 мм за время от 0.2 до 3.8 секунд с точностью ± 0.15 мм. Рычажные механизмы крепились непосредственно к ондулятору. Положение измерительной струны относительно магнитных полюсов выставляли и контролировали при помощи измерительных плиток. Величина провиса струны на длине 4.5м не превышала 0.2 мм. Перемещение струны за один шаг шагового двигателя не превышала $\Delta = 0.31$ мм. Управление шаговыми двигателями осуществлялось с помощью ЭВМ РС через контроллер шагового двигателя КШД-485.

Сигнал с измерительного контура поступал на предварительный усилитель, установленный непосредственно на рычажном механизме, с коэффициентом усиления 1000. Схема усилителя приведена на рис. 8.

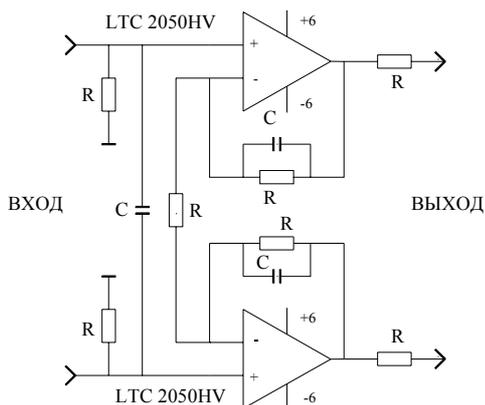


Рис. 8. Схема предварительного усилителя.

Усиленный сигнал поступал на блок усилителя-интегратора, выполненного в стандарте КАМАК. Схема усилителя-интегратора приведена на рис. 9.

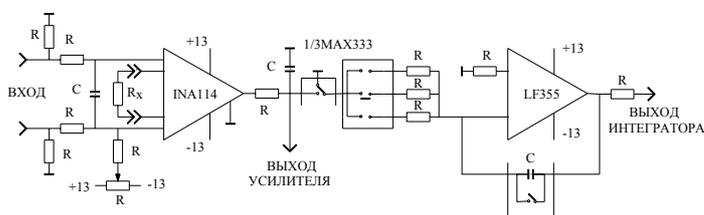


Рис. 9. Схема усилителя-интегратора.

Усилитель расположенный в этом блоке усиливает сигнал до 100 раз. Интегратор имеет τ интегрирования равной 1 секунде. Это позволило существенно подавить паразитные сигналы, наводимые в измерительном контуре внешними электромагнитными полями и колебаниями струны в магнитном поле ондулятора. Из блока усилителя-интегратора выходит два сигнала (просто усиленный и проинтегрированный по времени) и поступают на 12 разрядный АЦП-101SK, откуда через контролер K0607 данные передаются в ЭВМ. Управлением измерениями и обработкой результатов на РС занимается специально написанная программа с удобным многооконным интерфейсом рис. 10.

Программа работает в среде Windows 95, 98. Калибровка ИС проводилась при помощи тарированного С-образного электромагнита, установленного на рычажном механизме. Калибровка электромагнита проводилась при помощи датчика Холла.

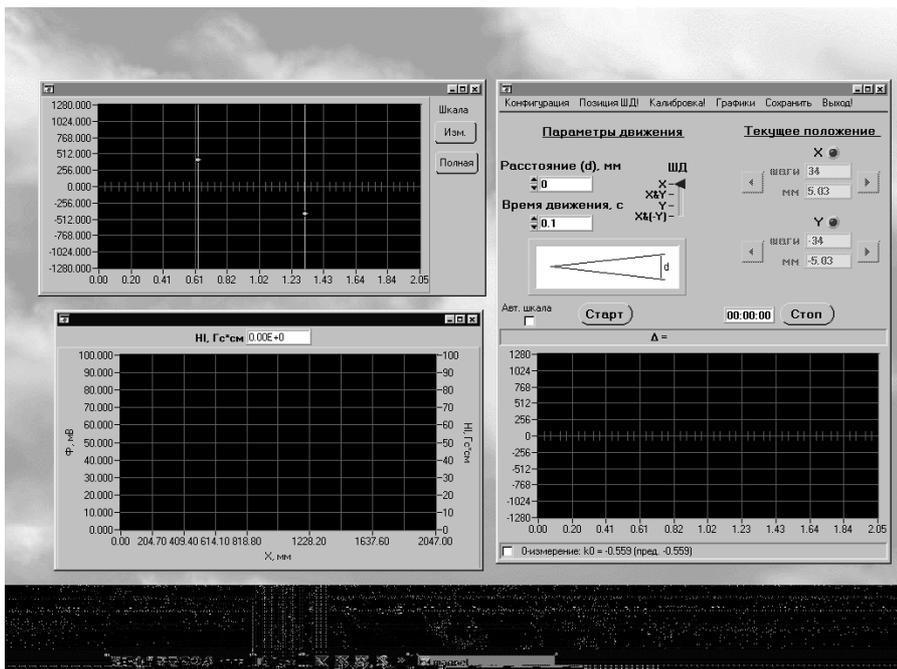


Рис. 10. Многооконный интерфейс программы управления измерениями.

3. Процедура измерений и обработка результатов

Измерения и обработка результатов полностью автоматизированы и управляются с помощью одной программы. Эта программа работает в 2 режимах: а) измерение 1 интеграла магнитного поля; б) измерение 2 интеграла магнитного поля. После того как будет выбран режим измерения, программа задаст режим работы АЦП-101SK и перемещения концов измерительной струны в блоке управления шаговыми двигателями КШД-485. Каждый конец струны может перемещаться на расстояние от 0мм (0 шагов шагового двигателя) до 19.8 мм (80 шагов шагового двигателя) за время от 0.2 до 3.8 секунд. После этого, программа выставит измерительную струну в исходное положение для начала измерения, и будет ждать команду оператора о начале измерения. Время, затрачиваемое на эти действия, не превышает 4 секунд. После получения команды о начале измерения, программа производит обнуление интегратора, запуск АЦП-101SK и перемещение струны в зависимости от выбранного режима измерения (а) – синхронно оба конца струны в одну сторону, б) – одного конца струны со стороны захода электронного пучка в ондулятор). По окончании работы АЦП, программа считывает из него данные и переходит в режим ожидания запуска от оператора, для производства измерения при обратном перемещении струны. Время, затрачиваемое на эти действия от 5 до 10 секунд. Измерение при обратном перемещении струны служит для визуального сравнения результатов, и определения работоспособности всей измерительной системы. После получения от оператора команды запуска измерения при обратном перемещении струны, программа обнуляет интегратор, запускает АЦП, производит обратное перемещение струны, дожидается окончания работы АЦП, считывает из него данные, выводит в специальных окнах графики зависимости от времени величин усиленного наведённого сигнала U и его интеграла $U_{\text{и}}$. После этого, программа производит обработку результатов измерения в зависимости от выбранного режима:

- а) переводит полученные данные $U_{\text{и}}(t)$ в $U_{\text{и}}(x)$ и выводит их в виде графика в специальном окне (где $U_{\text{и}}$ в mV, а x в mm). Вписывает в полученный график ломаную линию, состоящую из 10 отрезков, по методу наименьших квадратов. После этого, находит производную ломаной линии по x и, умножив на калибровочный коэффициент K_1 ,

выводит график зависимости 1 интеграла магнитного поля Vl (Гс·см) от x (мм) в виде гистограммы;

- б) переводит полученные данные $U_n(t)$ в $U_n(x)$. Вписывает ломаную линию по методу наименьших квадратов в полученные значения $U_n(x)$. Находит производную ломаной линии по x в точке x_0 и, умножив на калибровочный коэффициент K_2 , выводит значение 2 интеграла магнитного поля Vl^2 (Гс·см²).

Время, затрачиваемое на эти действия, от 5 до 10 секунд.

4. Настройка режимов работы ондулятора с помощью ИС

В ондуляторах петли гистерезиса магнитного поля в полюсах существенно различны. Действительно для того, чтобы не допустить изменение траектории движения электронов в кольце ускорителя, значения магнитного поля на крайних полюсах ондулятора делают меньше, чем в его центральной части. Изменение магнитного поля в ондуляторе на 0.3 Гс, приводит к изменению 1 интеграла магнитного поля более чем на 100 Гс·см. Поэтому, в ондуляторе сделаны специальные токовые витки, позволяющие корректировать магнитное поле так, что бы значения 1 и 2 интегралов было минимальным. Управлением режимами работы ондулятора занимается специальная “обучаемая” программа. Она осуществляет переход от одного режима работы ондулятора к другому с определённой скоростью и двигаясь в одном направлении по петле гистерезиса. Весь диапазон работы ондулятора был разбит на 15 участков при подъёме поля и на 15 участков при его уменьшении. На краях этих участков при помощи ИС мы настраивали токи корректоров ондулятора и заносили их значения в программу управления режимами ондулятора. Программа при помощи сплайна экстраполировала их на весь участок. Таким образом, пройдя несколько раз по всему диапазону режимов работы ондулятора и внося каждый раз в них коррективы, мы добились того, что во всём диапазоне работы ондулятора 1 и 2 интегралы магнитного поля удовлетворяют техническим требованиям $Vl \leq 20$ Гс·см, а $Vl^2 \leq 2000$ Гс·см².

В процессе настройки режимов работы ондулятора, было произведено несколько сотен измерений как 1, так и 2 интегралов магнитного поля.

Характерный вид и диапазон значений полученных гистограмм 1 интеграла магнитного поля приведены на рисунках 11÷14.

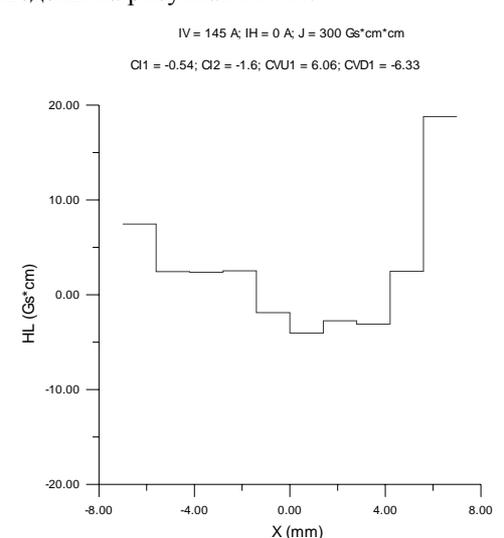


Рис. 11. Распределение HL при максимальном токе в ондуляторе.

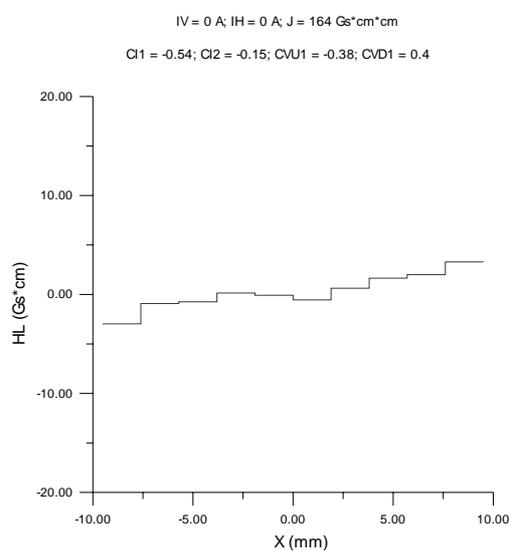


Рис. 12. Распределение HL при нулевом токе в ондуляторе.

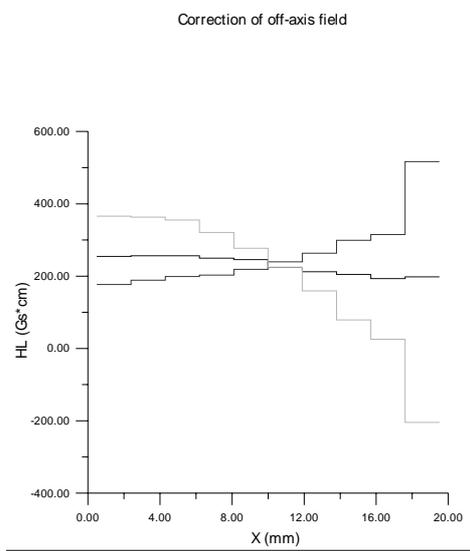


Рис. 13. Коррекция полей в ондуляторе.

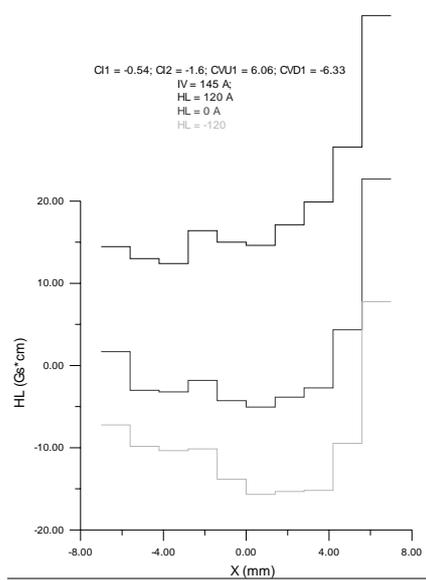


Рис. 14. Влияние горизонтального поля на HL вертикального поля в ондуляторе.

5. Калибровка измерительной системы

Калибровка ИС проводилась с помощью тарированного С образного электромагнита. В качестве магнитопровода в нём использован отожженный пермаллой. Величина 1 интеграла магнитного поля в этом магните была промерена датчиком холла с точностью <2%, и могла изменяться 0 до 32 Гс·см.

Коэффициент K_1 находили следующим образом:

1. выставляли в программе ИС $K_1=1$, величину магнитного поля в калибровочном магните делали равной 0, и производили измерение величины $В1_0$ как описано в пункте 3.
2. Выставляли величину 1 интеграла магнитного поля в калиб-ровочном магните 20 Гс·см, и производили измерение величины $В1_{20}$ как описано в пункте 3.
3. Вычисляли калибровочный коэффициент K_1 по формуле:

$$K_1 = \frac{20}{В1_{20} - В1_0}$$

Коэффициент K_2 находили следующим образом:

1. выставляли в программе ИС $K_2=1$, величину магнитного поля в калибровочном магните делали равной 0, и производили измерение величины $В1_0^2$ как описано в пункте 3.
2. Выставляли величину 1 интеграла магнитного поля в калибровочном магните 20 Гс·см, и производили измерение величины $В1_{20}^2$ как описано в пункте 3.
3. Вычисляли калибровочный коэффициент K_2 по формуле:

$$K_2 = \frac{20 \cdot 450}{В1_{20}^2 - В1_0^2}.$$

6. Точность измерений

Существует 5 основных источника погрешности при измерении ИС:

1. Неточность калибровки измерительной системы тарированным С-образным электромагнитом. Погрешность калибровки С-образного магнита при 20 Гс·см составляет <2%.

2. Дискретность оцифровки сигнала в АЦП. Погрешность составляет $\pm 0.1 \text{ Гс}\cdot\text{см}$ для измерения 1 интеграла магнитного поля и $\pm 45 \text{ Гс}\cdot\text{см}^2$ для измерения 2 интеграла магнитного поля (статистическая погрешность).
3. Шумы усилителей и интегратора. Погрешность составляет $< 0.8 \text{ Гс}\cdot\text{см}$ для измерения 1 интеграла магнитного поля и $< 360 \text{ Гс}\cdot\text{см}^2$ для измерения 2 интеграла магнитного поля (статистическая погрешность).
4. Ошибка измерений из-за провисания струны. Величину этой погрешности можно описать следующими формулами:

$$\Delta B_1 < B_0 \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta}{\pi \cdot L} \cdot 2 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) < 1.8 \text{ Гс}\cdot\text{см},$$

$$\Delta B_1^2 < B_0^2 \cdot \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta}{\pi} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) \approx 400 \text{ Гс}\cdot\text{см}^2,$$

где λ – период ондулятора, L – длина ондулятора, Δ – величина максимального прогиба измерительной струны, x – отклонение точки максимального прогиба измерительной струны от центра ондулятора вдоль траектории движения электронов.

5. Колебания измерительной струны, возникающие вследствие её перемещения, а так же наводимые сигналы внешними электромагнитными полями в измерительном контуре. Величину этой погрешности теоретически оценить невозможно. Для её определения провели следующий эксперимент. В ондуляторе включили самое высокое магнитное поле, и провели 10 измерений ИС в течение 10 минут. Графики значений 1 интеграла магнитного поля наложенные друг на друга приведены на рисунке 15. Довольно большие разбросы значений B_1 на краях этих графиков, объясняются неточностью вписывания на них отрезков ломаной линии по методу наименьших квадратов. На всех остальных участках разброс значений 1 интеграла магнитного поля не превышал $2.5 \text{ Гс}\cdot\text{см}$. Разброс значений 2 интеграла магнитного поля был $< 500 \text{ Гс}\cdot\text{см}^2$.

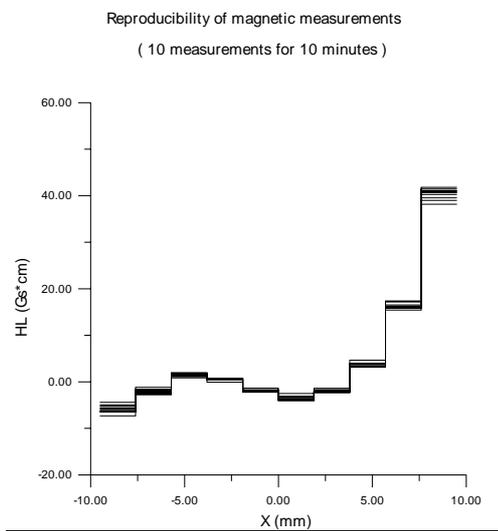


Рис. 15. Измерения HL при максимальном токе в ондуляторе, для определения статистической погрешности ИС.

7. Заключение

Для настройки режимов работы ондуляторов, была создана измерительная система, позволяющая измерять 1 интеграл магнитного поля с точностью $<3 \text{ Гс} \cdot \text{см}$ и 2 интеграл магнитного поля с точностью $<500 \text{ Гс} \cdot \text{см}^2$. Время одного измерения ИС составляет ~ 15 секунд. С помощью этой ИС были настроены эллиптические ондуляторы для PSI (было произведено несколько сотен измерений). Ондуляторы были установлены на накопительное кольцо SLS и запущены в работу. Отклонения электронного пучка на выходе из ондуляторов от начальной траектории, на всех режимах работы ондуляторов, не превышает $1 \div 2 \text{ мкм}$, что полностью удовлетворяет техническому заданию, и подтверждает работоспособность и эффективность ИС.