



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2018-20

С.А. Холоденко, А.В. Артамонов, А.М. Блик, С.А. Горохов,
А.В. Инякин, В.И. Лисин, В.А. Лишин, В.Н. Ноздрачёв,
В.Ф. Образцов, М.К. Полковников, А.В. Попов, В.И. Романовский,
А.С. Садовский, В.К. Семенов, О.В. Стенякин, О.Г. Чикилёв

**Измерения магнитного поля спектрометрического
магнита СП-40 установки ОКА**

Протвино 2018

Аннотация

Холоденко С.А. и др. Измерения магнитного поля спектрометрического магнита СП-40 установки ОКА: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2018-20. – Протвино, 2018. – 10 с., 8 рис.

Разработана и сконструирована система для измерения магнитного поля, позволяющая в автоматическом режиме проводить измерения индукции магнитного поля. Проведено два сеанса по измерению магнитного поля спектрометрического магнита СП-40 установки "ОКА". Измерения проводились для двух режимов работы канала: 12.55 ГэВ/с и 17.7 ГэВ/с, соответствующих току 920 А и 1300 А соответственно. Основной целью измерений является выявление возможных отклонений расчётных значений индукции магнитного поля от измеренных. В работе представлено описание автоматизированной системы измерения магнитного поля, которая была специально разработана, реализована и успешно применялась в обоих сеансах. По предварительным результатам наблюдается различие на уровне 10% от расчётных значений.

Abstract

Kholodenko S.A. et al. B-field measurements of the SP-40 spectrometer magnet of the OKA experimental setup: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2018-20. – Protvino, 2018. – p. 10, figs. 8.

The new system for B-field measurements in the automatic mode has been developed, designed and constructed. B-field measurements of the SP-40 magnet of the OKA setup has been performed during two dedicated runs: in April and December for two main modes: 12.5 GeV/s and 17.7 GeV/s, that corresponds to 920 A and 1300 A respectively. The main goal of these measurements is to identify possible deviations between calculated and measured values. This paper describes an automated magnetic field measurement system. A brief comparison between measured and calculated B-Field values that shows the difference on the level of 10%.

1. Введение

На стадии реконструкции экспериментальных данных возникает необходимость вводить ряд поправочных коэффициентов, корректирующих в том числе и импульсы вторичных заряженных частиц. При этом в программе реконструкции используется дискретная карта магнитного поля, основанная на математических расчётах. Наличие явной асимметрии в конструкции магнита позволяет предположить наличие возможных отклонений расчётных значений от истинного магнитного поля. Основной задачей данной работы является измерение значений всех трёх компонент вектора индукции магнитного поля и его сравнение с расчётной картой поля на предмет значительных отклонений. Ввиду жёстких ограничений как по ресурсам, так и по возможному времени проведения измерений было принято решение использовать имеющийся в наличии датчик Холла MetroLab THM1176-HF [1], в котором размер сенсора составляет $0.15 \times 0.15 \times 0.01$ мм³ и уже реализованы калибровочные поправки от температуры и стабильности напряжения питания. Подробное описание сенсора представлено в работе [2]

Продольный по пучку размер магнита СП-40 составляет 3000 мм, апертура составляет 2700×1350 мм². Установленные магнитные экраны ограничивают апертуру до 2000×1350 мм². Для прецизионного измерения рассеянного магнитного поля система продольного перемещения должна охватывать область, вдвое превышающую размер магнита, т.е. иметь рабочую область 6000 мм. Таким образом, общий объем для измерения магнитного поля составляет $6000 \times 2000 \times 1350$ мм³.

Жёсткие временные ограничения связаны с невозможностью включения системы питания и охлаждения магнитных элементов вне сеансов работы ускорительного комплекса. Если добавить к этому требование стабильной работы магнитного элемента по питанию, охлаждению и т.д., то становится очевидным требование проводить измерения за разумное (≈ 1 недели) время, или 10^4 минут. Если представить весь объем измерений в качестве набора отдельных продольных по пучку измерений, т.н. ‘линейки’, то используя шаг в 50 мм по осям X и Y, получается $\sim 10^3$ продольных из-

мерений. Или 10 минут на одно продольное измерение, в которые уже входит время, требуемое для возврата каретки с датчиком и перемещение на следующее положение по координатам X и Y. Достичь столь высоких темпов измерений возможно лишь полностью исключив фактор человеческих ошибок, т.е. с использованием полностью автоматизированной системы перемещения.

2. Система перемещения

Разработанная система перемещения позволяет в автоматическом режиме последовательно перемещать каретку с датчиком по одной из трёх координат. Датчик Холла крепится в каретке, перемещаемой вдоль оси пучка (ось Z, длина 6000 мм) по верхней плоскости прямоугольной алюминиевой трубы. Каретка приводится в действие с помощью зубчатого ремня GT2 шириной 6 мм и шагового двигателя PL42HD58-D5 [3]. На Рис. 1 представлена фотография системы продольного перемещения на основе профиля Bosch Rexroth с кареткой и закреплённым в ней датчиком Холла, используемая в осеннем сеансе.

Необходимость перемещения вдоль каждой дополнительной оси удваивает количество используемых двигателей. Так, перемещение по горизонтальной оси (ось X) осуществляется с помощью двух кареток, установленных с расстоянием 2000 мм или 3200 мм для первого и второго сеанса соответственно. Перемещение каждой каретки осуществляется по прямоугольной алюминиевой трубе 40x80 с помощью зубчатого ремня GT2 и двух шаговых двигателей, которые синхронно перемещают обе каретки в одном направлении. Требование синхронной работы независимых двигателей может быть выполнено при использовании шаговых двигателей. Для перемещения используются двигатели PL57H76-GB с редукторами 57GB20K.

Для осуществления перемещения по вертикальной оси (ось Y) используются четыре нержавеющей шпильки длиной 2000 мм каждая с резьбой M8, установленные на четырёх вертикальных опорах из прямоугольной алюминиевой трубы 40x80. За вращение каждой из шпилек отвечает свой шаговый двигатель PL57H76-GB через редуктор 57GB50K (весенний сеанс измерений), который в дальнейшем был заменён на 57GB5K для осеннего сеанса, что позволило значительно ускорить процесс перемещения по вертикали.

Перемещению на 1 мм соответствует:

по оси X — 209 шагов;

по оси Y — 15893 или 1703 шагов для весеннего и осеннего сеансов соответственно;

по оси Z — 10 шагов;

Необходимость перемещения по всем трём координатам накладывает ряд специфических требований к плате управления шаговыми двигателями.



Рис. 1. Фотография системы продольного (параллельно оси пучка) перемещения датчика.

3. Блок управления шаговыми двигателями

Специально для проведения измерений разработан и создан управляющий модуль, позволяющий проводить последовательные перемещения по выбранной координате на заданное число шагов/полушагов. В блоке управления также реализована система нормально замкнутых концевых выключателей со считыванием их текущего состояния. Предусмотрена возможность опроса управляющей платы о текущем действии и количестве выполненных шагов, что позволяет эффективно использовать систему перемещения, минимизируя время простоя. Ограничение по току определяется перемещением по оси Y и составляет 12А. На Рис. 2 представлена фотография платы управления.

Для управления контроллером используется следующий набор команд:

- Команда движения, состоящая из 13 байт. Например: «XD0T0S12345F6», где:
Первый байт — имя оси: «X», «Y» либо «Z»;
2 —3: Определяют направление движения: вперёд («D0») либо назад («D1»);
4 —5: Определяют тип движения: Шаг («T0») либо полушаг («T1»);
6 —11: Количество шагов: от «S00000» до «S65535»;
12 —13: Скорость перемещения: от самой низкой («F0») до самой высокой («F9»);
Ответом на команду должно быть 15 байт, первые 13 из которых повторяют принятую команду. Последние два байта соответствуют ошибке: «NO» либо успешному выполнению команды: «OK».
- RESET — команда сброса, ответом на которую служит те же 5 байт текста.
- STATE — команда текущего состояния. Ответом служит набор из 33 байт:
Первый байт — "S";
2 —4: удержание по осям: «Z», «X» и «Y» соответственно (0 —нет удержания, 1 —есть удержание);
5 —10: состояние концевых выключателей: «0» —замкнут либо «1» —разомкнут

- по осям Z, X и Y соответственно;
- 11 —23: последняя принятая команда движения;
- 24 —28: количество сделанных шагов;
- 29 —33: количество требуемых шагов.

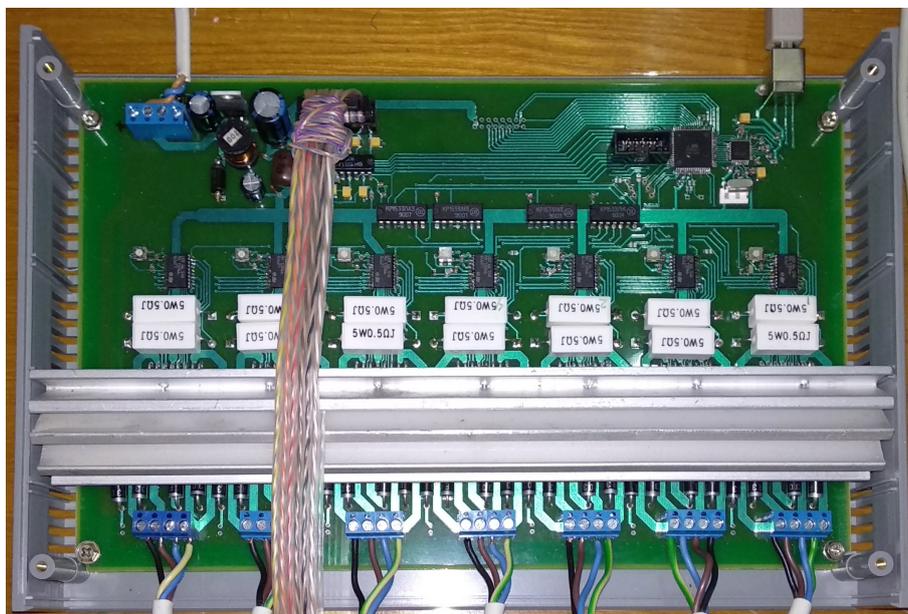


Рис. 2. Фотография модуля управления шаговыми двигателями.

4. Система сбора данных и онлайн-мониторинга

Штатные программные пакеты для вычитывания датчика Холла предназначены для операционных систем Windows и MacOS. Также реализована возможность использовать набор стандартных команд формата SCPI, что позволяет интегрировать датчик в общую систему управления, несмотря на отсутствие штатной программы вычитывания под Linux. На Рис. 3 слева представлено основное рабочее окно созданной системы сбора данных.

На базе офисного компьютера реализована система онлайн-мониторинга, позволяющая отслеживать не только последнее измерение, но и полный набор всех предыдущих измерений. Программа основана на пакете JSRoot[4] и позволяет осуществлять все привычные действия с гистограммами через WEB-интерфейс. Каждое новое измерение, по завершению записи и закрытию соответствующего файла, автоматически обрабатывается и добавляется в список доступных для просмотра через WEB-интерфейс гистограмм. На Рис. 3 справа представлен скриншот программы онлайн-мониторинга. По горизонтальной оси отложено время.

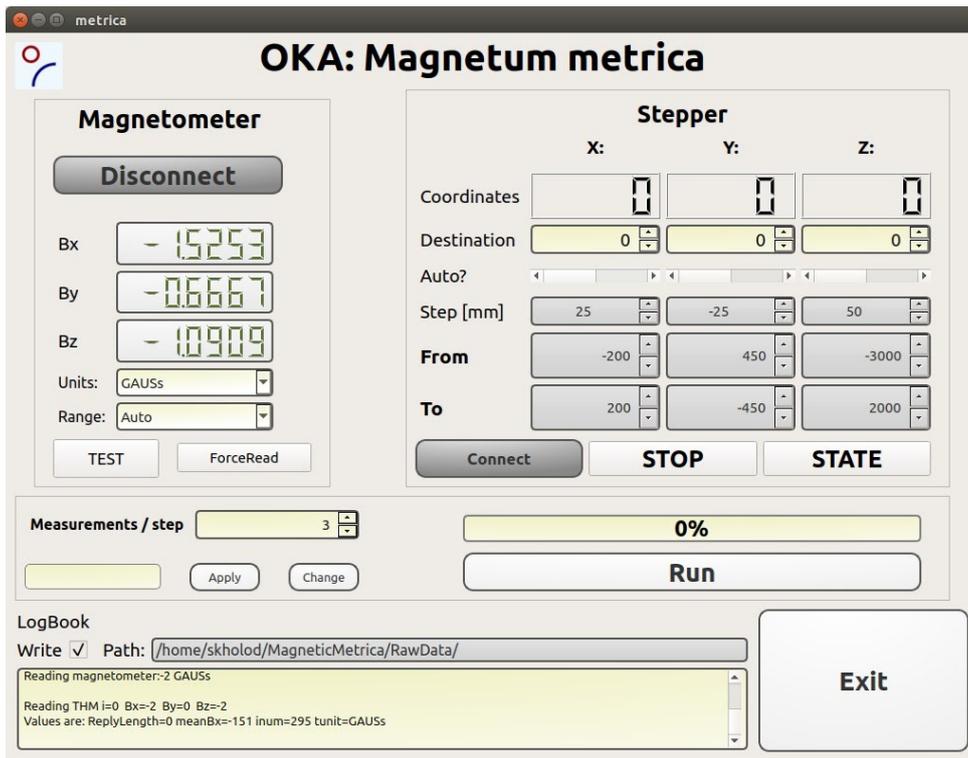


Рис. 3. Рабочее окно программы управления перемещениями и вычитыванием датчика Холла.

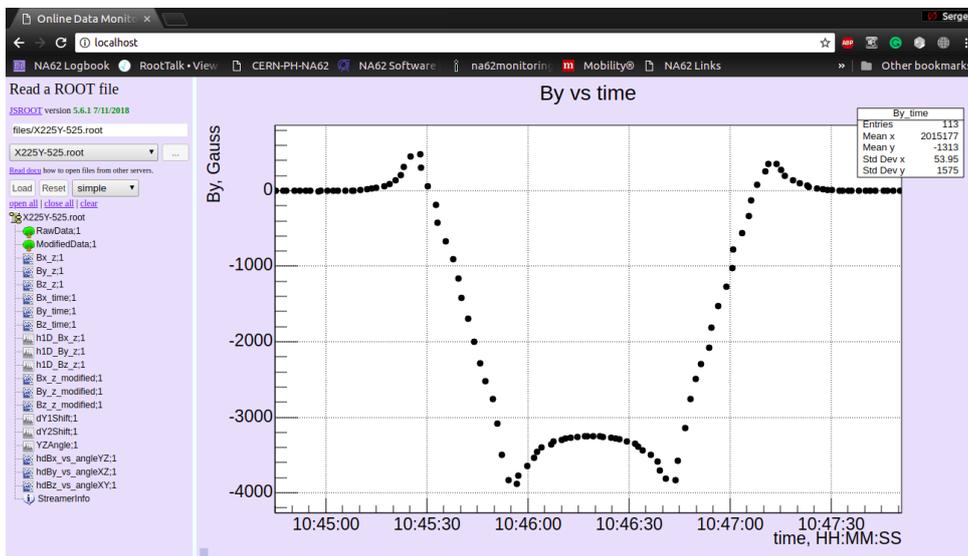


Рис. 4. Рабочее окно программы онлайн-мониторирования.

5. Сеансы измерений

Ввиду особенностей организации системы охлаждения и питания магнитных элементов существуют временные ограничения на проведение сеансов по измерению магнитного поля, которые должны быть синхронизованы с сеансами работы всего ускорительного комплекса У-70. Продольные размеры системы перемещения требуют демонтажа трековых детекторов до и после магнита, что вынуждает работать на времени ускорительного комплекса.

Измерения магнитного поля проводились в два этапа. На первом этапе в качестве продольной направляющей использовалась прямоугольная профильная алюминиевая труба 40×80 общей длиной 6400 мм. Если расположить лабораторную декартову систему координат в центр магнита, то максимальная верхняя точка составляет $Y_{max} = +625$ мм, что соответствует расстоянию 25 мм от датчика до верхнего полюса магнита. Ввиду конструктивной особенности такой системы и вертикальному расположению профильной трубы возникает существенное ограничение вблизи нижнего полюса: минимально возможная координата соответствует положению $Y_{min} = -450$ мм, или 225 мм от нижнего полюса.

Для проведения измерений магнитного поля в областях ближе к нижнему полюсу была подготовлена новая продольная направляющая на основе алюминиевого профиля Bosch Rexroth 40x40L 2N, которая дополнительно усиливалась алюминиевым швеллером. Стоит также отметить особенность конструкции штатного датчика Холла, управляющая плата которого находится на расстоянии 2000 мм от самого датчика. Продольный размер управляющей платы потребовал изготовления специального звена гибкого кабель-канала, наличие промежутка в усиливающем швеллере, а также внес ограничение на максимальную координату во вертикали. На Рис. 5 представлена фотография, на которой наглядно представлено ограничение по вертикальной координате, обусловленное вертикальным положением звена под управляющую плату при приближении к верхнему полюсу.

Первый сеанс измерений

В период с 11/04 по 21/04 проведены измерения магнитного поля магнита СП-40 для двух стандартных режимов работы канала: 12.55 ГэВ/с и 17.7 ГэВ/с , что соответствует режимам магнита $\sim 920 \text{ А}$ и $\sim 1300 \text{ А}$ соответственно. Шаг измерений составляет 50 мм по всем осям. Общее время измерений одного режима составляет ≈ 5 суток круглосуточной работы.

На Рис. 6 представлена характерная зависимость компонент B_X , B_Y , B_Z от координат X и Z .

Второй сеанс измерений

Для проведения измерений вблизи нижнего полюса проведены работы по модернизации системы перемещения. Так, в ходе подготовки к сеансу были перемещены вертикальные опорные столбы за пределы магнита, а в качестве направляющей для



Рис. 5. Фотография системы перемещения. Максимальное верхнее положение определяется размером звена гибкого кабель-канала с управляющей платой.

продольного измерения используется профиль Bosch Rexroth $40 \times 40L2N$, усиленный алюминиевым швеллером. Измерения проводились в период с 20/12 по 28/12 для режима 17.7ТэВ/с или 1300 А. Шаг измерений составляет 50 мм в центре магнита и 25 мм для периферийной области.

На Рис. 7 представлены гистограммы, диапазон по осям в которых соответствует апертуре магнита СП-40, где каждое продольное измерение представлено в виде одного бина в координатах X и Y . Измерения проводятся с постепенным увеличением значения координат по X и Y , так чтобы в конце измерений приблизиться к максимальной верхней области. Несмотря на использование гибкого кабель-канала в осеннем сеансе, после ~ 1500 продольных перемещений возникло повреждение одного из кабелей между датчиком Холла и управляющей платой, что привело к потере ~ 24 часов на идентификацию и устранение неисправности. В связи с этим шаг по X координате был изменён на 50 мм для верхних рядов.

На Рис. 8 представлена зависимость одной из вторичных координат вектора индукции B_Z в зависимости от координаты Y . Данные измерений обоих сеансов хорошо согласуются между собой, в то время как расчётное значение компоненты B_Z оказывается недооценённым.

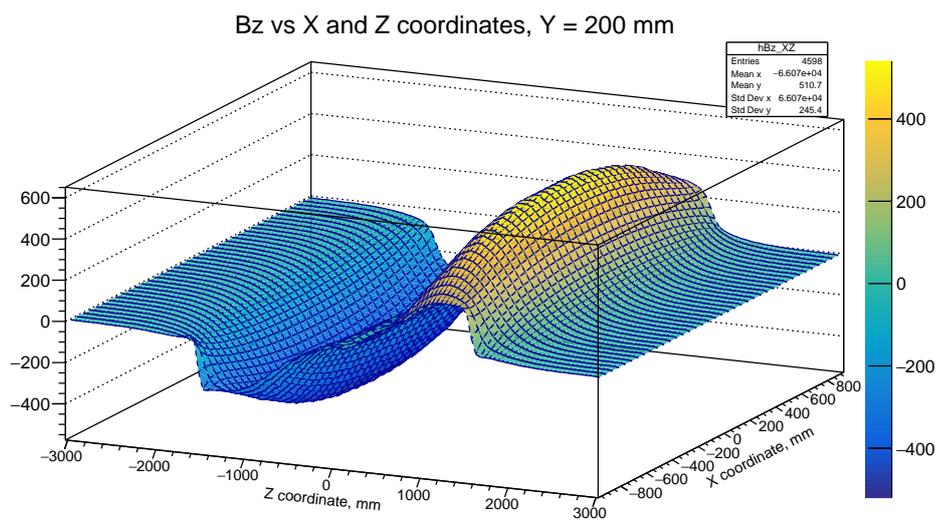
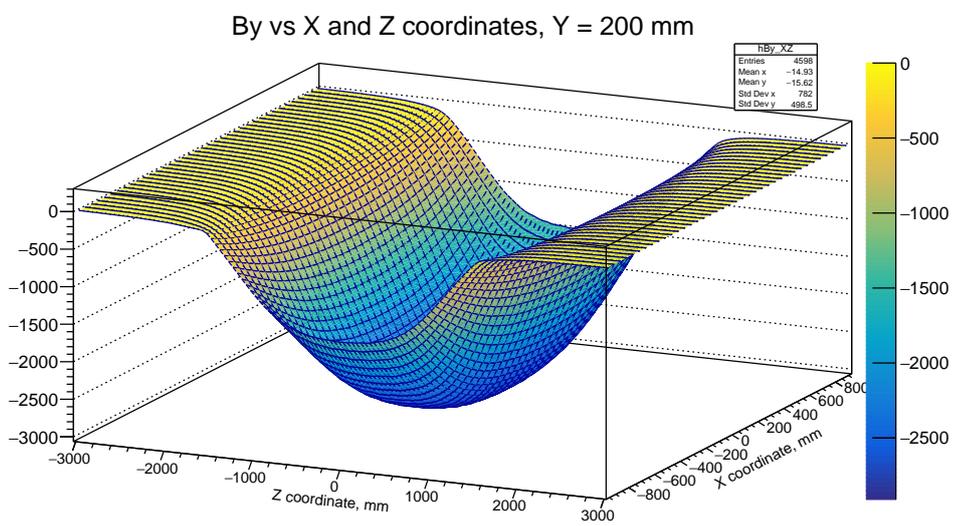
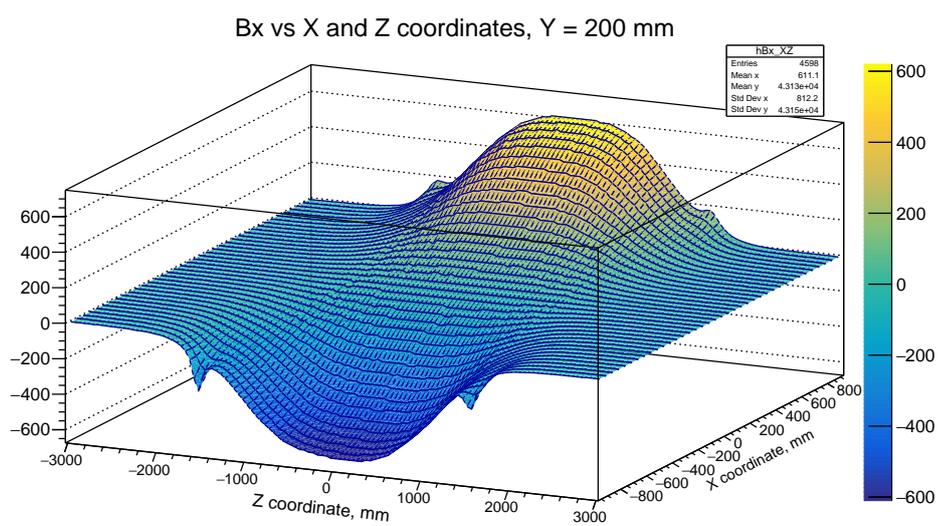


Рис. 6. Компоненты индукции магнитного поля в зависимости от координат X и Z.

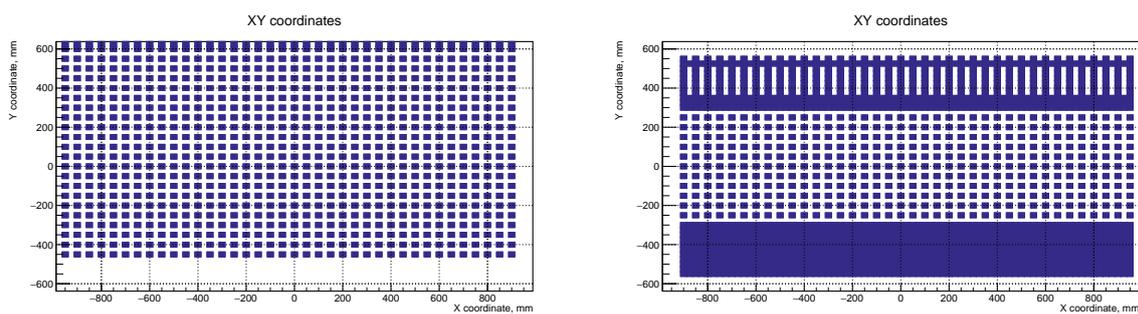


Рис. 7. Распределение продольных измерений магнитного поля от координат X и Y. Для весеннего сеанса (слева) шаг измерений составлял 50 мм по всем осям, в то время как для осеннего (справа) сеанса шаг варьировался и составлял 50 мм в центральной области и 25 мм ближе к полюсам магнита.

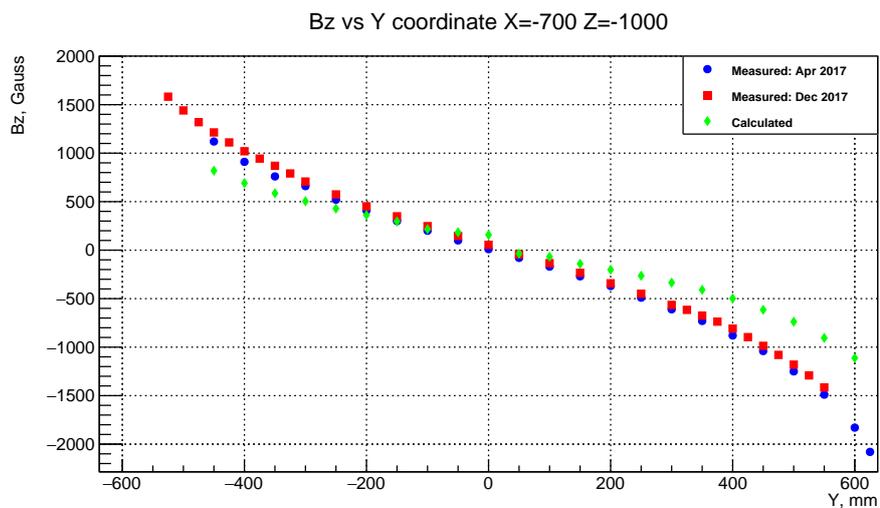


Рис. 8. Гистограмма зависимости вторичной компоненты B_Z от вертикальной координаты Y для экспериментальных данных (красные и синие метки) и данных расчётного значения поля (зелёные метки).

6. Заключение

Разработана и создана система измерения магнитного поля, позволяющая без вмешательства сменного персонала проводить измерения в больших объемах с заданным шагом. Проведено два сеанса измерений магнитного поля спектрометрического магнита СП-40 для двух основных режимов работы 21 канала: режим 17.7 ГэВ/с и режим 12.55 ГэВ/с. Полученные значения индукции магнитного поля для обоих сеансов хорошо согласуются между собой.

Наблюдено расхождение расчётного значения индукции магнитного поля с измеренными значениями. Так, используя нормировку на значение индукции поля в центре магнита, интеграл по основной компоненте поля $\int B_Y dz$ для расчётного поля превышает измеренный на 8-10%, в то время как для второстепенной компоненты $\int B_X dz$ расчётное значение оказывается недооценённым также на 8-10%.

Авторы выражают глубокую благодарность В.В Полякову и К.Г. Качнову за помощь в разработке системы и выполнение высококвалифицированных механических и фрезерных работ, коллективу ОЭУ У-70 за обеспечение стабильных условий работы магнитного элемента на протяжении всего периода измерений, а также коллективам КС и АТХ за организацию и своевременную доставку негабаритного груза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта N18-02-00179.

Список литературы

- [1] MetroLab web-site <https://www.metrolab.com/products/thm1176/>
- [2] D. R. Popovic, S. Dimitrijevic, M. Blagojevic, P. Kejik, E. Schurig and R. S. Popovic, "Three-Axis Teslameter With Integrated Hall Probe," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 56, no. 4, pp. 1396-1402, Aug. 2007.
doi: 10.1109/TIM.2007.900133
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.836.7014&rep=rep1&type=pdf>
- [3] https://purelogic.ru/catalog/elektroprivod/shagovye_dvigateli_i_aksessuary/shagovye_dvigateli/
- [4] <https://root.cern.ch/js/>

Рукопись поступила 5 декабря 2018 г.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

С.А. Холоденко и др.

Измерения магнитного поля спектрометрического магнита СП-40 установки
ОКА.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Подписано к печати 07.12.2018. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 0,9. Уч.-изд.л. 1,16. Тираж 80. Заказ 21. Индекс 3649.

НИИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2018-20,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2018
