

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

А.М. Батраков, П.В. Вагин, П.Д. Воблый,
А.Б. Огурцов, Д.С. Шичков

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕМЕЩАЕМЫХ КАТУШЕК

ИЯФ 2008-34

НОВОСИБИРСК
2008

**Программное обеспечение
систем измерения магнитных полей
с помощью перемещаемых катушек**

*А.М. Батраков, П.В. Вагин, П.Д. Воблый,
А.Б. Огурцов, Д.С. Шичков*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В ИЯФ СО РАН разработан комплект аппаратуры для проведения прецизионных измерений с помощью перемещаемых катушек и создано несколько систем, базирующихся на этой аппаратуре. В данной работе представлено Windows-ориентированное программное обеспечение этих систем. Описываются возможности программ и решения, позволившие унифицировать часть программных продуктов. Приводятся краткие описания разработанных систем и примеры их использования.

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

Введение

Выпускаемые в ИЯФ магнитные элементы для ускорителей заряженных частиц – дипольные магниты, магнитные линзы, корректирующие катушки, встраиваемые устройства для генерации СИ – проходят процедуру измерения их параметров. Измеряются карты магнитных полей, их однородность, градиенты, положение магнитных осей и т.п. Для измерения таких важных характеристик магнитных элементов, как первый и второй интегралы поля, широкое применение находит индукционный метод, в котором используется интегрирование сигнала со специализированных катушек при их перемещении в магнитном поле измеряемого устройства. Хотя основы индукционного метода остаются неизменными на протяжении десятилетий, электронное оборудование и программное обеспечение постоянно совершенствуются.

В Институте разработаны VME-модули для проведения измерений с помощью перемещаемых катушек: интегратор с цифровым выходом и малошумящие усилители с низким температурным дрейфом [1].

В препринте описывается программное обеспечение систем с перемещаемыми катушками, базирующихся на разработанной аппаратуре.

1. Системы измерения магнитных полей при помощи перемещаемых катушек

В последнее время в ИЯФ было создано несколько систем, использующих новую аппаратуру для прецизионных измерений постоянных магнитных полей [1, 2].

Опишем кратко разработанные системы.

1.1 Измерение параметров магнитных линз

С помощью катушек, вращающихся относительно оси, измеряется широкий набор параметров магнитных линз: величины пространственных гармоник магнитных полей, эффективная магнитная длина, смещения и углы наклона магнитной оси, поворот плоскости линзы относительно гирдера. Этот метод является незаменимым инструментом для правильной установки линз.

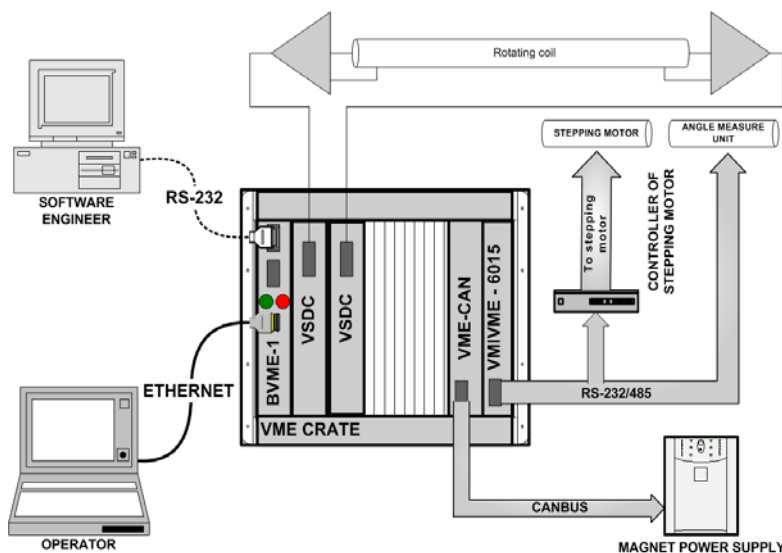


Рис. 1.1. Структурная схема системы измерения параметров магнитных линз.

Структурная схема измерительной системы параметров магнитных линз изображена на рисунке 1.1. Измерительная система включает в себя:

1. Персональный компьютер, работающий под управлением операционной системы семейства MS Windows 2000/XP.
2. VME-крейт, в состав которого входят следующие модули:
 - * контроллер VME шины (BVME-1);
 - * два интегратора с цифровым выходом (VsDC);
 - * плата ввода/вывода (VMIVME-6015);
 - * CAN-контроллер (VME-CAN).
3. Измерительная катушка.
4. Шаговый двигатель с управлением по шине RS-485, вращающий измерительную катушку.
5. Измеритель угловых перемещений (ЛИР-512), определяющий угол поворота катушки.
6. Два источника тока, управляемые по шине CANBUS.

Измерительная катушка помещается в апертуру магнитной линзы так, что сторона, вокруг которой совершается вращение, расположена вдоль оси линзы. Один из способов измерений состоит в том, что катушка совершает последовательные повороты на углы порядка нескольких градусов. На каждом повороте сигнал с катушки интегрируется и таким образом измеряется приращение величины тангенциальной составляющей магнитного потока (или усредненного по катушке поля, т.к. геометрия катушки не изменяется).

Изменение угла поворота фиксируется точным измерителем с погрешностью $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ рад. Если суммировать измеренные приращения, то получим зависимость величины магнитного поля от угла, из которой вычисляются остальные параметры.

1.2 Измерение первого и второго интегралов магнитного поля в вигглерах

От встраиваемых в ускоритель устройств (вигглеры, ондуляторы) требуется, чтобы они не вносили существенных искажений в орбиту пучка.

Угловое отклонение пучка пропорционально первому интегралу магнитного поля $\Psi = \frac{e}{E} \int_0^L B(l) dl$, где $B(l)$ – магнитное поле, L – длина устройства, e – заряд частицы, E – энергия частицы, а поперечное смещение частицы относительно первоначальной траектории пропорционально второму интегралу магнитного поля в вигглере: $\Delta = \frac{e}{E} \int_0^L dl \int_0^l B(l) dl$.

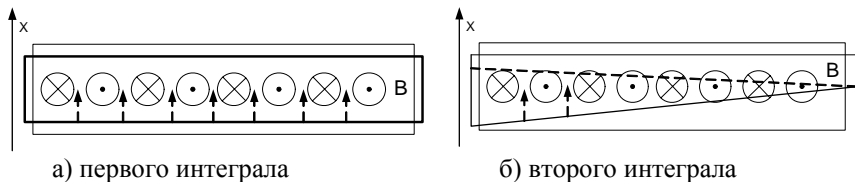


Рис. 1.2. Схема измерения интегралов магнитного поля.

Способ измерения 1-го и 2-го интегралов описан в [3]. Катушка образована двумя струнами, натянутыми вдоль измеряемого устройства и соединёнными так, чтобы получился рамочный контур. Одна из них закреплена неподвижно, а вторая перемещается в магнитном поле. Если перемещать оба конца струны перпендикулярно полю, как показано на рисунке 1.2 (а), то интеграл по времени от наведенного сигнала будет пропорционален первому интегралу магнитного поля. А если один из концов струны закрепить неподвижно, а второй перемещать так, как показано на рисунке 1.2 (б), то будет измеряться второй интеграл.

Структурная схема измерительной системы, применяющейся в этом случае, изображена на рисунке 1.3.

Как видно из рисунка, в состав системы входят те же самые устройства, что и в случае измерения линз, однако их конфигурация и количество несколько иное: появился второй шаговый двигатель и исключён из системы измеритель угловых перемещений.

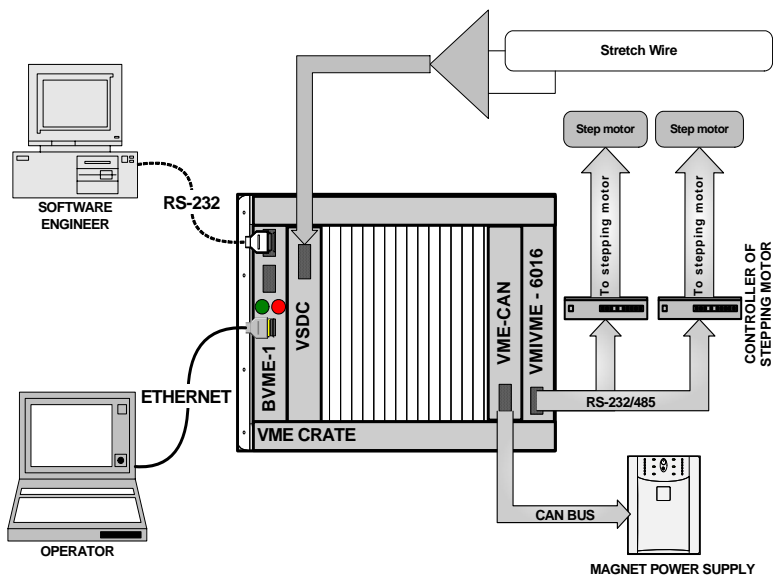


Рис. 1.3. Структурная схема системы измерения первого и второго интегралов магнитного поля.

1.3 Измерение продольного распределения 1-го интеграла поля в вигглерах

При изготовлении вигглеров – затухателей на постоянных магнитах для источника СИ Petra-III в DESY необходимо было получение первых интегралов вертикального и горизонтального полей, не превышающих ± 100 Гс·см при полном интеграле от полюсов одной полярности $\pm 1.8 \cdot 10^6$ Гс·см. Для достижения указанной величины требовалась очень тщательная механическая юстировка всех полюсов. С целью выявления аномальных участков, где «набираются» интегралы, необходимо знать их поведение вдоль устройства и к тому же для всей поперечной апертуры.

Для подобных измерений используется так называемая λ -катушка, имеющая длину, равную периоду вигглера [1, 2]. При перемещении λ -катушки сигнал основной гармоники сильно подавляется, приближаясь в идеальном случае к нулю. В результате удаётся измерить незначительные отклонения от идеальности на фоне очень больших интегральных значений.

Для получения поперечного сечения поведения 1-го интеграла по длине вигглера применяют несколько катушек, намотанных на одном каркасе (рис. 1.4). Измерительная часть системы содержит соответствующее количество интеграторов, устройства управления шаговым двигателем и контроллер крейта.

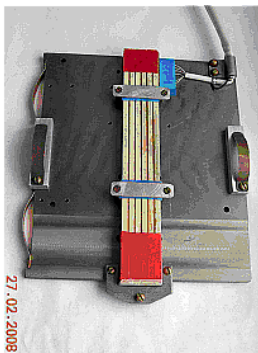


Рис. 1.4. Каретка и керамический носитель с 5-ю λ -катушками.

Из приведённых примеров видно, что все измерительные системы имеют похожую структуру и построены на одних и тех же модулях. Их основное отличие заключается в конструкции измерительной катушки и способе её перемещения. Такое использование унифицированных аппаратных средств создаёт предпосылки для унификации программного обеспечения.

2. Программное обеспечение

Функции программного обеспечения измерительных систем можно разделить на три группы (рисунок 2.1):

- * конфигурирование и управление аппаратурой измерительной системы;
- * проведение измерений и сохранение данных;
- * обработка и представление данных.

Первая из них (Configure and Control Hardware) включает в себя функции по настройке, управлению и тестированию аппаратных средств измерительных систем. В силу того, что все системы построены на одной аппаратной базе, возникает возможность выделить эти функции в отдельный программный модуль, и использовать его во всех разрабатываемых программах без изменений. Такой подход позволяет ускорить разработку программного обеспечения для новых систем и сократить время, необходимое для его тестирования.

Оставшиеся две группы отвечают за проведение измерений, сохранение, обработку и представление их результатов. Эта часть программного обеспечения сильно зависит от типа измеряемого магнита и обработки данных. Поэтому для каждой из систем её приходится реализовывать заново.

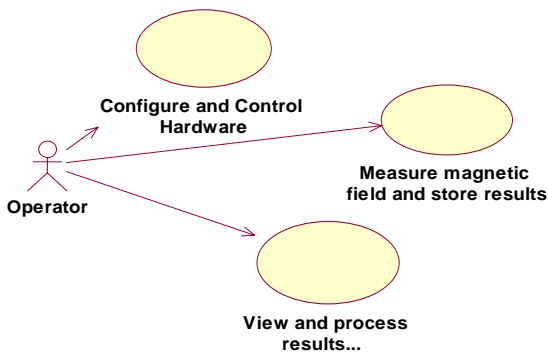


Рис. 2.1. Функции программного обеспечения.

Как уже говорилось, аппаратура измерительной системы выполнена в стандарте VME. В качестве CPU использовался контроллер BIVME1, разработанный в ИЯФ, и программно поддерживаемый операционной системой μ CLinux.

Реализация полного программного обеспечения в рамках контроллера VME с сохранением всех требующихся функций невозможна. Поэтому было решено разделить его на две части (рисунок 2.2). Первая из них (клиент) должна быть программой, исполняемой на персональном компьютере под управлением операционной системы семейства MS Windows 2000/XP. В ее функции входит управление измерениями, а также сохранение, обработка и представление результатов.

Вторая часть (сервер) – набор однотипных программ (сервисов) VME контроллера. Он предназначен для предоставления управления аппаратными средствами программам персонального компьютера.

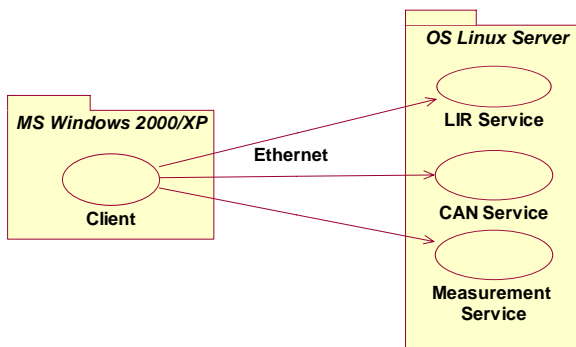


Рис. 2.2. Структура программного обеспечения.

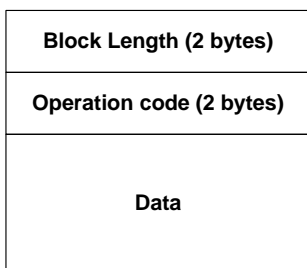


Рис. 2.3. Структура данных клиент-сервер.

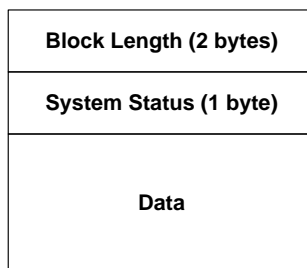


Рис. 2.4. Структура данных сервер-клиент.

Сервер и клиент обмениваются блоками данных, структура которых изображена на рисунках 2.3 и 2.4, по сети Ethernet. Клиент при посылке команды серверу должен указать:

- * длину блока данных (2 байта);
- * код команды (2 байта);
- * данные, зависящие от посылаемой команды.

Сервер на каждую принятую команду должен послать ответ, в котором содержатся следующие поля:

- * длина блока данных;
- * статус выполнения команды;
- * данные, зависящие от принятой команды и результатов ее исполнения.

Такой формат не предусматривает проверки целостности данных. Но это и не требуется. Протокол обмена данными TCP, применяемый в данном случае, гарантирует доставку данных от отправителя получателю.

Рассмотрим подробнее элементы клиента и сервера.

Как говорилось ранее, сервер предоставляет клиенту доступ к функциям настройки и управления однотипной аппаратурой измерительных систем. Поэтому сервер должен быть в достаточной степени унифицированным, чтобы иметь возможность управлять любой из измерительных систем.

Чтобы обеспечить возможность простого переконфигурирования сервера для конкретной измерительной системы, он был разбит на три независимые части (смотри рисунок 2.2). Каждая из них работает со своим классом устройств. Так, LIR_Service управляет взаимодействием с измерителем угловых перемещений, CAN_Service – со всеми устройствами, подключаемыми к шине CAN, а Measurement_Service – с шаговыми двигателями и интеграторами.

Такое разделение сервера на три части, имеет следующие преимущества:

- * задействуются только необходимые в данной системе сервисы;
- * упрощается их модификация и сокращается время на отладку;
- * при необходимости легко добавляется новый сервис.

Рассмотрим структуру программного обеспечения VME контроллера (рисунок 2.5). Пользовательская программа (в нашем случае Service) может получить доступ к аппаратуре измерительной системы (CAN-контроллеру, интеграторам (VSDC) и плате ввода/вывода VMIVME-6015), подключенным к VME шине (VME Bus), только через системные вызовы ядра операционной системы (Linux Kernel), использующие для этих целей, драйверы устройств (Device Drivers).

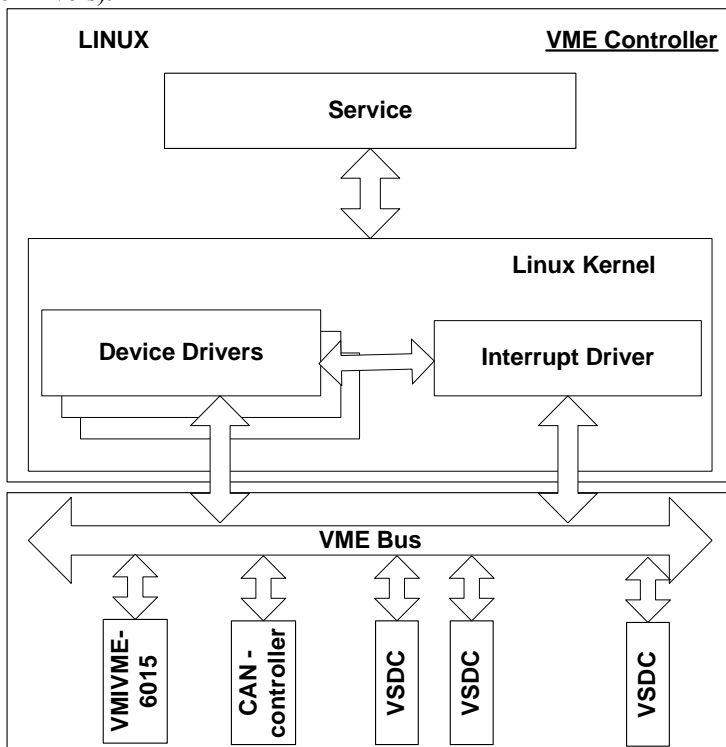


Рис. 2.5. Структура программного обеспечения VME контроллера.

Драйвер устройства – это подпрограмма ядра операционной системы, с помощью которой операционная система получает доступ к аппаратным средствам (в нашем случае VME модулям) стандартным образом.

Всего было разработано три независимых драйвера устройств - по числу типов VME модулей, применяемых в измерениях. Они предоставляют программные функции для работы с интеграторами, CAN-контроллером и платой ввода-вывода (VMIVME-6015).

Каждое из этих устройств работает по прерываниям, выставляя на VME шину сигнал запроса, когда ему надо привлечь к себе внимание контроллера. При этом операционная система контроллера должна вызвать специализиро-

ванную функцию (обработчик), обрабатывающую это прерывание. Для каждого из прерываний допускается существование только одного обработчика.

Всего на VME шине предусмотрено 7 линий прерываний, которые в сочетании с 255 возможными векторами прерываний позволяют однозначно определить, какой именно модуль выставил запрос. Однако контроллер реализован таким способом, что операционная система рассматривает все эти прерывания как одно – прерывание от VME шины.

Это означает, что обрабатывать прерывания может только один драйвер, а остальные просто не смогут зарегистрировать свою функцию – обработчик прерывания, и, соответственно, не смогут работать с этим прерыванием. Решить эту проблему можно двумя способами. Первый из них заключается в том, чтобы использовать один драйвер, который может работать со всеми устройствами и обрабатывать их прерывания. Но такой драйвер будет слишком сложным в разработке и отладке. Кроме того, при добавлении новых устройств в систему, его потребуется модернизировать и заново тестировать.

Второй вариант реализации обработки прерываний от многих устройств, заключается в разработке драйвера виртуального устройства (Interrupt Driver), функции которого состоят в следующем:

- * регистрации функций, обрабатывающих прерывания VME шины;
- * обнаружении прерывания на VME шине;
- * идентификации запрошенного прерывания и вызова соответствующей функции-обработчика.

Такой способ обработки прерываний позволяет легко добавлять новые драйверы устройств, не меняя при этом существующие. Этот способ и был реализован.

Еще один элемент программного обеспечения контроллера VME – набор сервисов. Все они имеют одинаковый рабочий цикл (рисунок 2.6) и функционируют следующим образом.

После запуска программы сервис определяет, все ли модули присутствуют в системе, и выполняет их первоначальное конфигурирование. Затем сервис ждёт, когда к нему подключится клиент, после чего переходит в рабочий цикл. Находясь в рабочем цикле, большую часть времени сервис ожидает команды клиента. После того, как команда была получена, она декодируется, и проверяется возможность ее исполнения. Если полученную команду выполнить невозможно или она неизвестна, клиенту отправляется соответствующее уведомление. Если всё в порядке, сервис исполняет ее, обращаясь к аппаратной части через соответствующие драйверы, и возвращает клиенту состояние системы и результаты выполнения команды.

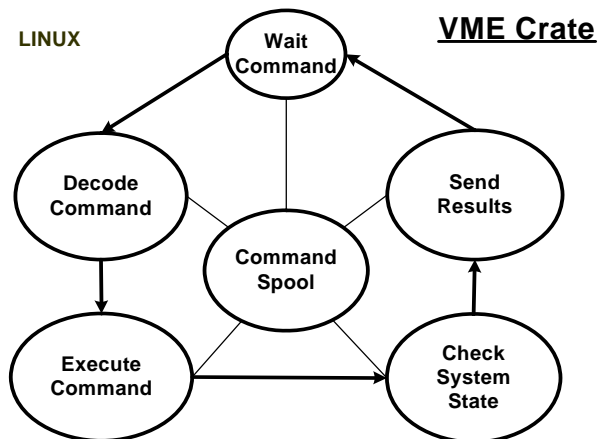


Рис. 2.6. Структура сервиса.

Вторая часть программного обеспечения системы измерения магнитных полей – Win32 приложение или клиент. В общем случае оно должно предоставлять оператору следующие возможности:

- * конфигурирование и управление периферийными устройствами;
- * управление процессом измерения;
- * сохранение и восстановление результатов измерения;
- * формирование отчетов о проводимых и проведенных измерениях.

Клиент состоит из следующих модулей (рисунок 2.7).

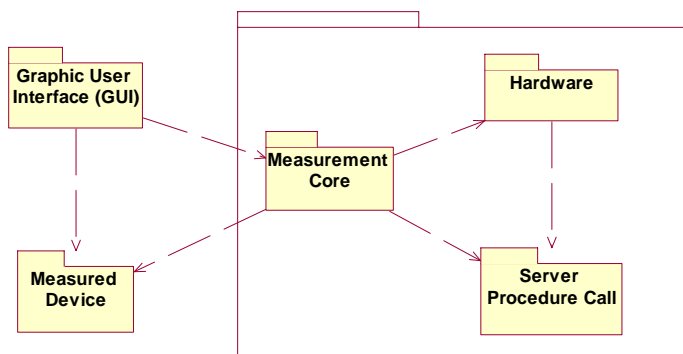


Рис. 2.7. Структура клиента.

Наиболее сложным из модулей клиента – модуль пользовательского интерфейса (Graphic User Interface). Именно он предоставляет оператору информацию о том, как проходит процесс измерения магнита, о состоянии системы, выводит результаты измерения и формирует отчеты. Таким образом,

этот модуль является связующим звеном между пользователем и измерительной системой.

Следующий программный модуль (Measured Device) содержит информацию о параметрах измеряемого магнита, алгоритмы обработки результатов измерения и сами результаты.

Эти два модуля зависят от типа проводимых измерений и сильно меняются в зависимости от предназначения измерительной системы.

Оставшиеся три модуля (Measurement Core, Hardware и Server Procedure Call) образуют ядро Win32 программного обеспечения измерительной системы. Они присутствуют без изменений во всех разработанных программах. Простейший из них – это модуль взаимодействия с сервером (Server Procedure Call). Его назначение состоит в обеспечении связи между клиентом и сервером. Совместно с серверным программным обеспечением, он реализует сервис RPC (Remote Procedure Call). Таким образом, остальные модули становятся независимыми от реализации взаимодействия с серверным программным обеспечением. И изменение реализации серверных функций не приведет к необходимости вносить изменения в них.

Следующий модуль (Hardware) содержит описание периферийных устройств и инкапсулирует в себе все особенности работы с ними.

Измерительный модуль (Measurement Core) реализует алгоритм проведения измерений.

Алгоритм проведения измерений изображен на рисунке 2.8.

Работа начинается с того, что оператор создает новую или открывает существующую измерительную сессию, в которой указывается, какой магнит будет измеряться. Кроме того, измерительная сессия содержит различные сведения, являющимися неизменными для всех измерений в текущей сессии: длину магнита, размеры линз, калибровочные коэффициенты и т.п.

После того, как сессия будет создана или открыта, оператору необходимо создать новое или открыть уже существующее измерение. Если оператор создает новое измерение, то на следующем шаге он должен настроить параметры использующихся аппаратных средств измерительной системы.

Так, например, при измерении магнитных мультиполей требуется сконфигурировать два интегратора, один шаговый двигатель, измеритель угловых перемещений. А если измеряются первый и второй интегралы магнитного поля, то необходимо настроить один интегратор и два шаговых двигателя.

После этого проводятся сами измерения. Первая операция – позиционирование измерительной катушки в начальное положение. С этого положения начинается последовательность шагов, каждый из которых включает в себя:

- * запуск интеграторов;
- * изменение положения катушки;
- * считывание данных с интеграторов.

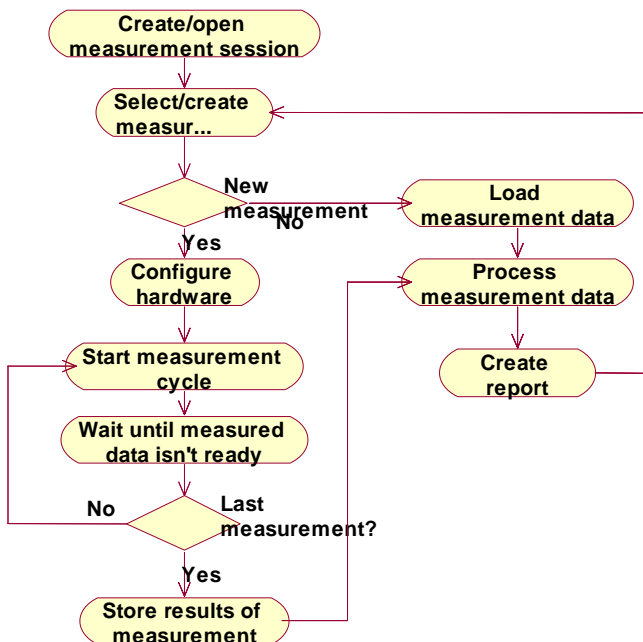


Рис. 2.8. Алгоритм измерения.

Измерительные циклы повторяются, пока не будет выполнено условие завершения текущего измерения. В зависимости от задачи, это может быть поворот измерительной катушки на 360° , смещение измерительного контура на заранее указанное расстояние, выполнение катушкой требуемого количества шагов и т.п. По окончании измерения его результаты записываются в указанный оператором файл.

Далее, программное обеспечение проводит обработку измеренных данных и формирует отчеты.

3. Обработка и представление результатов

Несмотря на то, что программное обеспечение созданных измерительных систем имеет много общего, оно имеет существенные различия в модулях пользовательского интерфейса и обработки результатов. Поэтому рассмотрим каждую из программ отдельно.

3.1. Первый и второй интегралы

Для того, чтобы начать измерения, оператор должен указать:

- * диапазоны и режимы аппаратуры;
- * тип проводимого измерения (1-й или 2-й интеграл);
- * координаты начала и окончания движения струны;
- * шаг перемещения струны;
- * количество циклов, которые необходимо выполнить в указанном интервале положений струны с целью дальнейшего усреднения данных;
- * значение координаты струны для дополнительной обработки результатов (см. далее).

Рабочее окно программы представлено на рисунке 3.1.

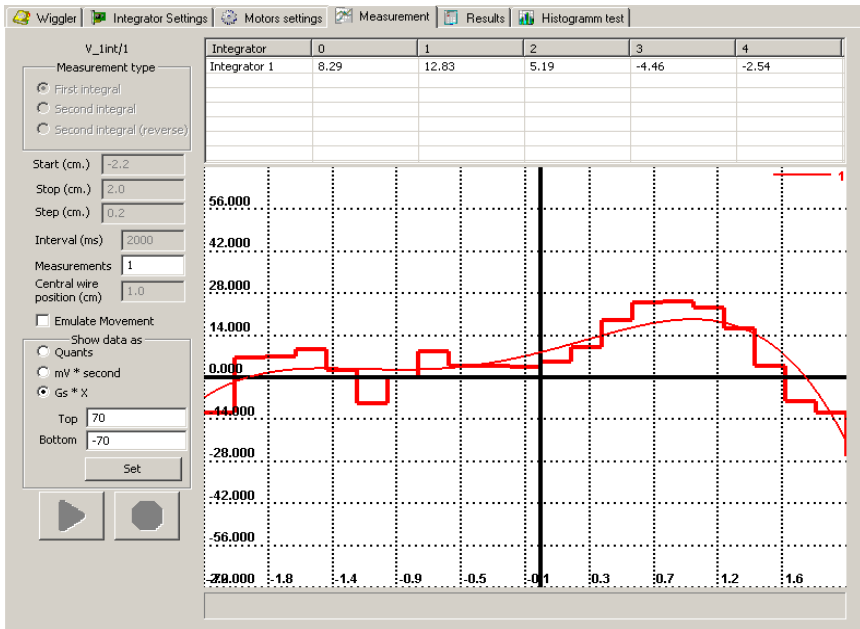


Рис. 3.1. Рабочее окно программы.

Работа начинается с определения аппаратного смещения нуля, т.е. значения интеграла при выбранном времени интегрирования, измеряемого без перемещения струны. Смещение нуля вычисляется как среднее по нескольким циклам, количество которых задает оператор. В дальнейшем, аппаратное смещение вычитается из результата каждого измерения.

После того, как смещение нуля определено, программа инициирует измерение интеграла с заданным шагом в указанном диапазоне перемещений струны. Интеграл, измеренный на каждом шаге, относится к середине этого отрезка. График полученной зависимости строится на экране. Значения в промежутках между отсчётами вычисляются с помощью интерполяционного полинома, степень которого выбирается оператором.

Возможно проведение нескольких циклов однотипных измерений с последующим усреднением результатов. Это позволяет уменьшить требования к механическим вибрациям и электрическим наводкам.

Иногда для полной аттестации магнитного элемента возникает необходимость в определении «матрицы интегралов», т.е. в измерении зависимости интегралов поля от координат, как в направлении движения струны, так и в перпендикулярном направлении $\{I(x,y)\}$. В таких случаях измерения проводятся с помощью нескольких, параллельно натянутых и одновременно перемещаемых струн, либо с помощью одной струны, последовательно сдвигая её в перпендикулярном направлении для каждого «продольного» измерения. Для обработки данных, полученных таким способом, программное обеспечение предоставляет некоторые дополнительные возможности.

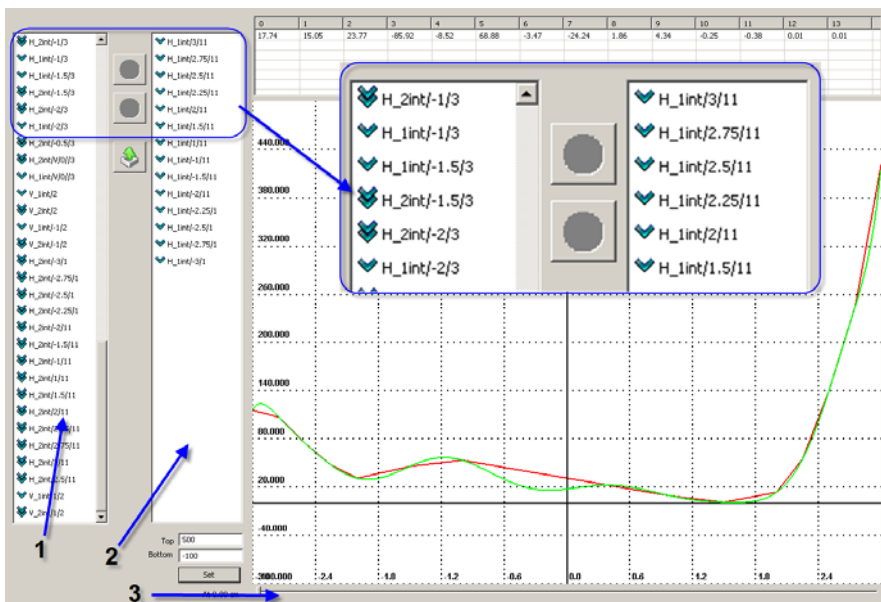


Рис. 3.2. Дополнительная обработка результатов измерений.

Так, например, если применяется одна струна, оператор должен указать, какие из проведенных измерений следует собрать в одно. Далее, используя эти комбинированные данные, программа строит необходимые распределе-

ния. При проведении измерений, подготавливаемых к такой «сборке», необходимо каждый раз задавать значение соответствующей перпендикулярной координаты, один и тот же интервал перемещения струны и одинаковый шаг. На рисунке 3.2 показана одна из такихборок. Оператор, из списка проведенных измерений для текущего магнита (1), выбирает те, что следует включить в «сборку» (2). В измерениях, включенных в «сборку», программа ищет результаты с одинаковой координатой в направлении движения струны, и по этим результатам строится график зависимости интеграла магнитного поля от перпендикулярной координаты. Если несколько измерений имеют одинаковую перпендикулярную координату, то значение интеграла в рассматриваемой точке усредняется по всем таким измерениям. При помощи слайдера (3) пользователь может изменять координату вдоль направления движения, а программа будет строить график для выбранной точки.

3.2. Магнитные мультиполи

Программное обеспечение для измерения мультиполей используется с несколькими типами магнитных элементов. Поэтому оператор перед началом измерения должен указать, какой магнитный элемент будет измеряться: диполь, квадруполь, секступоль или октуполь. В таких измерениях применяются два интегратора, шаговый двигатель и измеритель угла поворота, поэтому параметры этих устройств также должны быть настроены необходимым образом.

Помимо настроек аппаратных средств и выбора магнитного элемента, требуется определить величину угла, на который следует поворачивать измерительную катушку за один шаг измерения, и количество циклов для усреднения. После того, как все перечисленные настройки произведены, можно начинать измерения.

Измерение параметров магнитных мультиполей, как и в случае измерения интегралов магнитного поля, начинается с определения аппаратного смещения нуля, которое выполняется аналогичным образом.

Измерение параметров мультиполей происходит так, как описано в разделе 1.1, поэтому подробно на процедуре здесь останавливаться не будем, а опишем только способ представления результатов.

На рисунке 3.3 изображено окно программы с данными измерения. В этом случае измерялась секступольная линза. Помимо графика магнитного поля линзы (1), программа по оси Y выводит необработанные данные, считанные с интеграторов (2), результаты измерения аппаратных нулей (3) и шаг, с которым было проведено измерение (4). Эти графики, за исключением величины измерительного шага, строятся для левой и правой измерительных катушек.

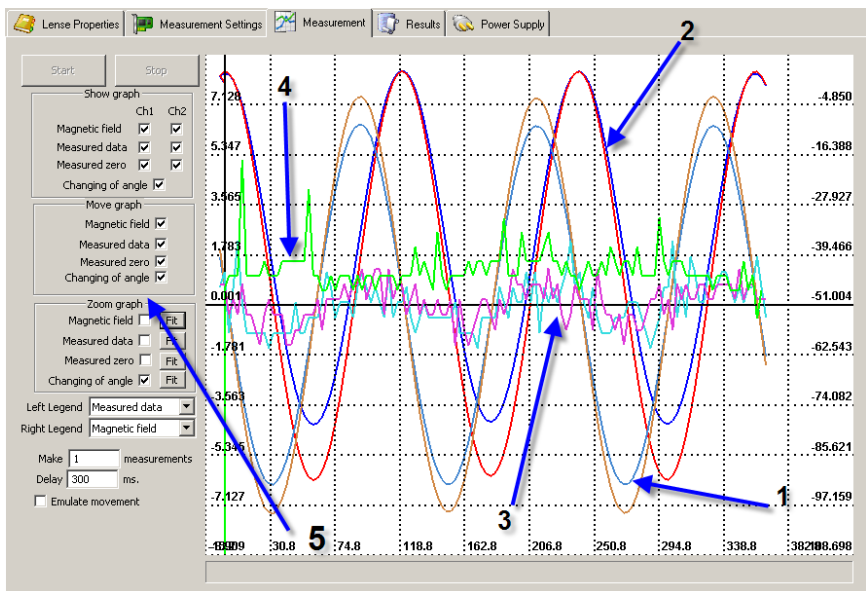


Рис. 3.3. Рабочее окно программы.

При помощи панели управления (5) оператор может выбирать:

- * какие из графиков следует отображать;
- * проводить масштабирование выбранных графиков и изменять их положение на экране;
- * выбирать к чему будет относиться правая и левая оси Y.

Необходимо отметить, что ось X – это угол поворота измерительной катушки, общий для всех графиков.

Если полученную зависимость магнитного поля от угла поворота разложить в ряд Фурье, взяв в качестве периода полный оборот, то будут получены мультипольные коэффициенты, характеризующие свойства магнитного поля линзы [5].

Для разложения данных в ряд применялся алгоритм дискретного преобразования Фурье по методу Cooley-Tukey [4]. Этот алгоритм позволяет рассчитать N первых коэффициентов разложения функции в ряд Фурье по 2N известных дискретных значений этой функции на одном периоде ($N = 2^k$ – обязательное условие).

Важным требованием к данным, накладываемым применявшимся алгоритмом, является то, что необходимо знать 2N значений функции на равномерной сетке. В рассматриваемой измерительной системе механика не позволяет выдерживать измерительный шаг точнее, чем ± 0.01 градуса. Эта ошибка неравномерности отсчетов, если ее никак не учитывать, приведет к

возникновению шума в данных и, как следствие, увеличению высших гармоник в Фурье-разложении. Так как избавиться от ошибок, вносимых механикой, невозможно, их приходится учитывать программно.

Чтобы сделать сетку равномерной, программа интерполирует измеренные данные в промежутках измерительной сетки с помощью кубических сплайнов. После чего на полученном графике программа строит равномерную сетку, по значениям в узлах которой и проводится преобразование Фурье.

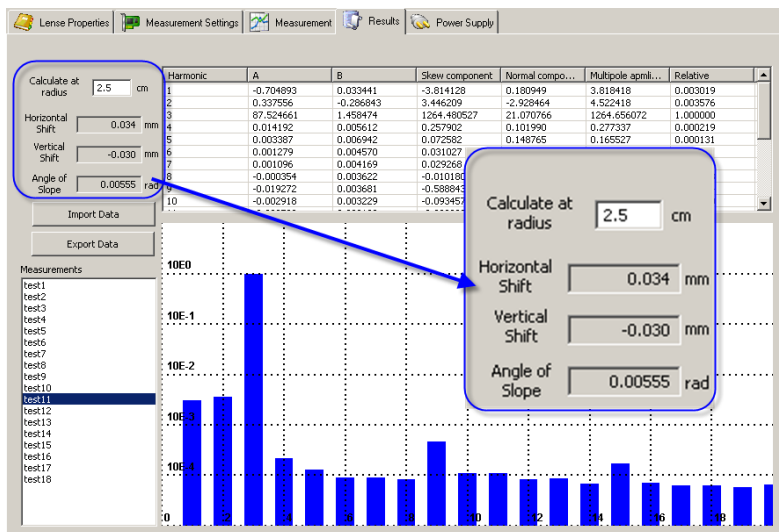


Рис. 3.4. Представление результатов измерений.

Результаты измерения представляются в отдельном окне, изображенном на рисунке 3.4.

Результатами измерений являются:

- * таблица коэффициентов Фурье;
- * графика отношения амплитуд высших гармоник к основной;
- * смещение магнитной оси линзы в вертикальном и горизонтальном направлении;
- * угол наклона линзы.

Помимо этого программа позволяет распечатывать паспорт магнита, где указывается вся эта информация (рисунок 3.5).

SEXTUPOLE REGISTRATION CERTIFICATE OF S220_12_50A-39

Date: 14.23.39 03.09.2007
 Sextupole effective length (L): 22.00 cm. Coil radius (R): 2.65 cm. Horizontal shift: 0.0364 mm.
 Main current (I₀): 0.0000 A. Vertical shift: 0.0260 mm.
 Correction current: I = 0.0000 A. Angle of slope: 0.00074 rad.
 D:\Users\Dimtry\Data\sextupole\S220\S220_12\DATA\S220_12_50A-39.lmf

Harmonic (n)	Magnetic field amplitude at radius 1.00 cm.		Magnetic field amplitude at reference radius 2.600 cm.				Phase (rad.)
	$\sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ (Gs)	relative	B _n (Gs)	A _n (Gs)	$\sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ (Gs)	relative	
1	1.579122	0.014912	-1.26969	0.910929	1.579122	0.002206	-0.6148
2	0.946212	0.008954	2.003379	1.436610	2.465350	0.003444	0.62217
3	105.6968	1.000000	715.9637	1.594596	715.9625	1.000000	0.00222
4	0.020026	0.000189	0.276707	-0.21754	0.361984	0.000492	-0.6662
5	0.004254	0.000040	0.057847	-0.18567	0.194377	0.000372	-1.2696
6	0.000152	0.000001	-0.00272	-0.01790	0.018115	0.000025	1.41959
7	0.000068	0.000001	0.014723	0.014875	0.020929	0.000029	0.79055
8	0.000037	0.000000	-0.01544	0.025365	0.029690	0.000041	-1.0236
9	0.000183	0.000002	-0.37946	0.052837	0.383126	0.000536	-0.1383
10	0.000003	0.000000	-0.01534	-0.00707	0.016895	0.000024	0.43193
11	0.000001	0.000000	0.017611	0.002653	0.017810	0.000025	0.14950
12	0.000001	0.000000	0.029049	-0.02410	0.037749	0.000053	-0.6926
13	0.000001	0.000000	-0.01805	0.094978	0.096680	0.000135	-1.3629
14	0.000000	0.000000	-0.00241	-0.01816	0.018327	0.000026	1.43865
15	0.000000	0.000000	0.256808	0.008245	0.258939	0.000362	0.03184
16	0.000000	0.000000	-0.02633	0.029149	0.040651	0.000057	-0.7995

$$\int_{-L}^{+L} dx \int_{-L}^{+L} dy \int_{-L}^{+L} dz \dots \text{where } \int_{-L}^{+L} dx = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\psi) + B_n \sin(n\psi)) \int_{-L}^{+L} dy = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin(n\psi) + B_n \cos(n\psi))$$

Operator: Vobly

Signature:

Рис. 3.5. Паспорт магнита.

3.3. Продольное распределение 1-го интеграла

Так же, как и для предыдущих случаев, оператор в начале работы устанавливает параметры аппаратуры и сценарий движения. После команды «старт» измеряются аппаратные нули каналов, и затем катушка сдвигается на один шаг. Эта процедура выполняется циклически до достижения финальной точки. При перемещении измеряется изменение среднего магнитного потока через катушку, откуда вычисляются приращения среднего поля. Полученные таким образом приращения поля затем суммируются для получения зависимости этого поля от продольной координаты.

Для вычисления продольного распределения первого интеграла полученная зависимость интегрируется по длине вигглера.

Графическое окно программы имеет две оси Y: по левой откладывается вычисленное из приращений среднее поле, по правой – вычисленные значения интегралов. Количество и масштаб выводимых графиков могут быть оперативно изменены.

На рис.3.6 показано поведение 1-го интеграла вдоль вигглера-затухателя для 5 поперечных координат и поле для одной из катушек (центральной). Отчётливо видны зоны недостаточной юстировки полюсов, приводящей к заметным изменениям и поперечному расхождению интеграла, а также влияние выходного корректора, уменьшившего поперечный разброс и финальные значения интегралов.

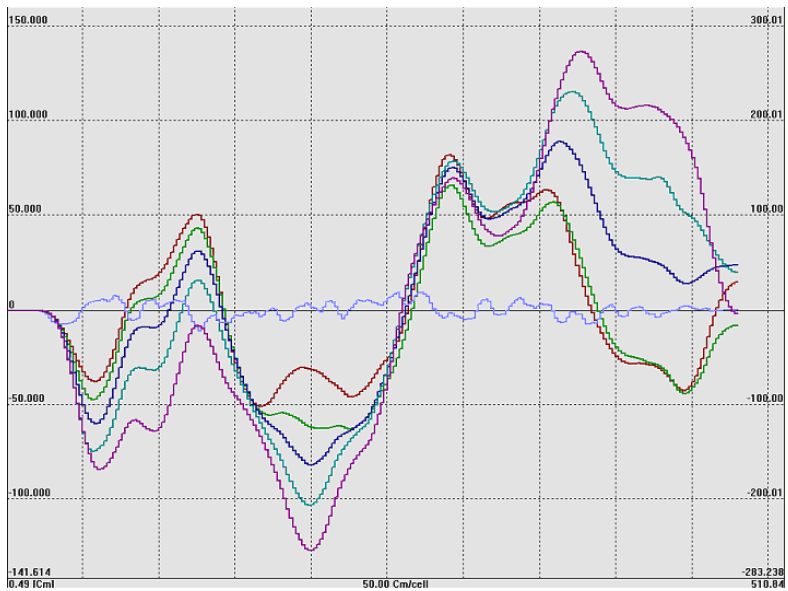


Рис.3.6. Графическое окно программы.

Список литературы

- [1] *А.М. Батраков, П.В. Вагин, П.Д. Воблый и др.* Аппаратура для прецизионного измерения постоянных магнитных полей с помощью перемещаемых катушек. - Препринт ИЯФ 2008-26, Новосибирск, 2008, http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/files/2008_026.pdf
- [2] *M. Tischer, K. Balewski, A. Batrakov et al.* Damping Wigglers at the Petra-III Light Source. - Proceedings of EPAC 2008.
- [3] *Е.И. Антохин, А.М. Батраков, П.Д. Воблый, Н.И. Зубков, Ю.М. Колокольников, Е.Г. Мигинская, и др.* Измерительная система 1 и 2 интегралов магнитных полей. - Препринт ИЯФ 2002-046 (557 Кб), Новосибирск, 2002, http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/files/2002_046.pdf
- [4] Numerical Recipes in C, Second Edition (1992), <http://www.nrbook.com/a/bookcpdf.php>
- [5] *В.Н. Корчуганов, С.Ф. Михайлов, И.Н. Чуркин, и др.* Установка для прецизионных магнитных измерений мультиполей SLS. - Препринт ИЯФ 2000-072 (2176 Кб), Новосибирск, 2000, http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/files/2000_072.pdf

*А.М. Батраков, П.В. Вагин, П.Д. Воблый,
А.Б. Огурцов, Д.С. Шичков*

**Программное обеспечение
систем измерения магнитных полей
с помощью перемещаемых катушек**

*A.M. Batrakov, P.V. Vagin, P.D. Vobly,
A.B. Ogurtsov, D.S. Schichkov*

**Software for magnetic measurements
with movable coils**

ИЯФ 2008-34

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 16.12. 2008 г.

Сдано в набор .22.12. 2008 г.

Подписано в печать 23.12. 2008 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 34

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11