

Система мониторинга пучков заряженных частиц в каналах транспортировки

В.А. Киселев, В.Р. Козак, Э.А. Купер, А.И. Науменков, В.В. Репков
Институт ядерной физики им Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Для повышения эффективности работы сложных протяженных систем транспортировки пучков частиц требуется знание положения центра тяжести и распределения плотности пучка во многих сечениях вдоль его траектории. Для этого используется несколько типов однопролетных датчиков. Многообразие используемых в системах транспортировки датчиков пучка объясняется отсутствием некоторого идеального, обладающего следующими свойствами:

- минимальное воздействие на пучок (прозрачность);
- максимальное количество измеряемых параметров пучка, его пространственно-угловых характеристик и заряда в широком диапазоне изменения тока пучка;
- возможность простого включения этого датчика в систему автоматизированного измерения и управления с использованием ЭВМ.

Для решения траекторных задач, требующих расположения трех и более датчиков на половине волн бетатронных колебаний, предпочтительно использование прозрачных датчиков тока изображения [1].

Мониторы вторичной эмиссии (МВЭ), ввиду своей универсальности, получили наибольшее распространение в ускорительной технике. Их различные модификации, созданные за последние 20 лет, успешно используются для измерения тока, положения центра тяжести и профиля пучка заряженных частиц. Такие датчики просты и надежны, но они обладают низкой чувствительностью. Повысить чувствительность МВЭ можно с помощью микроканальной пластины, что влечет за собой заметное усложнение конструкции датчика.

В докладе рассматриваются электронные приборы для обработки сигналов, поступающих от МВЭ или от других, упомянутых выше, датчиков, выходными сигналами которых является заряд.

Измерители положения пучка (ИПП) устанавливаются недалеко от датчиков (2-5 м) вдоль каналов транспортировки пучка. Эти приборы осуществляют запоминание, оцифровку, хранение информации. Все преобразователи связаны одним кабелем, который подключается к специализированному интерфейсному модулю, расположенному в крейте КАМАК. По данному кабелю осуществляются обмен информацией между измерителями и ЭВМ, синхронизация (запуск) и питание приборов. Интерфейсный модуль может быть реализован в любом другом стандарте: VME, MULTIBUS и т.д. К одному интерфейсному модулю можно подключить до 15 измерителей.

Технические характеристики измерителя:

- количество каналов измерения - 32
- разрешающая способность (по заряду) - 1 фК
- разрядность АЦП - 14
- динамический диапазон измерителя - 1 фК - 0,5 нК
- диапазоны чувствительности - 1, 4, 16, 64
- размеры преобразователя - 200 * 200 * 50 мм
- мощность, потребляемая преобразователем - 2,5 Вт.

Основные характеристики системы сбора информации:

- датчики используются в основном в каналах транспортировки пучков заряженных частиц, поэтому частота повторения относительно невелика (не более 50 Гц);
- разрешающую способность (по заряду) измерителя желательно иметь предельно высокой, что позволяет увеличить прозрачность МВЭ и решать с их помощью траекторные задачи.
- датчики устанавливаются, как правило, вдоль канала транспортировки пучков, поэтому имеет смысл использовать для подключения регистрирующей аппаратуры один кабель.

Методы измерения

Наиболее простым и естественным способом регистрации зарядов является запоминание их на емкостях с последующей коммутацией ко входу усилителя и далее к АЦП. Этот метод обладает столь же естественным ограничением. Дело в том, что при коммутации ключей происходит "наброс заряда" и, соответственно, флуктуации этого наброса, которые и определяют предельное разрешение данного метода.

Величина остаточного заряда при коммутации ключа определяется главным образом амплитудой управляющего напряжения на затворе коммутирующего транзистора и емкостью затвор-канал. Если мы оценим емкость 10 пФ и амплитуду управляющего сигнала 10 В, то наведенный заряд составит 0.1 нК.

Во всех электронных коммутаторах используется компенсация данного "наброса", и поэтому в качественных электронных коммутаторах остаточный заряд может составлять 0.1 пК. Обычно в справочных параметрах приводится эта цифра. Важно отметить, что при компенсации наведенного заряда не происходит уменьшения флуктуации (шумов) коммутации, напротив, шумы могут возрасти.

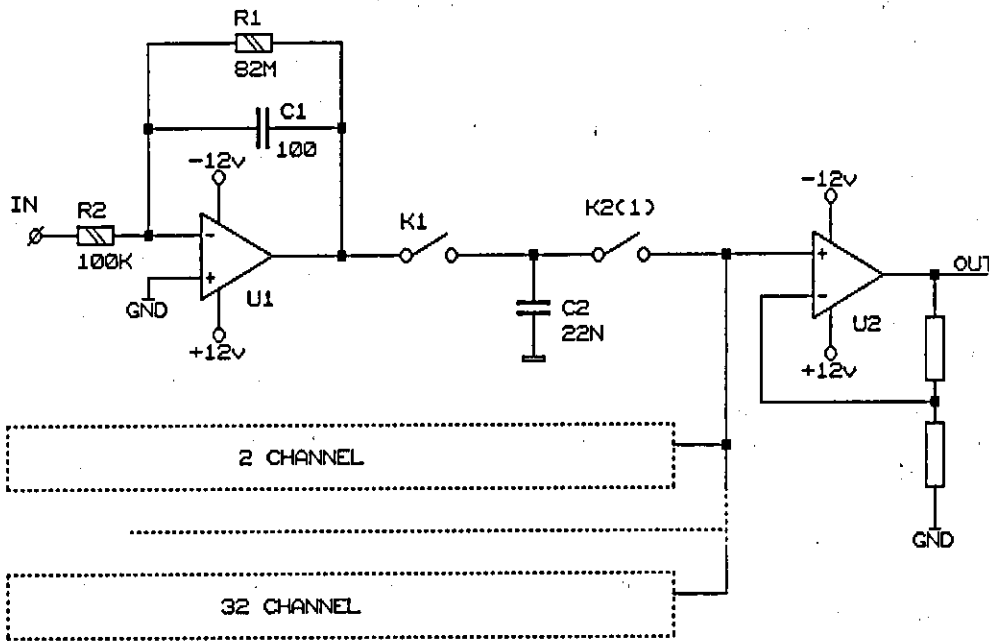


Рис. 1.

Шумы можно оценить как корень из количества носителей в наведенном заряде. В нашем случае шумы коммутации составят 30 - 60 фК, что с хорошей точностью соответствует измеренным значениям. Для того чтобы уменьшить влияние шумов коммутации, перед запоминающей емкостью установлен зарядочувствительный усилитель (рис.1). Усилитель охвачен интегрирующей обратной связью, поэтому в первом приближении величина емкости сигнальных проволочек датчика и соединяющих проводников не сказывается на чувствительности.

Схема работает следующим образом.

Заряд через резистор R2 поступает на вход интегратора и запоминается на емкости интегратора C1. Напряжение на выходе усилителя U1 становится равным $U=C1 \cdot Q$, после этого емкость разряжается через резистор R1. Постоянная времени разряда составляет несколько миллисекунд, что значительно меньше минимального периода запускающих импульсов, поэтому к следующему запуску емкость интегратора разрядится до пренебрежимо малого напряжения.

Посредством ключа K1 напряжение U запоминается на емкости C2, после чего посредством ключей K2(I) происходит последовательный опрос запомненных напряжений, усиление сигналов масштабным усилителем, оцифровка с помощью АЦП и запись полученной информации в ЗУ. Масштабный усилитель имеет 4 дистанционно-изменяемых коэффициента усиления - 1; 4; 16; 64.

Время запоминания сигнала сравнительно велико (100 мкс). Поэтому емкость C2 можно выбрать достаточно большой, чтобы шумы зарядов при коммутации ключей K1 и K2 приводили к пренебрежимо малым шумам запомненного напряжения.

Система связи

Было принято решение ограничиться простой системой связи, ориентированной только на работу с данными ИПП.

Код в линии уравнивается, длительность кодового импульса 800 нс. Каждая посылка начинается с "1", которая представляет собой положительный импульс длительностью 800 нс и амплитудой 5 В. Далее, "0" представляет собой отсутствие импульса, а каждая следующая "1" передается импульсом обратной полярности по отношению к предыдущему. Завершается посылка битом четности.

Обмен информацией между ИПП и контроллером осуществляется следующим образом.

Контроллер генерирует в линию посылку, состоящую из 14 битов, в которой определяется номер ИПП (4 бит), адрес ЗУ ИПП (6 битов), бит запуска и бит запись/чтение.

После этого, если генерируется команда записи (W/R=1), то контроллер без перерыва посылает одно информационное слово, если посылается команда чтения (W/R=0), то контроллер переходит в режим приема информации, а ответное слово генерирует выбранный ИПП. При наличии стартового бита (SB) происходит запуск всех или выбранного ИПП.

Таким образом, обмен информацией инициализирует только контроллер, что в данном случае не является ограничением, и позволяет обойтись без механизма анализа конфликтов в линии.

Помехозащищенность линии обеспечивается за счет контроля четности и проверки выполнения чередования полярности импульсов (после положительного импульса должен следовать отрицательный и наоборот).

Четыре бита (N1-N4) позволяют адресовать 16 модулей, но позиция с номером 15 обозначает групповую команду (каждый блок реагирует на свой номер и на номер 15), таким образом, к одному кабелю может быть подключено до 15 ИПП (номера 0-14).

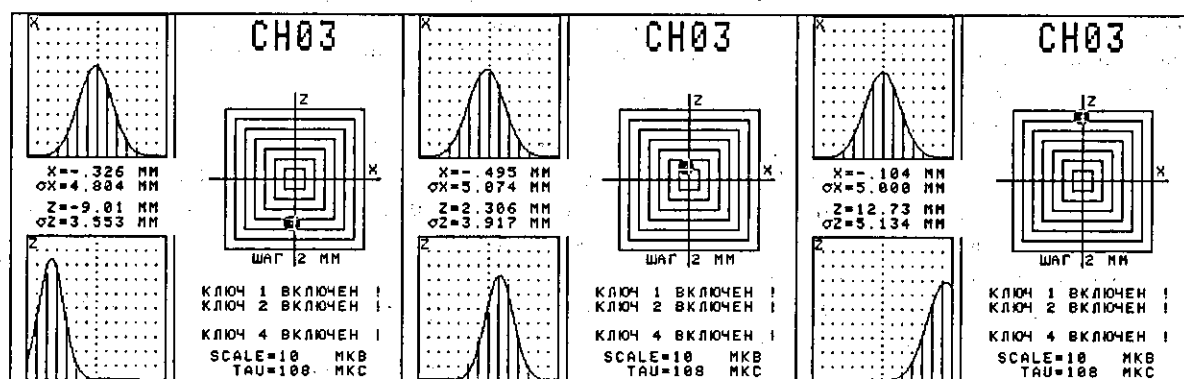
Адресное пространство ЗУ составляет 64 ячейки из которых в младших 32 ячейках хранится измеренная информация, из следующих 32 задействована одна ячейка, в которой размещен статусный регистр ИПП. В статусном регистре размещаются информация о задержке измерения относительно запуска (5 битов) и масштабный коэффициент усилителя (2 бита).

По этому же кабелю осуществляется питание измерителей. Среднее напряжение в линии составляет 18-30 В. Каждый ИПП снабжен преобразователем, который вырабатывает необходимые напряжения.

Контроллер

Как уже упоминалось, контроллер выполнен в стандарте КАМАК, хотя он легко может быть сделан в любом другом стандарте. Контроллер состоит из программируемой матрицы MACH210 в которой реализован протокол системы связи, и нескольких микросхем для организации КАМАК интерфейса. К контроллеру можно подключить две независимые ветви измерителей. Запуск всех ИПП может осуществляться от ЭВМ через КАМАК, либо по внешнему импульсу через разъем на передней панели контроллера. По сигналу внешнего запуска контроллер генерирует в линию соответствующую команду.

На рис. 2 представлены результаты измерений положения электронного пучка в канале ВЭПП-3 - ВЭПП-4. Величина перепускаемого тока 20 мА.



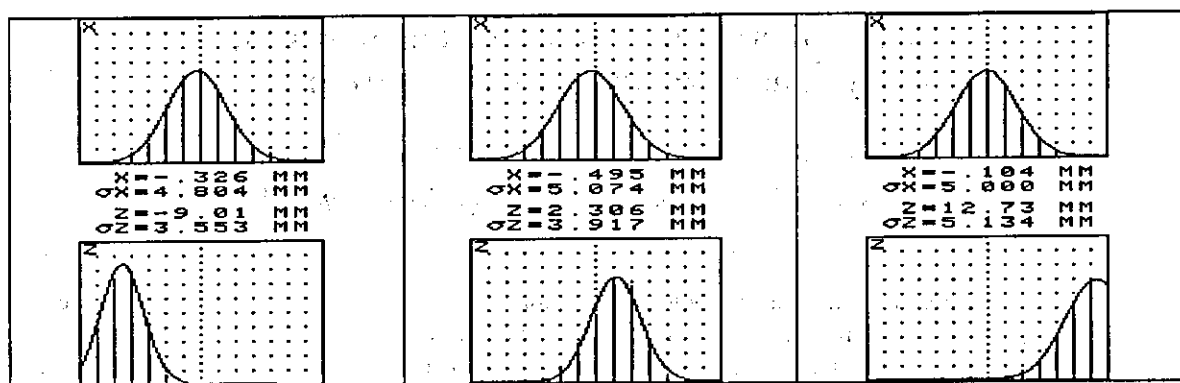


Рис. 2.

Список литературы

- [1] Киселев В.А. и др. Автоматизированная система измерения и коррекции траектории пучка в канале ВЭПП-3 – ВЭПП-4М на основе датчиков тока изображения. - Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2. Протвино, 1994, с.74-79.

Семейство интеллектуальных контроллеров для управления источниками питания

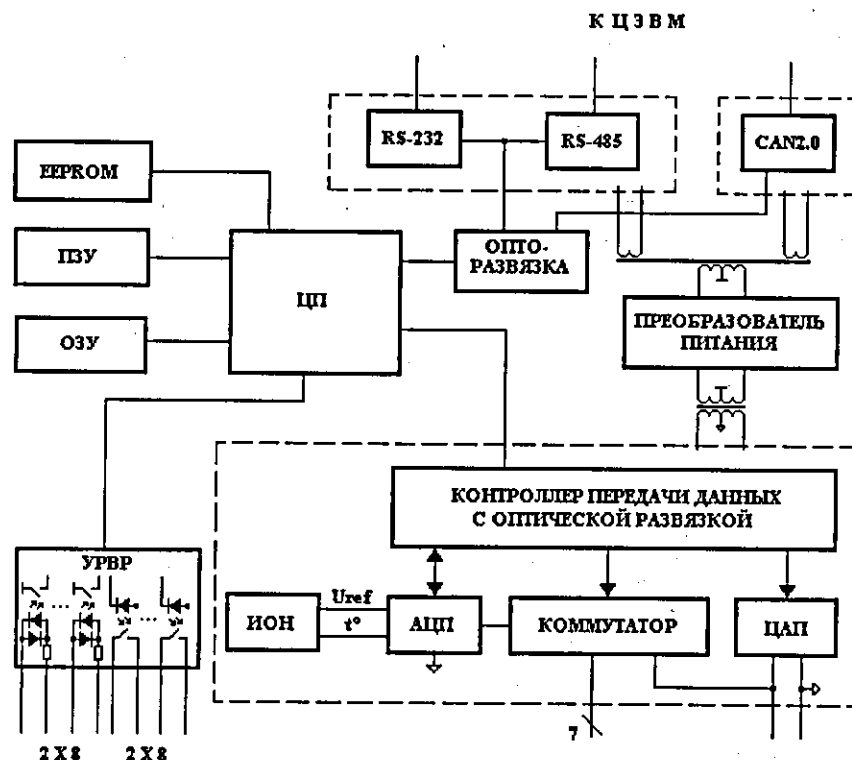
Э. Ю. Ермолов, Ю. В. Заруднев, В. Р. Козак, Э.А. Купер, А. В. Сазонов
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия

Для управления системами питания ускорительно-накопительных комплексов Института в настоящее время широко используются микропроцессорные контроллеры, которые снабжены широким набором цифровых и аналоговых устройств ввода-вывода. Эти контроллеры способны осуществлять многие функции автономно, например, изменение тока питания магнитных элементов ускорителя по заданному закону, циклические измерения токов и напряжений в различных точках источников питания и т.д. Это минимизирует количество обращений управляющей ЭВМ и повышает надежность системы в целом.

Первые системы подобного вида были использованы для управления магнитной системой накопителя ВЭПП-4 [1]. Успешный многолетний опыт эксплуатации контроллеров и доступность современной элементной базы стимулировали разработку нового поколения контроллеров для источников питания.

В докладе рассмотрены три варианта блоков: одноканальный контроллер для управления источниками питания сильноточными магнитами ЦАПИ+, 16-канальный контроллер для управления источниками питания корректирующих магнитов CANDAC16 и многоканальный АЦП CANADC40.

Модуль ЦАПИ+ применяется в источниках питания с точностью стабилизации выходного тока до 0.01%. Блок включает в себя 16-разрядный ЦАП, 8-канальный 24-разрядный АЦП, последовательные интерфейсы CAN 2.0 и RS-485 для связи с ЭВМ, микропроцессор с ОЗУ 64К, память программ (FLASH 128К), регистр ввода/вывода 8/8, последовательный интерфейс RS-232 для ручного управления.



Для увеличения помехозащищенности аналоговых трасс, блок размещается непосредственно в стойке силовой установки. Аналоговая часть гальванически изолирована относительно цифровой. АЦП имеет дифференциальный вход. Коммутатор двухпроводный с интегральными ключами на 8 каналов.

Для обеспечения необходимых метрологических характеристик АЦП в широком диапазоне температур применяется процедура автокалибровки. Для этого периодически измеряются напряжение эталонного источника, его температура и напряжение смещения при закороченном входе АЦП. Процессор, произведя необходимые вычисления, выдает скорректированное значение измеряемых напряжений.

Все сигналы как входящие, так и исходящие, имеют оптическую или трансформаторную развязку относительно цифровой земли.

Рабочая программа хранится в энергонезависимой памяти. Программа пишется на языке С на IBM PC-совместимом компьютере с использованием специальной библиотеки. Библиотека содержит функции записи, чтения и управления функциональными узлами блока, а также ввод/вывод по последовательным интерфейсам RS-232 и CAN 2.0. Трансляция и загрузка в память осуществляются специальными утилитами. Загрузка может производиться по обоим последовательным интерфейсам.

Блок управления может функционировать в двух режимах:

- управление по последовательной линии связи;
- ручное управление.

В режиме ручного управления можно устанавливать напряжение на выходе ЦАП, контролировать аналоговые сигналы каналов АЦП, читать/писать УРВР. Ручное управление осуществляется от внешнего устройства, подключенного к последовательному интерфейсу RS-232, например с помощью переносного компьютера.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1. ЦАП

Интегральный ЦАП	DAC714
Разрядность	16
Диапазон выходных напряжений	0...+10В
Дискретность	150 мкВ
Монотонность	16 бит
Нелинейность	±1 LSB
Смещение нуля	±1 LSB
Погрешность полной шкалы без коррекции	0.01%
с программной коррекцией	±1 LSB
Макс. частота изменения кода	1кГц
Временная нестабильность записи кода	0.3 мс

2. АЦП

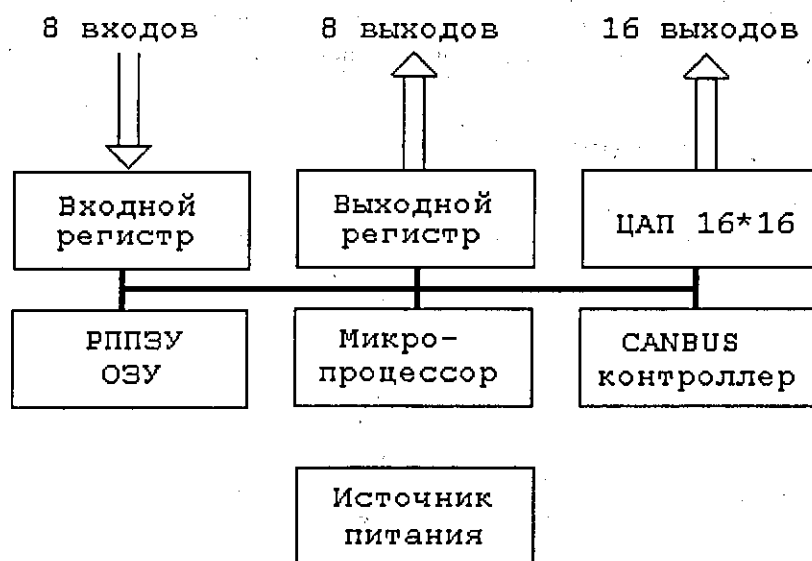
Интегральный АЦП	ADS 1211
Количество каналов	8 двухпроводных
Диапазон входных напряжений	-10...+10 В
Разрядность	24
Дискретность	1.2 мкВ
Нелинейность	0.003 %
Смещение нуля без коррекции	0.005 %
с программной коррекцией	0.003 %
Погрешность полной шкалы без коррекции	0.01 %
с программной коррекцией	0.003 %
Время измерения	20 мс
Время установления	60 мс
Время калибровки	120 - 240 мс

Модули CANDAC16 и CANADC40 разработаны для управления и контроля многоканальных источников питания, а также для использования как многоканальный ЦАП и АЦП широкого применения. Оба устройства также предназначены для встраивания в стойку источников питания. Модули снабжены интерфейсом к шине CANBUS, по которой и осуществляется связь с ЭВМ.

Модуль CANDAC16 состоит из:

- 16-канального ЦАПа;
- 8-канального выходного регистра с гальванически изолированными выходами;
- 8-канального входного регистра с гальванически изолированными входами;
- CANBUS интерфейса, по которому осуществляется связь устройства с управляющей ЭВМ;
- встроенного микропроцессора.

С точки зрения пользователя, ЦАП может трактоваться либо как 16 независимых цифроаналоговых преобразователей, либо как многоканальный генератор функций. В процессоре может содержаться до 8 таблиц для каждого канала ЦАПа, по которым устройство формирует изменяющееся напряжение методом линейной интерполяции. Все ЦАПы на линии CANBUS, либо программно определенная группа ЦАПов могут стартовать одновременно широковещательной посылкой и с неопределенностью около 1 мсек изменять напряжения/токи соответствующих каналов источников питания ускорительного комплекса. Аппаратно многоканальность ЦАПа реализована циклической раздачей напряжения с одного ЦАПа на 16 аналоговых запоминающих устройств.



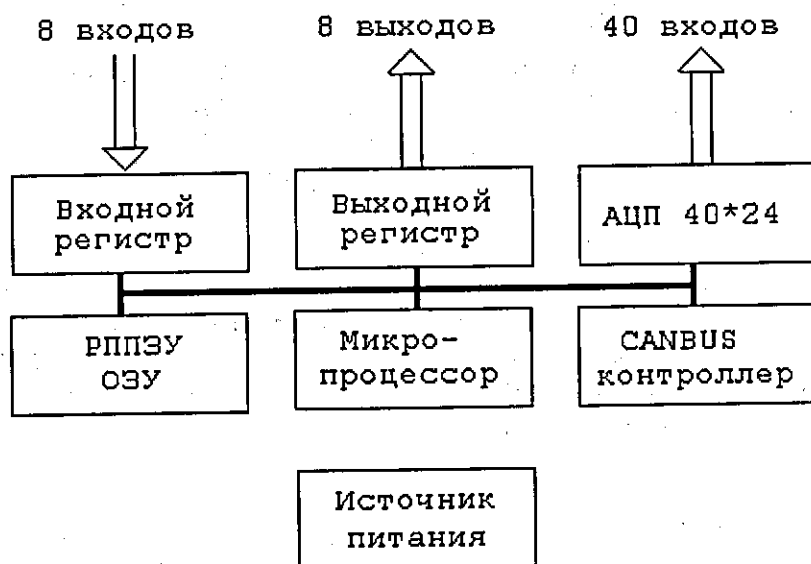
Основные параметры устройства CANDAC16:

- | | |
|-----------------------------------|---------|
| - разрядность ЦАПа | 16 бит; |
| - разрешающая способность | 16 бит; |
| - абсолютная погрешность не более | 0.1 %; |
| - выходное напряжение | 10 В; |
| - каналов выходного регистра | 8; |
| - каналов входного регистра | 8. |

Модуль CANADC40 состоит из:

- 40-канального АЦП;
- 8-канального выходного регистра с гальванически изолированными выходами;
- 8-канального входного регистра с гальванически изолированными входами;
- CANBUS интерфейса, по которому осуществляется связь устройства с управляющей ЭВМ;
- встроенного микропроцессора.

40-канальный АЦП выполнен на микросхеме сигма-дельта АЦП и аналоговых мультиплексорах. Каждый измерительный канал является дифференциальным. Процессор может организовывать измерения либо нескольких каналов (от 1 до 40), либо обеспечивать быстрые измерения по одному выбранному каналу. Измеренные значения могут как выдаваться в CANBUS, так и запоминаться во встроенной памяти и выдаваться по специальному запросу. Старт серии измерений может осуществляться адресным либо широковещательным сообщением по шине CANBUS. Командой от ЭВМ можно выбирать компромиссное сочетание времени измерения и разрешающей способности.



Основные параметры устройства CANADC40:

- разрядность АЦП 24 бит;
- разрешающая способность 24 бит;
- абсолютная погрешность не более 0.01 %;
- входное напряжение 10 В и 1 В;
- каналов выходного регистра 8;
- каналов входного регистра 8.

Литература

1. Ю.В. Заруднев и др. Интерполирующие цифроаналоговые преобразователи для систем питания электрофизических установок. - В кн. Труды 12 всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т.1, сс. 121-123, ОИЯИ, Д9-92-235, Дубна, 1992.

Прецизионный измеритель направления магнитного поля

В.Н. Бочаров, А.В. Бублей, В.В. Пархомчук, В.С. Тупиков
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

А.К. Кроуфорд, С.С. Нагайцев, А.В. Шемякин
Fermilab, Batavia, USA

Описан датчик, позволяющий контролировать направление магнитного поля в установках с электронным охлаждением с точностью $B_{\perp}/B_{\parallel} \sim 10^{-5}$. Основа датчика — магнитная стрелка с зеркалом, отражающим лазерный луч. Обсуждаются измерения с помощью этого датчика поперечных магнитных полей прототипа модуля соленоида системы электронного охлаждения, сооружаемой в Фермилабе.

Введение

Электронное охлаждение предъявляет высокие требования к параллельности траекторий электронов в секции взаимодействия с пучком охлаждаемых частиц [1]. В существующих установках электроны фокусируются продольным магнитным полем, и качество поля, а именно отклонение силовых линий от прямых, может определять эффективную поперечную температуру пучка и скорость охлаждения.

Для контроля качества поля в установке МОСОЛ (ИЯФ, Новосибирск) [2] был создан датчик, основанный на железной стрелке с прикреплённым зеркалом. Стрелка закреплялась в двухосевом шарнире, позволяющем датчику поворачиваться в двух направлениях и отслеживать направление магнитного поля. Изменения положения зеркала наблюдались с помощью промышленного оптического автоколлиматора. Позднее схожая конструкция использовалась и на других установках [3].

В проекте электронного охлаждения Фермилаба [4] задача изготовления соленоидов для охлаждающей секции [5] и измерения их полей имеет свою специфику. Соленоиды должны создавать магнитные поля 50–150 Гс. Для эффективного охлаждения интеграл поперечных полей не должен нигде на длине каждого модуля превышать величину 1 Гс·см. При этом точность измерения полей должна быть на уровне 1–3 мГс.

В настоящей работе описывается датчик, разработанный в ИЯФ для измерения полей этого соленоида и использующий ту же основную идею, что и в [2]. Однако низкое по сравнению с традиционными охладителями магнитное поле потребовало внести значительные изменения в конструкцию датчика, описываемые в 1-м разделе. Датчик был успешно использован для измерений магнитных полей прототипа модуля соленоида. Одним из результатов этих измерений явились оценки на погрешности датчика, представленные в 2-м разделе.

1. Устройство прибора

В устройстве [2] точность измерения поперечной компоненты поля ограничивалась в основном механическим трением в подшипниках. Величина угла α_{err} между истинным и измеряемым направлением поля может быть оценена как $\alpha_{err} \sim N_{fric}/(M \cdot B_0)$, где N_{fric} — момент силы трения; M — магнитный момент стрелки и B_0 — напряжённость ведущего магнитного поля. Поскольку величина M пропорциональна B_0 , точность падает как $1/B_0^2$, так что датчик, обеспечивающий измерение углов 10^{-5} радиан при $B_0 = 1$ кГс, обнаруживает ошибку только $4 \cdot 10^{-3}$ при 50 Гс.

Для кардинального улучшения точности при измерениях в малых полях в обсуждаемом датчике были изменены оба параметра в формуле для α_{err} . Во-первых, стрелка была изготовле-

на из постоянного магнита, что, согласно оценкам, примерно на порядок увеличило магнитный момент M при внешнем поле 100 Гс. Во-вторых, закрепление в подшипниках было заменено подвесом на нити, что, по-видимому, практически полностью исключило трение. Кроме того, вместо измерения углового отклонения зеркала датчика с помощью автоколлиматора сейчас используется оптический канал с лучом лазера (рис.1). На датчике смонтированы дипольные катушки (X и Y), которые компенсируют внешние поперечные поля так, что стрелка устанавливается в одном и том же направлении, а отражённый от зеркала лазерный луч приходит в одно и то же место фотодатчика. Мерой поперечных полей служат токи в компенсирующих катушках.

На рис.1 представлена блок-схема датчика. Магнитная стрелка образована двумя $NdFeB$ цилиндрами длиной 10 мм и диаметром 5 мм, зафиксированными в алюминиевой трубке. К этой же трубке прикреплены зеркала. Вся деталь (т.е. стрелка компаса) подвешивается с помощью тонкой нити, закрепленной на корпусе компаса. Эта сборка вставляется в кареточную трубу (кадетку) таким образом, что центр магнита находится на ее оси. Отражённый от зеркала лазерный луч принимается на четырехсекторный фотодиод, пары которого образуют X - и Y -каналы регистрации. Сформированные таким образом два сигнала для X - и Y -каналов являются сигналами ошибки, которые в случае включенной обратной связи поступают на входы интеграторов и далее на входы выходных усилителей, формирующих токи компенсирующих витков. Замкнутая петля обратной связи позволяет удерживать световое пятно в центре фотодиода, при этом токи в компенсирующих витках пропорциональны величинам поперечных компонент поля. Чтобы исключить из сигнала шумы, вызванные внешней засветкой, в схеме применена модуляция лазерного луча. Сигналы с фотодиода поступают на отдельные для каждого канала схемы дифференциатора-вычитателя, а затем синхронного детектора.

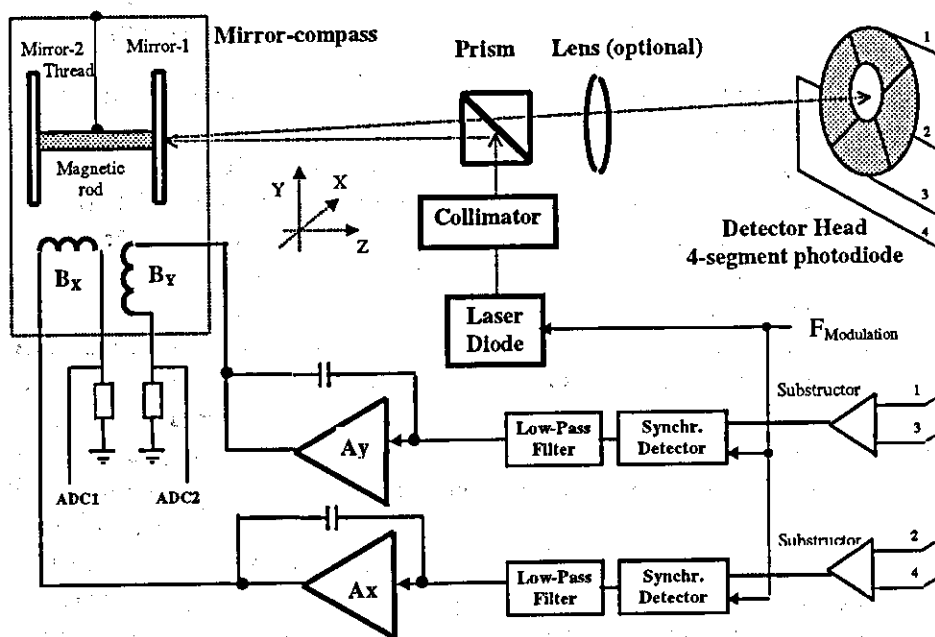


Рис. 1: Блок-схема измерительной системы.

Каретка фиксируется в поперечном направлении двумя струнами и может перемещаться на расстояние 20 м с помощью тяги и шагового двигателя. Значение продольной координаты отсчитывается по углу поворота двигателя, а абсолютная привязка осуществляется с помощью концевого выключателя, расположенного на одном из концов диапазона перемещений.

2. Калибровка и результаты измерений

Калибровка чувствительности системы проводилась с использованием длинного линейного проводника, расположенного снаружи соленоида параллельно его оси. Проводник смещался вертикально (для калибровки X-канала), либо горизонтально (Y) относительно оси датчика. Измеренные компенсационные токи с высокой точностью линейны по току проводника. Линейный коэффициент и расчёт поля проводника определяют калибровку.

Статистический анализ измерений, проведённых при фиксированных всех внешних параметрах, показывает, что распределение разбросов близко к гауссовому (рис.2). При напряжённости продольного поля 50 Гс без усреднений дисперсия составляет менее 0.5 мГс и менее 0.2 мГс при 10 усреднениях. Разброс определяется, по-видимому, несколькими факторами: отклонениями луча лазера от прямой из-за флуктуаций плотности воздуха, механическими колебаниями стрелки компаса, шумами электроники.

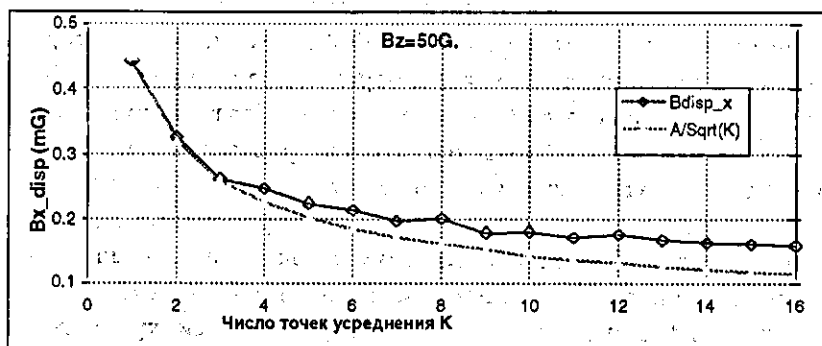


Рис. 2: Дисперсия результатов измерений поперечного поля B_x в зависимости от числа усреднений K .

Для проверки долговременной стабильности измерения поперечных полей 2-метрового соленоида были повторены несколько раз, и величины, измеренные в первом заходе, вычтены из данных последующих измерений. Полученные таким способом разности для интервалов времени между заходами 140 минут, 8 часов и 3 дня укладываются в ± 4 мГс по X и ± 8 мГс по Y. Возможно, что частично эти отклонения связаны с недостаточно жёстким закреплением соленоида относительно оптической системы и, в результате, с изменением со временем угла между его осью и лазерным лучом.

Причиной наибольшей систематической погрешности в измерениях оказалась неперпендикулярность плоскости зеркала и магнитной оси компаса. Возможно, что основная сложность связана с несовпадением механической оси постоянных магнитов, формирующих стрелку компаса, и оси его намагничивания. В результате такой неперпендикулярности в измерениях появляется дополнительная компонента поперечного поля, пропорциональная величине продольного поля, и, следовательно, постоянная по длине однородной части соленоида. В использовавшейся версии компаса это отклонение от перпендикулярности оказалось около 5 мрад, что не позволяло проводить измерения при значениях продольного поля выше 100 Гс.

Другой причиной систематической погрешности является наличие паразитных механических моментов, действующих на стрелку, выставленную по лазерному лучу. Такие моменты возникают из-за несовпадения вдоль оси Z точки подвеса и центра тяжести компаса или из-за остаточного после закрепления закручивания нити подвеса. В измерениях этот эффект проявляется, соответственно, как Y- и X-компоненты поперечного магнитного поля, не зависящие от напряжённости продольного поля.

Одной из особенностей измеряемого соленоида секции охлаждения является наличие зазоров между отдельными модулями. Продольное поле испытывает значительное возмущение в

зазорах, однако значение интеграла поперечного поля по зазору должно быть в высокой степени компенсировано. Использование датчика в неоднородном продольном поле оказалось ограниченным градиентом порядка 1 Гс/см из-за втягивания/выталкивания стрелки, поскольку при продольном смещении стрелка компаса задевала корпус датчика.

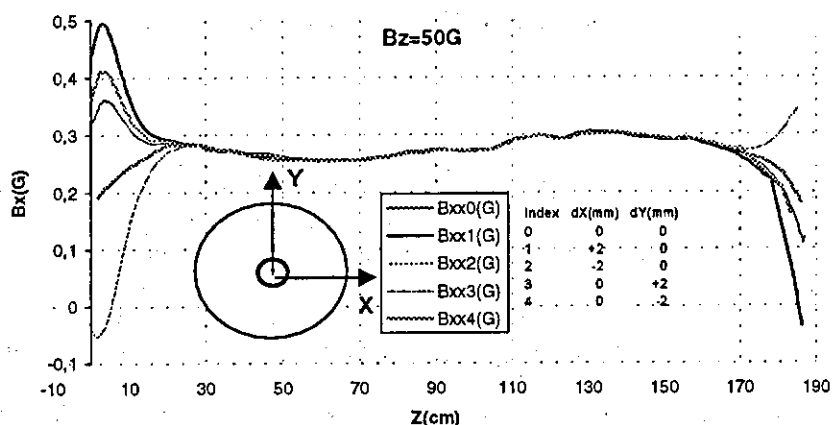


Рис. 3: Примеры измерений компоненты поля B_z вдоль соленоида при различных небольших смещениях вакуумной камеры относительно оси соленоида.

Заключение

В проведённых измерениях датчик показал работоспособность в полях 30–100 Гс. С его помощью удалось измерить собственные поперечные поля соленоида с точностью около 5 мГс и подобрать токи корректирующих дипольных катушек соленоида так, что интеграл поперечных полей на длине однородной части двухметрового модуля не превышает 0.2 Гс·см при величине продольного поля 50 Гс. Измеренная дисперсия ниже 0.5 мГс позволяет надеяться, что после проводимой в настоящее время модификации датчика он будет использован для измерений полей с точностью 1 мГс на всей 20-м длине будущего соленоида охлаждения.

Список литературы

- [1] В.В.Пархомчук, А.Н.Скринский. УФН т.170, № 5 сс.473-493, 2000.
- [2] А.Л.Арапов и др. Прецизионный соленоид для электронного охлаждения. Труды XIII Междунар. конф. по ускор. частиц высоких энергий, Новосибирск, 1986, т.2, стр.341-343.
- [3] A.V.Bublei et al. New Technology for Production of Precision Solenoid for Electron Cooling Systems. Proc. of MEEC-98, Dubna, 1998, Russia.
- [4] FNAL R&D in medium energy electron cooling. By S.Nagaitsev, A.Burov, A.C.Crawford, T.Kroc, J.MacLachlan, G.Saewert, C.W.Schmidt, A.Shemyakin, A.Warner. Nucl.Instr. and Meth. A441(2000) pp. 241-245.
- [5] Cooling Section Solenoid for the 5 MeV Fermilab Electron Cooling Project, by S.Nagaitsev, A.C.Crawford, V.Kashikhin, A.Makarov, A.Shemyakin, V.Vostrikov. Proc. of EPAC-00, Vienna, 26-30 June 2000, pp. 2447-2449.