

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

Ю.М.Великанов, В.Ф.Веремеенко, Н.А.Винокуров, Б.А.Довженко,
Ю.А.Евтушенко, Е.И.Загородников, Д.А.Кайран, В.Р.Козак, Э.А.Купер,
Л.Э.Медведев, А.С.Медведко, А.Д.Орешков, С.П.Петров, С.С.Средняков,
С.В.Тарарышкин.

МОЩНЫЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ
СИБИРСКОГО ЦЕНТРА ФОТОХИМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ:
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ИСТОЧНИКОВ
ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

ИЯФ 2003-69

НОВОСИБИРСК
2003.

**МОЩНЫЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ
СИБИРСКОГО ЦЕНТРА ФОТОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ:
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ**

Ю.М.Великанов, В.Ф.Веремеенко, Н.А.Винокуров, Б.А.Довженко,
Ю.А.Евтушенко, Е.И.Загородников, Д.А.Кайран, В.Р.Козак, Э.А.Купер,
Л.Э.Медведев, А.С.Медведко, А.Д.Орешков, С.П.Петров, С.С.Середняков,
С.В.Тарарышкин.

Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация.

В препринте описана система управления источниками питания магнитной системы лазера на свободных электронах. Она базируется на интеллектуальных контроллерах источников питания с интерфейсом CANBUS и программном обеспечении, написанном на языке C++ в среде WINDOWS. В работе приводятся особенности аппаратного построения источников питания, проведено сравнение вариантов систем управления с интерфейсами CANBUS и SAMAC. Подробно рассмотрена структура и основные возможности управляющего программного обеспечения как отдельной программы, так и возможность её подключения в интегрированную систему управления по протоколу Epics Channel Access.

**FREE ELECTRON LASER FOR THE SIBERIAN CENTRE FOR
PHOTOCHEMICAL RESEARCH:
CONTROL AND POWER SUPPLY SYSTEM FOR ELECTROMAGNETIC
ELEMENTS**

Y.M.Velikanov, V.F.Veremeenko, N.A.Vinokurov, B.A.Dovzhenko, Y.A.Evtushenko, E.I.Zagorodnikov, D.A.Kayran, V.R.Kozak, E.A.Kuper, L.E.Medvedev, A.C.Medvedko, A.D.Oreshkov, S.P.Petrov, S.S.Serednyakov, S.V.Tararyshkin.

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia.

Abstract.

A control system of Free Electron Laser is described. The control system is based on embedded intelligent controllers with CANBUS interface and on software written on C++ in WINDOWS media. Solutions of some specific hardware problems are discussed. A comparison of realized architecture with CAMAC-system realization is done. The control software structure and capabilities are described in detail. A possibility of connection of the control software to integrated control system using Epics Channel Access protocol is also discussed.

1. Введение.

В настоящее время в Институте ядерной физики создается мощный лазер на свободных электронах (ЛСЭ) на основе ускорителя-рекуператора. Полномасштабный ЛСЭ основан на многооборотном ускорителе-рекуператоре с энергией электронов до 50 МэВ и будет давать среднюю мощность излучения до 50 кВт в диапазоне длин волн 5 – 20 микрон. На настоящий момент уже построена первая очередь ЛСЭ. В ускорителе-рекуператоре первой очереди есть только одна дорожка (оборот), см. Рис. 1, поэтому энергия электронов не превышает 12 МэВ, а средняя мощность излучения - 1 кВт в диапазоне длин волн 100 – 200 микрон.



Рисунок 1. Схема первой очереди ЛСЭ.

ЛСЭ первой очереди включает в себя следующие системы:

- инжектор электронов с энергией 2МэВ, длительностью сгустка около 100 пикосекунд, частотой следования сгустков до 22 МГц и зарядом в сгустке 0.5 – 2 нК;
- высокочастотную систему ускорителя-рекуператора с 16 резонаторами на ускоряющей дорожке, обеспечивающую набор энергии электронов от 2 до 12 МэВ за один пролет;
- магнитную систему ускорителя-рекуператора;
- излучательную систему ЛСЭ, обеспечивающую когерентное излучение с длиной волны порядка 100 мкм и средней мощностью до 1 кВт;
- систему управления и контроля ЛСЭ, состоящую из нескольких компьютеров, объединенных в локальную сеть, и обеспечивающих управление и контроль всех систем ЛСЭ;

В данной статье рассматривается система управления для контроля и управления источниками питания магнитной системы ЛСЭ. Магнитная система, обеспечивающая движение пучка заряженных частиц по заданной траектории, состоит из большого числа разных элементов. В нашем случае это поворотные и корректирующие магниты, квадрупольные и соленоидальные линзы, ондуляторы и группирователь, всего около 60 элементов.

Все эти элементы питаются от управляемых источников постоянного тока, разработанных и производимых в Институте. В свою очередь, все источники питания управляются от ЭВМ посредством цифро-аналоговых преобразователей. Контроль тока и напряжений на элементах магнитной системы осуществляется с помощью аналого-цифровых преобразователей.

2. Требования к стабильности магнитного поля в различных элементах микротрона-рекуператора.

Нестабильности магнитного поля в элементах магнитной системы приводят к увеличению эмиттанса электронного пучка. Если взять в качестве критерия увеличение эмиттанса не более, чем в два раза, то это дает величину допустимой нестабильности поля в разных элементах, и, следовательно, стабильности тока источников питания магнитной системы. Из приведенных в приложении А расчетов получается, что самые высокие

требования к стабильности магнитного поля предъявляются в поворотных магнитах.

Таблица требований, предъявляемых к стабильности токов источников питания магнитной системы:

| | | Кол-во (шт.) | $J_0 (A)$ | $\Delta J_0 (mA)$ | $\Delta J_i (mA)$ | $\Delta J_i / J_0$ |
|--------------------------------|----|--------------|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Поворотные магниты 30° | А) | 4 | 7 | 10 | 1.7 | $2.4 \cdot 10^{-4}$ |
| | Б) | 8 | 7 | 10 | 1.1 | $1.6 \cdot 10^{-4}$ |
| Поворотные магниты 15° | | | | | | |
| | Б) | 2 | 10 | 8 | 2 | $2.0 \cdot 10^{-4}$ |
| Поворотные магниты 165° | | | | | | |
| | Б) | 2 | 1000 | 4200 | 3000 | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| Ондуляторы | | | | | | |
| | Б) | 2 | 2500 | 5120 | 3700 | $1.5 \cdot 10^{-3}$ |
| Корректоры | А) | 9 | 1 | 20 | 2.3 | $2.3 \cdot 10^{-3}$ |
| | Б) | 40 | 1 | 60 | 3 | $3.0 \cdot 10^{-3}$ |
| Квадрупольные линзы | А) | 9 | 1 | 22 | 2.5 | $2.5 \cdot 10^{-3}$ |
| | Б) | 40 | 1 | 145 | 7 | $7.0 \cdot 10^{-3}$ |

где : А) – инжекционный канал.
 Б) – микротрон-рекуператор.

J_0 - расчетный ток данного элемента;

ΔJ_0 - нестабильность тока в данном элементе, вызывающая удвоение эмиттанса;

ΔJ_i - нестабильность тока в данном элементе, вызывающая частичное увеличение эмиттанса, сумма которых дает удвоение;

$\Delta J_i / J_0$ - относительная нестабильность тока для данного элемента, вычисленная с учетом независимости всех источников питания, и их равного вклада в увеличение эмиттанса.

($\Delta J_i = \Delta J_0 / \sqrt{i}$, где i - кол-во элементов).

Данная таблица составлена в приближении $\Delta B/B = \Delta J/J$ во всем диапазоне частот. На самом деле связь B и J является частотнозависимой, и очень сильно зависит от многих параметров (магнитные характеристики магнитопроводов, конструкция обмоток и магнитопроводов, конструкция вакуумной камеры). В работе [2] приводятся результаты исследований связи B и J в диапазоне частот от 50Гц до 1кГц для электромагнитов и линз, выполненных из нешихтованной стали, и имеющих характерные для ускорителей размеры.

Показано, что в этом диапазоне частот выполняется соотношение $\Delta B/B \leq \Delta J/J$, следовательно, выполнив указанные в таблице требования к стабильности токов, мы гарантированно не увеличим эмиттанс вдвое.

3. Источники питания магнитной системы.

В соответствии с приведенными в таблице требованиями, использовались источники питания различных типов, которые можно разделить на четыре группы по току и мощности потребления. Первая, самая маломощная группа источников питания, с максимальным током потребления до $\pm 3A$, и мощностью до 40 Вт питает обмотки корректирующих магнитов, дополнительные (корректирующие) обмотки поворотных магнитов и фокусирующих линз (всего около 65 источников питания). Ко второй группе можно отнести источники питания с максимальным током до $\pm 20A$ и мощностью до 200Вт, которые питают основные обмотки поворотных магнитов и фокусирующих линз (всего около 50 источников питания). Третья группа включает в себя два более мощных источника питания 165-градусных магнитов с выходным током до 1000 А и мощностью до 10 кВт. В четвертую группу входит источник питания двух соединенных последовательно ондуляторов с выходным током до 2500 А и мощностью до 120 кВт.

Источники питания 1-ой и 2-ой групп представляют собой усилители мощности, которые питаются от источников постоянного напряжения и являются устройствами с глубокой отрицательной обратной связью, обеспечивая на низкоомном шунте напряжение, пропорциональное входному. Упрощенная структурная схема приведена ниже.

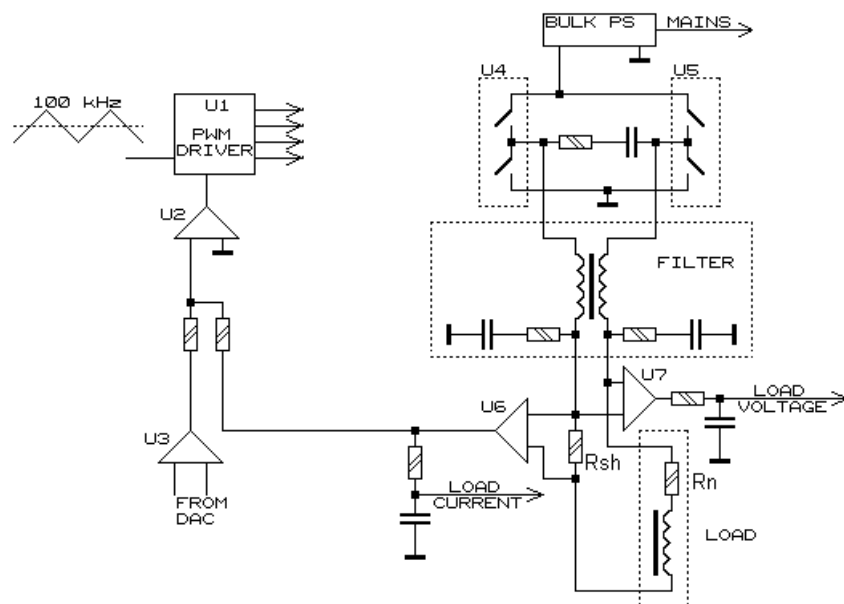


Рисунок 2. Структурная схема источников питания 1-ой и 2-ой группы.

Как следует из схемы, управляющий сигнал с ЦАП, подается на вход буферного усилителя U_3 с симметричным входом и коэффициентом передачи равным единице. С его выхода сигнал подается на усилитель сигнала ошибки U_2 , на который также подается вырабатываемый схемой измерения тока сигнал обратной связи, пропорциональный току нагрузки. Напряжение с выхода усилителя сигнала ошибки поступает на вход широтно-импульсного модулятора (PWM), на который также подается напряжение пилообразной формы частотой 100кГц. В результате суммирования пилообразного напряжения и медленно меняющегося напряжения сигнала ошибки, на выходе модулятора образуются импульсы, длительность которых пропорциональна сигналу ошибки. Далее эти импульсы поступают на схему драйвера (PWM driver), а с её выхода – на мост, выполненный на силовых MOSFET модулях (U_4, U_5), который питается от буферного источника напряжения (Bulk PS). В результате работы моста в нагрузке протекает ток, среднее значение которого равно:

$$\langle I \rangle = \frac{E}{R} \left(\frac{2\tau}{T} - 1 \right)$$

где:

R - активная составляющая сопротивления нагрузки;

E - напряжение силового буферного источника питания;

τ - длительность интервала времени, в течение которого включена одна из диагоналей моста;

T - период работы моста.

При $\tau = T/2$ имеем $\langle I \rangle = 0$, при $\tau = 0$ или $\tau = T$ получаем соответственно $\langle I \rangle = -E/R$ или $\langle I \rangle = E/R$. Этот ток протекает через нагрузку, и измерительный резистор R_{sh} . Масштабный усилитель U_6 , снимающий сигнал с шунта, питается от гальванически изолированного источника напряжений и осуществляет гальваническую развязку силовой и измерительной цепей. Далее измеренное напряжение поступает на усилитель сигнала ошибки, замыкая цепь обратной связи, а также, через сглаживающий фильтр, на АЦП. Таким образом, усилитель с необходимой точностью обеспечивает пропорциональность управляющему напряжению среднего тока, протекающего через нагрузку. Нестабильность выходного тока определяется в основном температурным коэффициентом сопротивления резистора R_{sh} , которая в данном случае (выбран резистор С5-16ВМ) составляет $3 \cdot 10^{-4}$ /град. .

Технические характеристики источников питания:

| | 1гр. | 2гр. |
|--|-----------|-----------|
| Номинальный ток нагрузки. | $\pm 3A$ | $\pm 10A$ |
| Напряжение буферного источника питания. | 12В | 20В |
| Погрешность задания коэффициента передачи (выходной ток/входное напряжение). | $\pm 1\%$ | $\pm 1\%$ |
| Нестабильность выходного тока. | $\pm 6mA$ | $\pm 6mA$ |
| Уровень пульсаций выходного. Напряжения(100 кГц). | 0.1В | 0.1В |
| Управляющее напряжение при номинальном токе нагрузки. | $\pm 6В$ | $\pm 6В$ |

Источники питания второй группы отличаются от первой тем что в них используются более мощные буферный источник, MOSFET модули, а также измерительный резистор R_{sh} .

Мощные источники питания третьей и четвертой групп (поворотные магниты и ондулятор) выполнены на основе трехфазного тиристорного регулятора напряжения. Структурная схема источника питания поворотных магнитов представлена на рисунке :

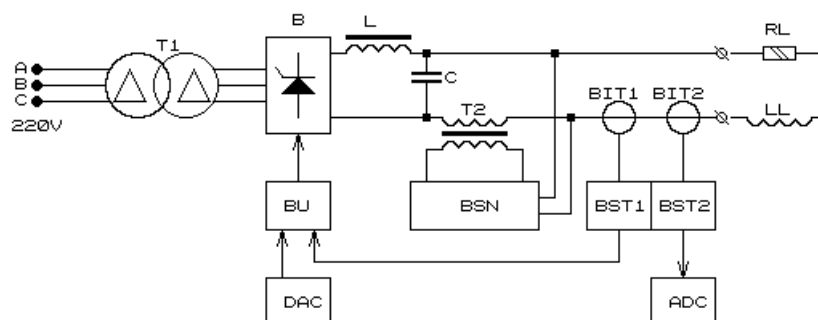


Рисунок 3. Структурная схема источников питания поворотных магнитов.

Источник питается от 3-х фазной сети переменного тока 220В. Силовая часть включает в себя понижающий трансформатор Т1, тиристорный выпрямитель В, LC – фильтр, трансформатор подавления пульсаций Т2 и два бесконтактных магнито-модуляционных измерителя тока ВIT1 и ВIT2.

Выходное напряжение трансформатора Т1 выбрано таким, чтобы в рабочем режиме выходное напряжение выпрямителя имело наименьшую величину пульсаций, т.е. тиристорный выпрямитель близок к диодному, для которого эта величина на частоте 300Гц составляет 13%. Для подавления пульсаций выходного напряжения тиристорного выпрямителя применен LC-фильтр. Для того, чтобы обеспечить устойчивость в замкнутой цепи автоматического регулирования и непрерывность подавления возмущающих факторов в широком диапазоне частот, нижняя граничная частота этого фильтра должна быть ниже верхней частоты пропускания тиристорного выпрямителя, которая в данном случае составляет 300 Гц. Кроме того в практических схемах тиристорных выпрямителей гармоника с частотой 100 Гц из-за перекоса фаз питающего напряжения имеет тоже значительную величину. Поэтому граничная частота фильтра $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ выбрана равной 30 Гц что позволяет ослабить гармоники выходного напряжения частотой 100 Гц и 300 Гц в 10 и 100 раз соответственно.

Для подавления пульсаций выходного напряжения до уровня $U_{\sim}/U_{\text{вых}} \leq 10^{-3}$ в источнике питания поворотных магнитов применена схема активного подавления, состоящая из трансформатора Т2 и блока стабилизации напряжения (BSN), работающего по принципу ШИМ-регулятора.

Для измерения выходного тока в источнике применено два бесконтактного измерителя тока, которые вместе с блоками стабилизации тока (BST) образуют прецизионные измерительные трансформаторы постоянного тока, которые имеют абсолютную погрешность 0.01% и температурную погрешность $1-2 \cdot 10^{-6}$ / град..

Сигнал первого измерителя сравнивается в блоке управления (BU), с выходным напряжением управляющего цифро-аналогового преобразователя (DAC), и используется в цепи стабилизации тока, управляя фазовым углом тиристорного выпрямителя. Выходной сигнал второго датчика поступает на аналого-цифровой преобразователь (ADC) и используется в системе контроля. АЦП кроме выходного тока измеряет также выходное напряжение источника питания, что является дополнительным средством контроля исправности как самого источника, так и цепи нагрузки.

Структурная схема источника питания ондулятора отличается от приведенной выше тем, что в ней отсутствует схема подавления пульсаций (трансформатор Т2 и BSN), так как к стабильности магнитного поля ондулятора предъявляются менее жесткие требования. Кроме этого используется один датчик тока (BIT), который используется как в цепи стабилизации выходного тока, так и в цепи его измерения.

Технические характеристики источников питания 3-й и 4-й групп:

| | Поворотные магниты | Ондулятор |
|---|--------------------|-----------|
| Макс. вых. напряжение. | 12 В | 48 В |
| Макс. вых. ток. | 1 КА | 2.5 КА |
| Амплитуда пульсаций вых. напряжения при макс. выходном токе и выходном напряжении 80% от максимального. | 10 мВ | 0.4 В |
| Нестабильность выходного тока, приведенная к максимальному значению. | 0.2% | 0.01% |
| КПД источника питания при макс. выходных параметрах. | 80% | 92% |
| Тип охлаждения. | вода | вода |
| Максимальная потребляемая мощность. | 15 КВт | 130 КВт |

4. Выбор управляющего оборудования.

Данные требования заставляют использовать два различных типа контроллеров источников питания. Первый тип представляет собой недорогое многоканальное устройство, управляющее источниками питания корректоров. Второй тип представляет собой прецизионный одноканальный контроллер, для управления источниками питания поворотных магнитов и ондуляторов.

Поскольку системы автоматизации в ИЯФ построены на основе стандарта КАМАК, то и управляющие и измерительные блоки (ЦАП и АЦП) для этих систем выполнялись в этом же стандарте. Многоканальный контроллер реализовывался на одной из версий ЦАП16*16 (16-канальный ЦАП) и интегрирующего АЦП с дополнительным коммутатором аналоговых сигналов. Одноканальный контроллер строился на основе прецизионного одноканального ЦАПа и интегрирующего АЦП с аналоговым коммутатором. Такие системы автоматизации имеют ряд недостатков. Во-первых, использование промежуточного конструктива (КАМАК) приводит к возникновению большого количества сигнальных трасс и дополнительных разъёмных соединений, что в свою очередь понижает надёжность и помехозащищённость системы. Во-вторых чтение и запись информации в КАМАК-блоки требует выполнения дополнительных операций с регистрами контроллера крейта. В среднем требуется не менее 6 операций ввода-вывода на передачу одного слова.

В современных системах автоматизации описанные проблемы преодолеваются путем использования микропроцессорных контроллеров, встраиваемых непосредственно в источники питания. Эти контроллеры снабжены необходимым набором цифровых и аналоговых устройств ввода-вывода. Они способны выполнять многие функции автономно, например, осуществлять изменение тока питания магнитных элементов ускорителя по заданному закону, проводить 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.

К моменту проектирования системы управления источниками питания в институте были разработаны микропроцессорные контроллеры источников питания с интерфейсом CANBUS. Сравнительный анализ возможных конфигураций систем управления источниками питания (на основе КАМАК модулей и на основе CANBUS устройств) показал значительные преимущества схемы на основе CANBUS устройств, что однозначно обусловило выбор разработчиков системы. Ниже перечисляется ряд факторов, определивших наш выбор.

- 1) Отсутствие многометровых аналоговых трасс между крейтом КАМАК и стойками с источниками питания. Соответственно, существенно уменьшились наводки на сигнальные трассы, а отсутствие ряда промежуточных разъемов повысило надежность системы.
- 2) Отсутствие КАМАК крейтов, а также крейт-контроллеров, создающих промежуточный интерфейс между программой и исполнительными устройствами.
- 3) Сокращение номенклатуры используемых устройств.
- 4) Система адресации устройств, базирующаяся на идентификаторах стандарта CANBUS не только обеспечивает адресацию к одному устройству, группе или всем устройствам, но также предоставляет возможность подключения к сети нескольких управляющих ЭВМ.
- 5) Протокол обмена и микроконтроллеры устройств обеспечивают получение требуемой информации от оконечных устройств с минимальными программными затратами, и в тоже время предоставляет ряд высокоуровневых функций, облегчающих эксплуатацию системы.
- 6) Отключение одного устройства не влияет на работоспособность остальных частей системы. При подключении к сети (или подаче питания на блок) устройство посылает управляющей ЭВМ сообщение об этом, позволяя включить устройство в рабочий цикл без вмешательства оператора.

Скорость работы CANBUS определяется длиной коммуникационной трассы, для данной системы было выбрано значение скорости 250kBit/sek, что составляет ~2500 сообщений в секунду. Текущие потребности данной системы составляют 120-150 сообщений в секунду в

стандартном режиме (многоканальный режим измерений), что соответствует 4-6% от полной загрузки сети. В режиме одноканальных измерений с максимальным быстродействием 1ms (при измерении пульсаций источников питания) загрузка возрастает до 1100 сообщений в секунду т.е., до 45% загрузки сети.

Контроллеры для сети CANBUS, разработанные в ИЯФ имеют 6-битовый адрес (диапазон адресов - 0-63). Соответственно на одной линии может быть до 64-х контроллеров. В нашей системе используется $12 \cdot 2 + 3 = 27$ контроллеров, что составляет чуть больше трети от максимально-возможного числа устройств в данной сети.

При использовании аппаратуры КАМАК нам потребовалось-бы $3 \cdot \text{ЦАП}16 \cdot 16 + \text{АЦП} + 0.5 \cdot \text{КАС}$ -а, что составляет половину крейта КАМАК. Таким образом, для 4-х стоек маломощного питания потребуется 2 полных крейта. Кроме того, ввиду сильной удаленности стоек мощного питания друг от друга (расстояние между стойками до ~40м) пришлось бы ставить по одному крейту возле каждой стойки питания. Т.е. нужно 5 крейтов КАМАК, что несомненно гораздо дороже предлагаемой системы, и, кроме того, требует дополнительного места для крейтов.

Таким образом, построение системы управления на основе CANBUS устройств является гораздо более экономичным решением.

Система управления источниками питания имеет две основные задачи (режима работы). В основном режиме система управления должна изменять значения тока в элементах магнитной системы по команде оператора (или по запросу от другой ЭВМ) и непрерывно контролировать функционирование системы питания. Контроль функционирования включает в себя:

- проверку соответствия измеренного и заданного токов в обмотках магнитных элементов с помощью цифро-аналоговых преобразователей;
- проверку напряжения на обмотках магнитных элементов. Это позволяет обнаружить такие неисправности как коротки на трассе, ненадежные контакты, перегрев обмотки;
- контроль целостности системы управления и контроля, а также автоматическое восстановление рабочего контекста при включении стоек питания, которые по каким-либо причинам временно отключались.

В большинстве систем управления питанием (и наша не является исключением) система автоматизации должна облегчать обнаружение и диагностику неисправностей источников питания. Если в основном режиме работы измерители(АЦП) должны подавлять частоты, кратные частоте сети,

и поставлять измерения управляющей ЭВМ с достаточно большим интервалом времени, то в диагностическом режиме измерители должны работать с высокой частотой, чтобы зарегистрировать пульсации выпрямителя на выходе источников питания (достаточно частая неисправность). Т.е. измерители должны работать как цифровые осциллографы.

CANBUS-контроллеры имеют ряд функций, значительно облегчающих решение упомянутых задач, по сравнению с аналогичными КАМАК устройствами.

Все контроллеры при включении питания посылают в сеть специальную посылку, описывающую устройство (тип прибора, его идентификатор, программную и аппаратную версию, причину высылки сообщения). Эта же посылка высылается при аномально высоком уровне ошибок в сети и при восстановлении после аппаратных сбоев. Кроме того, протокол обмена предусматривает команду широковещательного запроса «Кто подключен к линии». Описанные свойства позволяют программному обеспечению автоматически обнаруживать и включать в работу новые устройства, периодически проверять работоспособность устройств, не требующих информационного обмена с ЭВМ, а также обнаруживать устройства с неправильным идентификатором (адресом) или с устаревшей версией программного обеспечения.

Для стандартного режима работы аналого-цифровые преобразователи предоставляют режим многоканальных измерений, конфигурируемый единственной командой, определяющей каналы, подлежащие обмеру, скорость обмера каналов и некоторые другие возможности. После получения этой команды блок непрерывно сканирует все указанные каналы и высылает измерения в сеть (либо оставляет во внутренней памяти).

Для регистрации формы выходных сигналов (тока и напряжения) источников питания блок предоставляет осциллографический одноканальный режим. В этом режиме устройство может измерять входной сигнал с частотой до 1кГц. В отличие от аналогового КАМАК модуля, здесь измеряемые данные занимают часть пропускной способности сети, а процессорное время тратится незначительно, благодаря архитектуре интерфейса CANBUS и драйвера, обслуживающего интерфейс. В этом режиме ЭВМ практически свободна. В случае КАМАК устройства, где обмен осуществляется по программному каналу, на прием осциллографической картинки тратится практически все процессорное время. Описанное выше позволяет проводить контроль пульсаций автоматически с некоторым периодом. Если возникает потребность

регистрировать какой-то канал непрерывно (например, канал, подозреваемый в редких проявлениях каких-либо неприятностей) CANBUS измерители могут записывать «осциллографическую картинку» во внутренний кольцевой буфер на 4000 измерений, не загружая сеть. Эта информация может быть запрошена управляющей ЭВМ тогда, когда она сочтет это нужным.

Ниже представлены основные параметры устройств, использованных при построении системы автоматизации магнитной системы лазера на свободных электронах.

| <i>Параметр</i> | <i>CANDAC16</i> | <i>CANADC40</i> | <i>CDAC20</i> |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Разрешение ЦАП | 16 бит | - | 21 бит |
| Точность ЦАП | 0,05% | - | 0,005% |
| Число каналов ЦАП | 16 | - | 1 |
| Разрешение АЦП | - | 23 бит | 23 бит |
| Точность АЦП | - | 0,03% | 0,003% |
| Число каналов АЦП | - | 40 | 5 |
| Шкала (входная/выходная) | 10 В | 10 В | 10 В |
| Число каналов входного регистра | 8 | 8 | 8 |
| Число каналов выходного регистра | 8 | 8 | 8 |

5 . Размещение источников питания и схема соединения контроллеров с управляющей машиной.

Вся система питания и управления магнитной системой включает в себя 4 стойки маломощного питания, 2 стойки мощного питания поворотных магнитов и стойку питания ондулятора.

Схема коммуникации всех контроллеров с центральной машиной и схематичное расположение стоек питания показано на рисунке:

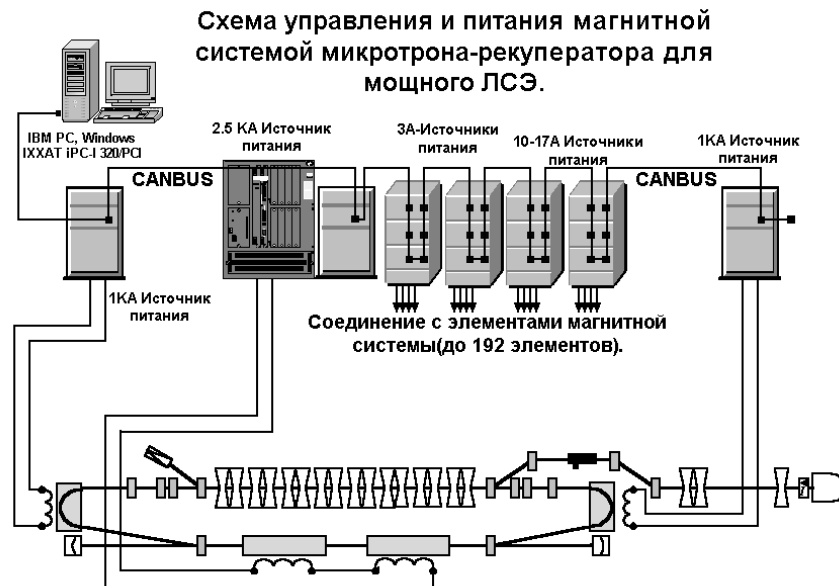


Рисунок 4. Схема управления и питания элементов магнитной системы.

Каждая стойка маломощного питания (3А и 10-17А стойки) имеет по 3 секции. Каждая секция управляется парой ЦАП-АЦП и может содержать до 16-ти источников питания. Соответственно, в 4-х стойках может быть до 192-х источников питания. На настоящий момент используется около 120 источников. В дальнейшем планируется добавить еще около 30 источников (магнитные элементы инжектора). Таким образом, остается свободных еще ~40 резервных мест для источников питания.

Размещение контроллеров CANDAC16-CANADC40 и источников питания в стойке показано на фотографии:

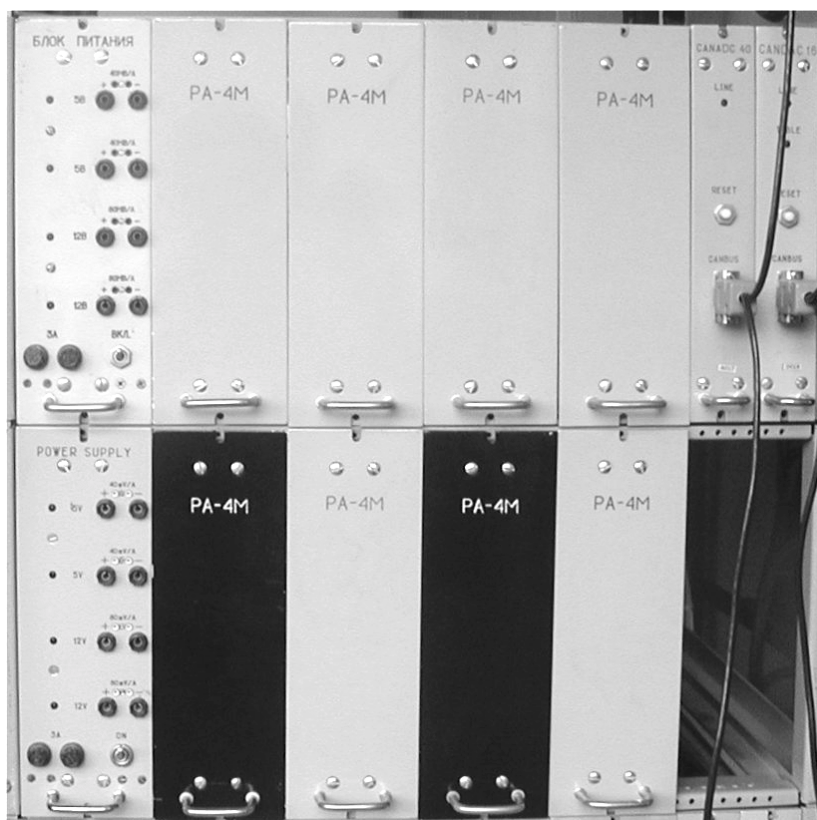


Рисунок 5. Размещение контроллеров CANDAC16-CANADC40 и маломощных источников питания.

Пара ЦАП-АЦП управляет 16-ю источниками, размещенными в 8-ми блоках (по 2 источника в блоке). Каждый источник имеет управляющий вход, управляемый одним из каналов ЦАП-а, и два выхода, выдающих напряжение, пропорциональное измеряемому самим источником току, и напряжение, пропорциональное измеряемому падению напряжения на нагрузке (магнитном элементе). Эти 2 выхода подключены к 2-м каналам АЦП. Таким образом используется $16 \cdot 2 = 32$ канала АЦП.

Размещение контроллеров CDAC20 в стойках предназначенных, как говорилось выше, для управления одноканальными источниками, показано на фотографии:

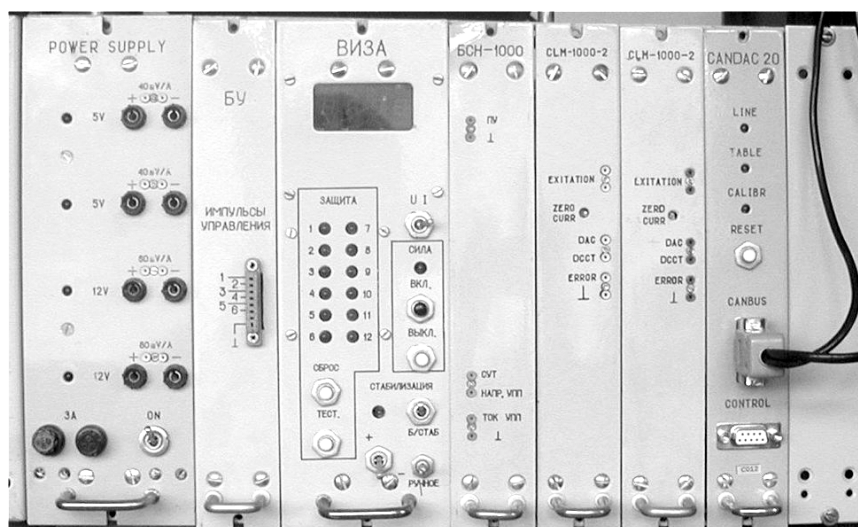


Рисунок 6. Размещение контроллеров CDAC20 в стойках мощных источников питания.

Блок CDAC20 размещен в этаже управляющей электроники рядом с блоком измерителя тока, блоком управления блокировок, и др. управляющей аппаратурой. В процессе работы используется 1 канал ЦАП для задания тока, и 5 каналов АЦП – 1 для контроля заданного тока, 2 канала для контроля измеряемого тока, и 2 канала для контроля измеряемого напряжения. Также для контроля состояния блокировок используется входной регистр. Выходной (управляющий) регистр используется для удаленного (программного) включения силового питания и, иногда, для сброса блокировок.

5. Программное обеспечение.

Учитывая предназначение и структуру данной системы, а также общие требования к управляющим программам, работающим в интегрированной системе управления, можно сформулировать следующие требования, которым должно удовлетворять программное обеспечение для данной системы:

- 1) Возможность управлять источниками питания с консоли управляющей машины.
- 2) Возможность удаленного управления с главной операторской машины через интерфейс Erics Channel Access .
- 3) Возможность сохранять и загружать набор всех заданных токов всех источников питания (сохранение и восстановление режима).
- 4) Наличие «сторожа», постоянно контролирующего значения измеряемого тока, напряжения для выявления возможных неисправностей источников питания и соединений магнитных элементов (обрыв обмотки, перегрев, плохой контакт, неисправность источника и т.д.).
- 5) Возможность осуществлять одноканальные (осциллографические) измерения любого источника с предельно-возможной скоростью для выявления возможных пульсаций тока напряжения в источниках питания.
- 6) Возможность проводить размагничивание всех элементов системы.
- 7) Наличие справочного руководства по использованию программы.

В качестве устройства, обеспечивающего интерфейс CAN-to-PC, используется плата iPC-I 320/PCI немецкой фирмы IXXAT выполненная в PCI –формате.

Для взаимодействия с этой платой на программном уровне используется набор библиотек, называемый VCI (Virtual CAN Interface), разработанный фирмой IXXAT для работы со своими платами под операционными системами типа Windows. VCI представляет собой набор функций, которые позволяют управлять работой платы, посылать и принимать сообщения от контроллеров в CAN-сети, создавать очереди входящих и выходящих сообщений и т.д.

Программа управления источниками питания магнитной системы была написана под операционной системой Windows с использованием

библиотеки VCI. Использовалась среда разработки Microsoft VisualC++ 6.0.

Примерная внутренняя структура программы изображена на схеме :

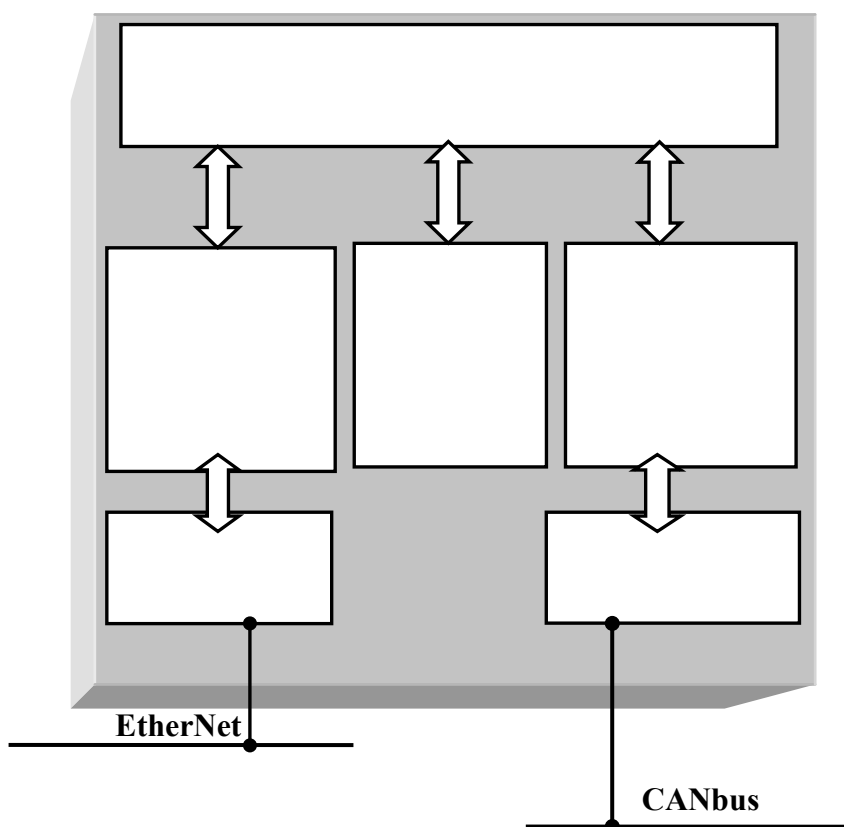


Рисунок 7. Примерная внутренняя структура управляющего программного обеспечения.

Программа взаимодействует с контроллерами источников питания с помощью отправки и приема сообщений из сети (доп.поток 3 на схеме) . Преобразование полученных пакетов в значения токов элементов, и обратно, контроль ошибок осуществляется в другом потоке (доп.поток 2). Еще один

поток (доп.поток 1) создается для работы Epics Channel Access Server-a, который обеспечивает удаленное управление системой. Данная организация программы обеспечивает её стабильную работу даже на сравнительно слабой машине без перегрузок и зависаний.

Основные возможности программы:

1) Сохранение значений заданных токов всех элементов (режим) на данный момент времени в файл, загрузка режима из файла, при этом программа сама выставляет нужные токи в источники питания автоматически.

2) Непрерывный контроль соответствия заданного тока и измеренного. В случае слишком большой разницы (переход за предел, установленный пользователем), предусмотрена цветовая индикация данного элемента в главном окне программы.

3) В случае если включен Epics Channel Access Server, можно осуществлять удаленное управление элементами, то-есть задавать и контролировать токи элементов с любой другой машины в данной локальной сети.

4) Размагничивание всех элементов системы. На элемент подается переменный ток чередующейся полярности затухающей амплитуды от максимума тока источника до нуля.

5) При повторном включении стойки источников питания программа сама восстанавливает заданные токи элементов. И наоборот, при закрытии программы, она оставляет текущие значения токов, а при запуске считывает эти значения из ЦАП-ов и объявляет их как заданные токи элементов. Это позволяет удалять и снова запускать программу, сохраняя при этом весь режим магнитной системы без изменений.

6) Возможность осуществлять одноканальные измерения любого выбранного элемента с любым временем измерения (Цифровой осциллограф).

7) Запуск на измерение всех измеряющих каналов АЦП в одноканальном режиме последовательно для всех источников питания. Полученные результаты позволяют выявить возможные пульсации в напряжении и токе источника питания с частотой до 300Гц. (Тест стабильности источников).

Главное окно программы изображено на рисунке:

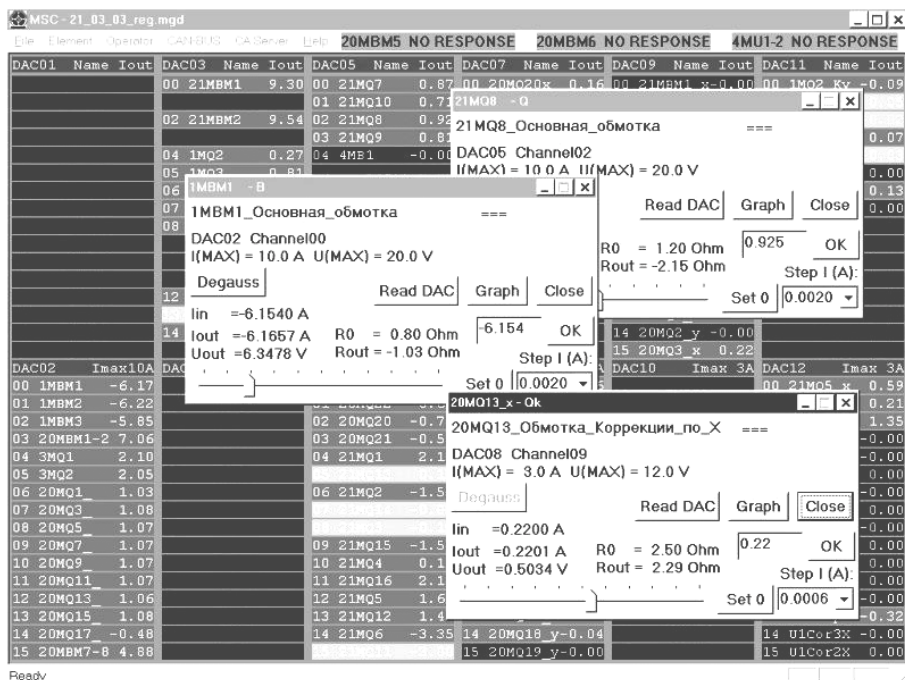


Рисунок 8. Главное окно программы.

На передней панели программы схематично отображены все источники питания, находящиеся в 4-х стойках малоомощного питания в виде строк различного цвета. Цвет текста строки показывает, подключен данный источник питания или нет. Цвет фона строки показывает текущее состояние элемента и правильность работы источника питания. Содержание строк показывает порядковый источника питания в данной секции (или номер канала ЦАП-а), имя элемента магнитной системы, управляемого данным источником, и текущее значение заданного тока в нем.

Строки элементов сгруппированы в столбцы по 16 штук (по числу источников питания в секции), а столбцы пронумерованы в соответствии с общим номером данной секции в стойках: DAC01–DAC12 – всего 12 секций в 4-х стойках. Данная схема позволяет пользователю наглядно контролировать а) Наличие свободных мест в стойках для подключения

новых элементов. б) Текущее состояние системы и наличие токов в магнитных элементах.

Управление мощными источниками питания производится из отдельной диалоговой панели, вызываемой из меню программы (см. рисунок).

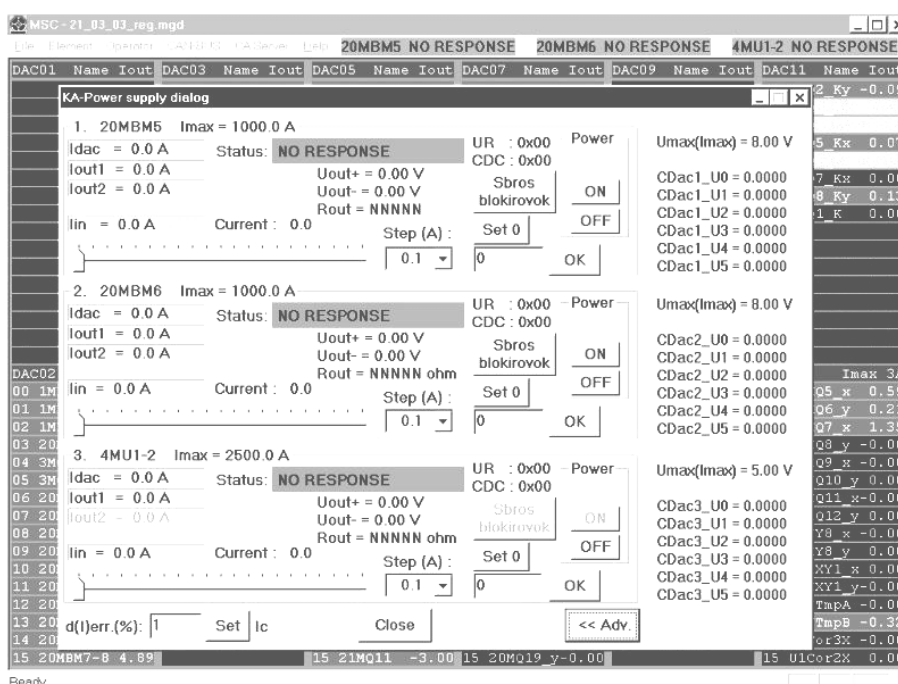


Рисунок 9. Окно для управления мощными источниками питания.

Сразу после старта программа читает значения всех каналов всех ЦАП-ов, оказавшихся в данный момент включенными, и преобразует полученные значения в заданные токи соответствующих элементов. После этого программа запускает все нужные (те, к которым подключен хотя бы один элемент) АЦП в режим многоканальных измерений по каналам от 0-го до 31-го с временем измерения 20мс. При этом цикл обхода всех каналов АЦП примерно равен 2 секундам. Контроллеры мощных источников питания (CDAC20) также включаются в режим многоканальных измерений.

В процессе работы программа непрерывно принимает пакеты со значениями напряжения каналов АЦП, преобразует их в измеряемые токи и напряжения в соответствии с коэффициентами, относящимися к данному источнику питания, и выводит их на экран. Пользователь имеет возможность контролировать текущие значения тока как с главного окна программы, так и вызвав индивидуальную диалоговую панель для любого элемента правым щелчком мыши на строке элемента в главном окне программы.

Кроме того, непрерывно анализируется состояние всех устройств на линии по наличию приходящих от него сообщений. Если от какого-то контроллера долго ничего не приходит, то он объявляется недоступным, вместе со всеми элементами, подключенными к этому контроллеру. При включении какой-либо стойки или секции после запуска программы она “подключает” все появившиеся контроллеры в работу, при этом, в каналы ЦАП-ов заносятся нужные значения, АЦП пускаются в режим многоканальных измерений, а соответствующие им элементы становятся доступными для работы. Это возможно благодаря тому, что при включении питания все контроллеры, разработанные в ИЯФ, сигнализируют об этом, посылая в сеть сообщение определённого формата.

Периодически, один раз в секунду производится чтение входного регистра контроллеров CDAC20. Полученные данные используются также для контроля состояния мощных источников питания и состояния блокировок.

Также раз в 10 минут производится процедура калибровки ЦАП-а всех блоков CDAC20.

Изменение тока источника питания может осуществляться всего несколькими способами:

1. Из диалогового окна данного элемента.
2. При загрузке ранее сохраненного режима из файла.
3. Через Epics Channel Access Server, задавая значения соответствующих Process Variables.
4. Из диалоговых панелей “Composite Element” и “Multi-Element Set”, позволяющих изменять токи сразу в группах элементов.

Для контроля правильности работы источников питания в программе предусмотрено несколько возможностей.

Первая из них – так называемый «сторож». В процессе работы программа непрерывно сравнивает значение заданного тока со значением измеренного тока, и если относительная разница превысила определенный порог (в %), то строка с этим элементом в главном окне выводится другим цветом. Предусмотрены 2 предела, которым соответствуют 2 цвета – желтый

– 1-й предел, красный – 2-й предел. Включение и выключение этого режима, задание пороговых значений осуществляется в настройках программы.

Вторая возможность – измерение значения тока или напряжения источника в одноканальном режиме. В программе эту операцию можно осуществлять двумя способами.

Первый способ (сканировать любой канал по-выбору) реализован в диалоговом окне “Single-Channel Test”. Это окно представляет собой, по сути, цифровой осциллограф. Оно позволяет измерять выбранный канал с любым доступным временем интегрирования, менять масштаб выводимой картинке, и т.д. Этот способ подходит, если нужно детально исследовать какой-либо один источник питания.

Второй способ реализован в диалоговом окне “Stability Test”. При старте программа начинает одноканальные измерения (по очереди) всех каналов АЦП, которые измеряют ток или напряжение (по выбору) всех источников питания. Измерение одного канала продолжается в течении некоторого времени (по умолчанию 200мс). После этого программа останавливает одноканальный режим измерений, выводит на экран полученные данные, обрабатывает их и переходит на соответствующий канал АЦП, соответствующий следующему активному источнику питания. Так продолжается, пока программа не обойдет все источники питания. Есть возможность запустить этот процесс в циклическом режиме.

Обработка полученных данных производится следующим образом: из полученных значений находится среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Эта величина отражает величину разброса напряжения канала (а значит и измеряемого тока в элементе) по времени. Далее на графике данного диалогового окна отображается относительная величина этого отклонения, что позволяет оператору визуально контролировать относительную величину нестабильности всех элементов магнитной системы, и выявлять «плохие источники». При этом есть возможность выбрать любой источник питания, повторно измерить соответствующий ему канал АЦП, и посмотреть на распределение напряжения канала от времени. На рисунке показана диалоговая панель с результатами измерения всех источников магнитной системы. Верхний график в виде гистограммы – набор вертикальных линий, каждая линия означает среднеквадратичное отклонение измеренного значения для каждого источника, нижний график – распределение по времени измеренного напряжения канала АЦП для одного из источников питания. Для примера выбран источник питания с пульсациями в 100Гц.

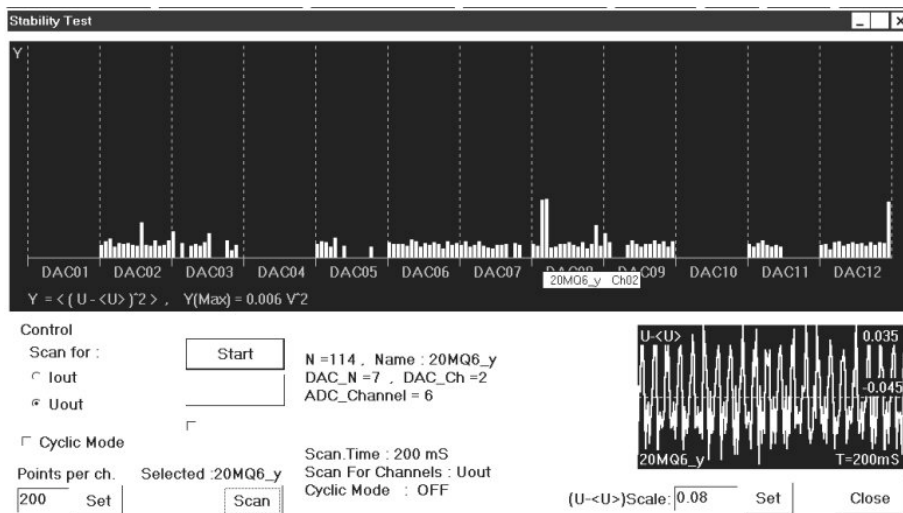


Рисунок 10. Диалоговое окно для диагностики источников питания.

Данный режим работы требует немного системных ресурсов, и может выполняться в фоновом режиме, параллельно с основной работой программы, не мешая работе оператора.

Удаленное управление магнитной системы осуществляется через интерфейс Erics Channel Access. При работе Channel Access Server-а главное окно программы остается без изменений, не внося каких-либо ограничений в работу оператора, и позволяет контролировать процесс удаленного управления, задание новых значений токов и т.д..

Таким образом, программа удовлетворяет основными требованиям, необходимым для данной системы. Описанные выше возможности позволяют оператору полностью контролировать магнитную систему, сравнительно легко управлять движением пучка в канале ускорителя, вести контроль источников питания, быстро находить неисправности в них. В течении года своей работы программа продемонстрировала высокую надежность и удобство в использовании.

7. Заключение.

На настоящий момент полностью собрана и работает первая очередь лазера на свободных электронах. Получена генерация когерентного излучения на длине волны 120 микрон. В процессе эксплуатации магнитная система продемонстрировала высокую надежность работы. Данная реализация системы позволяет очень легко добавлять, убирать, перемещать элементы магнитной системы, заменять источники питания и управляющие контроллеры. Эти действия можно производить, не перезагружая управляющую программу и не выключая другие источники питания. Контроль работы источников питания позволяет быстро выявлять и исследовать неисправности в работе отдельных источников питания, и всей системы питания в целом. Возможность удаленного управления управляющей программой через интерфейс Eric's Channel Access позволяет интегрировать её в общую систему управления.

Отсутствие большого количества сигнальных кабелей, трасс существенно упрощает доступ к источникам питания и повышает надежность системы. Канал связи управляющей машины со стойками питания занят на 4%, как и было заявлено. Архитектура построения является масштабируемой, что позволит произвести дополнение системы питания до своей полной мощности без модификаций программного обеспечения.

Руководство для пользователя программного обеспечения находится на пультовой ЛСЭ, а описание использованных в системе управления устройств с CANBUS интерфейсом по адресу <http://www.inp.nsk.su/~kozak/designs/designs.htm>.

Приложение А. Требования к стабильности магнитного поля в различных элементах микротрона-рекуператора.

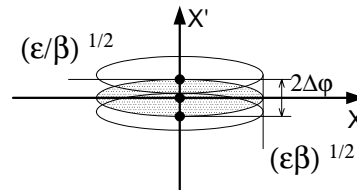
Нестабильности магнитного поля в элементах магнитной системы ускорителя приводят к эффективному увеличению эмиттанса электронного пучка. Наиболее требовательными к стабильности магнитного поля являются поворотные магниты.

Рассмотрим поведения электронного пучка на фазовой плоскости при прохождении поворотного магнита с полем B_0 и углом поворота φ_0 . Изменения поля в поворотном магните на величину ΔB приведет к дополнительному углу поворота электронного пучка на угол

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta B}{B_0} \operatorname{tg}\varphi_0.$$

Пучок на фазовой плоскости смещается вверх или вниз, в зависимости от величины и знака ΔB , в среднем занимая больший фазовый объем (см. рисунок). Оценка максимального угла $\Delta\varphi$, для увеличения эмиттанса не больше, чем в два раза дает величину

$$\Delta\varphi < \sqrt{\frac{\varepsilon}{\beta}}.$$



Для электронного пучка в инжекционном канале $E=2$ МэВ, эмиттанс $\varepsilon = 6$ мм*мрад, β -функция 10 м, получаем $\Delta\varphi < 8 \cdot 10^{-4}$. Для поворотных 30-градусных магнитов получаем необходимую стабильность поля

$$\frac{\Delta B}{B_0} < 1.3 \cdot 10^{-3}, \text{ или на рабочем токе } I_0 = 7 \text{ А, } \Delta I = I_0 \frac{\Delta B}{B_0} = 10 \text{ мА.}$$

Для электронного пучка максимальной энергии $E=14$ МэВ эмиттанс $\varepsilon = 1$ мм*мрад, β -функция 20 м, получаем $\Delta\varphi < 3 \cdot 10^{-4}$. Для поворотных 15-градусных магнитов получаем необходимую стабильность поля

$$\frac{\Delta B}{B_0} < 8 \cdot 10^{-4}, \text{ или на рабочем токе } I_0 = 10 \text{ А } \Delta I = I_0 \frac{\Delta B}{B_0} = 8 \text{ мА.}$$

Рассмотрим влияние нестабильности поля в корректоре на эмиттанс электронного пучка. В отличие от поворотных магнитов, углы создаваемые корректирующими элементами сами по себе являются малыми величинами

$$\varphi_{cor} = \frac{e \int B_0 dZ}{pc}.$$

Интеграл магнитного поля для корректоров при токе в обмотках 1А равен 250 Гс см.

Для энергии инжекции 2 МэВ, получим $\varphi_{cor} = 4 \cdot 10^{-2}$ при токе 1А. Из предыдущего мы знаем, что величина $\Delta\varphi$ желательна меньше, чем $8 \cdot 10^{-4}$, то есть ограничения на нестабильность тока в корректоре

$$\Delta I = I_0 \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{cor}} = 20 \text{ мА.}$$

При максимальной энергии 14 МэВ

$$\varphi_{cor} = 5 \cdot 10^{-3}, \Delta\varphi < 3 \cdot 10^{-4},$$

следовательно $\Delta I = 60$ мА.

Так как магнитная система инжекционного канала насчитывает 9 корректоров, предполагая, что нестабильности имеет случайный характер получим необходимое ограничение на стабильность тока $\Delta I < \frac{20}{\sqrt{9}} \cong 7$ мА. В магнитной системе основного ускорителя-рекуператора насчитывается 40 корректоров $\Delta I < \frac{60}{\sqrt{40}} \cong 9$ мА.

Перейдем к рассмотрению требований к источникам питания основных поворотных магнитов. Из-за сохранения полного угла поворота в магнитных зеркалах, здесь более существенным становится требование на сохранение времени прохождения оборота, соответственно стабильности времени прохождения электронным пучком замедляющих резонаторов на обратном пути. Требования на точность фазы прохождения резонаторов, без существенного увеличения потерь тока, $\Delta\psi = \pm 0.5^\circ$, что на нашей частоте ВЧ системы $f_{ВЧ} = 180.4$ МГц, соответствует, точности длины траектории $\Delta l = \pm 2.3$ мм. Радиус поворота в магнитном зеркале фактически задан вакуумной камерой и составляет $R = 267$ мм. Соответственно требование на стабильность тока в обмотках магнитных зеркал $\Delta I/I = \Delta l/\pi R = \pm 3 \cdot 10^{-3}$.

Требования на стабильность тока в источнике питания ондуляторов, легко понять из требований на ширину линии излучения лазера на свободных электронах.

Длина излучения в ЛСЭ: $\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$, где λ_w -длина периода ондулятора,

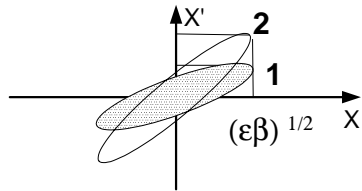
γmc^2 -энергия электронного пучка, K -параметр ондуляторности, который линейно зависит от поля в ондуляторе, соответственно и от тока в обмотках.

Тогда:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta K}{K} = \frac{1 + K^2/2}{K^2} \frac{\Delta \lambda}{\lambda}.$$

Естественная ширина линии излучения определяется длительностью светового сгустка ($L_{сгустка} \sim 4$ см) и длиной волны излучения ($\lambda \sim 120$ мкм) и равна $\Delta \lambda/\lambda \sim 3 \cdot 10^{-3}$. На фоне естественной ширины линии возникает требование на стабильность длины волны в половину ширины линии. Нас интересует случай изменения K от 0.5 до 1.2, получаем $\Delta I/I < 1.5 \cdot 10^{-3}$.

Рассмотрим поведение пучка на фазовой плоскости при прохождении линзы с фокусным расстоянием f_0 . Изменения фокусного расстояния на величину Δf , приведет к тому, что пучок на фазовой плоскости повернется на другой угол и у него, при неизменном эмиттансе, будут другие параметры Твисса (см. рис.).



Для оценки эффективного эмиттанта воспользуемся формулой выражением для эмиттанта:

$$\epsilon^2 = \langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2.$$

Параметры Твисса для пучка определяются из следующих соотношений: $\langle x^2 \rangle = \beta \epsilon$, $\langle x'^2 \rangle = \gamma \epsilon$, $\langle xx' \rangle = \alpha \epsilon$. Будем считать, что оба

состояния пучка на фазовой плоскости с параметрами $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ и с параметрами $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ равновероятны. Тогда

$$\epsilon^2 = \epsilon_0^2 \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} - \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right)^2 \right) = \frac{\epsilon_0^2}{4} |I_1 + I_2|,$$

где I_1, I_2 матрицы Твисса электронного пучка в состояниях 1 и 2 соответственно. Для тонкой линзы матрица преобразования выглядит следующим образом:

$$M_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}.$$

При прохождении пучком электронов магнитной системы, имеющей матрицу M , матрица Твисса, характеризующая пучок, преобразуется, по формуле $I = M \cdot I_0 \cdot M^{-1}$. Легко получить, что $I_2 = M_{\Delta(1/f)} \cdot I_1 \cdot M_{\Delta(1/f)}^{-1}$.

Следовательно $\alpha_2 = \alpha_1 + \beta_1 \cdot \Delta(1/f)$, $\beta_2 = \beta_1$, $\gamma_2 = \gamma_1 + \beta_1 \cdot (\Delta(1/f))^2 + 2\alpha_1 \cdot \Delta(1/f)$ и

$$\epsilon = \epsilon_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_1 \cdot \Delta(1/f)}{2} \right)^2}.$$

Характерная оценка для величины пульсаций силы линзы получается: $\Delta(1/f) < 2/\beta_1$. Сила линзы

$$1/f = \frac{e \int G dz}{pc},$$

из магнитных измерений квадрупольных линз, известно, что при токе в катушках 1 А интеграл градиента получается: $\int Gdz = 190$ Гс. Тогда, для энергии инжекции 2 МэВ и β -функции 10 м $\Delta I < 75$ мА, для полной энергии 14 МэВ β -функции 30 м $\Delta I < 140$ мА.

Отклонения траектории электронного пучка от положения центра линзы может достигать $d=5$ мм. В этом случае линза с фокусным расстоянием f_0 начинает работать как корректор с углом коррекции $\phi_{lans} = \frac{d}{f_0}$.

Нестабильность в фокусном расстоянии Δf приводит к случайному дополнительному углу $\Delta\phi_{lans} = d \cdot \Delta(1/f)$, из предыдущего известно, что величина этого угла должна быть не больше $\Delta\phi = 3 \cdot 10^{-4}$, следовательно

$$\Delta(1/f) < \frac{\Delta\phi}{d} = 6 \cdot 10^{-2}.$$

Преобразовывая фокусную силу в силу тока в катушках линзы, для энергии инжекции 2 МэВ получим $\Delta I = 22$ мА, для энергии 14 МэВ $\Delta I = 145$ мА.

То есть требование к стабильности поля в линзе как корректора сильнее, чем как собственно линзы. В магнитной системе инжекционного канала 9 линз, соответственно $\Delta I = \frac{22}{\sqrt{9}} = 7$ мА, на основной энергии 40 линз

$$\Delta I = \frac{145}{\sqrt{40}} = 23 \text{ мА}.$$

Список Литературы :

1. A.M. Batrakov, V.P. Bolotin, A.N. Dubrovin, O.I. Deichuli, Yu.A. Evtushenko, N.G. Gavrilov, O.B. Golubenko, E.I. Gorniker, D.A. Kairan, M.A. Kholopov, V.V. Kolmogorov, E.I. Kolobanov, A.A. Kondakov, S.A. Krutikhin, V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, E.A. Kuper, I.V. Kuptsov, G.Ya. Kurkin, L.E. Medvedev, A.S. Medvedko, E.G. Miginsky, S.V. Miginsky, L.A. Mironenko, A.D. Oreshkov, V.K. Ovchar, S.P. Petrov, V.M. Petrov, T.V. Salikova, I.K. Sedlyarov, M.A. Scheglov, S.S. Serednyakov, O.A. Shevchenko, E.I. Shubin, A.N. Skrinsky, S.V. Tararyshkin, L.A. Timoshina, A.G. Tribendis, V.F. Veremeenko, N.A. Vinokurov, P.D. Vobly, N.I. Zinevich. "Status of the free electron laser for the Siberian centre for photochemical research", Nucl. Instr. and Meth. A470 (2001), pp. 60 - 65.
2. С.П.Петров. "Разработка тиристорных источников стабилизированного тока для питания магнитных элементов накопителей заряженных частиц". Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск. 1987.
3. В.Р.Козак, Э.А.Купер. Микропроцессорные контроллеры для управления источниками питания. Препринт ИЯФ 2001-70, 2001.