

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

Т.В. Саликова, М.А. Щеглов,
В.А. Овчар, А.Д. Орешков

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ИНЖЕКТОРОМ ЛСЭ НА БАЗЕ EPICS

ИЯФ 2003-74

Novosibirsk
2003

**Программное обеспечение
системы управления инжектором ЛСЭ на базе EPICS**

*Т.В. Саликова, М.А. Щеглов,
В.А. Овчар, А.Д. Орешков*

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

Аннотация

Система управления 1.5МэВ инжектором ЛСЭ построена на базе портированного EPICS. Это позволяет использовать недорогое оборудование: персональные компьютеры и CAMAC модули, разработанные в нашем институте. Эта работа описывает ОПИ и ИОС уровни системы управления инжектором.

Control system of FEL injector based on EPICS

T.V. Salikova, M.A. Scheglov, V.K. Ovchar, A.D. Oreshkov

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

The control system of the 1.5MeV FEL injector is built on the base of ported EPICS. It uses low-cost hardware: personal computers and CAMAC equipment produced by our institute. This article describes OPI and IOC parts of control system of the injector.

Введение

Строительство первой очереди ЛСЭ проводилось поэтапно, одновременно с вводом в действие части комплекса ЛСЭ создавалась и отдельная для ее управления система, решающая ряд технологических задач, возникающих при наладке оборудования, а также выполняющая функции управления и сбора данных. На ранней стадии для управления инжектором, ВЧ системой и другими системами применялись отдельные персональные компьютеры под управлением Window95, не связанные между собой. При эксплуатации ЛСЭ в рабочем режиме появляется острая необходимость в создании распределенной системы управления.

Поставленная задача была решена посредством создания распределенной системы управления на базе EPICS [1] (Experimental Physics and Industrial Control System). EPICS – комплекс инструментальных программных средств, предназначенных для создания распределенных систем управления. EPICS состоит из трех базовых частей: OPI, IOC, CA.

OPI (OPerator Interface) обеспечивает удобный интерфейс для оператора, предоставляет инструментальную среду для создания статических баз данных и управляющих программ. В каждый IOC загружается **база данных** и стартует ряд процессов для управления ресурсами IOC. База данных состоит из записей (record – рекорд) со сложной структурой, каждая из которых, описывают выделенную часть оборудования и определяют алгоритм работы с ним, а также формат преобразования данных, считанных с датчика в инженерную единицу измерения (и обратное преобразование).

IOC (Input/Output Controller) – это компьютер с подключенным к нему оборудованием, под управлением операционной системы жесткого времени.

CA (Channel Access) обеспечивает весь необходимый комплекс сетевых функциональных возможностей на базе протокола TCP/IP.

Был выполнен ряд работ по расширению функциональных возможностей EPICS [2], что позволило сократить финансовые затраты на приобретение стандартного набора программных и аппаратных средств, поддерживаемых EPICS. Это позволило на OPI и IOC уровнях использовать персональные компьютеры с процессорами класса Intelx86, и подключить к IOC аппаратуру SAMAC, разработанную в нашем институте.

На рисунке 1 представлена схема первой очереди создания мощного лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на основе микротрона–рекуператора [3], параметры которого приведены в таблицы 1.

Таблица 1. Параметры ускорителя-рекуператора

Частота ускоряющего ВЧ	180.4 МГц
Группирующий ВЧ резонатор	1
Число ускоряющих ВЧ резонаторов	18
Амплитуда ВЧ на резонаторе	800 кВ
Число орбит	1
Энергия инжекции	1.5 МэВ
Максимальная энергия электронов	14 МэВ
Максимальная частота следования сгустков	22.5 МГц
Максимальный средний ток	50 мА
Заряд сгустка	0.5 ÷ 1.5 нКл

На выходе из пушки энергия электронов пучка достигает 300 кэВ, на выходе из инжектора 1.5 МэВ, после прохода ВЧ линейки микротрона энергия пучка может достигать 14 МэВ. Из эго следует, что в случае аварийной ситуации, когда возможно попадание пучка на стенки вакуумной камеры, необходимо выполнить операцию «запирание пушки»¹, все другие варианты не эффективны.

В системе управления ЛСЭ предусмотрены следующие аппаратные и программные варианты аварийных отключений. Потери пучка можно определять по датчикам среднего тока (**BDCM** на рис.1). Аппаратно устанавливаются предельные значения потерь, если значения потерь превышены, происходит отключение таймера (таймер управляет частотой следования сгустков). Эта защита продублирована программно.

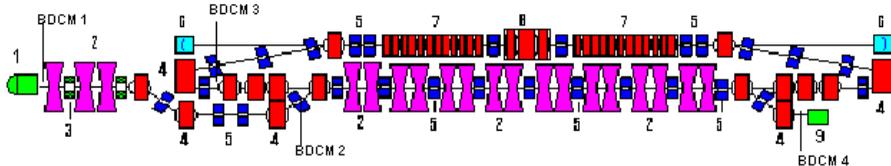


Рис. 1. Схема первой очереди ЛСЭ.

Программа следит не только за предельными значениями потерь тока, но и за «отпиранием пушки»². Если ток превышает значение максимального среднего тока, то программа быстро отключает напряжение на ускоряющей трубке и производит отключение питания пушки.

¹ Процедура «запирание пушки» включает следующую последовательность действий: отключение таймера (устройство управляет частотой следования сгустков), снятие высокого напряжения с ускоряющей трубкой, отключение системы питания пушки.

² Сбой в работе системы управления пушкой, который приводит к попаданию всего тока эмитированного катодом в ускоряющую трубку.

Попадание пучка на стенки камеры можно определить по увеличению уровня радиации или вакуума, по росту температуры. К сожалению, это медленные диагностики, время обработки сигнала с ионизационной камеры ~1 сек. Время сканирования всех термодатчиков равно приблизительно 5 сек. Выборка данных из вакуумного датчика происходит приблизительно за 10 ~ 500 мсек. Это обстоятельство не позволяет использовать показания применяемых датчиков в системах защиты, а использовать, в основном, только для контроля прохождения пучка. Управляющие программы **OPI** уровня отслеживают изменение этих параметров, если значения параметров достигают предельного уровня, то следует сигнал предупреждения, в зависимости от параметров рабочего состояния инжектора проводится «запирание пушки».

На рисунке 2 представлена схема распределенной системы управление ЛСЭ. Для управления инжектором и ВЧ системой используется отдельные ИОС, с подключенной к ним CAMAC аппаратурой. Компьютеры «**gun**» и «**rf**» находятся под управлением операционной системы реального времени LynxOS, с поддержкой графической системы X11-Windows и стандартного набора сетевых служб, что позволяет использовать «**gun**» и «**rf**» в качестве ИОС (Input Output controller) и OPI одновременно. Каждый ИОС может работать самостоятельно независимо от других частей системы управления ЛСЭ, обеспечивая весь комплекс функциональных возможностей ИОС и OPI уровней, а также работать как составная часть распределенной системы без каких либо изменений в конфигурации системы. Эта возможность часто используется при проведении наладочных работ, когда необходима работа с конкретным ИОС.

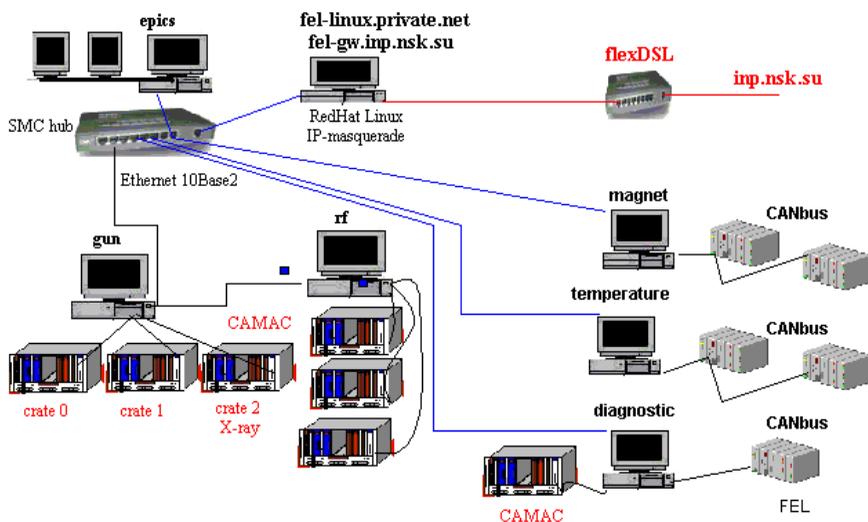


Рис. 2. Представлена схема распределенной системы управление ЛСЭ.

На OPI уровне работают несколько программ, обеспечивающие интерфейс для оператора в виде панелей управления. Главная панель программы управления инжектором «**GUN_Injector**» представлена на рисунке 4, где структура инжектора отображена на мнемосхеме. Для индикации отклонения параметра от рабочей величины в заданных пределах используется цветовая индикация, окраска функционального элемента или текстового поля в желтый или красный цвет сигнализирует о сбое в работе соответствующего технологического узла.

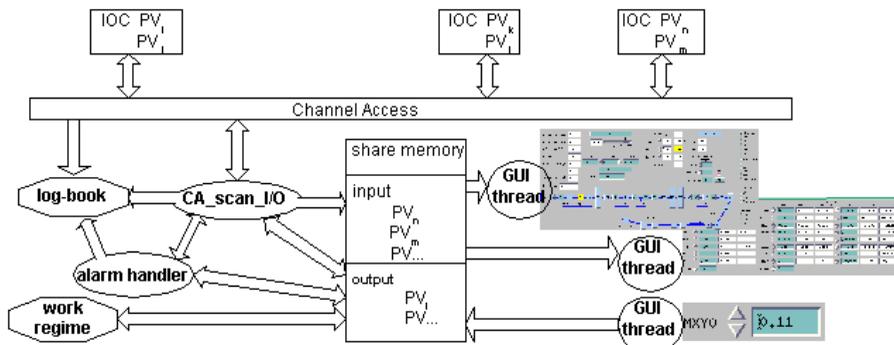


Рис. 3. Структура управляющих программ OPI уровня.

На рисунке 3 представлена структура управляющих программ OPI уровня, программа состоит из нескольких параллельно работающих процессов (*POSIX thread*).

В разделяемой памяти находятся структуры, элементы которых определяют параметры сетевого и графического интерфейсов для используемых PV (Process Variable). Структуры, предназначенные для обслуживания входных PV (рекорды типа: **ai**, **bi**, **calc**, **longin** и т.д.) отличаются от структур предназначенных для выходных PV (рекорды типа: **ao**, **bo**, **calcout**, **longout** и т.д.) имеющих расширенный набор элементов структуры.

Процесс **CA_scan_I/O** выполняет все функции контроля и обмена данными с рекордами: определяет IOC, где находится указанный рекорд и устанавливает виртуальный канал, считывает данные из рекорда, или записывает данные в рекорд, контролирует изменение состояния рекорда. Полученные данные помещаются в разделяемую память, доступную для процессов реализующих панели управления.

Каждую панель управления обслуживает отдельный процесс – **GUI thread**. Текстовые поля на панелях управления, предназначенные для отображения прочитанных данных, обновляются через секунду, что определяется средним временем реакции нормального человека на внешние раздражители. Для регулирования PV на панели управления создается

графический элемент (*widget: scale, SpinBox* или др.), обслуживаемый стандартным асинхронным вызовом (*callback*), который через **CA_scan_I/O** осуществляет запись данных в указанный рекорд.

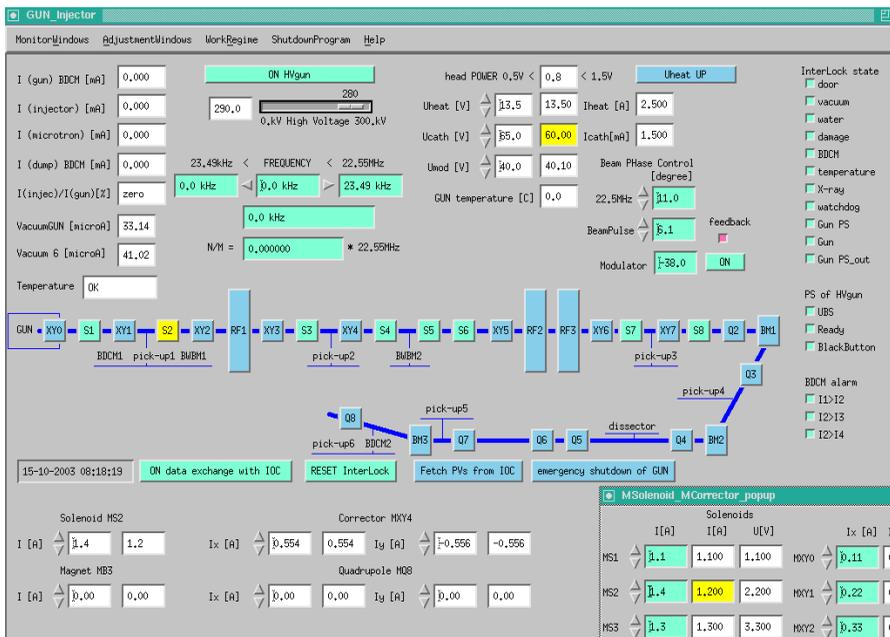


Рис. 4. Главная панель программы управления инжектором.

Отдельный процесс «**alarm handler**» анализирует каждое изменение всех PV, находящихся в разделяемой памяти и в предусмотренных случаях сбоя производит аварийное отключение.

Процесс «**log-book**» ведет «бортовой журнал», в который записывает сообщения о произошедшем событии и его времени. Фиксируется время запуска программы и время окончания работы. При переключении частоты следования сгустков в «бортовой журнал» заносится частота, показания датчиков тока и время. В случае аварийного отключения – в «бортовой журнал» заносится причина отключения и время и т.д.

Процесс «**work regime**» выбирает новые текущие значения выходных PV с интервалом 1 секунда, переписывает структуру «текущий рабочий режим» в файл, содержащий рабочие режимы. Можно вызвать специальную панель для обслуживания процесса «**work regime**» и внести некий комментарий, который будет далее интерпретироваться как идентификатор рабочего режима и записать текущие значения выходных PV как рабочий режим, или наоборот загрузить выбранный рабочий режим.

Для удобства идентификации рекордов (или PV), описывающих физические параметры системы управления ЛСЭ имя рекорда имеет следующий формат:

<тип рекорда>_<подсистема ЛСЭ>_<физический параметр>

тип рекорда: **ai** – аналоговый ввод, **ao** – аналоговый вывод, **bi** – бинарный ввод, **bo** – бинарный вывод, ...

подсистема ЛСЭ: **Inj** – инжектор, **Mic** – микротрон.

физический параметр: для тока 1-го соленоида **MS_I**, например: **AI_Inj_MS1_I**.

При сбоях аппаратуры или подпрограммы поддержки устройств (device support routine) в файл «**error log**» вносится запись, которая содержит имя рекорда, время и причину сбоя. Аналогичная запись заносится в файл «**log book**» программой, работающей на ОРІ уровне. Такой формат определения имени рекорда позволяет достаточно быстро и точно найти аппаратуру или подпрограмму, работающую с ошибками.

1. Система управления инжектором

Структура 1.5 МэВ инжектора электронов представлена на рисунке 5. Инжектор состоит из 300 кэВ пушки (GUN), группирующего ВЧ резонатора (RFC1) и двух ускоряющих резонаторов (RFC2, RFC3), элементов магнитной системы: восьми соленоидов (MS1 ... MS8) и восьми двух координатных магнитных корректоров (MXY0 ... MXY7). Трех пикап станций (BWM1 ... BWM3). Четырех датчиков среднего тока (BDCM1 ... BDCM4). Два широкополосных датчика тока (BWBM1, BWBM2), позволяющих наблюдать профиль сгустка на осциллографе.

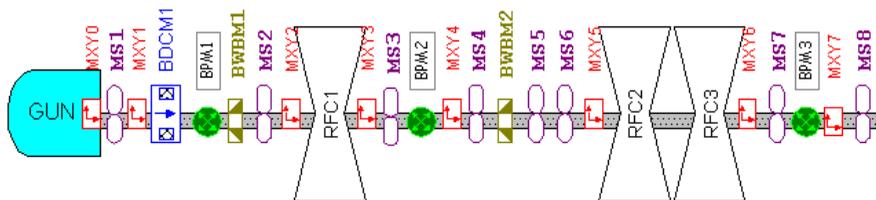


Рис. 5. Структура 1.5МэВ инжектора электронов.

Основная функция инжектора сформировать сгусток с заданными параметрами для дальнейшего ускорения в микротроне-рекуператоре. Длительность сгустка около 1.5 нсек³ на выходе из пушки, которая определяется, в основном, работой модулятора (наблюдается на BWBM1). Длительность сгустка около 100 пикосекунд на входе в микротрон (определяется с помощью диссектора).

³ 1.3 нсек на уровне половины амплитуды импульса.

ВЧ система инжектора состоит из трех одинаковых резонаторов, но подключенных к различным генераторам, первый ВЧ резонатор (RFC1) является группирующим, напряжение на нем можно поднимать до 100 кВ. В зависимости от фазы ВЧ группирующего резонатора электроны в сгустке получают необходимый продольный энергетический разброс. Например: если в момент пролета сгустка напряжение на резонаторе нарастает по синусоиде, следовательно, электроны, находящиеся в начале сгустка, наберут меньшую кинетическую энергию, чем электроны, находящиеся в конце сгустка. В зависимости от фазы ВЧ сгусток может группироваться или дегруппироваться на отрезке пути между резонаторами RFC1 и RFC2. Далее сгусток ускоряется в двух ускоряющих ВЧ резонатора (RFC2 и RFC3), где напряжение можно поднимать до 800кВ. Для снижения энергетического разброса электронов в сгустке, как правило, фаза второго ускоряющего резонатора подстраивается в слабо дегруппирующую фазу. В результате с учетом пролетного фактора и фаз резонаторов кинетическая энергия сгустка возрастает до 1.5 МэВ, а его продольный энергетический разброс уменьшается.

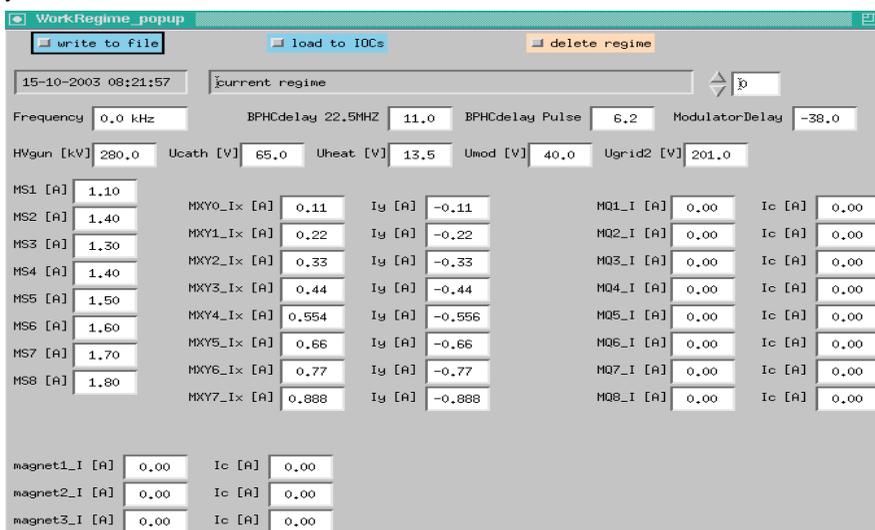


Рис. 6. Окно для просмотра файла, содержащего рабочие режимы.

База данных, загружаемая в ИОС инжектора, состоит из 137 записей, обслуживающих не только аналоговый ввод/вывод и чтение/запись входных/выходных регистров. Для оперативного контроля и аварийного отключения созданы специальные записи, порождающие процессы (*POSIX thread*). Эти процессы имеют более высокие приоритеты и находятся в активном состоянии, исполняют функции подпрограмм поддержки устройств и постоянно следят за состоянием устройств.

Для управления инжектором на OPI уровне написана программа «**GUN_Injector**». После запуска «**GUN_Injector**» стартует процесс, поддерживающий главную панель и стартует процесс «**work regime**», который выбирает из файла рабочих режимов структуру «текущий режим» для загрузки данных во все выходные PV. Для выбора определенного рабочего режима в меню нужно выбрать опцию «**WorkRegime**», которая порождает окно «**work regime**», представленное на рисунке 6.

Нажатие кнопки «**OFF data exchange with IOC**» на главной панели приведет к запуску процесса «**CA_scan_I/O**» и загрузке «текущего режима» в IOC. Процедура, обслуживающая кнопку «**Fetch PVs from IOC**», проведет запуск процесса «**CA_scan_I/O**» (если он не активен), прочтает значения выходных PV из IOC и использует их как новые данные для «текущего режима». Повторное нажатие кнопки «**ON data exchange with IOC**» останавливает процесс **CA_scan_I/O**.

Аварийное отключение оператор может произвести следующими способами: на главной панели выбрав опцию меню «**Shutdown Program**» или кнопку «**emergency shutdown of GUN**». А также запустив программу **sos** на IOC, обслуживающим инжектор. Последовательность аварийного отключения – отключение таймера, отключение питания пушки, снятие высокого напряжения с ускорительной трубки.

2. Элементы магнитной системы инжектора

Магнитная система инжектора состоит из восьми соленоидов (MS1 ... MS8) и восьми двухкоординатных магнитных корректоров (MXY0 ... MXY7). Каждая обмотка соленоида или корректора подключена к отдельному источнику постоянного тока.

Процедура управления элементом магнитной системы представляет следующую последовательность действий: задать ток в источник питания и приблизительно через секунду проверить установившиеся ток и напряжение. На рисунке 7 представлена схема управления элементом магнитной системы на уровне IOC.

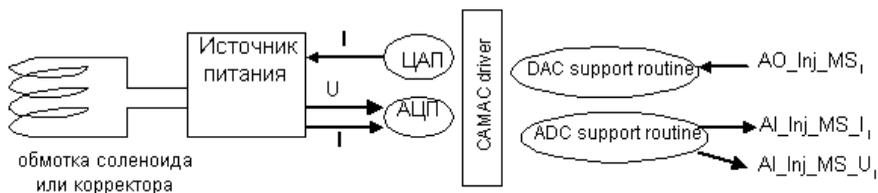


Рис. 7. Макет связей между PV и технологическим объектом на уровне IOC.

Рекорд с уникальным именем **AO_Inj_MS_i** обеспечивает регулирование тока *i*-го соленоида. Тип рекорда **ao** – аналоговый вывод, в рекорде указаны

пределы изменения тока $I_{\min} < I < I_{\max}$, тип подпрограммы поддержки устройства ЦАП, коэффициенты для линейного преобразования величины тока в код ЦАП ($\text{code} = \alpha I - \beta$) и другие параметры. Восемь рекордов **AO_Inj_MS_i** предназначены для задания тока в соленоидах, и шестнадцать рекордов **AO_Inj_MXY_i** – определяют токи в корректорах.

Аналогично описаны шестнадцать рекордов типа **ai** (аналоговый ввод), обеспечивающие слежение за величиной тока **AI_Inj_MS_I_i** и напряжения **AI_Inj_MS_U_i**, где *i* – номер источника тока для *i*-го соленоида. И тридцать два рекорда **AI_Inj_MXY_I_i** и **AI_Inj_MXY_U_i** для мониторинга параметров источников тока для корректоров. В качестве механизма обработки **ai** рекордов выбрано сканирование с заданным интервалом.

В рассматриваемом случае время сканирования определяется быстродействием аппаратуры, время цикла выборки можно оценить как сумму $\tau = t_{\text{ioc}} + t_{\text{dev}} + T_{\text{hardware}}$.

t_{ioc} – времени обслуживания рекорда службами ИОС, определяется в основном быстродействием процессора P_{cpu} и типом рекорда ($t_{\text{ioc}} = P_{\text{cpu}} N_{\text{codes}} < 100$ мсек).

t_{dev} – время, потраченное на обслуживание запроса подпрограммой поддержки устройства, программные затраты на выборку данных из интегрирующего АЦП $t_{\text{dev}} < 100$ мсек.

T_{hardware} – аппаратные расходы - это суммарное время оцифровки сигнала интегрирующем АЦП и время выборки данных.

Для подавления сетевых помех время интегрирования АЦП, как правило, задается равным 20мсек (для интегрирующего АЦП-20 реальное время $T_{\text{hardware}} = 20 \cdot 1.5 = 30$), тогда $\tau = t_{\text{ioc}} + t_{\text{dev}} + T_{\text{hardware}} \sim 30.2$ мсек. Это позволяет за время сканирования 1сек последовательно опросить 33 каналов, обслуживаемых одним интегрирующим АЦП с подключенным к нему мультиплексором.

Стабильность источников питания порядка 10^{-4} , точность АЦП и ЦАП порядка 10^{-4} , что позволяет для запуска механизма мониторинга в рекордах типа **ai** устанавливать величину $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ (dead-band – предел мертвой зоны).

На ОРІ уровне в главной панели программы управления инжектором на мнемосхеме, представленной на рисунке 4, для индикации отклонения параметров элемента магнитной системы, соответствующий графический объект «кнопка» (button) окрашивается в желтый цвет. Для задания токов в элементах магнитной системы на главной панели создано шесть пар текстовых полей, первое поле для задания тока, второе для контроля установившегося тока; для переключения текстового поля на другой магнитный элемент необходимо нажать соответствующую «кнопку» на мнемосхеме. Посредством каскадного меню «Monitor Windows» вызывается отдельная панель для управления элементами магнитной системы, реализованная в виде таблицы рисунок 8. Для индикации отличия

записанного значения тока от прочитанного на величину шага используется цветовая сигнализация, которая применяется и для индикации нестабильности источников (предполагается, что два последовательно измененных значения напряжения не должны отличаться более чем 1%).

MSolenoid_M Corrector_popup										
	Solenoids				Correctors					
	I [A]	I [A]	U [V]		I _x [A]	I _x [A]	U _x [V]	I _y [A]	I _y [A]	U _y [V]
MS1	1.1	1.100	1.100	МХУ0	0.11	0.111	0.111	-0.11	-0.111	-0.111
MS2	1.4	1.200	2.200	МХУ1	0.22	0.222	0.111	-0.22	-0.222	-0.111
MS3	1.3	1.300	3.300	МХУ2	0.33	0.333	0.222	-0.33	-0.333	-0.222
MS4	1.4	1.400	4.400	МХУ3	0.44	0.444	0.333	-0.44	-0.444	-0.333
MS5	1.5	1.500	5.500	МХУ4	0.554	0.554	0.444	-0.556	-0.556	-0.444
MS6	1.6	1.600	6.600	МХУ5	0.66	0.666	0.555	-0.66	-0.666	-0.555
MS7	1.7	1.700	7.700	МХУ6	0.77	0.777	0.666	-0.77	-0.777	-0.666
MS8	1.8	1.800	8.000	МХУ7	0.888	0.888	0.777	-0.888	-0.888	-0.777
step	0.1			step	0.01					

Рис. 8. Элементы магнитной системы инжектора.

3. Средний ток пучка

Датчики среднего тока BDCM (Beam Direct Current Monitor System) позволяют измерять ток в интервале от 10 мкА до 65 мА, их расположение показано на рисунке 1. Если программно установить максимальное время интегрирования 65.5мсек, тогда уровень наводок минимален.

BDCM на аппаратном уровне следит за потерями пучка, при превышении пределов производит отключение таймера. Аппаратно устанавливаются предельные значения потерь тока в интервале от 50 мкА до 800мкА (настройка точного значения потерь достаточно сложная процедура). При токах на датчиках около 60 мА BDCM проводит отключение таймера в течение 15мксек, при токах порядка 100 мкА время достигает 10 мсек.

В процессе эксплуатации появились новые требования: изменять точное значение величины потерь, и увеличить верхний предел величины потерь. Для этой цели были написаны новые подпрограммы поддержки BDCM.

В специальном поле рекорда **LI_Inj_BDCM** задаются значения допустимых потерь между первым и вторым датчиками, первым и третьем, первым и четвертым. Подпрограмма поддержки BDCM обслуживает рекорды **AI_Inj_I1_BDCM**, **AI_Inj_I2_BDCM**, **AI_Inj_I3_BDCM**, **AI_Inj_I4_BDCM**, предназначенные для выборки данных из датчиков. При инициации **LI_Inj_BDCM** рекорда стартует процесс **BDCM_thread**, который

постоянно находится в активном состоянии и периодически проводит выборку данных из BDCM, на рисунке 9 представлена его блок-схема.

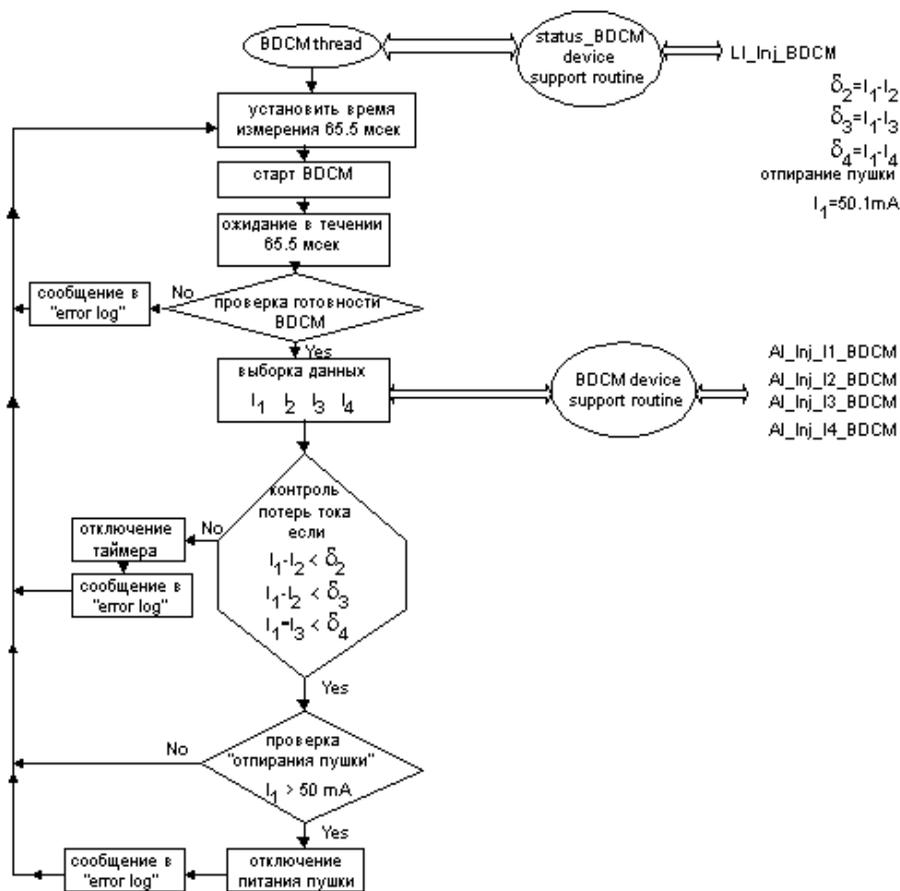


Рис. 9. Блок-схема **BDCM_thread** процесса.

Защита по току продублирована и аппаратно и программно. При отключении аппаратной защиты по току работает программная защита, но одновременно могут работать и оба варианта. **BDCM_thread** следит не только за предельными значениями потерь тока, но и за «отпиранием пушки». Если ток превышает значение максимального среднего тока, то программа быстро отключает напряжение на ускорительной трубке и питание пушки. Все сбои при работе устройства фиксируются в журнале ошибок (error log), а также фиксируются и аварийные отключения.

Процесс **BDCM_thread** обеспечивает максимальное допустимое время реакции:

$$T = t_{measure} + t_{ready} + 4 \cdot t_{fetch} + t_{CNAF} = 65.8 \text{ мсек},$$

$t_{measure}$ – время измерения 65.5мсек.

t_{ready} – время ожидания готовности не более 200 мксек.

$4 \cdot t_{fetch}$ – время выборки данных из четырех датчиков 64 мксек.

t_{CNAF} – время исполнения одного CNAF 16мксек (для отключения питания пушки достаточно в ЦАП послать один CNAF).

На главной панели «**GUN_Injector**» выводятся показания четырех датчиков среднего тока и в качестве характеристики прохождения пучка в инжекторе процентное отношение показания 2-го датчика, расположенного на выходе из инжектора, к показаниям 1-го датчика.

В процессе работы BDCM не может обеспечить точный ноль, нестабильности в работе аппаратуры приводят к флуктуациям в показаниях датчиков (при отсутствии пучка показания датчиков не нулевые). Разработчик гарантирует отклонения «нулей» не более чем на 20 мкА. Если «ноль» датчика превышает 50 мкА, тогда срабатывает цветовая сигнализации, что указывает на необходимость настройки аппаратуры. Для учета «ухода нуля» выполняется следующая операция – при отсутствии пучка идет постоянное вычисление среднего значения «нуля» для всех датчиков, которые затем вычитаются из показаний датчиков при включении пучка.

4. Пушка

В качестве эмиттера электронной пушки используется модифицированный катодно-сеточный узел с оксидным катодом от высокочастотного триода ГС-34. Ускоряющее напряжение на катоде задается импульсным модулятором [4], в результате работы которого эмиттируются электронные сгустки с зарядом ~1.5 нКл и длительностью 1.5 нсек. Частоту следования сгустков можно менять в пределах от 22.5 кГц до 22.5 МГц, что позволяет регулировать средний ток пушки. Фаза вылета сгустка из пушки синхронизована с фазой ВЧ системы.

На рисунке 10 представлена принципиальная схема пушки. Вся конструкция эмиттера находится под потенциалом минус 300 кВ относительно земли. Силовое питание для управляющей электроники пушки поступает от силового инвертора через высоковольтный изолирующий трансформатор. Мощность, передаваемая для управляющих блоков пушки, регулируется с помощью магнитного усилителя (DAC_stability). Уровень переданной мощности определяется напряжением на выпрямителе (Ustability). При достаточной передаваемой мощности происходит аппаратная инициализация управляющих блоков.

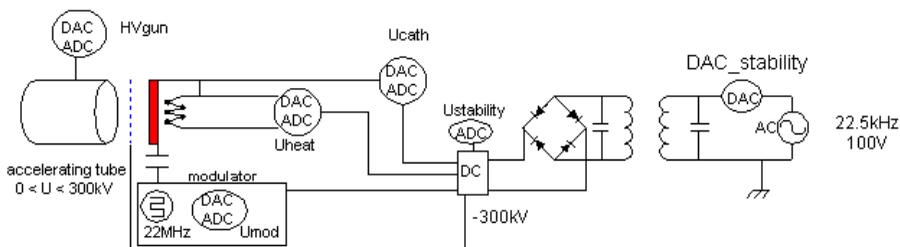


Рис. 10. Принципиальная схема пушки.

Для нормальной работы управляющих блоков пушки параметр стабилизации необходимо удерживаться в пределах $0.5 < U_{stability} < 1.5$. Зависимость $U_{stability}$ от $DAC_stability$ нелинейная и зависит от нагрузки (в процессе работы нагрузка часто меняется). Время стабилизации (интервал между записью кода $DAC_stability$ в ЦАП и установкой уровня $U_{stability}$ в АЦП) составляет около 200 мсек.

Обмен данными с управляющими блоками пушки осуществляется под управлением устройства «Optical Link» по дуплексному каналу через оптоволоконные кабели. «Optical Link» состоит из двух модулей: один находится в САМАС крейте, другой модуль (исполнительное устройство) расположен в пушке. Исполнительное устройство содержит 16 каналов АЦП и 4 канала ЦАП. В процессе эксплуатации «Optical Link» было обнаружено, что данные передаются без ошибок, если последовательно опрашивать каналы АЦП и последовательно записывать данные в ЦАП. На передачу одного слова уходит 3 мсек.

Учитывая выше описанные особенности работы аппаратуры, обслуживание пушки осуществляется отдельным процессом **Head Stability**. При инициации рекорда **BO_Inj_HeadStability** стартует процесс **Head Stability**, который постоянно находится в активном состоянии и периодически проводит стабилизацию питания системы управления пушки, выборку данных из 16 каналов АЦП «Optical Link», а так же запись, если был запрос к каналу ЦАП. На рисунке 11 представлена его блок-схема. Эмпирически установлены допустимые пределы изменения $DAC_stability$. Если нарушается условие $Low < DAC_stability < High$, и значение $DAC_stability$ не равно нулю, проводится отключение питания пушки (в ЦАП записывается $DAC_stability = 0$). Оператор имеет возможность изменять значение $DAC_stability$, что необходимо, например, сделать для включения питания пушки после аварийного отключения, вызванного срабатыванием «защиты по току»

Процесс «Head Stability» контролирует уровень вакуума, и если вакуум низкий, отключает накал, чтобы сохранить эмиссионные свойства катода. Контролируется запирающий потенциал U_{cath} , который не должен быть ниже 65 В. Если при работе с оборудованием процесс **Head Stability**

зафиксировал сбой, в журнал ошибок заносится запись о времени и причине сбоя и фиксируются аварийные отключения.

На главной панели управляющей программы **GUN_Injector** созданы три пары текстовых полей для контроля за параметрами пушки: Uheat (напряжение накала), Ucath (постоянное напряжение на катоде), Umod (переменное напряжение на модуляторе). Первое поле для записи параметра, во втором поле прочитанное значение из «Optical Link». Выводится и Ustability для визуального контроля за состоянием системы питания пушки; если Ustability = 0, следовательно, питание пушки отключено. Более детально параметры работы пушки представлены на специальной панели, которую можно вызвать через опцию «Adjustment Windows» в меню, а также установить новое значение DAC_stability для инвертора.

Накал необходимо поднимать медленно – приблизительно за 2 минуты напряжение Uheat возрастает от 0 до 15 В, желательно медленно и снимать накал, но при этом необходимо следить за вакуумом. Эту процедуру выполняет подпрограмма, которую можно запустить кнопкой «Heat Down» (надпись «Heat Down» указывает на текущее состояние накала) – поднять накал («Heat UP» – снять накал).

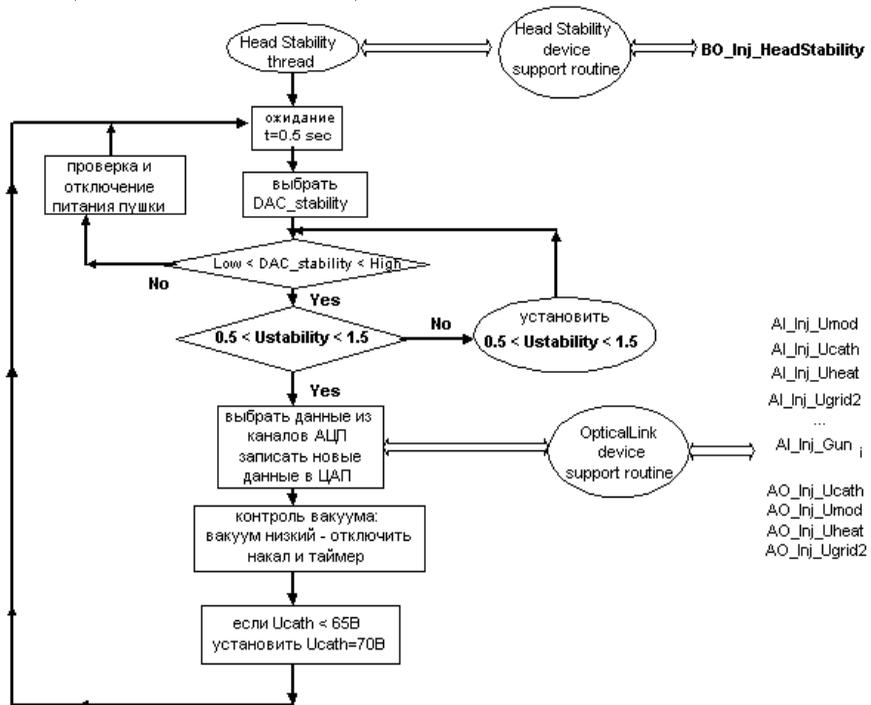


Рис. 11. Блок-схема **Head Stability** процесса.

Ускорительная трубка через высоковольтный коаксиальный кабель подключена к высоковольтному секционированному трансформатору-выпрямителю «Малютка», с регулируемым уровнем напряжения от 0 до 300 кВ. Аппаратная система управления питания ускорительной трубки снабжена быстродействующими защитами от превышения максимального тока и напряжения на высоковольтном выпрямителе. В цепи защиты вставлены блокировки, контролирующие наличие воды в системе охлаждения высоковольтного выпрямителя, наличие достаточного давления элегаза в баке высоковольтного выпрямителя и ряд других.

Работа системы питания ускорительной трубки контролируется посредством рекордов:

- AI_Inj_Utube** – напряжение на ускорительной трубке (прочитанное).
- AO_Inj_Hvgun** – напряжение на ускорительной трубке (записанное).
- LI_Inj_GUNstatus** – индикация состояния системы питания ускорительной трубки.
- LI_Inj_INTERLOCKstate** – индикация состояния устройства «InterLock», обслуживающего систему блокировок пушки.
- LO_Inj_OnOffGun** – производит включение/выключение системы питания.

На главной панели «**GUN_Injector**» для управления системы питания ускорительной трубки предназначены три графических элемента:

- * Кнопка «**OFF HVgun**» (надпись «**OFF HVgun**» указывает на текущее состояние системы питания)- если нет запрета по системе блокировок, подпрограмма (callback) производит включение системы питания, а нажатие на «**ON HVgun**» – выполнит снятие ускоряющего напряжения и отключение питания.
- * Шкала «**0kV High Voltage 300kV**» – позволяет установить напряжение на ускорительной трубке с шагом 1 кВ. При задании напряжения в начале проверяется состояние блокировок и если питание включено, то происходит медленное поднятие напряжения до заданного уровня (приблизительно за минуту).
- * Текстовое поле – где выводится прочитанное значение напряжения на ускорительной трубке.

Состояние системы блокировок отображается справа на панели управления. Если срабатывает защита на каком-либо устройстве, то «**alarm handler**» выполняет соответствующую процедуру, и цветовая индикация выделяет сработавшее устройство. Снять блокировку можно только нажатием кнопки «**Reset InterLock**». Сделано специально для акцентирования внимания оператора на системе блокировок.

Запуском модулятора управляет специально разработанное в стандарте SAMAC устройство – таймер. На таймер приходит опорная частота

$f_0 = 22.5$ МГц, f_{RF} , получаемая от мастер-генератора ВЧ системы. $f_{RF} = 180.4$ МГц $f_0 = f_{RF}/8 = 180.4$ МГц/8 этим обеспечивается привязка к фазе.

Из опорной частоты таймер вырабатывает последовательность кратных частот 22.5 МГц/ k , где $k = M/N$, M и N это целые числа, которые можно программно устанавливать. Значения M и N обычно выбираются так, чтобы частота изменялась от 22.5 кГц до 22.5 МГц. Работу таймера обслуживают следующие рекорды:

LO_Inj_M_timer – позволяет задать M .

LO_Inj_N_timer – позволяет задать N .

AI_Inj_TimerNM – определяет отношение N/M , что необходимо для определения действительной частоты следования сгустков $f_{beam} = (f_{RF}/8) \cdot N/M$, так как частота мастер-генератора f_{RF} может изменяться (что необходимо для подстройки оптической системы ЛСЭ).

LO_Inj_TimerG0608 – автоинкрементно/автодекрементно изменяет N – медленно изменять частоту следования сгустков, что позволяет процессу «**Head Stability**» среагировать на изменение нагрузки.

LI_Inj_TimerStatus – рекорд выбирает текущее состояние статусного регистра таймера.

AI_Inj_TimerDelay – позволяет задать время задержки следования сгустков относительно опорной частоты. Т.е. регулировать фазу влета сгустка в группирующий резонатор.

BO_Inj_TimerBPHC – включить/выключить «обратную связь по пучку». САМАС модуль Beam Phase Controller (BPHC) осуществляет «обратную связь по пучку», На BPHC приходят два сигнала: опорная частота $f_0 = 22.5$ МГц от мастер-генератора и сигнал с широкополосного датчика тока BWBM1. Если интервал между ними более 50 псек, тогда BPHC посылает на таймер два сигнала: LB1 – «фаза за пределами», LB2 – определяет направление корректирования фазы («1» – увеличение, «0» – уменьшение). Если в таймере включена «обратная связи по пучку», таймер начнет изменять время задержки следования сгустков относительно опорной частоты, пока BPHC не обнаружит одновременный приход обоих сигналов, или не достигнет предела шкалы. При достижении предела шкалы таймер отключает режим «обратной связи по пучку».

AO_Inj_BPHC22MHz – задать время задержки относительно опорной частоты.

AO_Inj_BPHCpulse – задать время задержки относительно сигнала с датчика BWBM1.

LI_Inj_BPHC_LB – текущие состояние BPHC.

Именно рекорд **LO_Inj_TimerG0608** используется в программе **GUN_Injector** для задания частоты следования сгустков. Подпрограмма, обслуживающая графический элемент *SpinBox* – пошаговое изменение величины, проверяет состояние блокировок, напряжение накала и напряжение на ускорительной трубке, и если все условия выполняются, то устанавливает новое значение частоты, в противном случае таймер отключается. Эта процедура частично дублирует аппаратные функции системы блокировок. Если срабатывает какая-либо блокировка в системе блокировок «InterLock», приходит сигнал, который отключает таймер. На главной панели под заголовком «Beam Phase Control» расположено три текстовых поля, предназначенных для контроля «обратной связи по пучку»:

- * 22. MHz – задать на ВРНС время задержки относительно опорной частоты (посылает запрос к рекорду **AO_Inj_BPHC22MHz**).
- * BeamPulse – задать на ВРНС время задержки относительно сигнала с датчика BWBM1 (посылает запрос к рекорду **AO_Inj_BPHCpulse**).
- * Modulator – задать на таймере время задержки следования сгустков относительно опорной частоты (посылает запрос к рекорду **AI_Inj_TimerDelay**).

Кнопка «ON»/«OFF» напротив поля Modulator позволяет включать/выключать режим «обратной связи по пучку» (посылает запрос к рекорду **BO_Inj_TimerBPHC**). Индикатор «feedback» отражает текущие состояние ВРНС. Если цвет индикатора зеленый, то это указывает - есть наличие «обратной связи по пучку», в противном случае - цвет красный.

Авторы выражают свою благодарность Е.Г. Мигинской за консультацию по системе управления инжектором – автору программы управления инжектором на базе Windows95; именно этот вариант программы был использован в стадии наладки инжектора.

Литература

- [1] Официальный сайт сообщества EPICS. <http://www.aps.anl.gov/epics>
- [2] T.V. Salikova, *Porting EPICS to real time UNIX, and usage ported EPICS for FEL automation*. Preprint Budker INP 2002-28, Novosibirsk 2002. p.8.
- [3] Antokhin E.A. etc. *First experimental results at the high power free electron laser at siberian center for photochemistry research*. Preprint Budker INP 2003-53, Novosibirsk 2003. p.11.
- [4] Купер Э.А., Овчар В.К., Тарарышкин С.В., Шейнгезихт А.А., *Наносекундный модулятор электронной пушки*. XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000, Т1, с.357-358.

*Т.В. Саликова, М.А. Щеглов,
В.А. Овчар, А.Д. Орешков*

**Программное обеспечение
системы управления инжектором ЛСЭ на базе EPICS**

*T.V. Salikova, M.A. Scheglov,
V.K. Ovchar, A.D. Oreshkov*

Control system of FEL injector based on EPICS

ИЯФ 2003-74

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 30.10.2003

Сдано в набор 31.10.2003

Подписано в печать 3.11.2003

Формат 60x90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 74

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