

УДК 621

**В. Р. Козак¹, Э. А. Купер¹, Н. А. Винокуров^{1,2}, С. С. Середняков^{1,2}
С. В. Тарарышкин¹, А. Г. Трибендис¹, П. А. Селиванов¹**

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: sseredn@inp.nsk.su

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НОВОСИБИРСКИМ ЛАЗЕРОМ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ *

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны и работает на базе многооборотного ускорителя-рекуператора. ЛСЭ представляет собой крупную физическую установку, управляемую с помощью большого количества различного оборудования. Для осуществления эффективного управления и мониторинга состояния ЛСЭ разработана специализированная система управления. В работе рассматриваются структура, аппаратные и программные средства системы управления, основные особенности, приведены параметры и возможности, предоставляемые описываемой системой.

Ключевые слова: лазер на свободных электронах, ускоритель электронов, система управления.

Введение

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН продолжается строительство мощного лазера на свободных электронах (ЛСЭ) [1]. ЛСЭ работает на основе многооборотного ускорителя-рекуператора и включает в себя три различные конфигурации (режима работы), которые различаются по энергии электронного пучка, используемого для генерации лазерного излучения и диапазону длин волн этого излучения. Каждому режиму работы соответствует определенное количество дорожек ускорителя и отдельный лазер на свободных электронах. Кроме того, структура всей установки тако-

ва, что отдельные ее компоненты используются для всех трех режимов работы, в то время как другие – при работе только одного режима (рис. 1).

На сегодняшний день первая и вторая очереди, обеспечивающие первый и второй режимы работы ЛСЭ, используются как источники мощного терагерцового излучения для научных исследований. Сооружение третьей очереди находится в стадии завершения. Все три конфигурации ЛСЭ представляют собой сложную физическую установку с большим количеством управляемых параметров. Для полноценной эксплуатации ЛСЭ создана специализированная распределенная система управления, включающая

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России и РФФИ (проект № 11-02-91320-СИГ_а) при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ в рамках ГК № 16.552.11.7044.

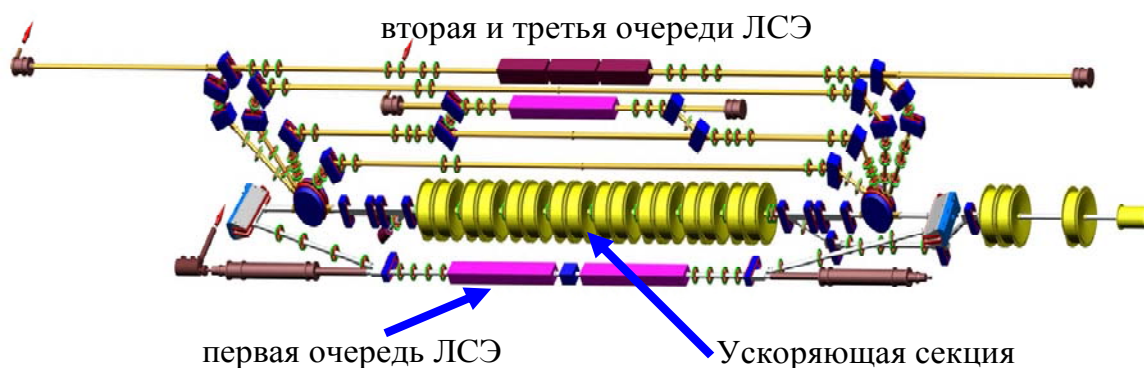


Рис. 1. Схема многооборотного ускорителя-рекуператора Новосибирского ЛСЭ

в себя различное управляющее оборудование, а также соответствующее программное обеспечение.

Принцип работы и особенности Новосибирского ЛСЭ

Лазер на свободных электронах представляет собой источник когерентного излучения, в котором в качестве рабочей среды используется релятивистский электронный пучок, пролетающий через специальную магнитную структуру – ондулятор. Ондулятор создает магнитное поле, поперечное движению пучка, постоянное по времени и меняющееся по гармоническому закону вдоль продольной координаты. В результате электроны, двигаясь в ондуляторе по извилистой траектории, испускают электромагнитное излучение (рис. 2).

Кроме того, на оси движения пучка устанавливаются зеркала оптического резонатора, в которых происходит накопление и усиление излучения. Для вывода излучения служит отверстие в одном из зеркал.

Длина волны излучения выражается формулой

$$\lambda = \frac{d}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right),$$

где λ – длина волны излучения; d – период ондулятора; γ – релятивистский фактор электронов; $K = K_0 I$ – параметр ондуляторности; I – ток в обмотках ондулятора.

Из этой формулы видно, что длину волны можно перестраивать в довольно больших пределах, меняя либо амплитуду поля в

ондуляторе либо энергию электронного пучка.

Лазер на свободных электронах имеет особенности, отличающие его от лазеров других типов, – высокую мощность излучения и возможность перестройки длины волны в довольно широких пределах.

Как было сказано, Новосибирский ЛСЭ может работать в трех различных режимах, и использует многооборотный ускоритель-рекуператор.

Принцип работы ускорителя-рекуператора состоит в том, что электронный пучок, многократно пролетая высокочастотную (ВЧ) ускоряющую секцию и набирая энергию, каждый раз попадает на следующую дорожку. Длина всех (кроме последней) дорожек подобрана таким образом, чтобы электроны пролетали через ускоряющую секцию в ускоряющей фазе колебаний ВЧ резонаторов. Длина же последней дорожки подобрана так, чтобы после ее пролета пучок попал в ускоряющую секцию уже в замедляющей фазе. Таким образом, пучок сначала ускоряется, пролетая несколько раз

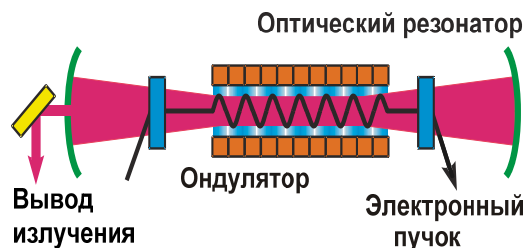


Рис. 2. Принцип действия ЛСЭ

Таблица 1
Режимы работы ЛСЭ

Параметр	Режим		
	1	2	3
Количество оборотов	1	2	4
Энергия электронного пучка, МэВ	12	20	40
Диапазон длин волн излучения, мкм	110–240	40–80	5–30

ускоряющую секцию, затем, пролетая по последней дорожке, отдает часть своей энергии в ЛСЭ, после чего пролетает столько же раз ВЧ ускоряющую секцию в замедляющей фазе и возвращает назад практически всю энергию, полученную при ускорении. Данный способ передачи энергии называется рекуперацией и имеет следующие преимущества.

1. Отработанный пучок отдает почти всю энергию обратно в ВЧ-резонаторы ускоряющей структуры.

2. Замедленный пучок гораздо проще утилизировать, так как он становится гораздо менее радиационно опасным.

Все три режима работы ЛСЭ различаются по количеству оборотов в ускорителе-рекуператоре, следовательно, имеют разную энергию электронного пучка. Кроме того, для каждого режима работы ЛСЭ установлен отдельный ондулятор (см. рис. 1), отличающийся от других своими параметрами (период и амплитуда магнитного поля, полная длина).

Таким образом, каждый режим работы ЛСЭ имеет свой диапазон длин волн и среднюю мощность излучения. Основные параметры режимов работы ЛСЭ приведены в табл. 1.

Структура ЛСЭ как объекта управления

Новосибирский ЛСЭ на базе многооборотного ускорителя-рекуператора включает в себя следующие основные системы.

1. Электронная пушка, выдающая сгустки электронов с частотой до 22,5 МГц, с за-

рядом в сгустке до 1,4 нКл. Средний ток пучка может достигать 30 мА.

2. ВЧ-система, включающая в себя 16 ускоряющих резонаторов и 3 резонатора в инжекционном канале (см. рис. 1). Ускоряющая секция может увеличивать энергию электронов на 12 МэВ за один проход.

3. Магнитная система состоит из сотен различных магнитных элементов – фокусирующие соленоиды, квадрупольные линзы, поворотные магниты, корректоры, ондуляторы – с рабочими токами от сотен миллиампер до двух килоампер.

4. Система диагностики пучка – датчики положения пучка, установленные на всех дорожках микротрона рекуператора.

5. Системы контроля «технологических» параметров ЛСЭ – температуры, вакуума, состояния питающей сети и т. д.

6. Оптическая система ЛСЭ включает в себя узлы, необходимые для накопления и транспортировки когерентного излучения, – оптический резонатор, канал вывода излучения, систему разводки излучения на пользовательские станции.

Для функционирования каждой системе требуется значительное количество соответствующего радиотехнического оборудования: источники питания магнитных элементов, ВЧ-генераторы, различные преобразователи сигналов, приводы шаговых двигателей и т. п. Для управления этим оборудованием и контроля за его функционированием требуется специализированная электроника, с помощью которой программное обеспечение управляет всем комплексом (табл. 2).

В процессе работы ЛСЭ разные системы информационно слабо связаны друг с другом. Помимо этого, ЛСЭ имеет ряд особенностей, отличающих его от других похожих установок:

1. высокая потребляемая мощность (около 3 МВт);

2. высокий максимальный средний ток электронного пучка (до 30 мА);

3. необходимость работать попеременно в трех разных режимах;

4. «комбинированная» архитектура всего ЛСЭ – некоторые части используются при работе во всех трех режимах, а другие построены для работы лишь одного.

Эти и ряд других факторов повлияли на выбор управляющего оборудования и конечную архитектуру системы управления.

Таблица 2

Основные системы ЛСЭ и используемое оборудование

Система ЛСЭ	Состав системы	Управляющее оборудование
Электронная пушка	Катодно-сеточный узел и высоковольтный выпрямитель	Блоки управления катодно-сеточным узлом и выпрямителем
ВЧ-система	19 ВЧ-резонаторов	4-каскадные ВЧ-генераторы
Магнитная система	390 магнитных элементов	Источники питания постоянного тока
Система диагностики пучка	70 пикап-станций	Преобразователи сигналов
Системы технологического контроля ЛСЭ	290 датчиков температуры, воды, 20 вакуумных насосов	Преобразователи сигналов с датчиков, источники питания вакуумных насосов
Оптическая система ЛСЭ	3 оптических резонатора, каналы вывода и транспортировки излучения	Блоки управления шаговыми двигателями и измерения параметров излучения

Аппаратная часть системы управления ЛСЭ

Поэтапное сооружение установки наложило существенный отпечаток на аппаратуру, используемую в системе управления. Так, например, система управления ускорительного тракта (включая ВЧ-систему) базируется на аппаратуре в стандарте КАМАК. Широкая номенклатура доступных устройств и богатый опыт создания систем на основе этого стандарта обусловили типичность КАМАК-автоматизации физических установок 1990-х гг.

Известные недостатки систем на базе стандарта КАМАК и значительный технологический прогресс электроники инициировали поиск других подходов при проектировании систем полномасштабного ЛСЭ.

В качестве основы аппаратной составляющей новой системы автоматизации была принята концепция интеллектуальных встраиваемых контроллеров с недорогим сетевым интерфейсом. Для нужд системы управления ЛСЭ разработан набор унифицированных контроллеров с интерфейсом CANbus [2], которые интегрированы в различные системы (источники питания, измерители температуры и т. п.). В табл. 3 приводится список контроллеров, разработанных специально для нужд системы управления ЛСЭ и используемых в ней.

Унифицированный набор ресурсов, предоставляемых для управления и контроля

оконечным оборудованием, обеспечил легкую интеграцию этих контроллеров с различными устройствами, а унифицированный протокол обмена значительно упростил создание программного обеспечения. Типичные ресурсы, предоставляемые контроллерами, – прецизионные аналого-цифровые каналы с разрешением около 20 бит, цифроаналоговые каналы различной точности и набор каналов дискретного ввода / вывода.

Разработанный набор устройств позволил единообразно автоматизировать практически все системы ЛСЭ с невысоким информационным трафиком и ликвидировать многочисленные аналоговые трассы между крейтами с управляющими блоками и управляемой электроникой.

Таблица 3
Контроллеры с интерфейсом CANbus

Контроллер	Входы АЦП	Выходы ЦАП	Цифровые входы и выходы
CANADC40	40	–	8 + 8
CANDAC16	–	16	8 + 8
CANDAC20	5	1	8 + 8
CEDAC20	6	1	8 + 8
CAC208	20	8	8 + 8
CEAC124	12	4	4 + 4
CIR8	–	–	16 + 8
SLIO24	–	–	24 + 24

Таблица 4

Количество устройств и каналов управления и контроля
в различных системах

Система	Интерфейс	Количество		
		управляющих устройств	каналов управления	каналов контроля
Электронная пушка	CAMAC, CANbus	7	10	10
ВЧ-система	CAMAC	28	50	200
Магнитная система	CANbus	61	400	800
Система диагностики пучка	CAMAC	75	0	280
Системы технологического контроля	CANbus	16	20	330
Оптическая система	CANbus, RS-485	10	10	20
Всего		164	490	1 640

Системы с высоким информационным потоком, такие как система диагностики пучка, по-прежнему реализованы в магистрально-модульном стандарте КАМАК.

В табл. 4 приводится сводка количества каналов управления и контроля по различным системам. В табл. 5 показаны информационные потоки в каждой системе, иллюстрирующие сказанное выше. Напомним, что стандарт CANbus обеспечивает скорость обмена информацией не выше 100 Кбайт/с, в то время как в крейте КАМАК скорость передачи данных может достигать 3 Мбайт/с, впрочем, эта величина является зависимой от типа примененного крейт-контроллера.

Таблица 5

Информационные потоки в системах

Система	Трафик, Кбайт/с
Электронная пушка	1
ВЧ-система	2
Магнитная система	8
Система диагностики пучка	16
Системы технологического контроля	0,2
Оптическая система	0,1

Все устройства управления и контроля подключаются к управляющим компьюте-

рам (типа IBM PC) с помощью интерфейсных устройств, которые являются либо платами расширения (PCI-board), либо внешними устройствами, подключаемыми к компьютеру с помощью стандартных шин (USB, Ethernet). Схема системы управления ЛСЭ изображена на рис. 3.

Программное обеспечение системы управления ЛСЭ

Управляющее программное обеспечение реализовано в виде отдельных модулей-программ, работающих на компьютерах IBM-PC. Каждая программа управляет одной из систем ЛСЭ. Доступ к управляющему оборудованию осуществляется посредством интерфейсных устройств, с которыми программа взаимодействует с помощью драйверов этих устройств и высокоуровневых библиотек. Структурная схема управляющего программного обеспечения приведена на рис. 4.

Каждая управляющая программа содержит встроенный сервер удаленного управления Channel Access из состава системы EPICS. Сервер содержит набор PV, (Process Variables), связанных с соответствующими управляемыми и измеряемыми величинами данной подсистемы, которые обслуживает данная программа. Таким образом, с помощью данного сервера можно управлять

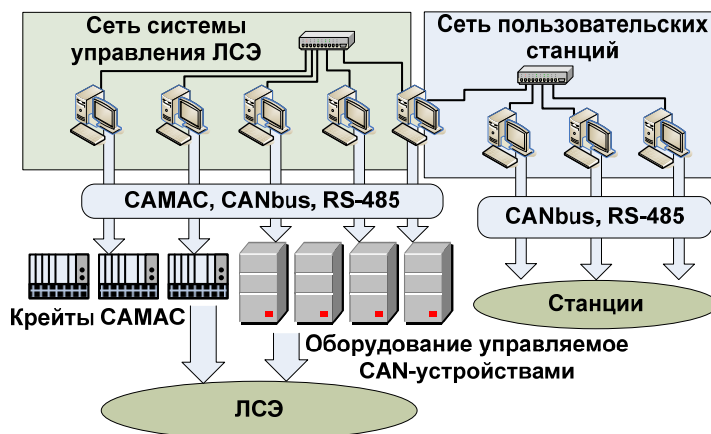


Рис. 3. Схема системы управления ЛСЭ

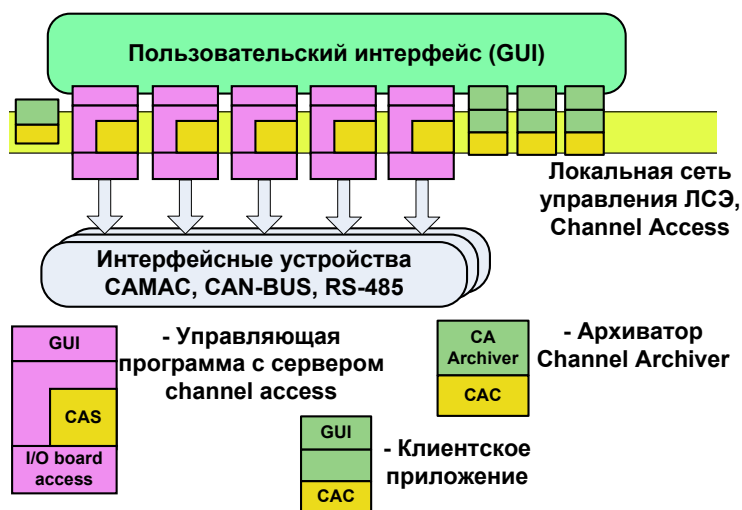


Рис. 4. Архитектура управляющего программного обеспечения

параметрами подсистемы «удаленно», т. е. из любой другой программы на любом компьютере, находящемся в локальной сети системы управления. Протокол EPICS Channel Access [3] позволяет создавать высокоуровневые клиентские приложения, которые могут управлять параметрами, принадлежащими разным подсистемам.

С другой стороны, каждая управляющая программа содержит развитый пользовательский интерфейс (GUI), позволяющий управлять любой подсистемой с консоли оператора.

Как было сказано, часть подсистем ЛСЭ имеет различную конфигурацию на разных

очередях ЛСЭ. Например, магнитная система имеет различный набор элементов, так как разные очереди ЛСЭ содержат разное количество дорожек ускорителя. То же самое относится и к системам контроля температуры и диагностики положения пучка. При этом в процессе эксплуатации ЛСЭ возникает необходимость работать попеременно во всех трех режимах. Учитывая эти факторы, программное обеспечение, управляющее данными подсистемами, было разработано таким образом, чтобы управление осуществлялось единообразно для всех режимов работы ЛСЭ. Каждой подсистемой во всех режимах управляет одна программа.

При ее запуске в соответствии с нужным режимом работы загружается соответствующая конфигурация – список управляемых элементов и их параметры. При этом все функции программы остаются идентичными. Программы, управляющие подсистемами, которые имеют одинаковую конфигурацию для всех режимов работы ЛСЭ, работают всегда в одной конфигурации.

Перечислим основные системы ЛСЭ и основные функции управляющих ими программных модулей.

1. Магнитная система ЛСЭ – управление источниками питания магнитных элементов, а также их диагностика (обнаружение пульсаций тока и наблюдение его временной стабильности).

2. Система измерения положения пучка – измерение и вывод на экран координат положения электронного пучка в местах пролета им пикап-станций, изучение временной стабильности положения и тока пучка.

3. Система контроля вакуума и температуры – считывание и вывод на экран показаний с датчиков температуры и блоков управления вакуумных насосов. В случае перегрева какого-либо участка вакуумной

камеры программа посылает запрет на включение электронного пучка.

4. ВЧ-система – управление ВЧ-генераторами, питающими ВЧ-систему ЛСЭ, включающую в себя 19 ВЧ-резонаторов, управление и диагностика состояния ВЧ-резонаторов.

5. Электронная пушка – управление катодно-сеточным узлом (напряжением накала, катода, ускорительной трубки), задание частоты следования электронных сгустков, непрерывная диагностика потерь электронного пучка в канале ускорителя.

6. Оптическая система – настройка положения зеркал оптического резонатора, снятие показаний с датчиков мощности излучения и передача их значений на пользовательские станции и на пульт оператора, управление монохроматором (измерение спектра излучения).

На рис. 5–7 приведены скриншоты некоторых управляющих программ.

Данные программные модули в основном используются операторами во время штатной работы ЛСЭ.

Кроме этих модулей, взаимодействующих с управляющей аппаратурой «напрямую», был разработан ряд клиентских при-

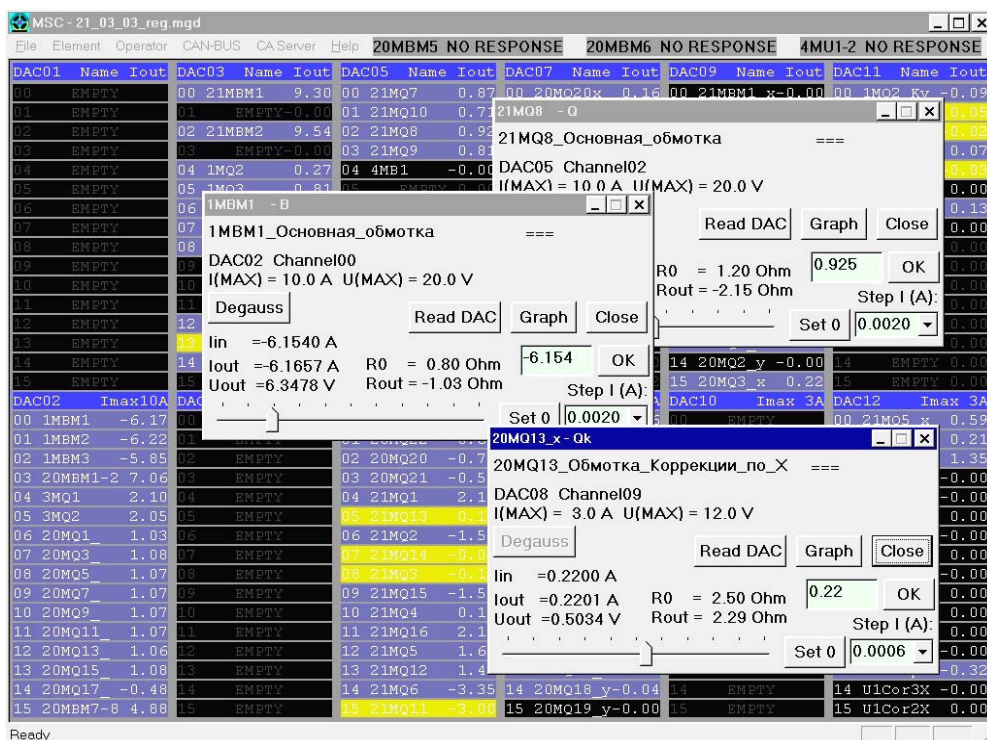


Рис. 5. Программа управления магнитной системой

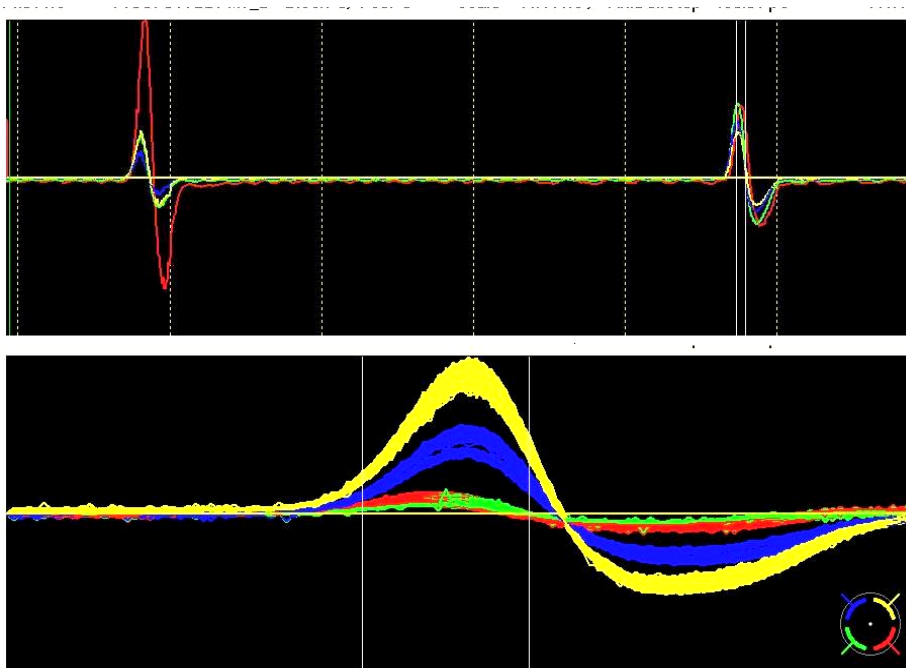


Рис. 6. Программа измерения положения пучка.
Временная развертка импульса с пикап-электродов

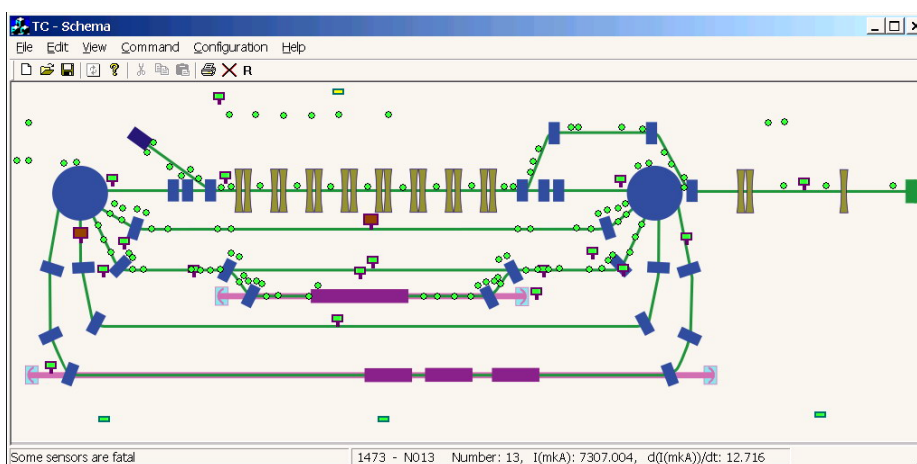


Рис. 7. Программа контроля вакуума и температуры

ложений (см. рис. 4), которые осуществляют доступ к управляемым параметрам с помощью протокола удаленного управления Channel Access. Каждый управляемый параметр представлен в сервере Channel Access в виде PV, доступ к которой осуществляется по имени. Одно клиентское приложение через соответствующие PV может работать с параметрами из разных подсистем, что было бы невозможно напрямую, из управляющих программ. В настоящее время в системе

управления задействованы следующие клиентские приложения.

1. Программа поиска фазы ВЧ-резонатора, соответствующей максимальной энергии пучка. Данное приложение работает с параметрами из двух подсистем – ВЧ-системы и системы измерения положения пучка.

2. Программа сохранения режимов работы ЛСЭ. В процессе эксплуатации ЛСЭ приложение непрерывно собирает около 20 основных его параметров, отвечающих за

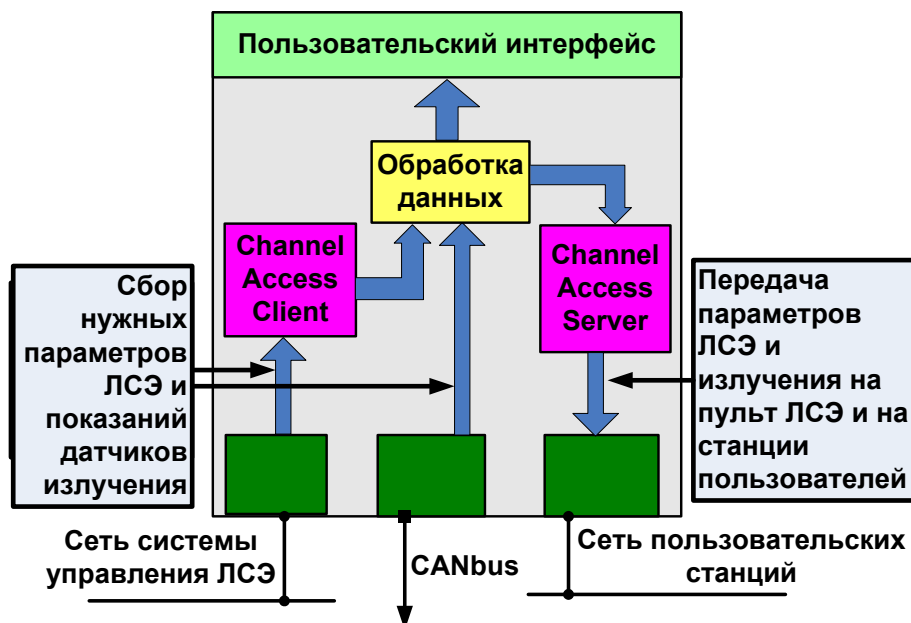


Рис. 8. Схема использования протокола Channel Access в модуле диагностики когерентного излучения ЛСЭ

энергию электронного пучка, его средний ток, мощность и длину волны излучения. Позволяет сохранить в любой момент времени эти величины для их использования при последующей настройке режима работы ЛСЭ.

3. Архиватор всех управляемых и измеряемых параметров. Для этого используется готовый модуль Channel Archiver из набора EPICS Extension. Архивирование производится непрерывно в течение всего времени работы ЛСЭ с интервалом в 30 с.

В настоящее время ведется разработка еще нескольких клиентских приложений, предназначенных для изучения и улучшения динамики электронного пучка в канале ускорителя и для повышения стабильности его работы.

Кроме стандартных вариантов использования протокола удаленного управления (клиент, сервер), некоторые программные модули используют комбинированную структуру Channel Access протокола, т. е. реализуют как клиентскую, так и серверную его часть. Такая архитектура используется для реализации межпрограммной связи, когда какому-то программному модулю нужно получить значение параметра из другой подсистемы. Наиболее интенсивно такой подход используется в системе диагностики

излучения ЛСЭ [4], где необходимо собирать самые важные параметры работы ЛСЭ (энергия, ток пучка, длина волны излучения) и передавать их как на пользовательские станции, так и на операторский пульт ЛСЭ. Примерная схема использования протокола Channel Access для этой задачи и направления передачи данных приведены на рис. 8.

Заключение

Поэтапность ввода в строй ЛСЭ предъявляет особые требования к системе управления. Первая очередь ЛСЭ работает в режиме генерации излучения для пользовательских экспериментов с 2004 г. Ввод в строй и отладка нового оборудования должны происходить так, чтобы не препятствовать этой работе.

Разработанная система управления позволяет осуществлять полнофункциональное управление, как в режиме настройки, так и в штатном режиме работы. Для всех трех режимов работы ЛСЭ реализован единый интерфейс и подход к управлению, что позволяет легко переключаться между очередями и значительно упрощает работу оператора. Опыт запуска второй очереди

ЛСЭ подтвердил правильность исходной стратегии.

В ближайшее время предполагается сдача в эксплуатацию третьей очереди ЛСЭ. Соответствующие управляющая аппаратура и программное обеспечение уже разработаны и готовы к решению поставленных задач.

Список литературы

1. *Vinokurov N. A. et al.* Novosibirsk Free Electron Laser Facility: Two-Orbit ERL with Two FELs // Proc. of FEL-2009, TUOD01.

2. *Kozak V. R.* Embedded Device Set for Control Systems. Implementation and application // Proc. of RuPAC-2006, THDO05.

3. *Hill J. O.* EPICS R3.14, Channel Access Reference Manual. URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>

4. *Kubarev V. V., Makashov E. V., Palagin K. S., Serednyakov S. S.* Control and Diagnostic System for Novosibirsk FEL Radiation // Proc. of FEL2007, MOPPH043.

Материал поступил в редколлегию 18.01.2012

**V. R. Kozak, E. A. Kuper, N. A. Vinokurov
S. S. Serednyakov, S. V. Tararyshkin, A. G. Tribendis, P. A. Selivanov**

THE CONTROL SYSTEM OF THE NOVOSIBIRSK FREE ELECTRON LASER

The Novosibirsk free electron laser (FEL) is the source of the coherent radiation with tunable wave length and operates on the basis of the multiple-turn energy recovery linac. The whole FEL itself represents the large physical facility, controlled by large amount of various equipments. Therefore, to carry out the effective control and monitoring of FEL operation, the specialized control system was developed. In this paper the structure, software and hardware components of this system are considered. The main features, parameters and possibilities, which this system provides, are described.

Keywords: free electron lasers, accelerators, control system.