

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

УДК 621.384.6 681.518

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НОВОСИБИРСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛСЭ  
И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СТАНЦИЯМИ<sup>1</sup>**

© 2024 г. Н. А. Винокуров<sup>a,b</sup>, В. Р. Козак<sup>a</sup>, Е. Н. Дементьев<sup>a</sup>,

С. С. Середняков<sup>a,b,\*</sup>, С. В. Тарарышкин<sup>a</sup>

*<sup>a</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера*

*Сибирского отделения Российской академии наук*

*Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11*

*<sup>b</sup>Новосибирский государственный университет*

*Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

*\*e-mail: sseredn@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 18.12.2023 г.

После доработки 12.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны и работает на базе четырехоборотного ускорителя-рекуператора. Данный ускоритель является крупной электрофизической установкой, содержащей большое количество электротехнического оборудования. Для осуществления эффективного управления данным комплексом была разработана специализированная система управления. Рассматриваются структура, аппаратные и программные средства данной системы управления. Также рассмотрены способы управления пользовательскими станциями ЛСЭ и их связь с основной системой управления ЛСЭ.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Институте ядерной физики собран и на протяжении ряда лет работает лазер на свободных электронах (ЛСЭ) [1]. ЛСЭ функционирует на основе многооборотного ускорителя-рекуператора и включает в себя три различные конфигурации (режима работы), которые различаются по энергии электронного пучка, используемого для генерации излучения, и диапазону его длин волн. Каждому режиму работы соответствует определенное количество дорожек ускорителя и отдельный лазер на свободных электронах. Структура всего комплекса такова, что отдельные его компоненты используются для всех

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

трех режимов работы, в то время как другие используются при работе только одного режима (см. рис 1).

**Рис. 1.** Схема Новосибирского ЛСЭ.

Все три конфигурации работы ЛСЭ, как по отдельности, так и вместе, представляют собой сложную электрофизическую установку с большим количеством управляемых параметров. Для полноценной эксплуатации ЛСЭ была создана специализированная распределенная система управления, включающая в себя различное управляющее оборудование, а также соответствующее программное обеспечение.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ НОВОСИБИРСКОГО ЛСЭ

Лазер на свободных электронах представляет собой источник когерентного излучения, в котором в качестве рабочей среды используется ускоренный электронный пучок. Релятивистский пучок пролетает через специальную магнитную структуру – ондулятор, который создает магнитное поле, поперечное движению пучка, постоянное по времени и меняющееся по ходу движения пучка по гармоническому закону. Электроны двигаются в таком поле по змеевидной траектории и испускают электромагнитное излучение (см. рис. 2).

**Рис. 2.** Принцип работы ЛСЭ.

На оси движения пучка устанавливаются зеркала оптического резонатора, в котором происходит накопление и усиление излучения. Для вывода излучения служит отверстие в одном из зеркал.

Длина волны излучения зависит от энергии электронного пучка и параметров ондулятора – периода и амплитуды магнитного поля. Соответственно, длину волны можно перестраивать в довольно больших пределах, меняя либо амплитуду поля в ондуляторе, либо энергию электронного пучка.

Как было сказано выше, 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 ускоряющую ВЧ-секцию и набирая энергию, каждый раз попадает на следующую дорожку. После пролета последней дорожки и передачи части своей энергии в излучение электронный пучок начинает пролетать все дорожки в обратном порядке, отдавая каждый раз часть своей

энергии обратно в ВЧ-систему. Данный способ передачи энергии и называется рекуперацией и имеет следующие преимущества:

- отработанный пучок отдает почти всю энергию обратно в ВЧ-резонаторы ускоряющей структуры;
- 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 ондулятор (см. рис 1.), отличающийся от других по своим параметрам (период и амплитуда магнитного поля, полная длина).

**Таблица 1.** Параметры режимов работы ЛСЭ

Режим работы ЛСЭ	1	2	3
Кол-во оборотов	1	2	4
Энергия электронного пучка, МэВ	12	20	40
Диапазон длин волн излучения, мкм	110–240	40–80	5–30

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

## 1. НОВОСИБИРСКИЙ ЛСЭ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Как электрофизическая установка ЛСЭ включает в себя следующие основные подсистемы.

1. Электронная пушка, выдающая сгустки электронов с частотой до 22.5 МГц с зарядом в сгустке до 1.4 нКл. Средний ток пучка может достигать 30мА.
2. ВЧ-система, содержащая 16 ускоряющих резонаторов и 3 резонатора в инжекционном канале (см. рис 1).
3. Магнитная система. Включает в себя сотни магнитных элементов разных типов – соленоиды, квадрупольные линзы, поворотные магниты, корректоры, ондуляторы – с рабочими токами от сотен миллиампер до двух килоампер.

4. Система диагностики пучка. Включает в себя датчики положения и тока пучка, установленные на всех дорожках микротрона рекуператора.

5. Системы контроля “технологических” параметров ЛСЭ. Сюда входят контроль температуры вакуумной камеры ускорителя и других, критичных к нагреву элементов комплекса: вакуума, состояния охлаждающего дистиллята, состояния внешней питающей сети и т.д.

6. Оптическая система ЛСЭ. Включает в себя узлы, необходимые для накопления и транспортировки когерентного излучения – оптические резонаторы, канал вывода излучения, систему разводки излучения по пользовательским станциям.

В табл. 2 приведен состав всех систем ЛСЭ и управляющего им радиотехнического оборудования.

**Таблица 2.** Подсистемы ЛСЭ

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	1–2- и 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, монохроматор

Весь комплекс Новосибирского ЛСЭ имеет ряд особенностей, отличающих его от других похожих установок.

1. Большая 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, в то время как другие части используются для работы одного из режимов.

Эти и ряд других факторов повлияли на выбор управляющего оборудования, программного обеспечения и конечную архитектуру всей системы управления.

#### 4. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛСЭ

Поэтапное сооружение установки сильно повлияло на выбор аппаратуры, используемой в системе управления. Так, например, система управления ускоряющей ВЧ-секцией базируется на аппаратуре в стандарте КАМАК. На выбор данного стандарта повлияло наличие большого количества разработанных ранее модулей.

При этом значительный технологический прогресс электроники инициировал поиск других подходов при проектировании систем управления. Так, для нужд управления несколькими подсистемами ЛСЭ был разработан набор унифицированных контроллеров с интерфейсом CANbus [2], которые были интегрированы в различные подсистемы (источники питания, измерители температуры и т.п.). В табл. 3 приводится список контроллеров, разработанных специально для нужд системы управления ЛСЭ.

**Таблица 3.** Контроллеры с интерфейсом CANbus

Контроллер	Входов АЦП	Выходов ЦАП	Цифровых входов и выходов
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

Помимо указанных выше интерфейсов, в системе управления ЛСЭ используются шины RS-485, Ethernet, но в гораздо меньшем объеме.

В табл. 4 приводится сводка используемых интерфейсов и количество каналов управления и контроля по различным системам ЛСЭ.

**Таблица 4.** Управляющее оборудование для подсистем ЛСЭ

Система	Интерфейс	Кол-во упр. устройств	Кол-во каналов управления	Кол-во каналов контроля
Электронная пушка	САМАС, CANbus	7	20	20
ВЧ-система	САМАС	28	100	200
Магнитная система	CANbus	61	400	800
Система диагностики пучка	САМАС	75	0	280
Системы технологического контроля	CANbus	16	20	330
Оптическая система	CANbus, RS-485	10	10	30
Всего	–	164	500	1670

Все устройства управления и контроля через указанные шины передачи данных подключены к персональным компьютерам (типа IBM PC) с помощью интерфейсных устройств, которые либо являются внутренними платами расширения (PCI-board), либо являются внешними устройствами, подключаемыми к компьютеру с помощью стандартных шин (USB, Ethernet). Схема основных подключений системы управления ЛСЭ изображена на рис. 3. Все управляющие компьютеры подключены к общей локальной сети Ethernet, которая физически отключена от внешней сети. Также отдельная локальная сеть предусмотрена для пользовательских компьютеров. Эти две сети соединены между собой через один из управляющих компьютеров (см. рис. 3), через который происходит передача основных параметров работы ускорителя и генерируемого излучения из системы управления ЛСЭ на экспериментальные станции.

**Рис. 3.** Архитектура системы управления ЛСЭ.

## 5. 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 с помощью интерфейсных устройств, с которыми программа взаимодействует с помощью драйверов этих устройств и высокоуровневых библиотек. Структурная схема управляющего программного обеспечения приведена на рис. 4.

**Рис. 4.** Структура программного обеспечения системы управления ЛСЭ.

Каждая управляющая программа содержит встроенный сервер удаленного управления Channel Access из состава системы EPICS [3]. Сервер предоставляет набор PV-переменных (Process Variables), которые представляют собой переменные, доступные для чтения, либо записи в локальной сети. В управляющей программе каждая PV-переменная связана с соответствующей управляющей либо измеряемой величиной данной подсистемы, которая в свою очередь отражает параметр какого-либо устройства. С помощью данного сервера можно управлять параметрами подсистемы из любой другой программы на любом компьютере, находящемся в локальной сети системы управления.

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

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

1. Магнитная система ЛСЭ: управление источниками питания магнитных элементов, а также их диагностика.
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. 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. Контроль состояния блокировок.

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, измерение спектра излучения, контроль состояния канала транспортировки излучения.

На рис. 5 приведены скриншоты некоторых управляющих программ.

**Рис.5.** Скриншоты управляющих программ.

Кроме этих модулей, взаимодействующих с управляющей аппаратурой “напрямую”, был разработан ряд клиентских приложений (см. рис. 4), которые управляют нужными параметрам ЛСЭ с помощью протокола Channel Access, обращаясь к соответствующим PV-переменным, находящимся в серверах основных программ. Таким образом, одно клиентское приложение может работать с параметрами из разных подсистем.

## 6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СТАНЦИЯМИ

Помимо управления оборудованием микротрона-рекуператора и через него электронным пучком, в рамках системы управления ЛСЭ был реализован общий функционал для управления аппаратурой на пользовательских станциях и передачи на них основных параметров электронного пучка и излучения. В силу некоторой схожести управляющего оборудования и задач управления данный функционал был реализован в программном модуле управления оптической системой. Данный модуль может работать в двух конфигурациях:

- серверной – собирает основные параметры электронного пучка и излучения и выдает их в обе локальные сети как PV сервера EPICS,
- клиентской – получает основные параметры через протокол EPICS Channel Access и отображает их на экране компьютера.

В результате существует возможность запускать программный модуль управления оптической системой на компьютерах пользовательских станций в клиентском режиме и управлять локальным оборудованием, а также видеть на экране основные параметры

работы комплекса. В сводной табл. 5 приведен функционал данного модуля, и то, как он используется на пользовательских станциях и в системе управления ЛСЭ.

**Таблица 5.** Функционал системы управления излучением ЛСЭ

Функционал управления	Система управления ЛСЭ	Пользовательские станции
Управление шаговыми двигателями	Юстировка зеркал оптических резонаторов ЛСЭ	Управление различными подвижками при проведении экспериментов
Снятие показаний датчиков излучения ЛСЭ	Отображение на экране на пульте ЛСЭ. Передача этих значений как PV сервера Еріс CAS.	Получение показаний датчиков как PV через клиентский протокол Еріс СА и отображение на экране.
Получение спектра излучения	Управление монохроматором. Получение из него спектра, передача его как PV сервера ЕPІCS.	Получение спектра излучения через клиентский протокол Еріс СА и отображение на экране.
Контроль состояния канала передачи излучения ЛСЭ	Опрос состояний зеркал и шиберов оптического канала. Передача их как PV через сервер ЕPІCS. Построение на экране картинки – состояния канала (см. рис 7).	Получение состояний зеркал и шиберов как PV через клиентский протокол Еріс СА и отображение на экране состояния канала в виде схемы(см. рис 7).

На рис. 6 приведена схема системы управления оптической системой ЛСЭ и интеграции её с пользовательскими станциями.

**Рис. 6.** Схема соединений системы управления излучением ЛСЭ.

**Рис. 7.** Схема состояния канала транспортировки излучения на экране компьютера.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время Новосибирский ЛСЭ работает попеременно во всех трех режимах. Разработанная система управления позволяет осуществлять полный контроль

и диагностику работы всего комплекса. Для всех трех режимов работы ЛСЭ система имеет единый интерфейс и подход к управлению, что позволяет легко переключаться между очередями и значительно упрощает работу оператора. Также данная система интегрирована с компьютерами на пользовательских станциях и содержит единообразный функционал для управления экспериментами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vinokurov N.A., Dementyev E.N., Dovzhenko B.A. et al.* Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs. // Proceedings of FEL. Novosibirsk. 2009. TUOD01.
2. *Kozak V.R.* Embedded device set for control systems. Implementation and application. // Proceedings of RuPAC. Novosibirsk. 2006. THDO05.
3. *Hill J.O.* EPICS R3.14, Channel Access Reference Manual  
<http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис.1.** Схема Новосибирского ЛСЭ.

**Рис. 2.** Принцип работы лазера на свободных электронах.

**Рис. 3.** Архитектура системы управления ЛСЭ.

**Рис. 4.** Структура программного обеспечения системы управления ЛСЭ.

**Рис.5.** Скриншоты управляющих программ.

**Рис.6.** Схема соединений системы управления излучением ЛСЭ.

**Рис.7.** Схема состояния канала транспортировки излучения на экране компьютера.

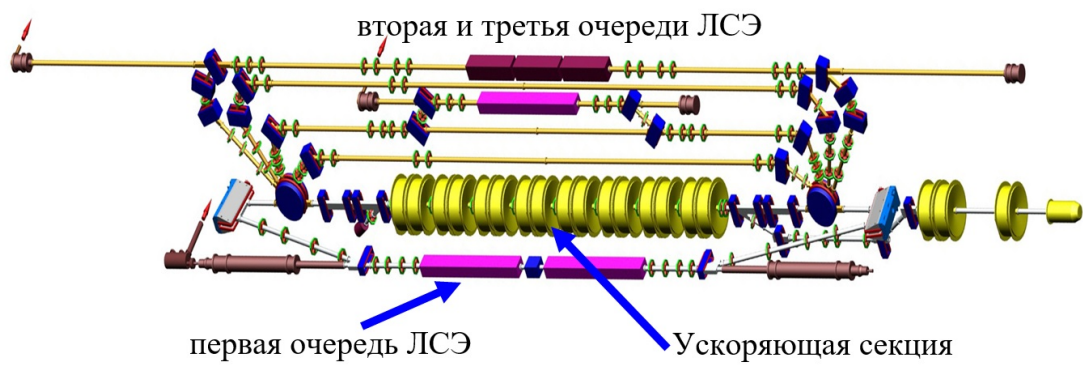


Рис. 1

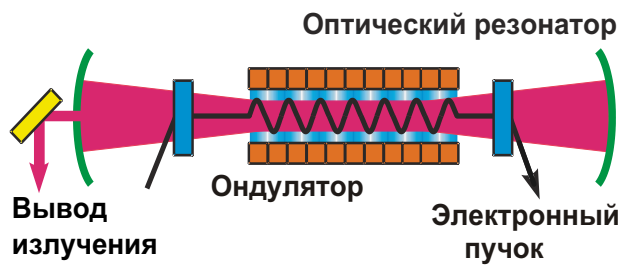


Рис. 2

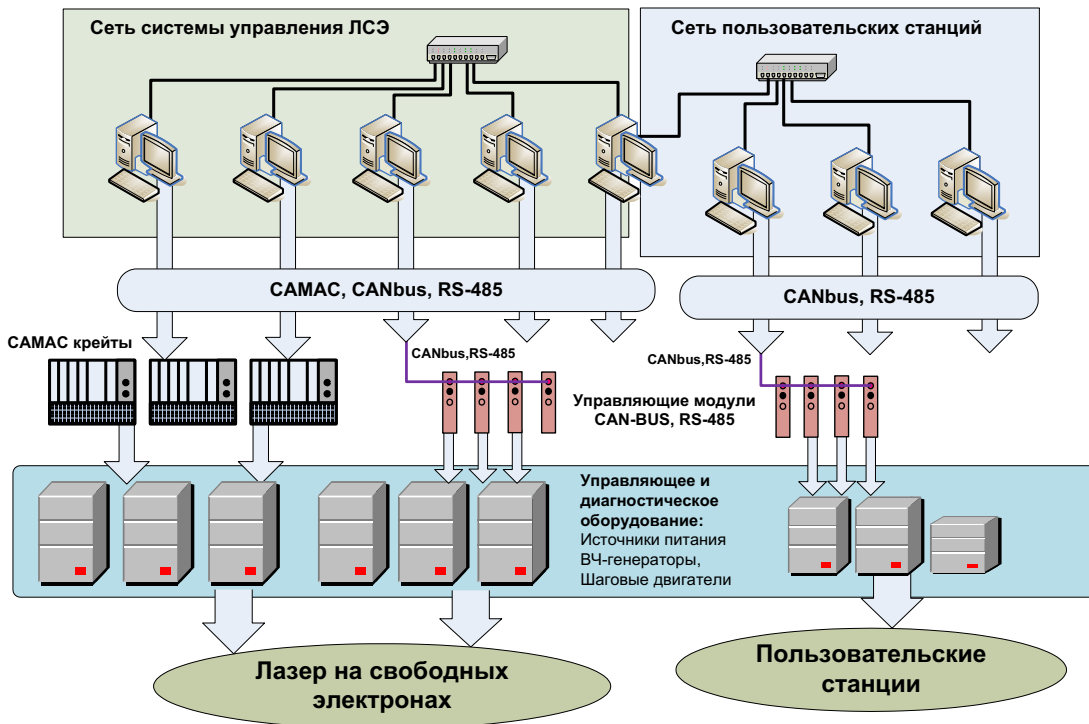


Рис. 3

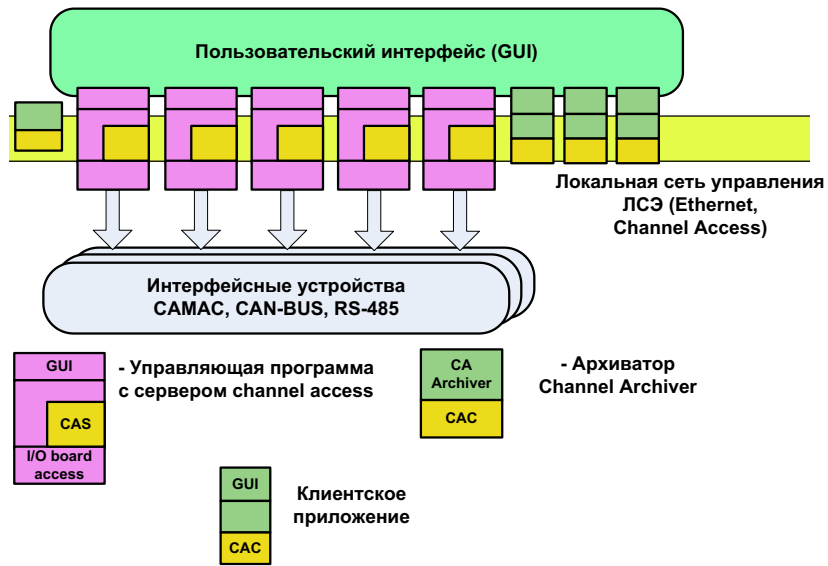


Рис. 4

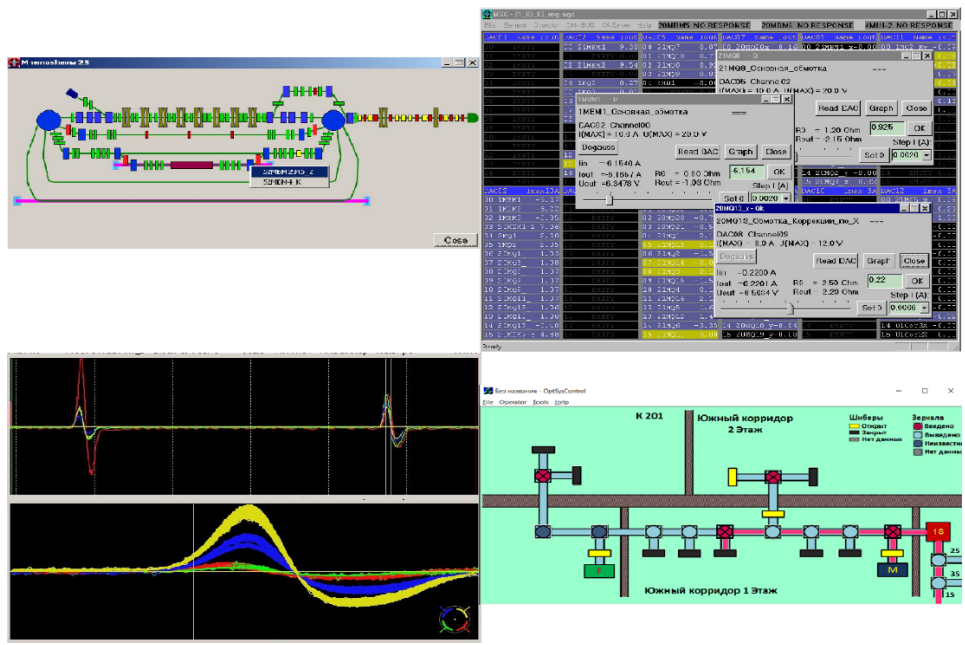


Рис. 5

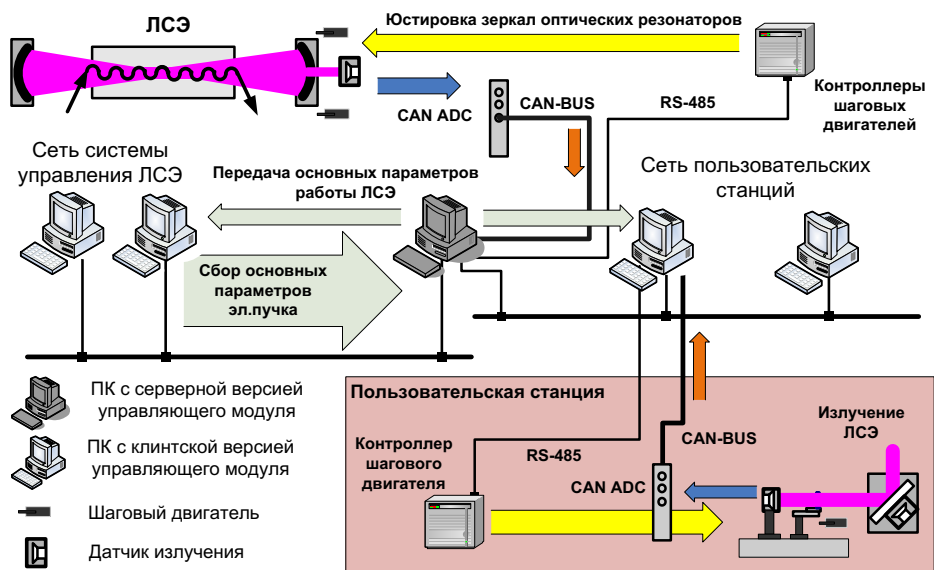


Рис. 6

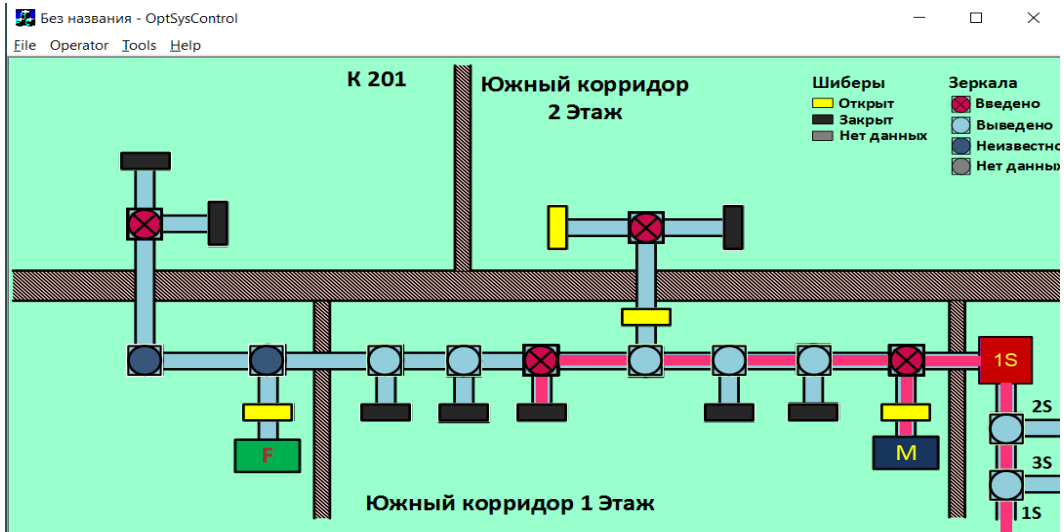


Рис. 7

**Для связи с авторами:**

**Середняков Станислав Сергеевич**

Тел.: 8-913-019-09-83 (моб.)

E-mail: [sseredn@inp.nsk.su](mailto:sseredn@inp.nsk.su)

[Козак Виктор](#)

E-mail: [V.R.Kozak@inp.nsk.su](mailto:V.R.Kozak@inp.nsk.su)

Тел.: (383)294856

Винокуров Николай

E-mail: [N.A.Vinokurov@inp.nsk.su](mailto:N.A.Vinokurov@inp.nsk.su)

Тел.: (383)294003

Тел.: 8-913-740-85-60 (моб.)

**Для переводчика:**

#### THE CONTROL SYSTEM OF NOVOSIBIRSK FREE ELECTRON LASER FACILITY AND USERS STATIONS

Novosibirsk Free electron Laser (FEL) is the source of coherent radiation with ability of wavelength tuning. It based on multi-turn energy recovery linac, which involves one single-turn and one 4-turn microtron-recuperator. There are three different free electron beam lasers, mounted on different tracks of these accelerators. Each FEL is operates on different electron beam energy and have different wavelength range and power of generated radiation. Whole FEL facility is a complex physics installation, therefore, for effective control and monitor of FEL operation state and its parameters, the particularized control system was developed. In this article, the main features, hardware, software compound parts used in this control system are considered. Also aspects of interaction of this control system with users stations are considered