

УДК 621.384.6 681.518
DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-14-24

Система управления магнитными элементами микротрона-рекуператора Новосибирского лазера на свободных электронах

Н. А. Винокуров^{1,2}, Б. А. Довженко¹, В. Р. Козак¹, Э. А. Купер¹, Л. Э. Медведев¹
А. С. Медведко¹, С. С. Середняков^{1,2}, С. В. Тарарышкин¹, О. А. Шевченко¹

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

Аннотация

В настоящее время в Новосибирске сконструирован и работает лазер на свободных электронах. Данный комплекс является крупной электрофизической установкой и источником когерентного излучения в достаточно широком диапазоне длин волн. Основные параметры излучения – длина волны и мощность излучения – зависят от параметров электронного пучка – его энергии, среднего тока и траектории движения. В свою очередь, система магнитных элементов является основным инструментом управления траекторией движения пучка. В данной статье описывается структура, характеристики данной системы и возможности, которые предоставляет система управления магнитными элементами.

Ключевые слова

лазеры на свободных электронах, ускорители электронов, системы управления, магнитные элементы

Для цитирования

Винокуров Н. А., Довженко Б. А., Козак В. Р., Купер Э. А., Медведев Л. Э., Медведко А. С., Середняков С. С., Тарарышкин С. В., Шевченко О. А. Система управления магнитными элементами микротрона-рекуператора Новосибирского лазера на свободных электронах // Сибирский физический журнал. 2020. Т. 15, № 2. С. 14–24. DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-14-24

The Control System for the Magnet Power Supplies of Microtron-Recuperator for Novosibirsk Free Electron Laser

N. A. Vinokurov^{1,2}, B. A. Dovzhenko¹, V. R. Kozak¹, E. A. Kuper¹, L. E. Medvedev¹
A. S. Medvedko¹, S. S. Serednyakov^{1,2}, S. V. Tararyshkin¹, O. A. Shevchenko¹

¹ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

Free electron laser based on multi-turn microtron-recuperator is currently operates at Novosibirsk. Whole facility is a coherent radiation source with ability of wavelength tuning in adequately wide range. The main parameters of radiation (wavelength and radiation power) are depends on electron beam parameters – its energy, average current, movement trajectory. The system of magnetic elements, in turn, appear to be a main instrument to control over beam

© Н. А. Винокуров, Б. А. Довженко, В. Р. Козак, Э. А. Купер, Л. Э. Медведев,
А. С. Медведко, С. С. Середняков, С. В. Тарарышкин, О. А. Шевченко, 2020

movement trajectory. The structure, main parameters of this system, abilities of magnetic elements control system are described in this article.

Keywords

free electron lasers, electron accelerators, control systems, magnet elements

For citation

Vinokurov N. A., Dovzhenko B. A., Kozak V. R., Kuper E. A., Medvedev L. E., Medvedko A. S., Serednyakov S. S., Tararyshkin S. V., Shevchenko O. A. The Control System for the Magnet Power Supplies of Microtron-Recuperator for Novosibirsk Free Electron Laser. *Siberian Journal of Physics*, 2020, vol. 15, no. 2, p. 14–24. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-14-24

Введение

Новосибирский лазер на свободных электронах работает на базе многооборотного микротрона-рекуператора [1]. Весь комплекс может работать в трех различных конфигурациях. Реализация этих режимов работы и обеспечение нужного режима движения пучка по заданной траектории достигается при помощи магнитной системы, состоящей из множества магнитных элементов разных типов – поворотные магниты, квадрупольные линзы, корректоры. Для обеспечения работы этих элементов была разработана специализированная система управления, включающая в себя источники питания, управляющее оборудование и программное обеспечение.

Описание установки и принцип работы лазера

Весь комплекс Новосибирского лазера на свободных электронах включает в себя инжекционный канал, ускоряющий промежуток, одну дорожку в вертикальной плоскости для первого режима работы, и четыре дорожки в горизонтальной плоскости для второго и третьего режимов (рис. 1).

Рис. 1. Схема Новосибирского лазера на свободных электронах
Fig. 1. Novosibirsk Free electron laser main scheme

Три режима работы лазера соответствуют разному числу оборотов электронного пучка в канале ускорителя и, соответственно, его разным энергиям. Кроме того, каждому режиму работы соответствует свой диапазон длин волн генерируемого излучения (табл. 1) Это возможно благодаря тому, что в каждом режиме работы электронный пучок пролетает «свой» ондулятор, в котором пучок генерирует излучение в строго заданном диапазоне длин волн.

ISSN 2541-9447
Сибирский физический журнал. 2020. Том 15, № 2
Siberian Journal of Physics, 2020, vol. 15, no. 2

Таблица 1

Параметры режимов работы лазера на свободных электронах

Table 1

Parameters of operation modes of free electron laser

| Параметр | Режим работы | | |
|-----------------------------------|--------------|-------|------|
| | 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 |

Возможность работы попеременно в разных режимах, а также настройка траектории движения пучка возможны благодаря развитой системе магнитных элементов, специально спроектированной для этих целей. Так, включение разных конфигураций поворотных магнитов заставляет электронный пучок циркулировать по дорожкам ускорителя, соответствующим только данной конфигурации, набирать нужную энергию и пролетать ондулятор, соответствующий данному режиму работы. Более тонкая настройка режима движения пучка с помощью корректоров, квадрупольных линз и ондулятора позволяет добиваться требуемого режима генерации излучения ЛСЭ.

Магнитная система ЛСЭ

Магнитная система состоит из элементов, питаемых от источников питания постоянного тока, разработанных в ИЯФ [2]. Схема системы приведена на рис. 2.

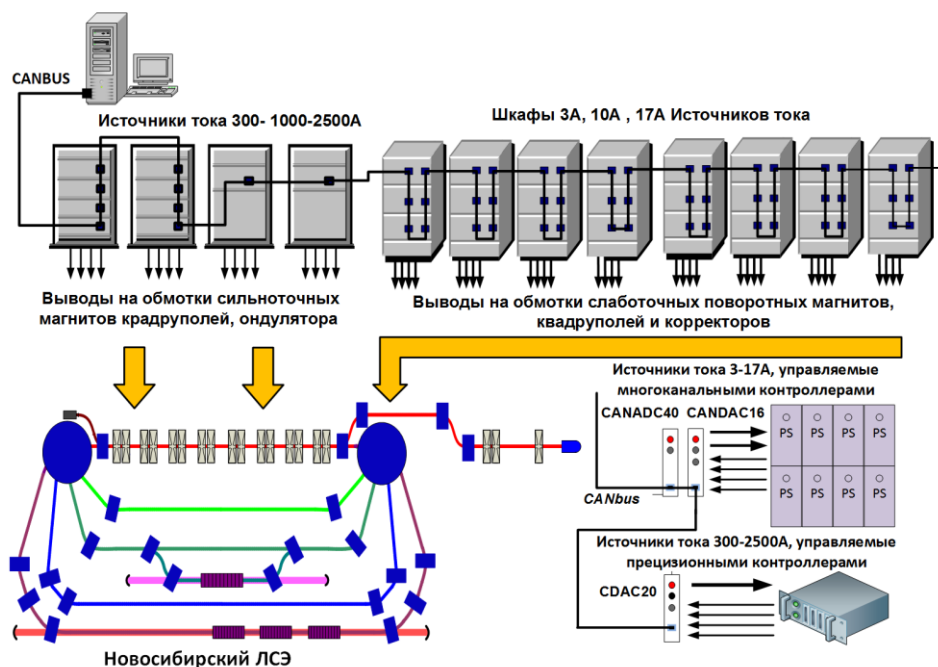


Рис. 2. Управление и питание магнитной системы ЛСЭ
Fig. 2. Scheme of control and supply of FEL magnetic system

Сведения об используемых в данной системе типах магнитных элементов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Элементы магнитной системы ЛСЭ

Table 2

FEL magnetic system elements

| Тип элемента | Количество | I Max(A) источника | Режимы ЛСЭ |
|----------------------------------|------------|--------------------|------------|
| Корректор | 10 | 3.0 | 1 |
| Слаботочные квадрупольные линзы | 120 | 10.0 | 1, 2, 3 |
| Слаботочные поворотные магниты | 14 | 17.0 | 1 |
| Сильноточные квадрупольные линзы | 9 | 300.0 | 2, 3 |
| Сильноточные поворотные магниты | 19 | 1000.0 | 1, 2, 3 |
| Ондуляторы | 1 | 2500.0 | 1 |

Управление магнитной системой ЛСЭ состоит из следующих составных частей (подсистем):

- 1) система питания магнитных элементов;
- 2) управляющее оборудование;
- 3) управляющее программное обеспечение.

Ниже следует описание каждой из подсистем.

Система питания магнитных элементов

Данная система включает в себя источники питания постоянного тока, различающиеся по мощности, максимальному выдаваемому току, точности и принципу работы. По этим параметрам все источники питания можно разделить на 2 группы.

- Слаботочные источники. Максимальный выдаваемый ток – 3, 10, 17 А. Используются для питания квадрупольных линз, корректоров и некоторых поворотных магнитов 1-й очереди.

- Сильноточные источники. Максимальный выдаваемый ток – 300, 1 000, 2 500 А. Данные источники используются для питания поворотных магнитов, мощных квадрупольных линз и ондулятора 1-й очереди.

Управляющее оборудование

Управление источниками тока осуществляется с помощью многофункциональных контроллеров, имеющих в своем составе аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП, АЦП). Все используемые управляющие модули были разработаны в ИЯФ [3], имеют интерфейс связи CAN-BUS [4] и являются встраиваемыми устройствами, т. е. помещаются непосредственно в стойку данного источника питания. По характеру управления и типу используемого управляющего устройства, данное оборудование также можно разделить на 2 группы.

- Управление слаботочными источниками (3, 10, 17 А). Используются многоканальные ЦАП и АЦП. Здесь пара модулей обслуживает группу (до 16-ти) источников питания. Для управления и контроля такой группой используется один модуль CANDAC16 (16-канальный ЦАП) и один модуль CANADC40 (40-канальный АЦП).

- Управление сильноточными прецизионными источниками тока (300, 1 000, 2 500 А). Используются одноканальные прецизионные контроллеры CDAC20 / CEDAC20. При этом каждый источник управляется «своим» контроллером.

В табл. 3 приведены основные параметры всех используемых цифровых устройств.

Таблица 3

Параметры управляющих устройств

Table 3

Control devices parameters

| Параметр | CANDAC16 | CANADC40 | CDAC20 |
|----------------------------------|----------|----------|---------|
| 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 |
| Количество используемых модулей | 24 | 24 | 13 |

Все контроллеры подключены к двум CAN-линиям и работают на скорости 250 кБит/с. Обе CAN-линии подключены к управляющему компьютеру с помощью шлюза CAN-Ethernet, также разработанного в ИЯФ [5].

Управляющее программное обеспечение

Управление системой осуществляется с помощью программного обеспечения (ПО), работающего на персональных компьютерах типа IBM-PC. Все ПО включает в себя несколько программных модулей, состоящих из двух частей (рис. 3).

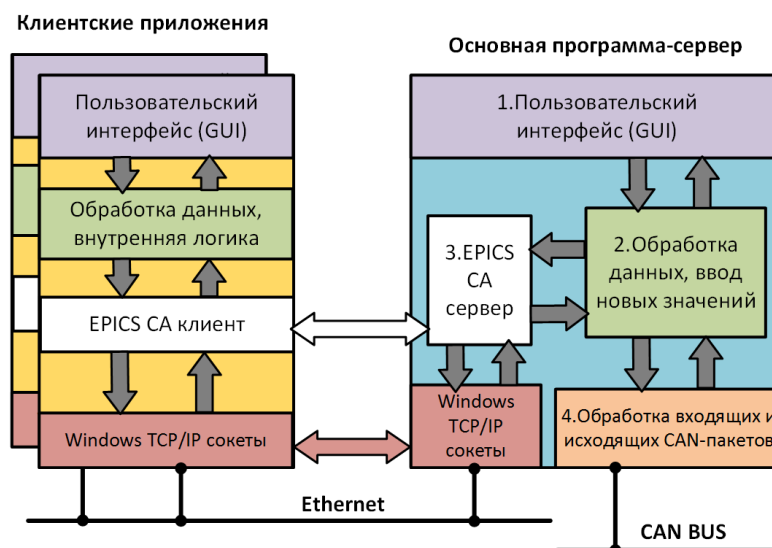


Рис. 3. Структура управляющего ПО
Fig. 3. Control software structure

- Основная управляющая программа, состоящая из следующих блоков: пользовательский интерфейс (1), логика, реализующая обработку входящих и выходящих данных (2), сервер удаленного управления (3), взаимодействие с управляющими устройствами через CAN-линии (4).
- «Клиентские» приложения, реализующие различные алгоритмы для управления электронным пучком и излучением лазера через основную управляющую программу с помощью протокола удаленного управления.

Возможности управления магнитной системой

Весь функционал управления магнитными элементами можно разделить по следующим категориям.

Пользовательский интерфейс оператора. На рис. 4 приведено главное окно основной управляющей программы. На нем все используемые источники питания представлены в виде строк разного цвета. Содержимое строки и ее цвет полностью отражает информацию – имя магнитного элемента, задан ли ток в источник питания, его величина и состояние. Задание и настройка тока производится при помощи окна, индивидуального для данного элемента (см. рис. 4).

Помимо табличного отображения источников питания, в программе предусмотрена «мнемосхема» – картинка с дорожками ускорителя соответствующей конфигурации со схематично изображенными на нем магнитными элементами (рис. 5). Использование данной схемы существенно облегчает поиск нужного элемента по месту его расположения на дорожке ускорителя.

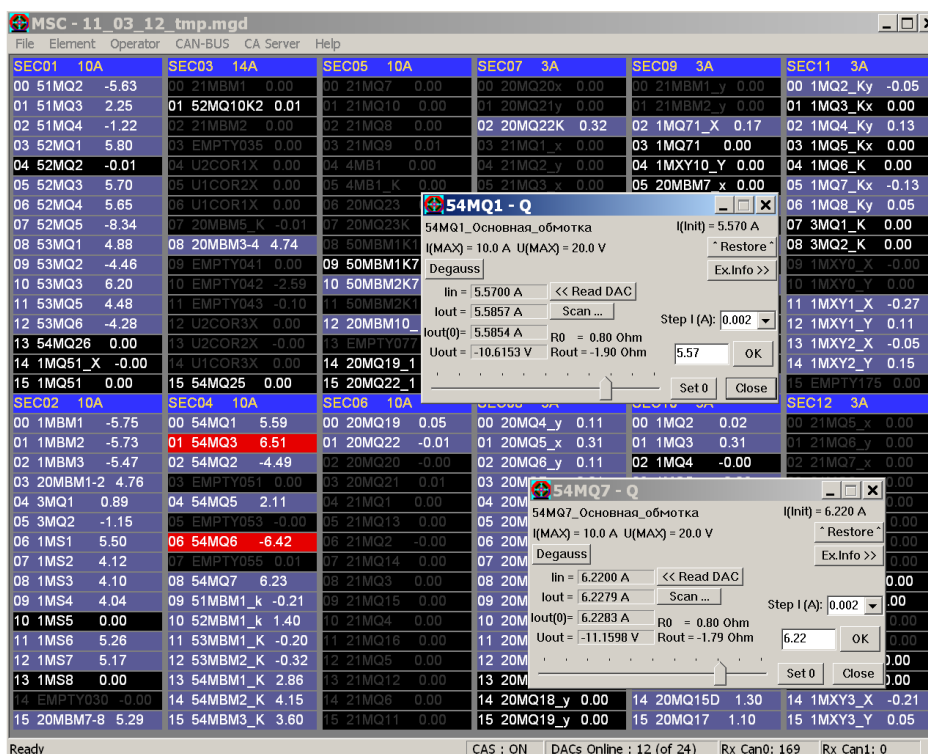


Рис. 4. Главное окно управляющей программы
Fig. 4. Control program main window

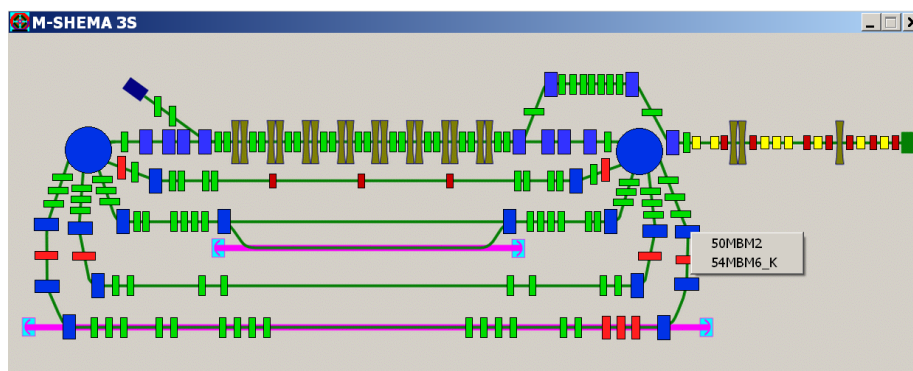


Рис. 5. Схематичное расположения магнитных элементов
Fig. 5. Schematic arrangement of magnetic elements

Интерфейс удаленного управления. Для обеспечения возможности управления магнитными элементами из других приложений, в основную управляющую программу встроен сервер удаленного управления. Для этого использовался сервер portable Channel Access, входящий в состав системы EPICS [6].

Функционал управления системой в целом. Ниже приводится список функций основной программы, реализующих начальную настройку всей системы в порядке их выполнения.

- Загрузка конфигурации программы, соответствующей выбранному режиму работы ЛСЭ. При старте основная программа подключает в работу управляющие устройства, используемые в данном режиме работы.
- Цикл размагничивания. По команде пользователя программа выполняет циклическую перестройку тока от максимального значения, соответствующего данному источнику, до минимального и обратно, постепенно понижая амплитуду данных колебаний.
- Загрузка режима работы магнитной системы. Данная операция выполняется посредством загрузки списка токов используемых источников тока из файла, сохраненного ранее.

Мониторинг работы источников питания. Для контроля работы источников питания на протяжении всего периода работы ЛСЭ, в основной программе для этого предусмотрено несколько функций.

- Контроль точности установления заданного тока. Сравнение заданного и измеренного токов. При превышении разницы максимально разрешенного значения, программа сигнализирует об этом в главном окне основной программы (см. рис .4).
- Контроль временной стабильности выдаваемого тока. Отслеживание изменения фактического значения тока во времени. При уходе тока на слишком большую величину, программа также оповещает об этом оператора при помощи цветовой индикации.
- Контроль пульсаций выходного тока. Программа по команде пользователя инициирует цикл осциллографических измерений выходных токов всех источников питания. Из полученных осциллограмм можно «увидеть» возможные пульсации тока частотой до 300 Гц.

Настройка режима циркуляции пучка и режима генерации излучения ЛСЭ

В процессе работы ЛСЭ часто возникает необходимость существенно менять режим работы магнитной системы, т. е. изменять ток во многих магнитных элементах в соответствии с конкретной задачей. Такая необходимость появляется, например, при переводе пучка на другую энергию и (или) перестройке длины волны излучения ЛСЭ. Для облегчения выполнения такого рода задач управляющее ПО магнитной системы предоставляет следующий набор инструментов.

1. Одновременное изменение токов произвольного набора источников либо целых групп (например, все поворотные магниты) на заданный коэффициент, т. е. новый ток вычисляется по формуле

$$I_i = I_i(\text{prev}) \times K,$$

где I_i – новое значение тока i -го элемента; $I_i(\text{prev})$ – предыдущее значение тока; K – коэффициент пересчета.

2. Одновременное добавление приращения тока ко всем элементам из выбранной группы, при этом приращение тока для каждого элемента умножается на индивидуальный коэффициент

$$I_i = I_i(\text{prev}) + \Delta I \times K_i,$$

где I_i – новое значение тока в i -го элемента; $I_i(\text{prev})$ – предыдущее значение тока в i -м элементе; ΔI – общее приращение тока; K_i – коэффициент для i -го элемента.

Данную функцию удобно использовать, если нужно подкорректировать траекторию движения пучка на определенном участке орбиты. Обе эти функции выполняются основной управляющей программой.

3. Вывод пучка на центр вакуумной камеры внутри отдельно взятой квадрупольной линзы. Для уменьшения потерь тока пучка, связанных с оседанием части электронов на стенках камеры, иногда появляется необходимость скорректировать траекторию движения пучка к центру вакуумной камеры.

Для выведения пучка в центр камеры в месте пролета квадрупольной линзы используется тот факт, что если пучок пролетает данную линзу не по центру камеры, то он отклоняется на некоторый угол, т. е. линза работает как корректор. При пролете пучка по центру отклонения не происходит.

Принцип и схема используемого алгоритма изображены на рис. 6.

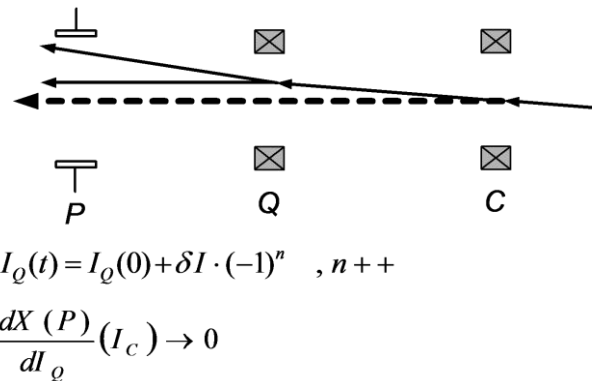


Рис. 6. Вывод пучка на центр квадрупольной линзы
 Fig. 6. Beam trajectory tuning to quadrupole lens center

Работа программы, реализующей этот алгоритм, заключается в следующем.

- Программа запускает цикл колебаний тока в выбранной линзе (Q) относительно текущего значения с временным интервалом 1 с. Изменение тока в линзе при этом можно выразить формулой

$$I_Q(t) = I_Q(0) + \Delta I \times (-1)^n; \quad n + +.$$

- В процессе работы цикла, программа вычисляет и выводит на график производную положения пучка на пикапе по току в линзе – dX_p/dI_Q в реальном времени.
- Программно изменяя ток выбранного корректора, оператор сводит к нулю вычисленную производную, что фактически означает вывод пучка на центр камеры в месте расположения данной квадрупольной линзы.

Производя серию таких действий по всему пути следования от инжектора до поглотителя пучка либо по определенному участку, можно существенно скорректировать орбиту пучка к центру камеры.

4. Перестройка длины волны излучения ЛСЭ. Длина волны излучения ЛСЭ 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 – параметр ондуляторности ($k = k_0 \cdot I$, где I – ток в обмотках ондулятора, k_0 – коэффициент пропорциональности).

Из формулы видно, что длину волны излучения можно варьировать, меняя либо ток в ондуляторе, либо энергию электронов. Чаще используется первый способ, так как второй гораздо более трудоемкий.

Для перестройки длины волны с помощью перестройки тока ондулятора разработано отдельное приложение, которое работает с несколькими управляющими программами ЛСЭ через протокол Channel Access. Работа данной программы заключается в следующем.

Программа осуществляет пошаговую перестройку тока ондулятора до требуемого значения, параллельно отслеживая ток пучка на поглотителе. В случае если ток упал ниже порогового значения, запускается цикл настройки магнитных элементов из заданного списка для получения максимального тока пучка. Далее продолжается пошаговое изменение тока ондулятора. После достижения требуемого значения тока ондулятора программа получает максимум мощности излучения ЛСЭ, настраивая ток магнита-группирователя. Примерная схема всего алгоритма приведена на рис. 7. Данное приложение существенно упрощает и ускоряет процесс перестройки длины волны излучения ЛСЭ.

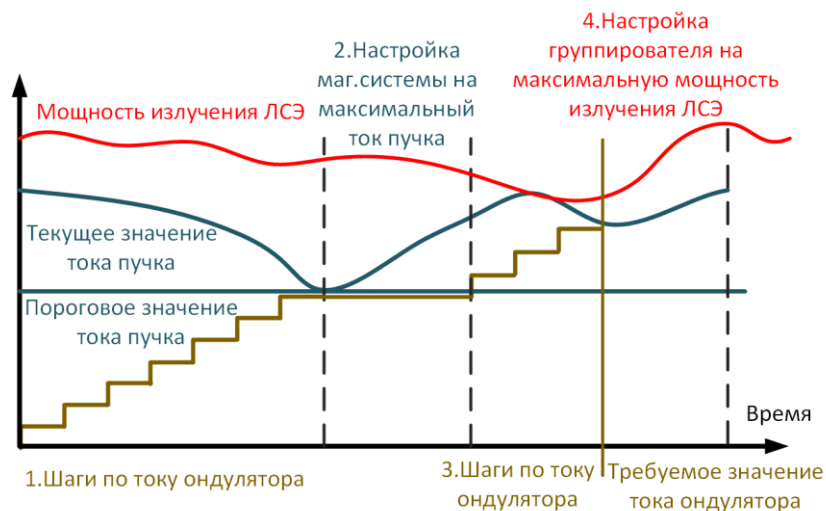


Рис. 7. Алгоритм перестройки длины волны излучения ЛСЭ
Fig. 7. Algorithm of FEL radiation wavelength tuning

Заключение

Разработанная система управления магнитными элементами успешно эксплуатируется в течение ряда лет. За это время в рамках разработанной архитектуры управляющего оборудования и ПО был произведен запуск второй и третьей очередей ЛСЭ. В настоящее время данная система управления построена таким образом, что может менять конфигурацию в соответствии с выбранным режимом работы ЛСЭ.

Возможности данной системы позволяют эффективно управлять режимом циркуляции пучка, задавать нужный режим генерации излучения, а также мониторировать основные параметры работы источников питания и управляющих устройств.

Список литературы / References

1. **Shevchenko O. et al.** The Novosibirsk Free Electron Laser – Unique Source of Terahertz and Infrared Coherent Radiation. *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 13–18.
2. **Vasichev S. S. et al.** High-Power Precision Current Supply is t2-1000 m for Elements of Magnetic Systems of Accelerators and Charged Particle Storage Rings. In: Proceedings of RuPAC. Novosibirsk, 2006.
3. **Kozak V. R., Kuper E. A.** Multifunctional devices for control system of accelerator facilities. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, p. 8–15.
4. **Corrigan S.** Introduction to the Controller Area Network (CAN). URL: <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>
5. **Mamkin V. R., Selivanov P. A.** Can Bus Gateway for Data Acquisition and Control. In: 20th Russian Conference on Charged Particle Accelerators. Contributions to the Proceedings. RuPAC, 2006.
6. **Hill J. O.** EPICS R3.12 Channel Access Reference Manual. URL: https://epics.anl.gov/EpicsDocumentation/AppDevManuals/ChannelAccess/cadoc_1.htm

*Материал поступил в редколлегию
Received
02.03.2020*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Винокуров Николай Александрович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией 8-1 ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Nikolay A. Vinokurov, Corresponding Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, head of laboratory 8-1, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

N.A.Vinokurov@inp.nsk.su

Довженко Борис Алексеевич, ведущий инженер ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Boris A. Dovzhenko, Lead Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

B.A.Dovzhenko@inp.nsk.su

Козак Виктор Романович, доктор технических наук, старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Victor R. Kozak, Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

kozak@inp.nsk.su

Купер Эдуард Адольфович, доктор технических наук, главный научный сотрудник ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Eduard A. Kuper, Doctor of Technical Science, Chief Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

E.A.Kuper@inp.nsk.su

Медведев Лев Эдуардович, ведущий инженер ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Lev E. Medvedev, Lead Engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

L.E.Medvedev@inp.nsk.su

Медведко Анатолий Степанович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Anatoly S. Medvedko, Candidate of Technical Science, Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

A.S.Medvedko@inp.nsk.su

Средняков Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Stanislav S. Serednyakov, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

speredn@inp.nsk.su

Тарарышкин Сергей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Sergey V. Tararyshkin, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

S.V.Tararyshkin@inp.nsk.su

Шевченко Олег Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия)

Oleg A. Shevchenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

O.A.Shevchenko@inp.nsk.su