

Научная статья

УДК (538.945; 621.31)

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-9-18

## Ключ эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов системы питания испытательного стенда ЛФВЭ ОИЯИ

Алексей Васильевич Кудашкин<sup>1</sup>, Виктор Николаевич Карпинский  
Дмитрий Николаевич Никифоров, Михаил Владимирович Петров  
Александр Алексеевич Савельев

Объединенный институт ядерных исследований  
Дубна, Россия

<sup>1</sup>akudashkin@jinr.ru

### Аннотация

В рамках реализации проекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) и FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) изготавливаются и тестируются сверхпроводящие магниты. Структура коллайдера NICA включает в себя 290 сверхпроводящих дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов [1]. Для защиты магнитов от повреждения в момент выхода из сверхпроводящего состояния используется система эвакуации энергии. Проведена необходимая модернизация данной системы с целью расширения диапазона индуктивности тестируемых магнитов до 210 мГн. Разработаны схмотехнические решения электронных блоков управления. Проведено моделирование и успешное тестирование новых модулей электроники. Данные модули введены в эксплуатацию в качестве элементов действующего стенда криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов. В данной статье описан принцип работы систем эвакуации энергии и ее составных узлов, а также результаты работы при испытаниях сверхпроводящих магнитов ускорительных комплексов NICA и FAIR.

### Ключевые слова

NICA, сверхпроводящий магнит, эвакуация энергии

### Для цитирования

Кудашкин А. В., Карпинский В. Н., Никифоров Д. Н., Петров М. В., Савельев А. А. Ключ эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов системы питания испытательного стенда ЛФВЭ ОИЯИ // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 2. С. 9–18. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-9-18

## Energy Evacuation Switch for Superconducting Magnet Power Supply at the VBLHEP JINR Test Bench

Aleksey V. Kudashkin<sup>1</sup>, Viktor N. Karpinsky,  
Dmitry N. Nikiforov, Mikhail V. Petrov  
Alexander A. Saveliev

Joint Institute for Nuclear Research,  
Dubna, Russian Federation

<sup>1</sup>akudashkin@jinr.ru

### Abstract

As part of the NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) and FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Darmstadt, Germany) projects, superconducting magnets are being manufactured and tested at the V. I. Veksler and

© Кудашкин А. В., Карпинский В. Н., Никифоров Д. Н., Петров М. В., Савельев А. А., 2025

A. M. Baldin Laboratory of High Energy Physics (VBLHEP) of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR). The structure of the NICA Collider includes 290 superconducting dipole, quadrupole, and correction magnets [1]. An energy evacuation system is used to protect magnets from damage while exiting the superconducting state. This system underwent necessary upgrade to expand the inductance range of the tested magnets to 210 мГн. Circuit design solutions for electronic control units were developed. Simulation and successful testing of new electronic modules were carried out. These modules were put into operation as elements of the existing cryogenic test bench for superconducting magnets. This paper describes the operating principle of the energy evacuation system and its constituent components, as well as the results of its operation during the testing of superconducting magnets for the NICA and FAIR accelerator complexes.

#### Keywords

NICA, superconducting magnet, energy evacuation

#### For citation

Kudashkin A. V., Karpinsky V. N., Nikiforov D. N., Petrov M. V., Saveliev A. A. Energy Evacuation Switch for Superconducting Magnet Power Supply at the VBLHEP JINR Test Bench. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 2, p. 9–18. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-2-9-18

## Введение

Ускорительный комплекс NICA состоит из коллайдера, находящегося на финальной стадии ввода в эксплуатацию, и инжекционного комплекса ускорителей. Инжекционный комплекс NICA включает в себя источники ионов, линейные ускорители, сверхпроводящие синхротроны «Бустер» и «Нуклотрон», а также линии перевода пучка [2]. «Бустер» введен в эксплуатацию в 2020 г. и успешно прошел четыре рабочих сеанса. Структурные магниты «Бустера» и коллайдера NICA успешно прошли сертификацию в рабочих (криогенных) условиях на испытательном стенде ЛФВЭ ОИЯИ в отделе НЭОСМТ (Научно-экспериментальный отдел сверхпроводящих магнитов и технологий).

Структура коллайдера NICA и синхротрона SIS100 состоит из магнитов типа «нуклотрон» [3]. Рабочий уровень температур при испытаниях сверхпроводящих магнитов около 4,5 К. При переходе обмотки магнита в нормально проводящее состояние происходит выделение большого количества тепловой энергии, что может повлечь за собой разрушение сверхпроводящего кабеля. Во избежание возникновения такого рода аварийной ситуации используется система защиты сверхпроводящих магнитов.

В магнитном поле сверхпроводящей обмотки может быть запасено большое количество энергии. При потере сверхпроводимости на участке обмотки накопленную энергию необходимо вывести из магнита за промежуток времени, при котором не произойдет повреждения обмотки. Чтобы предотвратить аварию при работе со сверхпроводником, рост напряжения фиксируется за время в несколько миллисекунд датчиками перехода сверхпроводимости, после чего сигнал передается на отключение источника тока и систему вывода энергии из испытываемого магнита, основной частью которой является ключ эвакуации энергии (КЭЭ). В составе штатного КЭЭ, используемого для криогенных испытаний магнитов с индуктивностью от 0,1 мГн до 1 мГн, для испытания магнита с индуктивностью 210 мГн увеличено сопротивление гашения энергии с 3,3 мОм до 1,3 Ом и изменен модуль электроники КЭЭ, контролирующей равномерное распределение энергии гашения, а также введены новые модули электроники в качестве модернизации КЭЭ.

## 1. Система защиты сверхпроводящих магнитов

В процессе криогенных испытаний сверхпроводящего магнита проводится этап «тренировки». При этом ток задается импульсно с пошаговым увеличением амплитуды. В процессе «тренировки» может произойти несколько «срывов» сверхпроводимости. В этом случае запасенная в магните энергия выводится с использованием системы эвакуации энергии. После вывода энергии магнит вновь охлаждается до рабочих температур и достижения сверхпроводящего состояния обмотки. Данная процедура производится до тех пор, пока ток возбужде-

ния обмотки не достигнет проектных значений для данного типа магнитов. Основной целью «тренировки» магнита является снятие внутренних напряжений обмотки, возникающих при ее производстве, вследствие чего при подаче тока и возникновении пондеромоторных сил происходят локальные деформации участков обмотки, приводящие к нарушению сверхпроводимости.

Основным источником тока питания при испытаниях сверхпроводящих магнитов является источник емкостного типа PS15000-25D. Последовательно с источником питания включен ключ эвакуации энергии (КЭЭ) (рис. 1), в котором при поступлении сигнала о нарушении сверхпроводимости (эвакуация энергии) энергия испытываемого магнита гасится на резисторах [4]. Сверхпроводящий магнит схематически разделен на две полуобмотки  $L1$  и  $L2$ .

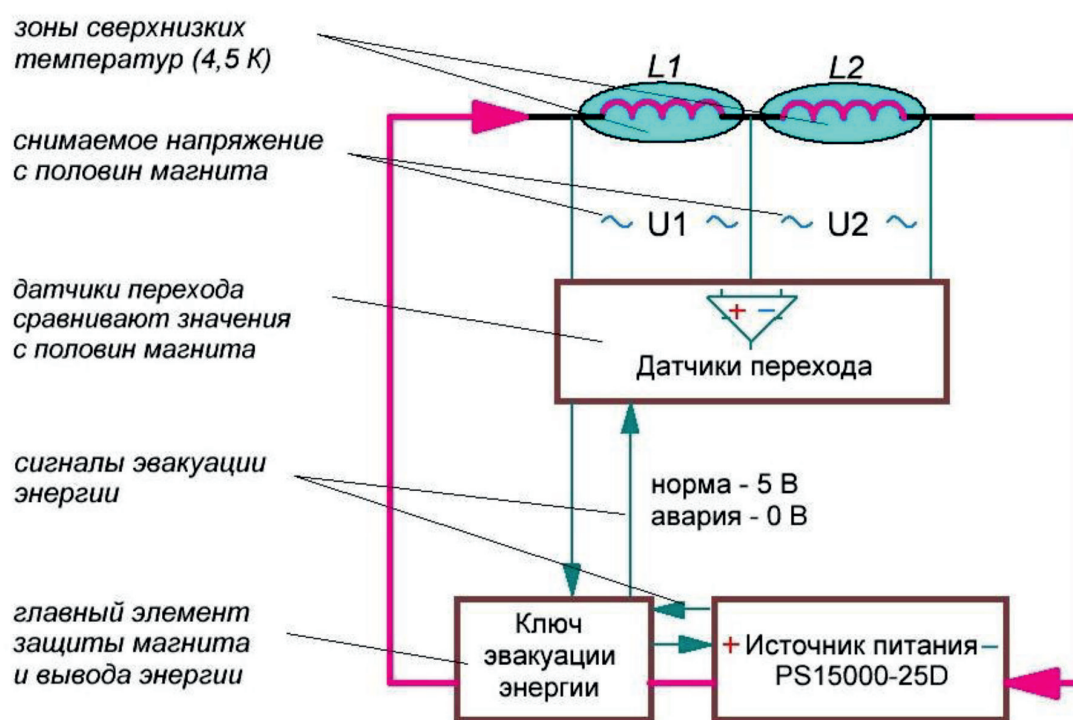


Рис. 1. Общая схема транспортировки сигнала эвакуации энергии  
Fig. 1. General circuit diagram for energy evacuation signal transmission

При протекании тока через магнит с полуобмоток  $L1$  и  $L2$  снимается напряжение  $U1$  и  $U2$  соответственно. При достижении критического значения тока сверхпроводимость участка обмотки нарушается и на данном участке начинает расти активное сопротивление. На участке сверхпроводника с появившимся сопротивлением начнет резко расти напряжение и датчики перехода зафиксируют разницу между напряжениями половин обмотки  $U1$  и  $U2$  [5]. При достижении установленного значения разницы напряжений ( $\approx 50$  мВ) датчики формируют сигнал эвакуации энергии, идущий на ключ эвакуации энергии и одновременно на источник питания, отключая подачу тока и переводя источник в инверторный режим.

## 2. Принцип работы ключа эвакуации энергии

Для решения задачи вывода энергии из сверхпроводящего магнита требовалось разработать устройство, способное вывести ток до 15 000 А из магнита за время, не превышающее 0,5 секунды [6]. Рассматривались механические выключатели, однако они имеют ограничен-

ное количество срабатываний. Поэтому был разработан тиристорный ключ, прототипом которого стал ключ эвакуации энергии, используемый на ускорителе «Нуклотрон» с рабочим током 6 000 А.

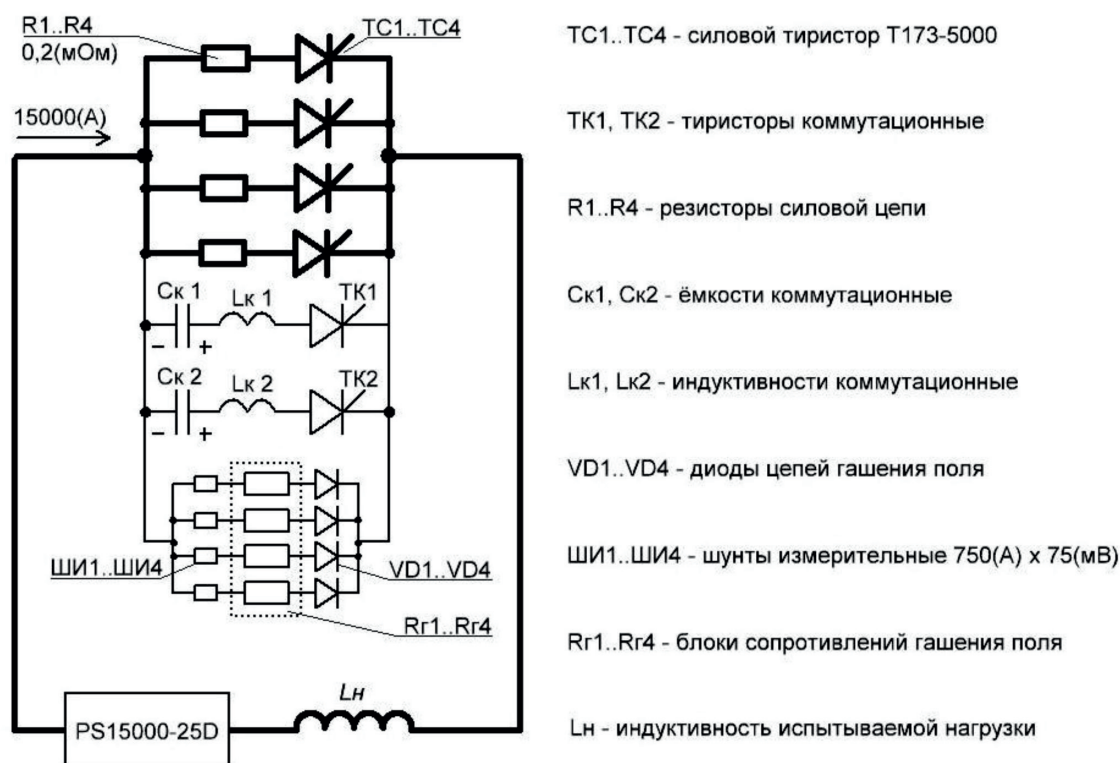


Рис. 2. Схема силовых элементов КЭЭ

Fig. 2. Circuit diagram of the power elements of energy evacuation switch

На рис. 2 изображен действующий КЭЭ испытательного стенда сверхпроводящих магнитов. Через силовые тиристоры в рабочем режиме протекает ток питания магнита. Каждый из силовых тириستоров способен пропускать 5 000 А постоянного тока при достаточном охлаждении. При теоретическом несрабатывании одного из четырех параллельно включенных силовых тиристоров максимальный рабочий ток (15 000 А) будет распределен по оставшимся трем тиристорам [7]. Также используются две ветки с коммутационными тиристорами, каждая из которых способна вывести ток из силовой цепи.

При получении сигнала эвакуации энергии в КЭЭ формируется управляющий сигнал открытия тиристоров TK1 и TK2, в результате ток начинает протекать по цепям Cк-Lк-TK. Емкости Cк1 и Cк2 предварительно заряжены до напряжения 260 В. Потенциал емкостей Cк за время коммутации  $t_k$  (см. формулу (1)) выведет весь ток из силовой цепи тиристоров TC1–TC4. При отсутствии тока через силовые тиристоры через 100 мкс они закрываются. По истечении времени разряда емкостей ток по цепям Cк-Lк-TK также прекратится. После разряда Cк1 и Cк2 весь ток будет протекать по цепи гашения энергии через резисторы Rг1–Rг4. Вся накопленная энергия магнита будет рассеиваться на данных резисторах гашения. Чем больше номинал этого сопротивления, тем быстрее рассеется энергия, накопленная в магните. Также при увеличении сопротивления гашения КЭЭ увеличится и напряжение на Rг. Во избежание пробоя в электронике КЭЭ или изоляции сверхпроводника номинал Rг подбирается таким образом, чтобы потенциал на нем не превышал 1 000 В.

Емкость  $C_K$  (см. формулу (1)) подбирается так, чтобы время отрицательного напряжения  $t_{он}$ , приложенного к силовым тиристорам, не менее чем в 2 раза, превышало время закрытия силовых тиристоров (100 мкс). Если силовые тиристоры не будут закрыты в результате срыва сверхпроводимости, то силовой ток не пойдет через сопротивление гашения энергии, а продолжит протекать по силовой цепи, что приведет к длительному циркулированию тока через магнит и повреждению сверхпроводника:

$$t_{он} = \frac{C_K \cdot U(t_k)}{I_0}, \quad (1)$$

где,  $U(t_k)$  – напряжение в момент обесточивания силовых тиристоров TC1–TC4;  $I_0$  – ток в начальный момент времени эвакуационного процесса.

Более правильным является расчет времени отрицательного напряжения с момента  $t_k$  при нулевом значении тока, протекающего через силовые тиристоры. Время отрицательного напряжения на конденсаторных батареях номиналом 15 мФ составит около 230 мкс, что более чем в 2 раза дольше, чем время закрытия силовых тиристоров TC1–TC4.

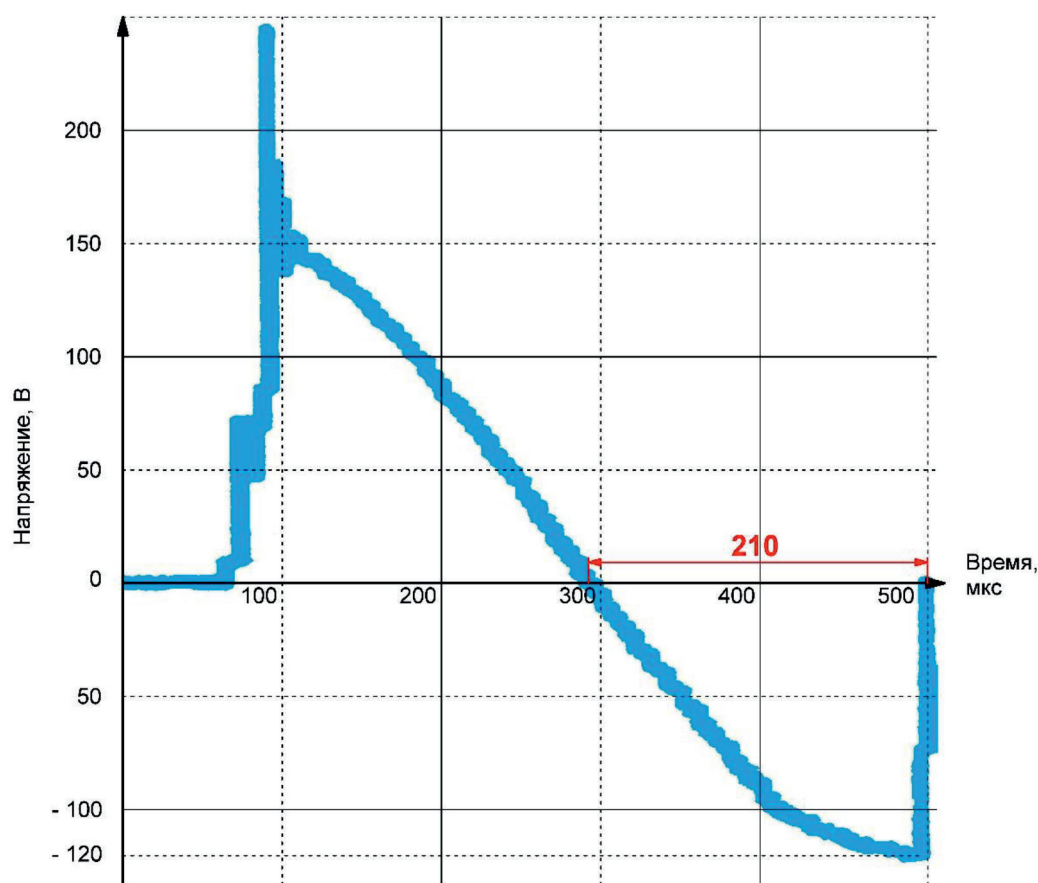


Рис. 3. Вывод тока из силовой цепи тиристоров в процессе эвакуации энергии

Fig. 3. Current output from the thyristor power circuit during energy evacuation

На используемом стенде системы защиты было измерено падение напряжения (рис. 3) на участке цепи R1–R4 и TC1–TC4, изображенном на рис. 2. При эвакуации энергии конденсаторы  $C_K$  в начальный момент времени имеют напряжение  $\approx 250$  В. При разрядке конденсаторов

ток выводится из силовых тиристоров TC1–TC4 за время  $\approx 220$  мкс. Также на осциллограмме видно, что приложенное отрицательное запирающее напряжение к тиристорам составляет 210 мкс, что не сильно отличается от расчетной величины в 230 мкс. При проектном значении времени закрытия тиристоров отрицательное напряжение должно быть приложено с длительностью 100 мкс. Данная осциллограмма подтверждает, что выдерживается двойной запас надежности по времени закрытия силовых тиристоров КЭЭ.

### 3. Система электроники ключа эвакуации энергии

Для управления силовыми полупроводниковыми элементами КЭЭ используются модули электроники (рис. 4).

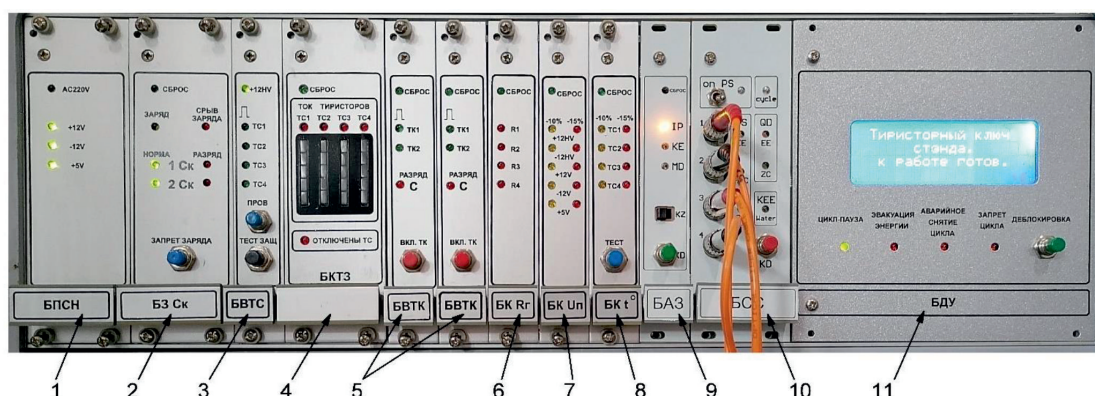


Рис. 4. Крейт электроники ключа эвакуации энергии: 1 – блок питания собственных нужд (БПСН); 2 – блок заряда конденсаторных батарей (БЗСк); 3 – блок включения силовых тиристоров (БВТС); 4 – блок контроля токовой загрузки (БКТЗ); 5 – блоки включения коммутационных тиристоров (БВТК); 6 – блок контроля резисторов гашения (БКРг); 7 – блок контроля напряжения питания (БКУп); 8 – блок контроля температуры тиристоров (БКт); 9 – блок анализа защит (БАЗ); 10 – блок согласования сигналов (БСС); 11 – блок диагностики управления (БДУ)

Fig. 4. Electronics crate for the energy evacuation switch: 1 – electronic crate power supply (ECPS), 2 – capacitor bank charging unit (CBCU), 3 – power thyristor switching unit (PTSU), 4 – current value control unit (CVCU), 5 – commutation thyristor switching units (CTSU), 6 – damping resistor control unit (DRCU), 7 – power-supply voltage control unit (PSVCU), 8 – thyristor temperature control unit (TTCU), 9 – quench analysis unit (QAU), 10 – signal matching unit (SMU), 11 – control diagnostics unit (CDU)

Питание крейта электроники осуществляет модуль БПСН (рис. 4, поз. 1). Модуль БЗСк (рис. 4, поз. 2) заряжает коммутационные конденсаторы С<sub>к</sub> (см. рис. 2) до напряжения 260–280 В. Модуль БВТС (рис. 4, поз. 3) формирует импульсы открытия тиристоров TC1–TC4 (см. рис. 2). При токе около 350 А (если используется R<sub>г</sub> около 6 мОм) открывается один из силовых тиристоров, а при токе около 800 А импульсы посылаются на оставшиеся три тиристора. Такая последовательность необходима для достаточного тока удержания тиристоров. Измеряя падение напряжения на резисторах R1–R4 (см. рис. 2), модуль БКТЗ (рис. 4, поз. 4) контролирует равномерность распределения тока между тиристорами TC1–TC4. Модули включения коммутационных тиристоров БВТК (рис. 4, поз. 5) по приходу сигнала эвакуации энергии формируют импульсы включения на тиристоры ТК1 и ТК2 (см. рис. 2). Для контроля токового распределения между резисторами гашения энергии R<sub>г1</sub>–R<sub>г4</sub> (см. рис. 2) используется модуль БКРг (рис. 4, поз. 6). Важно, чтобы система защиты смогла передать ошибку для прекращения цикла тока, даже если электропитание КЭЭ отключится по какой-либо причине. Эту функцию, а также любые просадки напряжения питания крейта электроники контролирует модуль БКУп (рис. 4, поз. 7). Все тиристоры и измерительные резисторы имеют водяное охлаждение,

характеристики полупроводников имеют зависимость от рабочей температуры, поэтому контролируются модулем БКТ (рис. 4, поз. 8). Модуль БАЗ (рис. 4, поз. 9) определяет источник сигнала эвакуации энергии, приходящего не только по причине выхода обмотки из состояния сверхпроводимости, но и по внутренним ошибкам источника питания или КЭЭ. Разница по времени прихода сигналов эвакуации энергии составляет доли микросекунд, поэтому используется программируемый логический элемент Altera со скоростью 5 нс на элемент цепи программируемой среды. Для взаимодействия и обмена данными КЭЭ с источником питания используется модуль БСС (рис. 4, поз. 10). Модуль БДУ (рис. 4, поз. 11) анализирует все внутренние ошибки КЭЭ и, кроме эвакуации энергии, может также выдавать ошибку второго или третьего приоритета без вывода энергии из системы.

#### 4. Результаты и измерения

По проекту NICA, КЭЭ использовался для испытаний магнитов индуктивностью до 1 мГн, однако в процессе эксплуатации появилась необходимость использования КЭЭ для магнитов с большим значением индуктивности обмотки. В результате внесенных изменений удалось испытать серию из восьми магнитов сведения-разведения пучков коллайдера с обмотками индуктивностью до 210 мГн и током питания до 600 А. Для проведения данных испытаний было изменено сопротивление гашения КЭЭ с 3,3 мОм до 1,3 Ом. Полное время вывода тока до нуля составляет 590 мс (рис. 5). Температура на выходе из сверхпроводящей обмотки во время эвакуации энергии составила 70–75 К, что допустимо для сверхпроводящих обмоток из NbTi. Безопасное время вывода энергии  $3\tau$  ( $\tau$  – постоянная времени спада)  $\approx 480$  мс и должно составлять менее 0,5 секунды, так как при дальнейшем увеличении температур на выходе из обмотки сверхпроводник может получить повреждения.

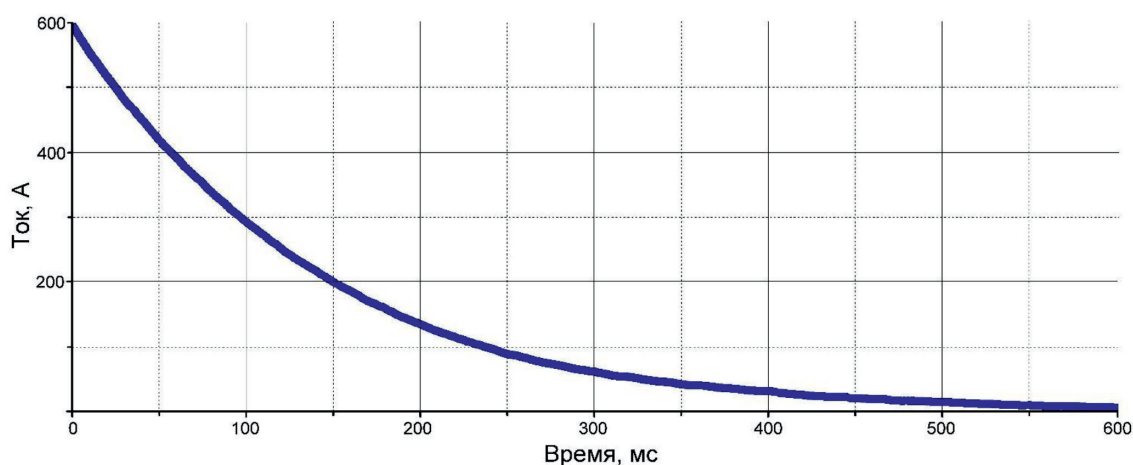


Рис. 5. Вывод энергии из сверхпроводящего магнита «BV-1»

Fig. 5. Energy extraction from the Superconducting Magnet BV-1

В ОИЯИ испытываются сверхпроводящие магниты ускорителя SIS100 проекта FAIR нескольких типов. Магниты, состоящие только из основной обмотки, испытываются источником PS15000-25D и КЭЭ. Если кроме основной обмотки есть еще одна или две обмотки корректирующих магнитов, то используются дополнительные источники питания. Цикл тока сверхпроводящего магнита с одной корректирующей обмоткой показан на рис. 6. Для корректирующей обмотки использовался источник PS350-150D. Как видно из красного графика, максимальный рабочий ток составляет 250 А, однако в режиме «тренировки» обмотки ток достигает до 300 А.

Максимальный ток рабочего режима основной обмотки составляет 7 700 А, а ток «тренировки» – 12 600 А.

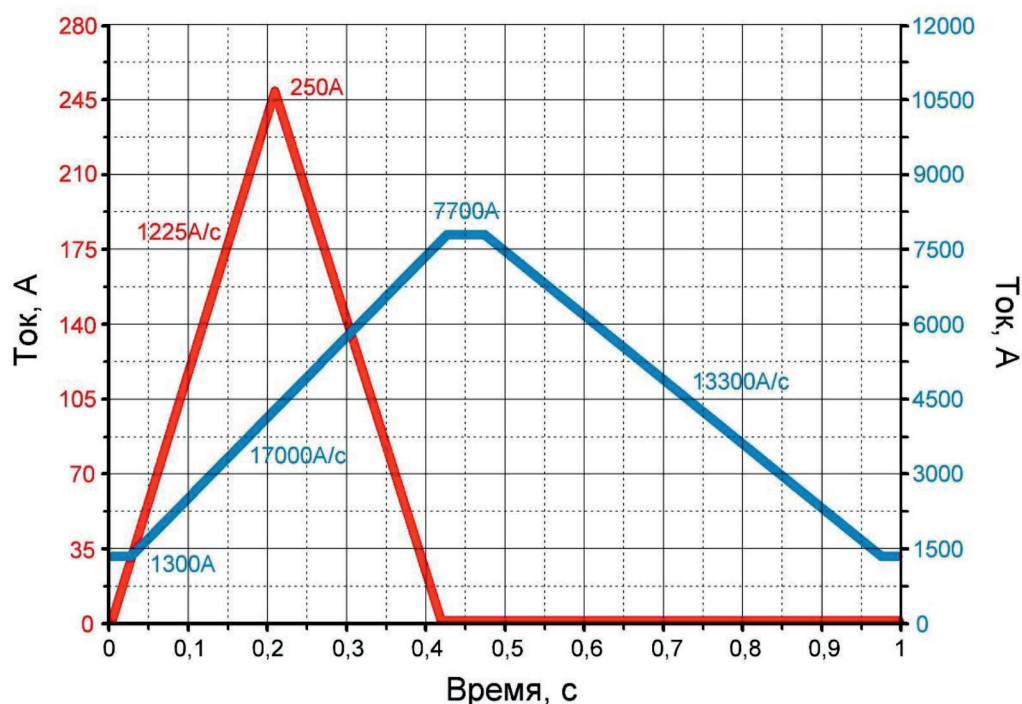


Рис. 6. Рабочий цикл сверхпроводящего магнита ускорителя SIS100 проекта FAIR  
Fig. 6. Operating cycle of the superconducting magnet for the SIS100 accelerator of the FAIR project

### Заключение

Для проведения испытаний сверхпроводящих магнитов сведения-разведения коллайдера NICA был модернизирован ключ эвакуации энергии для работы с более высокими индуктивностями обмоток магнитов. Результаты измерений показали стабильную работу КЭЭ со сверхпроводящими магнитами индуктивностью до 210 мГн. Сопротивление гашения  $R_g$  может регулироваться от 3,3 мОм до 1,3 Ом в зависимости от испытываемой нагрузки.

Для ключа эвакуации энергии были модернизированы ранее используемые модули электроники, а также спроектированы и интегрированы новые модули электроники (см. рис. 4, поз. 6, 9, 10). Система электроники управления КЭЭ новой конфигурации показала свою надежную работу при проведении токовых испытаний в процессе производства сверхпроводящих магнитов проектов NICA и FAIR.

Все магниты по проекту NICA успешно прошли испытания. По проекту FAIR (Дармштадт) сверхпроводящие магниты ускорителя SIS100 запущены в серию, испытано более 20 магнитов. Спроектированный КЭЭ показал свою надежную работу при проведении более 500 криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов.

### Список литературы

1. Kekelidze V. et al. Project NICA at JINR // Nuclear Physics A. 2013. Vol. 904–905. P. 945–948.

2. **Khodzhbagiyani H. G. et al.** Production and Test Status of the Superconducting Magnets for the NICA project and the SIS100 Synchrotron // *Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29. No. 5. DOI:10.1109/TASC.2019.2901591
3. **Карпинский В. Н. и др.** Развитие системы питания Нуклотрона // *Письма в ЭЧАЯ*. 2010. Т. 7, № 7 (163). С. 835–842.
4. **Dahlerup-Petersen K. et al.** The protection system for the superconducting elements of the Large Hadron Collider at CERN // *Proceedings of PAC*. 1999. Vol. 5, DOI:10.1109/PAC.1999.792249
5. **Иванов Е. В., Трубников Г. В., Сидорин А. О., Смирнова З. И.** Система детектирования перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса Нуклотрон // *Письма в ЭЧАЯ*. 2013. Т. 10, № 4 (181). С. 603–612.
6. **Kudashkin A., Karpinsky V., Khodzhbagiyani H., Sidorin A.** Power Supply and Protection System of the Nuclotron Booster in the NICA Project // *Proceedings of RuPAC-2010*. 2010. P. 83–85.
7. **Kudashkin A. V. et al.** 15 kA Energy-Evacuation Switch for Test Bench of Superconducting Magnets // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2016. Vol. 13, № 7. P. 862–866.

### References

1. **Kekelidze V. et al.** Project NICA at JINR. *Nuclear Physics A*, 2013, vol. 904–905, pp. 945–948.
2. **Khodzhbagiyani H. G. et al.** Production and Test Status of the Superconducting Magnets for the NICA project and the SIS100 Synchrotron. *Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, doi:10.1109/TASC.2019.2901591
3. **Karpinsky V. et al.** Development of the Nuclotron Power Supply System. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2010, vol. 7, no. 7 (163), pp. 835–842. (in Russ.)
4. **Dahlerup-Petersen K. et al.** The protection system for the superconducting elements of the Large Hadron Collider at CERN. *Proceedings of PAC*, 1999, vol. 5, doi:10.1109/PAC.1999.792249
5. **Ivanov E., Trubnikov G., Sidorin A., Smirnova Z.** Detection System for Transition to the Normal-Conducting Phase of Superconducting Magnets of the Nuclotron Accelerator Complex. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2013, vol. 10, no. 4 (181), pp. 603–612. (in Russ.)
6. **Kudashkin A., Karpinsky V., Khodzhbagiyani H., Sidorin A.** Power Supply and Protection System of the Nuclotron Booster in the NICA Project. *Proceedings of RuPAC-2010*, 2010, pp. 83–85.
7. **Kudashkin A. V. et al.** 15 kA Energy-Evacuation Switch for Test Bench of Superconducting Magnets. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2016, vol. 13, no. 7, pp. 862–866.

### Сведения об авторах

**Алексей Васильевич Кудашкин**, инженер-электроник 2-й категории

**Виктор Николаевич Карпинский**, начальник отдела

**Дмитрий Николаевич Никифоров**, начальник отдела

**Михаил Владимирович Петров**, начальник группы

**Александр Алексеевич Савельев**, электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования

### Information about the Authors

**Aleksey V. Kudashkin**, Electronics Engineer (2nd category)

**Viktor N. Karpinsky**, Head of Department

**Dmitry N. Nikiforov**, Head of Department

**Mikhail V. Petrov**, Head of Group

**Alexander A. Saveliev**, Electrician for Repair and Maintenance of Electrical Equipment

*Статья поступила в редакцию 11.03.2025;  
одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 12.05.2025*

*The article was submitted 11.03.2025;  
approved after reviewing 20.03.2025; accepted for publication 12.05.2025*