

Научная статья

УДК 621.314

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-26-35

Система вывода энергии из сверхпроводящего соленоида с током 5100 А и запасенной энергией 22 МДж

Александр Иванович Ерохин¹, Артём Андреевич Кремнев²,
Виталий Аркадьевич Шкаруба³, Евгений Эдуардович Пята⁴,
Александр Витальевич Булатов⁵, Татьяна Васильевна Бедарева⁶

¹⁻⁶Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹A.I.Erokhin@inp.nsk.su

²A.A.Kremnev@inp.nsk.su

³V.A.Shkaruba@inp.nsk.su

⁴E.E.Pyata@inp.nsk.su

⁵A.V.Bulatov@inp.nsk.su

⁶T.V.Bedareva@inp.nsk.su

Аннотация

На строящемся ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия) одним из ключевых является эксперимент PANDA. Основное поле спектрометра детектора PANDA обеспечивается сверхпроводящим соленоидом. Энергия магнитного поля, запасенная в сверхпроводящем соленоиде, достигает 22 МДж при рабочем токе 5100 А. В случае перехода сверхпроводящего кабеля, из которого состоит обмотка соленоида, в резистивное состояние для защиты магнита требуется безопасный вывод запасенной энергии. Предложенная авторами система обеспечивает своевременный вывод и диссипацию энергии во внешнем балластном резисторе, а не только на участке сверхпроводящего кабеля, перешедшего в резистивное состояние, предотвращая при этом его повреждение. Наиболее ответственными элементами системы вывода энергии являются размыкатель тока, с помощью которого в цепь питания сверхпроводящего соленоида вводится балластный резистор, и сам балластный резистор. В качестве размыкателя тока выбран модернизированный трехфазный автоматический выключатель. Разработана уникальная конструкция системы вывода энергии и балластного резистора с низкой паразитной индуктивностью.

Ключевые слова

сверхпроводящий соленоид, запасенная энергия магнитного поля, резистивное состояние сверхпроводящего кабеля, система вывода энергии, балластный резистор, размыкатель тока

Для цитирования

Ерохин А. И., Кремнев А. А., Шкаруба В. А., Пята Е. Э., Булатов А. В., Бедарева Т. В. Система вывода энергии из сверхпроводящего соленоида с током 5100 А и запасенной энергией 22 мДж // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 26–35. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-26-35

© Ерохин А. И., Кремнев А. А., Шкаруба В. А., Пята Е. Э., Булатов А. В., Бедарева Т. В., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2

Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2

Energy Extraction System for the Superconductive Solenoid with Current 5100 A and Stored Energy 22 MJ

Alexandr I. Erokhin¹, Artem A. Kremnev², Vitaly A. Shkaruba³,
Eugeny E. Pyata⁴, Alexandr V. Bulatov⁵, Tatyana V. Bedareva⁶

¹⁻⁶Budker Institute of Nuclear Physics
Of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science
Novosibirsk, Russian Federation

¹A.I.Erokhin@inp.nsk.su

²A.A.Kremnev@inp.nsk.su

³V.A.Shkaruba@inp.nsk.su

⁴E.E.Pyata@inp.nsk.su

⁵A.V.Bulatov@inp.nsk.su

⁶T.V.Bedareva@inp.nsk.su

Abstract

At the FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Darmstadt, Germany) accelerator complex under construction, one of the key experiments is the PANDA experiment. The main field of the PANDA spectrometer is provided by a superconducting solenoid. The energy of the magnetic field stored in a superconducting solenoid reaches 22 MJ at an operating current of 5100 A. In the case of the transition of the superconducting cable used for the solenoid winding into a resistive state, the safe extraction of stored energy is required to protect the magnet. The energy extraction system proposed by the authors provides energy dissipation inside the external dump resistor, and not in the section of the superconducting cable that has passed into resistive state, while preventing its damage. The most critical elements of the energy extraction system are the current breaker, with the help of which the dump resistor is introduced into the power circuit of the superconducting solenoid, and the dump resistor itself. A modernized three-phase circuit breaker was chosen as current breaker. A unique design of the energy extraction system including dump resistor with a low parasitic inductance has been developed.

Keywords

superconducting solenoid, stored magnetic field energy, resistive state of superconducting cable, energy extraction system, dump resistor, current breaker

For citation

Erokhin A. I., Kremnev A. A., Shkaruba V. A., Pyata E. E., Bulatov A. V., Bedareva T. V. Energy extraction system for the superconductive solenoid with current 5100 A and stored energy 22 MJ. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 26–35 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-26-35

Введение

Сверхпроводящий соленоид (далее – магнит) детектора PANDA питается от источника тока 5100А [1]. Общая блок-схема питания магнита представлена на рис. 1. В случае срыва сверхпроводимости (перехода участка сверхпроводника в резистивное состояние) детектором срыва сверхпроводимости генерируется сигнал «Квенч» (quench – срыв сверхпроводимости), при возникновении которого размыкатели тока системы вывода энергии переходят в состояние «разомкнуто», вводя в цепь питания внешний балластный резистор. Таким образом, большая часть запасённой энергии магнитного поля выделится в балластном резисторе. Здесь крайне важна надёжность и скорость размыкания системы.

Основные требования к системе вывода энергии:

- номинальный ток в цепи 5100 А;
- количество запасённой энергии при выводе из магнита – 22 МДж;
- величина балластного резистора для вывода энергии – 0,1 Ом;
- перегрев активных элементов резистора не должен превышать 60 °С;
- средняя точка балластного резистора должна быть заземлена для минимизации величины напряжения на обмотках магнита относительно земли при выводе энергии;

- паразитная индуктивность балластного резистора должна быть минимальна. Резистор должен быть установлен в непосредственной близости от размыкателя тока;
- минимально возможное падение напряжения на системе, что необходимо для минимизации тепловых потерь;
- время размыкания цепи должно быть не более 20 мс;
- надежность срабатывания системы при внештатных ситуациях;
- резервирование системы.

Несмотря на то что выходное напряжение источника тока ограничено 10 В, при выводе энергии максимальное напряжение на обмотках магнита может достигать 510 В (при токе 5100 А и сопротивлении балластного резистора 0,1 Ом). Для минимизации этого напряжения средняя точка балластного резистора должна быть заземлена, тогда максимальное напряжение на обмотке магнита относительно земли не превысит 255 В, что является безопасным для изоляции сверхпроводящей обмотки и кабелей цепи питания.

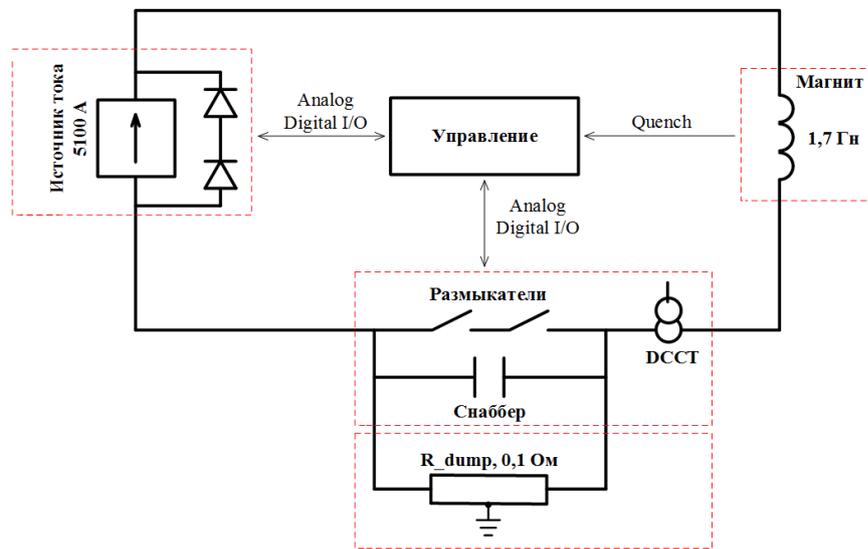


Рис. 1. Общая блок-схема питания магнита

Fig. 1. Magnet's general powering diagram

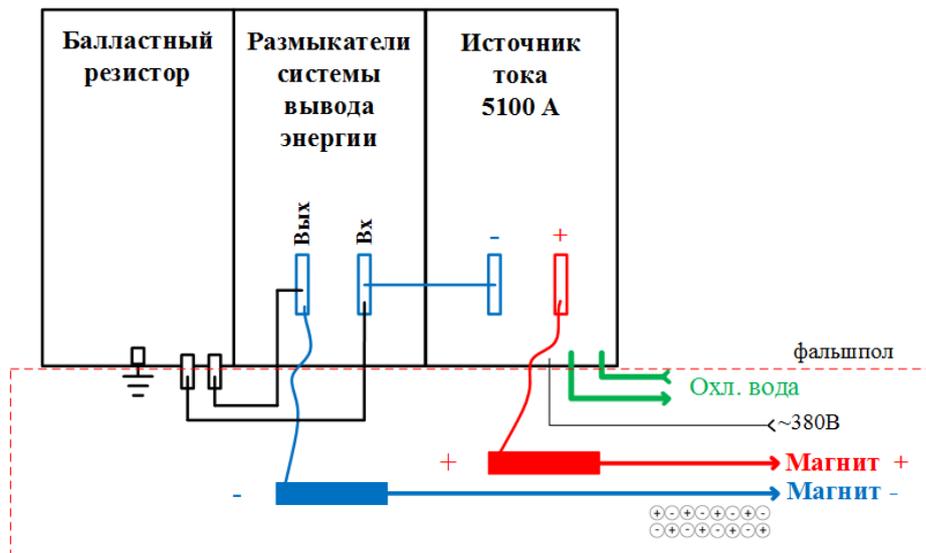


Рис. 2. Коммутация элементов цепи питания магнита

Fig. 2. Commutation of the magnet powering circuit's elements

Радиотехнические стойки с размыкателями системы вывода энергии, балластным резистором и источником тока, а также их коммутация, показаны на рис. 2. Для минимизации электромагнитных наводок от кабельных трасс между источником тока, системой вывода энергии и нагрузкой кабели проложены так, что они образуют систему квадруполей $\begin{matrix} + & - \\ - & + \end{matrix}$, как показано на рис. 2.

Общий вид и элементы системы вывода энергии

Система вывода энергии состоит из двух электромеханических размыкателей тока, балластного резистора сопротивлением 0,1 Ом и снабберных конденсаторов (рис. 3).

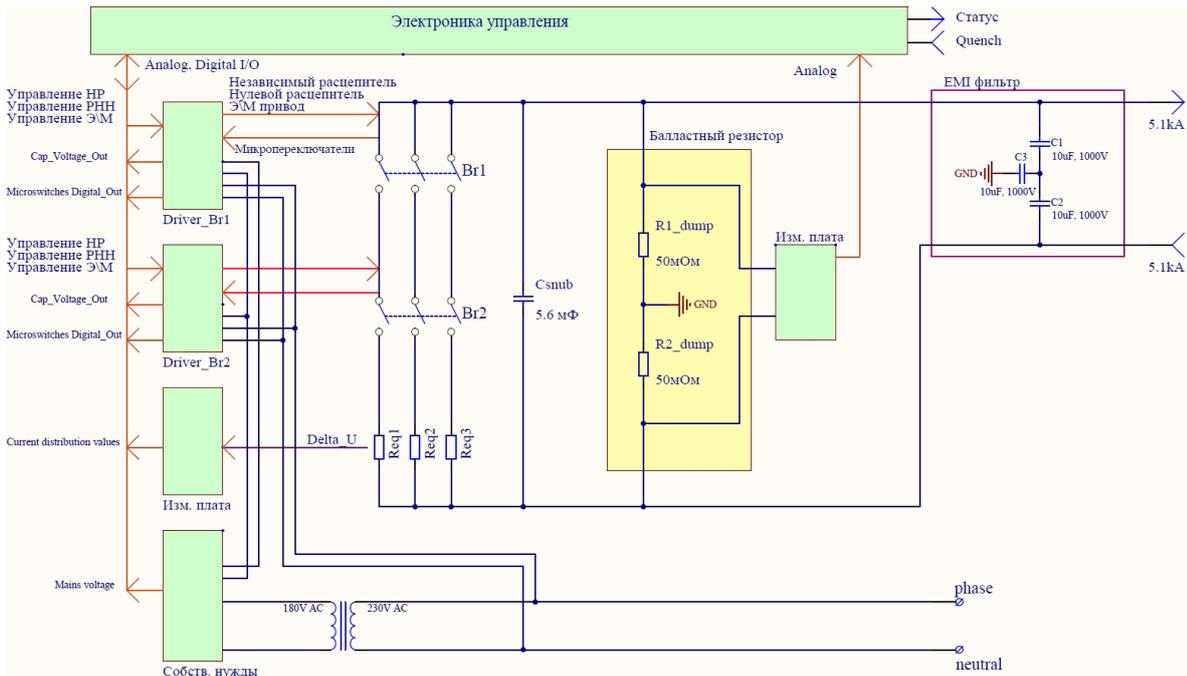


Рис. 3. Блок-схема и элементы системы вывода энергии
Fig. 3. General diagram and elements of the energy extraction system

Два размыкателя тока Br1 и Br2 устанавливаются для надежного срабатывания системы вывода энергии, обеспечивая резервирование системы. Снабберный конденсатор предназначен для предотвращения возникновения электрической дуги между контактами размыкателя тока в момент их размыкания. Электрические платы Driver_Br1 and Driver_Br2 формируют сигналы для внутренних активных устройств размыкателей.

Три фазы размыкателей, каждая из которых рассчитана на ток до 2000 А, соединены параллельно. Такое соединение позволяет коммутировать ток до 5400 А. Для симметричного распределения фазных токов размыкателя установлены разравнивающие резисторы R_{eq} сопротивлением 20 мкОм, которые вносят дополнительное сопротивление в каждую фазу, что уменьшает общий дисбаланс токов в случае разброса сопротивлений контактных групп размыкателя. Для контроля фазных токов, а также падения напряжения на системе вывода энергии, установлена плата аналоговых измерений.

Размыкатели тока

В качестве электромеханического размыкателя тока выбран коммерчески доступный трехфазный автоматический выключатель ВА55-43 производства КЕАЗ (Курский электроаппарат-



Рис. 4. Автоматический выключатель ВА55-43

Fig. 4. Automatic circuit breaker VA55-43

ный завод, РФ) с дополнительной модернизацией. Выключатель (рис. 4.) рассчитан на фазные токи до 2000 А.

Автоматические выключатели ВА55-43 содержат следующие управляющие устройства:

- электромагнитный привод, питающийся переменным напряжением 220 В, который переводит автоматический выключатель в состояния «замкнуто» и «разомкнуто»;

- расцепитель нулевого напряжения (РНН), питающийся постоянным напряжением 220 В. В активном состоянии, т. е. когда через обмотки РНН течет ток, РНН позволяет перевести автоматический выключатель в положение «замкнуто». В неактивном состоянии, т. е. когда ток через обмотки не течет, РНН не позволяет замкнуть выключатель. Если же выключатель находится в состоянии «замкнуто», то деактивация РНН приводит к размыканию выключателя. Таким образом, РНН обеспечивает пассивную безопасность, т. е. в случае потери контакта,

обрыва кабеля или пропажи электропитания РНН приводит к размыканию автоматического выключателя;

- независимый расцепитель (НР). В нормальном состоянии должен быть неактивным. При сигнале «разомкнуть» выключатель на НР подается импульс постоянного напряжения длительностью 5 мс, что приводит к размыканию выключателя;

- микропереключатели, показывающие статус выключателя «замкнуто» или «разомкнуто».

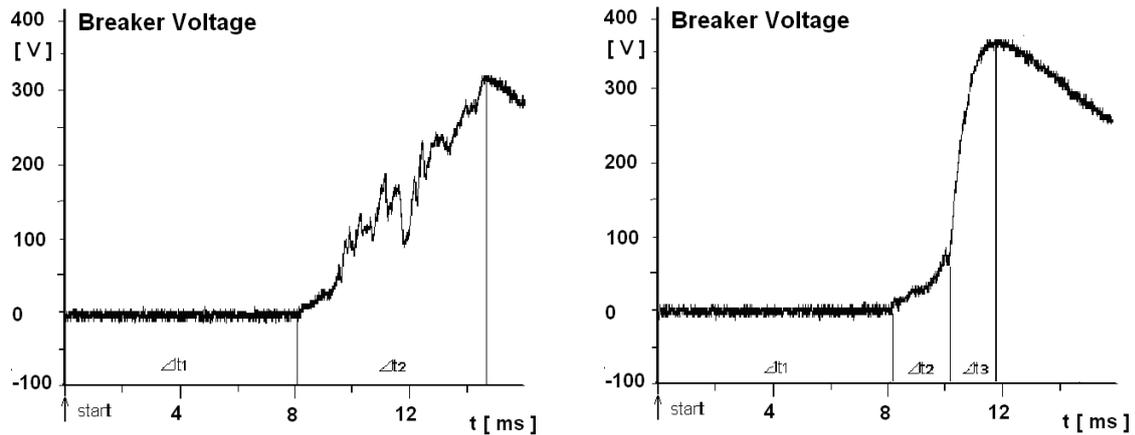
Предложенная модернизация позволяет одновременное использование расцепителей РНН и НР, что позволяет повысить надежность размыкания выключателя. Последовательное включение двух автоматических выключателей, каждый из которых имеет три различных способа расцепления, позволяет нам гарантировать надежное размыкание выключателей и безопасный вывод энергии из магнита при внештатных ситуациях.

Предыдущие НИОКР, выполненные в ИЯФ, а также двадцатилетний опыт использования подобных автоматических выключателей на меньшие токи в качестве размыкателя тока систем вывода энергии из сверхпроводящих магнитов Большого адронного коллайдера (БАК) показал их исключительную надежность [2; 3].

Снабберные конденсаторы

Для предотвращения возникновения электрической дуги между контактами выключателя в момент размыкания под полным током индуктивной нагрузки установлены снабберные конденсаторы C_{snub} (см. рис. 3). На рис. 5. показан пример результата применения снабберного конденсатора параллельно выключателю, где a – результат размыкания без снаббера, b – со снаббером. Здесь Δt_1 – механическая задержка срабатывания выключателя, Δt_2 – время горения дуги, Δt_3 – зарядка конденсатора до полного напряжения.

Из рисунков видно, что применение снаббера существенно уменьшает время горения дуги, следовательно, и время размыкания выключателя. Помимо уменьшения времени размыкания, применение снаббера предотвращает деградацию поверхностей контактов выключателя, – энергия, выделяемая во время горения дуги, прямо пропорциональна площади, заметаемой графиком за время Δt_2 . Наличие небольшой дуги при применении снаббера обусловлено небольшой паразитной индуктивностью монтажа, набегающей между размыкателем и снаббером. Теоретически ее можно уменьшить до нуля при нулевой индуктивности монтажа, но в данном конкретном случае величина дуги и время ее горения незначительны, как для системы в целом, так и для контактов автоматического выключателя.



а) напряжение между контактами при $C_{snab} = 0$
 а) contacts voltage with $C_{snab} = 0$

б) напряжение между контактами при $C_{snab} = 0,8 \text{ мФ}$
 б) contacts voltage with $C_{snab} = 0,8 \text{ мФ}$

Рис. 5. Пример результатов использования снаббера
 Fig. 5. Use of snubber results

3D-модель стойки с выключателями ВА55-43, снаббером и разравнивающими сопротивлениями приведена на рис. 6. Из-за конструктивных особенностей в эту же стойку установлен датчик тока DCCT.

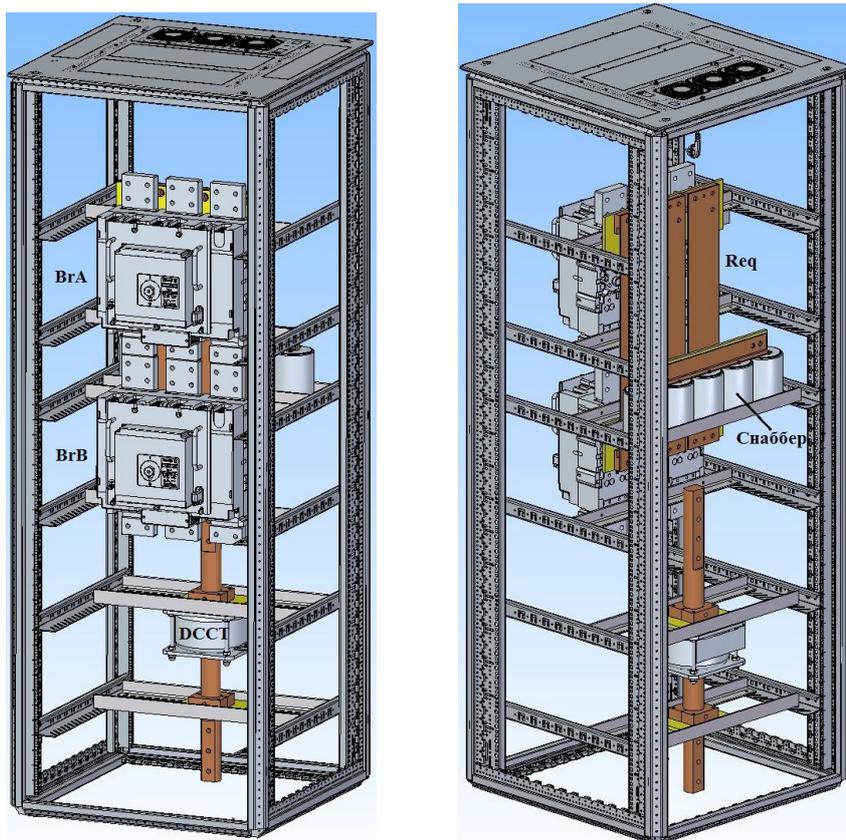


Рис. 6. 3D-модель стойки с основными элементами системы вывода энергии
 Fig. 6. 3D model with the general components of the energy extraction system's rack

Балластный резистор

Балластный резистор необходим для диссипации энергии, запасённой в сверхпроводящем магните, в случае срыва сверхпроводимости. Для минимизации переходных процессов при размыкании автоматических выключателей балластный резистор, а также коммутирующие шины между балластным резистором и выключателями должны иметь низкую паразитную индуктивность. Сопротивление балластного резистора выбирается из компромисса между скоростью вывода энергии, где постоянная времени вывода определяется как L/R , и максимальным напряжением, приложенным к обмотке магнита при выводе энергии, $-RI$.

3D-модель балластного резистора представлена на рис. 7, изображение изготовленного изделия – на рис. 8. Балластный резистор состоит из шести секций, каждая из которых собрана из набора пластин, изготовленных из листов нержавеющей стали толщиной 1,5 мм. Ширина каждого листа равна 50 см. Общая длина листов, из которых изготовлен балластный резистор, составляет 120 м, что обеспечивает полное сопротивление 0,1 Ом. Две пластины, сваренные по одной кромке листа, U -образную форму, а 10 подобных форм после последовательного соединения образуют «гармошку». Две такие «гармошки» вставляются одна в другую встречно, их последние листы свариваются между собой по кромке, образуя секцию сопротивлением 1/60 Ом (рис. 7, *справа*). Таким образом, уникальная конструкция резистора состоит из пластин, собранных бифилярно, что позволяет минимизировать его паразитную индуктивность.

Измеренная величина паразитной индуктивности балластного резистора составила менее 1,5 мкГн, что соответствует предварительным расчетам.

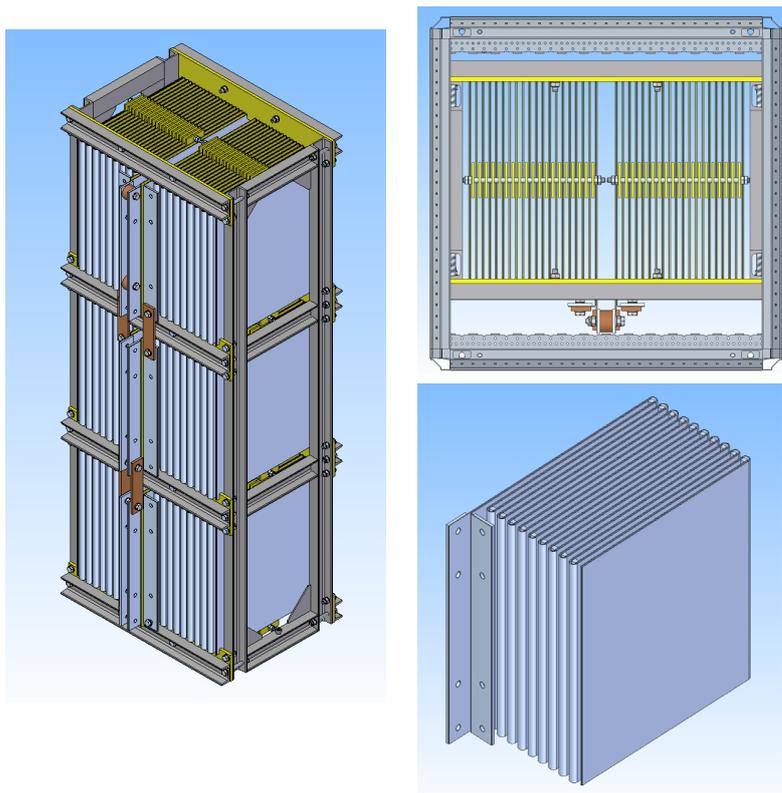


Рис. 7. Балластный резистор в сборе (*слева*), вид сверху и отдельная секция резистора (*справа*)

Fig. 7. Assembled dump resistor (*left*), top view and one section of the resistor (*right*)



Рис. 8. Фотография изготовленного балластного резистора без корпуса

Fig. 8. Picture of the manufactured dump resistor without rack

Электроника управления

Как было сказано выше, для надежности размыкатель тока в системе вывода энергии продублирован вторым. В целях резервирования каждый размыкатель управляется независимым каналом электроники. Управление системой вывода происходит при помощи контроллеров ICM_1 и ICM_2 (рис. 9). Эти контроллеры являются стандартными на ускорительном комплексе FAIR. Контроллеры типа ICM включают в себя четыре АЦП, необходимые для измерения аналоговых сигналов, входные и выходные регистры, а также последовательный интерфейс USI, по которому происходит обмен данными с контроллером верхнего уровня ACU. ACU, так же как и ICM, является стандартным на FAIR.

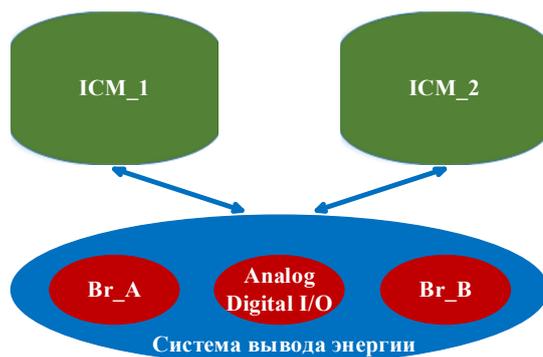


Рис. 9. Блок-схема электроники управления
Fig. 9. Control electronics general diagram

Контроллеры ICM собирают аналоговые и цифровые сигналы с плат Driver_BrA, Driver_BrB и измерительной платы. Также с ICM приходят управляющие сигналы на платы Driver_BrA и Driver_BrB, ответственные за активацию размыкающих устройств автоматических выключателей (рис. 10). Команды на замыкание или размыкание автоматических выключателей поступают на контроллеры ICM_1 и ICM_2 от контроллера верхнего уровня ACU. Команда на размыкание может быть как плановой, так и в случае срыва сверхпроводимости. В последнем случае сигнал приходит от внешнего детектора срыва сверхпроводимости.

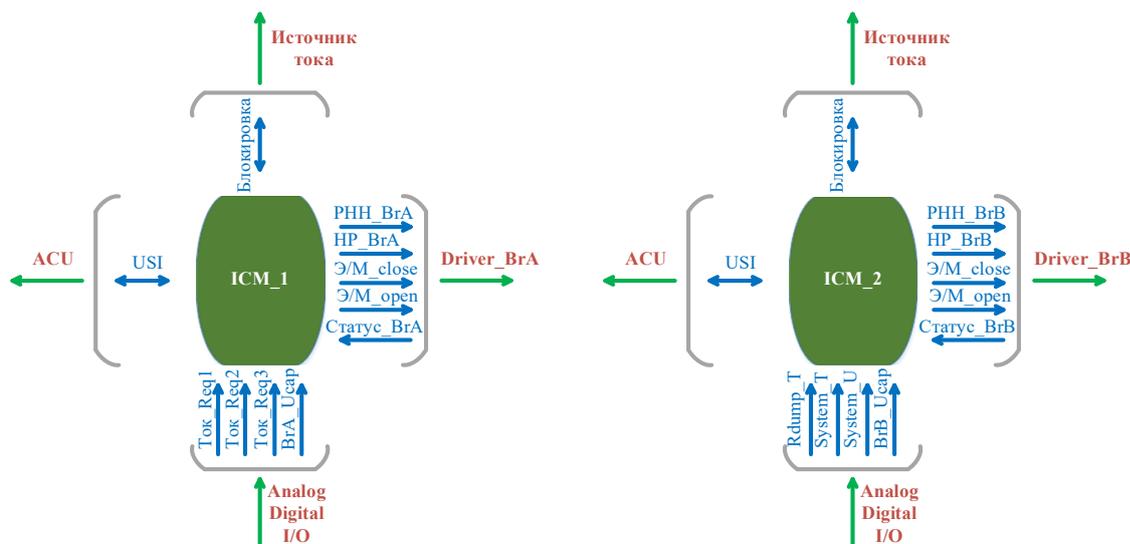


Рис. 10. Аналоговые и цифровые сигналы системы вывода энергии
Fig. 10. Analog and digital signals of the energy extraction system

Заключение

Учитывая опыт разработки подобных систем на меньшие токи, можно утверждать, что разработанная система вывода энергии на ток 5100 А отвечает всем поставленным техническим требованиям, а также требованиям по надежности системы. Проект прошел техническую проверку FAIR, был утвержден и получил одобрение на производство. Измеренные параметры изготовленного балластного резистора, такие как сопротивление и паразитная индуктивность, совпадают с расчетными.

Данная разработка ляжет в основу системы вывода энергии для детектора SPD на коллайдере NICA [4].

Список принятых обозначений

| | |
|-------------|---|
| FAIR | – Facility for Antiproton and Ion Research, установка для антипротонных и ионных исследований |
| NICA | – Nuclotron-based Ion Collider facility |
| SPD | – Spin Physics Detector |
| БАК | – Большой адронный коллайдер |
| Rdump | – балластный резистор |
| Csnub | – снабберный конденсатор |
| Quench | – срыв сверхпроводимости |
| ICM | – interlock and control module, модуль блокировок и контроля |
| ACU | – adaptive control unit, адаптивный модуль контроллера |
| USI | – universal series interface, универсальный последовательный интерфейс |
| DCCT | – direct current-current transformer, трансформатор постоянного тока |
| Analog I/O | – аналоговые входные и выходные каналы |
| Digital I/O | – входные и выходные каналы |
| BrA | – автоматический выключатель А. |
| BrB | – автоматический выключатель В. |
| Driver_BrA | – плата драйвера автоматического выключателя А. |
| Driver_BrB | – плата драйвера автоматического выключателя В. |
| Req | – разравнивающий резистор |
| HP | – независимый расцепитель |
| PHN | – расцепитель нулевого напряжения |
| Ucap | – напряжение на накопительном конденсаторе платы драйвера |
| Э/М | – электромагнитный привод |
| Э/М_close | – команда на замыкание выключателя электромагнитным приводом |
| Э/М_open | – команда на размыкание выключателя электромагнитным приводом |

Список литературы

1. **Турани М., Шмидт Л. и др.** Технический дизайн проект соленоида и дипольного спектрального магнита PANDA. Коллаборация PANDA, Дармштадт, 2009.
2. **Ерохин А. И.** Вывод и рекуперация энергии в индуктивных и емкостных накопителях: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2010.
3. **Ерохин А. И., Медведко А. С., Куулинг Г. Я. и др.** Разработка и испытания систем вывода энергии для корректирующих магнитных цепей БАК // Материалы Междунар. конф. по модуляторам мощности. Май 2008. Лас-Вегас, США. DOI 10.1109/IPMC.2008.4743691
4. **Абазов А. И. др.** Концептуальный дизайн детектора спиновой физики. E-print: 2102.00442v3

References

1. **Turany M., Shmidt L., etc.** Technical design report for the PANDA solenoid and dipole spectrometer magnets. PANDA collaboration, 2009. (in Russ.)
2. **Erokhin A.** Energy extraction and recuperation at the inductive and capacitive storages. PhD in Tech. Sci. Diss. Novosibirsk, 2010. (in Russ.)
3. **Erokhin A., Medvedko A., Coelingh G. etc.** Design and commissioning of the energy extraction systems for the LHC corrector magnets circuits. IEEE International Power Modulator Conference, proceedings. May 2008, Las Vegas. DOI 10.1109/IPMC.2008.4743691
4. **Abazov A., etc.** Conceptual design of the Spin Physics Detector. E-print: 2102.00442v3

Сведения об авторах

Александр Иванович Ерохин, кандидат технических наук

Артём Андреевич Кремнев, младший научный сотрудник

Евгений Эдуардович Пята, старший научный сотрудник

Виталий Аркадьевич Шкаруба, доктор технических наук

Александр Витальевич Булатов, ведущий инженер

Татьяна Васильевна Бедарева, ведущий инженер

Information about the Authors

Alexandr I. Erokhin, PhD in technical sciences

Artem A. Kremnev, Scientist

Vitaly A. Shkaruba, Doctor of Technical Sciences

Eugeny E. Pyata, Senior Scientist

Alexandr V. Bulatov, Lead-Engineer

Tatyana V. Bedareva, Lead-Engineer

*Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 01.04.2023;
принята к публикации 11.09.2023*

*The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 01.04.2023;
accepted for publication 11.09.2023*