

КЛЮЧ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ НА 15 000 АМПЕР СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ

*А. В. Кудашкин, А. О. Сидорин, В. Н. Карпинский,
А. Л. Осипенков, А. А. Макаров*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

На основе опыта эксплуатации системы защиты сверхпроводящих магнитов нуклотрона разработан новый ключ эвакуации энергии на 15 кА. Он используется на испытательном стенде сверхпроводящих магнитов, изготавливаемых для ускорительных комплексов NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility, реализуется в ОИЯИ) [1] и FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия).

Based on operation experience of protection system of Nuclotron's superconducting magnets a new energy evacuation switch for 15 kA was developed. It is used for superconducting magnets' testing bench which are produced for accelerator facilities NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility, implemented at JINR) and FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Darmstadt, Germany).

PACS: 29.20.dk; 84.71.Ba

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью эксплуатации сверхпроводящих (СП) устройств является необходимость защиты их от повреждения в случае спонтанного перехода обмоток в нормально-проводящую фазу. Защита СП-магнитов синхротронов, как правило, основана на системе эвакуации энергии, включающей в себя мощные коммутирующие устройства и резисторы гашения поля. При обнаружении перехода обмотки одного из магнитов в нормально-проводящее состояние источники питания магнитов отключаются и переходят в инверторный режим, а коммутирующие устройства вводят в цепь резисторы гашения поля, в которых рассеивается накопленная в магнитах энергия. Выбор типа коммутирующего устройства определяется режимом работы ускорителя.

Так, например, на коллайдере LHC в качестве размыкателя в системе питания одного октанта, состоящего из 154 магнитов, включенных последовательно с запасенной энергией, равной 1,33 ГДж при токе 11850 А, применены 8 включенных последовательно-параллельно автоматических быстродействующих механических выключателей типа «ВАБ49», каждый из которых рассчитан на ток 4 кА [2]. К достоинствам этого решения следует отнести низкое падение напряжения на силовом контакте и, соответственно, небольшие потери энергии на размыкателе во время эксплуатации. Именно это достоинство и явилось определяющим, так как большую часть рабочего цикла коллайдер работает

при постоянном токе питания, близком к максимальному. Однако ресурс срабатываний механического выключателя ограничен: для ВАБ49 он составляет 250 коммутаций номинального тока до капитального ремонта главных контактов.

В случае быстроциклирующего СП-синхротрона, который подобно нуклотрону ОИЯИ используется для выполнения целого ряда экспериментальных исследований, требующих большого разнообразия в параметрах ускоренных пучков, ресурс срабатывания размыкателя становится определяющим. Поэтому для системы защиты нуклотрона был разработан ключ эвакуации энергии (КЭЭ) на основе тиристорного коммутатора с максимальным током до 6 кА [3]. Аналогичное решение было положено в основу проекта системы эвакуации энергии бустера ускорительного комплекса NICA [4].

В настоящее время в ОИЯИ начато изготовление сверхпроводящих магнитов для новых ускорительных установок проектов NICA и FAIR, максимальный ток питания которых составляет примерно 15 кА. Для испытания новых магнитов и их тренировки током до максимального проектного в ОИЯИ создан специализированный испытательный стенд. Для стенда был разработан тиристорный ключ, имеющий падение напряжения 2–2,5 В, но он не ограничен в количестве срабатываний, что является необходимым для проведения испытаний.

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ ИЗ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Основная задача заключалась в разработке и создании тиристорного ключа эвакуации энергии для обеспечения надежного безаварийного вывода из сверхпроводящих структурных элементов и гашения тока в рабочем режиме источника: 15 000 А–25 В. Для решения задачи было разработано схемотехническое решение по коммутации тока такой мощности, испытаны все составные силовые полупроводниковые приборы, спроектирована монтажная и электромотажная схема соединений силовых узлов и узлов электроники внутренних защит КЭЭ-15000.

За основу при разработке КЭЭ-15000 была взята схема КЭЭ нуклотрона на 6 кА, и были усилены все полупроводниковые элементы, силовые шинные обвязки и емкости (рис. 1). Были заменены тиристоры силовой ветви ТС1-4 с протеканием тока 2 кА на тиристоры с максимальным током до 5 кА. Балластные резисторы R_61 – R_64 номиналом 0,5 мОм были заменены на более точные резисторы с сопротивлением 0,2 мОм таким образом, чтобы на них стало меньше падение напряжения, а следовательно, уменьшились потери мощности. Каждый из новых полупроводниковых элементов был испытан на стенде максимальным током до 5 кА и сняты осциллограммы вольт-амперных характеристик (рис. 2). На основании полученных данных были сформированы тиристор-резисторные сборки силовых ветвей так, чтобы токовая нагрузка между четырьмя параллельными ветками, через каждую из которых в нормальном режиме работы течет ток до 3750 А, была одинакова. Емкости $C_{к1}$ – $C_{к2}$ были увеличены до 15 мФ каждая. Это было необходимо, так как увеличился ток, который при эвакуации нужно вывести из силовой ветви ТС– R_6 . Был создан блок электроники для связи с источником PS15000-25D.

Для предотвращения аварийного разрушения сверхпроводящего кабеля обмотки от перегрева необходимо как можно раньше зафиксировать момент перехода. Для включе-

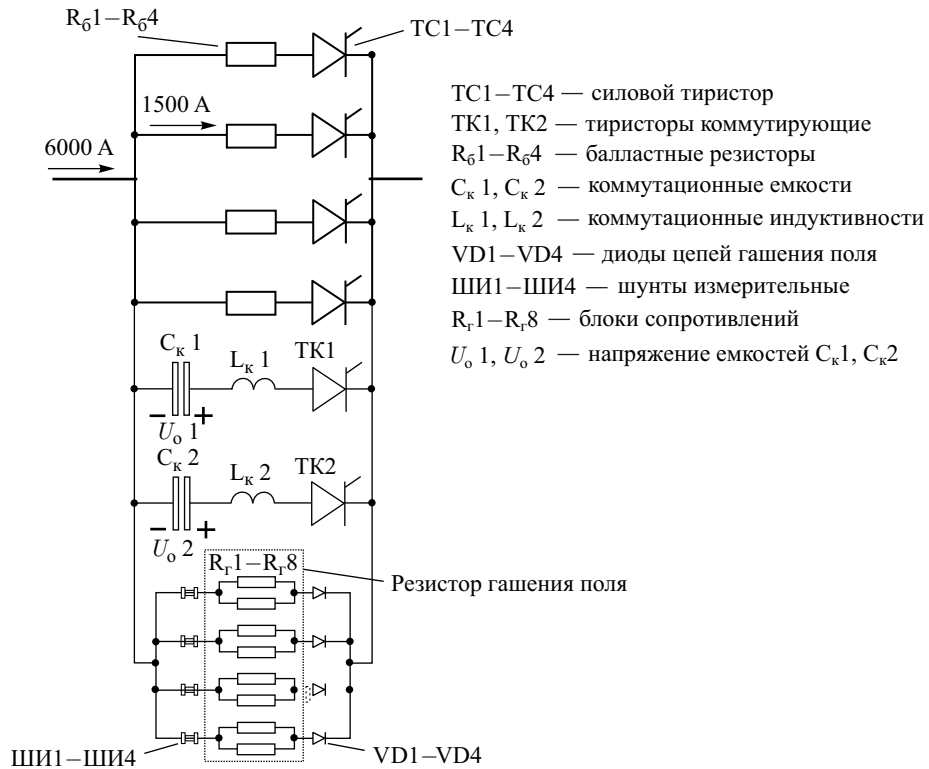


Рис. 1. Силовая схема ключа эвакуации энергии нуклотрона

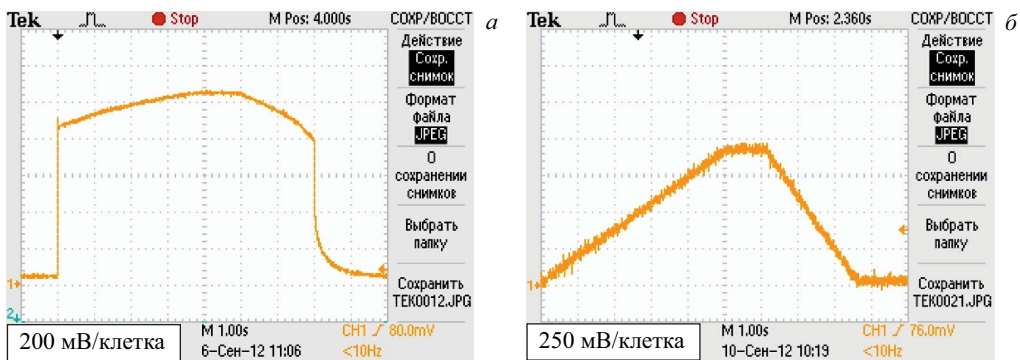


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики тиристора (а) и резистора (б)

ния защит проходят сигналы на входе датчиков [5], имеющие амплитуду более 50 мВ и длительность более 3 мс (уровень помех до 20–30 мВ). Датчики перехода расположены на испытываемом магните и передают сигнал о срыве сверхпроводимости на КЭЭ-15000.

В случае перехода сверхпроводника в нормальнопроводящее состояние скорость распространения зоны нагрева по сверхпроводнику при токе 15 кА будет равной 50 м/с. При появлении сопротивления на сверхпроводнике на этом участке начинает падать напряжение и значит выделяться тепло. Таким образом, нагрев происходит очень быстро и при отсутствии системы защиты приведет к полному выделению накопленной энергии в магните на теплом участке сверхпроводника и его выгоранию. Данную проблему решает КЭЭ-15000. Через этот КЭЭ в рабочем режиме течет ток до 15 кА со скоростью роста до 40 кА/с.

Для предотвращения перегрева и разрушения сверхпроводящего кабеля обмотки необходимо быстро снизить до нуля ток возбуждения магнита. Наиболее простым способом является гашение поля при высадке энергии на внешнее активное сопротивление. Этот способ состоит в отключении источника электропитания (замыкании входных цепей и переводе источника питания в инверторный режим работы) и введении в электрическую цепь сверхпроводящих магнитов активного сопротивления (внешнего) гашения поля. Уравнение для такой цепи имеет вид

$$L \frac{di}{dt} + i[R_{\text{внеш}} + R_{\text{дин}}(t)] = 0, \quad (1)$$

где L — суммарная индуктивность цепочки сверхпроводящих магнитов; i — ток возбуждения магнитов на момент появления нормальной зоны; $R_{\text{дин}}$ — динамическое сопротивление участка сверхпроводящего кабеля, перешедшего в резистивное состояние; $R_{\text{внеш}}$ — сопротивление эвакуации энергии (гашения поля).

Для анализа и расчета процессов коммутации все схемы приводятся к одной общей упрощенной схеме замещения (рис. 3). Важным требованием к системе эвакуации энергии является высокая скорость вывода тока из сверхпроводящих магнитных элементов. Безопасным выводом энергии считается эвакуация, проходящая за время 3τ . По техническому заданию эвакуация основной части энергии (3τ) должна произойти за время 0,5 с. Как видно из формулы (2), за время 3τ ток гасится на 95%. Для проекта NICA индуктивность испытываемых магнитов 0,1–0,63 мГн, таким образом, из формулы (3)

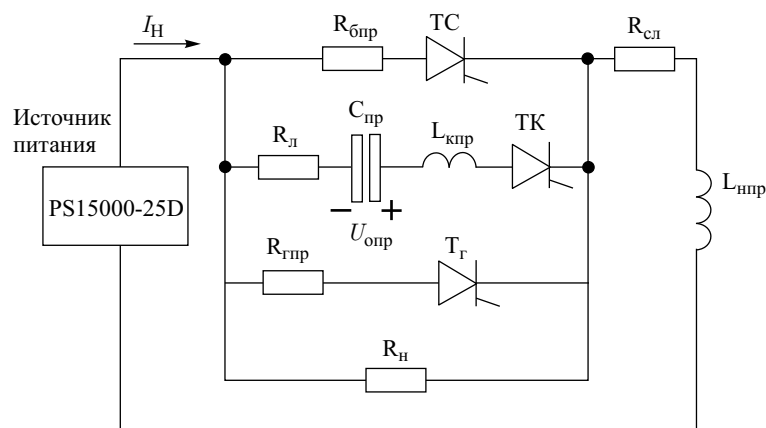


Рис. 3. Упрощенная схема замещения системы питания и эвакуации энергии

видно, что сопротивление гашения $R_{гпр}$ выбирается равным 3–7 мОм,

$$i_n = I_n e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

$$\tau = \frac{L_{нпр}}{R_{гпр}}, \quad (3)$$

где τ — постоянная времени процесса спада тока; t — время эвакуации энергии, I_n — ток на момент начала эвакуации энергии; i_n — ток в момент времени t ; $R_{гпр}$ — сопротивление гашения тока; $L_{нпр}$ — индуктивность нагрузки.

При нормальной работе с началом цикла функционирования испытательного стенда ток в начальный момент времени течет через резистор R_n . Сопротивление R_n выбрано таким, чтобы при токе 10 А падение напряжения на нем достигло порога включения тиристора ТС и скачок напряжения, вызванный включением тиристора группы ТС (включает в себя четыре параллельные ветки тиристоры), был в начале цикла и не мешал магнитным измерениям сверхпроводящей нагрузки. Далее в нормальном режиме работы весь ток течет по ветке $R_{бпр}$ –ТС. При эвакуации энергии по сигналу от датчиков обнаружения перехода сверхпроводящего магнита в резистивное состояние включаются коммутационные тиристоры ТК, подключая предварительно заряженные от источников ЗИ конденсаторные батареи $C_{пр}$. Начинается процесс вывода тока из силовых тиристоры ТС в конденсаторные батареи $C_{пр}$, время вывода показано от точки А до точки В (рис. 4). Шпильки напряжения показывают вывод тока из четырех силовых тиристоры ТС. В точке В весь ток силовой ветви выведен и для закрытия тиристоры ТС время отрицательного приложенного напряжения после вывода тока из тиристоры ТС должно быть 100 мкс. На КЭЭ-15000 в статическом режиме подачи тока 15 кА при эвакуации энергии время приложенного отрицательного напряжения к силовым тиристорам группы ТС показано от точки В до точки С (см. рис. 4), и оно равно 145 мкс, что гарантирует закрытие тиристоры ТС. При изменении полярности напряжения на конденсаторных батареях $C_{пр}$ (точка С) ток магнитов коммутируется из конденсаторных батарей в цепь сопротивления гашения поля $R_{гпр}$. Начинается гашение энергии, и ток уменьшается по экспоненте

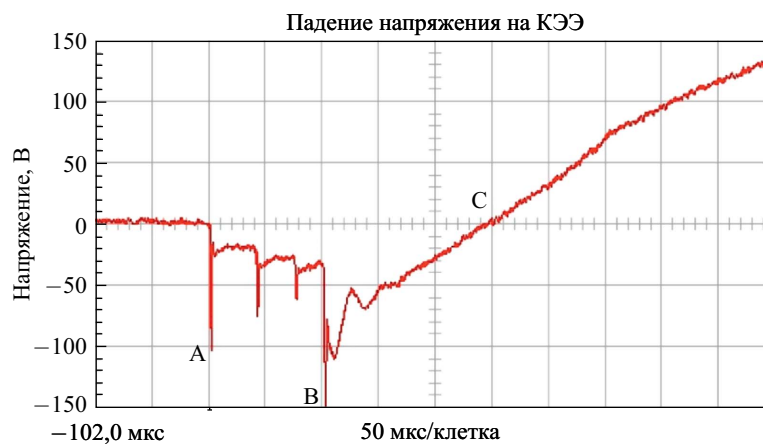


Рис. 4. Анод–катод (А–К) тиристорных сборок ТС1–ТС4

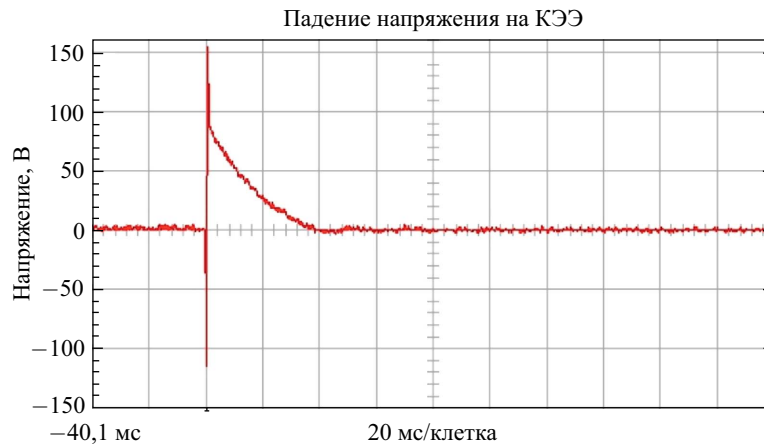


Рис. 5. Анод–катод (А–К) тиристорных сборок ТС1–ТС4

с постоянной времени τ (рис. 5). Для надежности в КЭЭ-15000 в процессе эвакуации энергии используются две коммутационные ветви, каждая из которых должна гарантированно выводить ток из силовой цепи. На графике (рис. 4) показано срабатывание одной коммутационной ветки КЭЭ-15000.

На графике (рис. 5) представлен коммутационный процесс при двух включенных коммутационных цепях КЭЭ-15000 (емкость 30 мФ) совместно с переходом источника в инверторный режим при токе 15 кА.

Как видно из графика (рис. 5), время вывода (гашения) тока — 40 мс. Такая скорость вывода тока обусловлена тем, что источник в момент эвакуации переходит в инверторный режим и начинает самостоятельно параллельно с ключом эвакуации выводить ток из системы. По этому графику видно, что система защиты значительно быстрее выводит ток, чем требуется по техническому заданию (0,5 с), что дает запас по надежности системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе опыта эксплуатации системы защиты сверхпроводящих магнитов нукло-трона разработан новый ключ эвакуации энергии на основе тиристорного коммутатора. КЭЭ позволяет выводить ток до 15 кА из сверхпроводящей нагрузки индуктивностью 0,01–1 мГн за время 0,5 с и гасит накопленную энергию на балластных резисторах. КЭЭ связан с источником питания оптическим каналом и способен передавать и принимать сигналы защит. Схемотехническое решение показало свою работоспособность в испытаниях предсерийного дублета квадрупольных линз бустера проекта NICA. На данный момент разработанный КЭЭ успешно применяется в испытаниях магнитов вновь создаваемых ускорительных установок комплекса NICA. Также планируется испытать 175 квадрупольных магнитов для синхротрона SIS100 (проект FAIR).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA Project at JINR // Part. Nucl. 2012. V. 9, No. 4–5(174–175). P. 521–526.
2. *Dahlerup-Petersen K. et al.* The Protection System for the Superconducting Elements of the Large Hadron Collider at CERN // Proc. of PAC. 1999.
3. *Карпинский В. Н. и др.* Развитие системы питания нуклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 835–842.
4. *Kudashkin A. et al.* Power Supply and Protection System of the Nuclotron Booster in the NICA Project // Proc. of RuPAC-2010, Protvino, 2010.
5. *Иванов Е. В. и др.* Система детектирования перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса нуклотрон // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 4(181). С. 603–612.