

ТИРИСТОРНЫЙ КОММУТАТОР ПИТАНИЯ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ ТРАНСПОРТНОГО КАНАЛА БУСТЕР–НУКЛОТРОН NICA

*Д. С. Винник¹, А. А. Крылов, А. А. Морсин,
Ш. Р. Сингатулин, К. Н. Хомяков*

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

Описывается разработанный коммутатор питания квадрупольных линз канала транспортировки бустер–нуклотрон, реализованный на тиристорной мостовой схеме, приводятся данные по коммутации тока с амплитудой до 500 А, рассмотрена временная стабильность устройства на прототипе. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что разработанный коммутатор является универсальным устройством и может использоваться в других силовых системах импульсного питания магнитной оптики ускорителей.

Implemented switch of quadrupole lens power supply in transfer channel Booster–Nuclotron, based on thyristor bridge scheme, is described, the data of current switch with amplitude up to 500 A is provided; the time stability of device is considered on the prototype. The given data allows one to make a conclusion that the developed switch is a universal device that could be used in other impulse power supplies of magnetic lenses in accelerators.

PACS: 29.20.D-; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные поля в квадрупольных линзах задаются траекторией пролета пучка частиц по каналу транспортировки, а сами поля линз определяются характеристикой магнитов по току возбуждения. Временной интервал активного состояния магнитов определяется темпом нарастания и спада поля после коммутации заряженного емкостного накопителя энергии, которое гораздо больше времени пролета пучка (около 0,1 мкс) по каналу транспортировки с длиной 28,1 м [1]. В таблице приведены параметры двух систем питания квадрупольных линз и аналогичной системы питания тестового индуктивного элемента. Магниты находятся на стадии изготовления, и их параметры являются расчетными. Успешный первичный запуск и настройка коммутатора в системе питания с заведомо меньшими временными характеристиками (скоростью нарастания тока возбуждения) по сравнению с величинами в техническом задании может гарантировать работу системы питания с реальными квадрупольными

¹E-mail: D.S.Vinnik@inp.nsk.su

Параметры системы питания квадрупольных линз канала транспортировки пучка из бустера в нуклотрон ускорительного комплекса NICA

Определение	L , мГн	I_{\max} , А	ε , %	$R_{\text{магн}}$, мОм	U_{\max} , В	C , мкФ	t_{\max} , мс ($R_{\text{пот}}$, мОм)
Первый тип	9,9	300	0,05	76	1800	1020	4,9 (110)
Второй тип	11	500	0,05	48	1800	3060	12,1 (82)
Тестовый элемент	0,675	500	0,05	200	625	510	0,87 (234)

линзами. Предельные значения емкости C и напряжения накопителя U_{\max} являются вариативными параметрами, в то время как остальные параметры (индуктивность магнитного элемента L , максимальное значение тока в магните I_{\max} , относительная стабильность тока ε , омическое сопротивление магнита $R_{\text{магн}}$, время выхода на максимум тока t_{\max} при известном сопротивлении величины потерь $R_{\text{пот}}$, являющейся суммарной величиной сопротивления проводов, соединяющих систему питания с магнитом, сопротивления p – n -переходов тиристоров в открытом состоянии и омического сопротивления магнита $R_{\text{магн}}$) получаются из оценочных расчетов равновесной орбиты пучка в транспортном канале.

СХЕМА ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для питания линз реализована система коммутации на основе тиристорного моста. Тиристор, выбранный как коммутационный элемент моста, обладает общеизвестными преимуществами, такими как высокое допустимое напряжение закрытого состояния, допустимый импульсный ток, значительно превышающий допустимый средний ток, удовлетворительные временные коммутационные характеристики, низкая стоимость, широкая номенклатура. При рассмотрении процессов заряд–разряд накопителей использование тиристорного моста позволяет уменьшить размах напряжения на конденсаторе накопителя и, как следствие, увеличить число возможных циклов разряда емкости (ресурс) накопителя в сотни раз и более.

В отличие от системы питания с одним симисторным силовым ключом [2] или с двумя параллельно-встречно включенными тиристорами в накопителе-коммутаторе «Аккорд-042» [3], в схеме с тиристорным мостом напряжение на конденсаторе практически не уходит в область отрицательных значений с малыми амплитудами (не более 100 В) после разряда в нагрузку.

На рис. 1 представлена упрощенная схема питания тестового магнитного элемента, где отражены основные компоненты вместе с эквивалентом нагрузки в качестве магнита индуктивностью $L1$, для упрощения схемы управления драйверы тиристоров и защитные компоненты моста не отображены. В качестве элементов тиристорного моста использовались два двухпозиционных тиристорных модуля, рассчитанные на средний ток до 250 А, обратное напряжение более 2,4 кВ и максимальный ударный

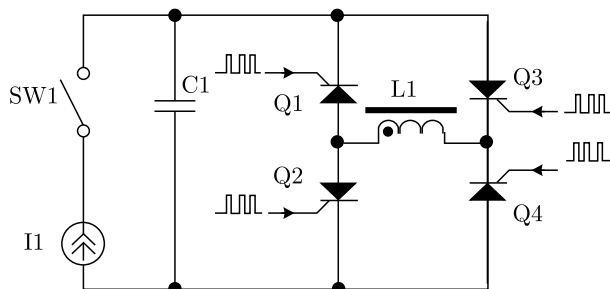


Рис. 1. Общая схема системы питания магнитной линзы

ток до 9 кА. Емкостный накопитель (С1) реализован на наборе из конденсаторов типа К75-80 с комбинированным диэлектриком. Внешнее зарядное устройство, изображенное как комбинация постоянного источника тока I_1 и ключа SW1, предварительно заряжает емкостный накопитель С1 до определенного значения напряжения до прихода от системы управления синхроимпульса об активации канала транспортировки. Датчики тока (магнитные компараторы с полосой пропускания до 100 кГц) при тестировании устанавливались в диагональ моста (контроль тока в магните, индуктивность L1) и в нижние плечи моста (изучение переходных процессов в цепи тиристоров Q2 и Q4) для теста.

Оценка времени спада тока на уровень $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ от максимального I_{\max} при условии, что ток меняется по синусоиде (затухание в системе мало), определяется значением $t = (2t_{\max}\varphi)/\pi$, где $t_{\max} = T/4$ — время выхода на максимум тока (см. таблицу), T — период колебаний тока, φ — фаза колебаний тока. Спад амплитуды тока I_{\max} аналогичен появлению фазового сдвига, т.е. $I_{\max} - I_{\max}\varepsilon = I_{\max} \cos(\varphi)$; отсюда получаем (при малых φ) $\varepsilon = \varphi^2/2$. Выражая φ , подставим его в формулу для времени спада тока и получим $t = (2t_{\max}/\pi)\sqrt{(2\varepsilon)} \sim (t_{\max}\sqrt{\varepsilon})$, что дает максимальное значение 19 мкс для случая с тестовой катушкой, соответственно, стабильность активации питания по импульсу запуска без учета медленных уходов параметров магнита должна быть меньше. Для реальных линз длительность импульса существенно больше и время спада на уровень 0,05 % значительно выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Работу экспериментальной системы питания магнитного элемента иллюстрирует экспериментальная осциллограмма на рис. 2.

После прохождения пучка в моменты максимального тока в магните (нулевого напряжения на емкостном накопителе) ток в магните, как и в тиристорах Q3 и Q2, спадает, а напряжение на емкости С1 уходит в отрицательные значения при возврате магнитной энергии индуктивности в емкость. Для гарантированного набора тока удержания тиристоров 2-й диагонали моста Q1 и Q4, используемых для рекуперации энергии индуктивности, за время длительности импульсов тока драйверов тиристоров контроллер осуществляет их запуск при достижении напряжения менее -70 В на емкости. Таким образом, размах достигаемого напряжения на накопителе равен сумме исходного напряжения (до разряда) и 70 В.

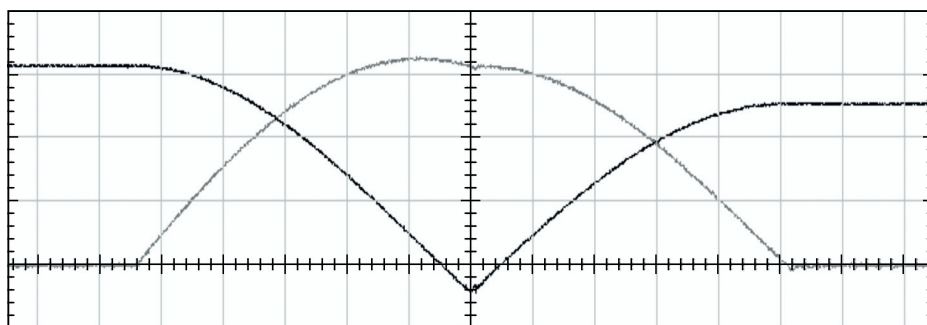


Рис. 2. Ток магнита (светлый график, масштаб по оси Y — 160 А) и напряжения на конденсаторе (темный график, масштаб по оси Y — 200 В); масштаб по оси X — 200 мкс

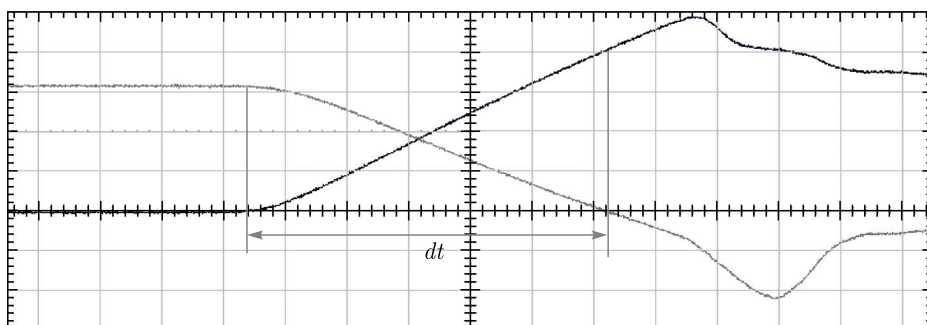


Рис. 3. График процесса перехвата тока из первой (светлый график) диагонали моста во вторую (темный график); масштаб по оси X — 2 мкс, по оси Y — 160 А

Стабильность коммутаций во времени определяет способность системы питания получить с минимальной вариацией максимум тока в интервале времени пролета пучка (не более 100 нс), как отмечалось ранее.

Максимальный разброс времени достижения максимума тока (нулевого напряжения на конденсаторе) при неизменном (с точностью до 10^{-4}) начальном напряжении на накопителе с числом последовательных измерений 1000 циклов не превысил 5 мкс; суммарная задержка начала работы коммутатора (включая задержки передачи синхроимпульса и подготовку источника питания) составила около 1 мкс. Таким образом, полученный разброс удовлетворяет начальным требованиям стабильности тока и временного интервала присутствия максимума тока в интервале 19 мкс для тестируемой нагрузки.

Важным в работе моста является быстрое переключение тиристорных пар, что характеризуется скоростью нарастания тока, текущего через тиристоры при перехвате тока. Превышение критической скорости нарастания тока тиристора (500 А/мкс) может привести к разрушению полупроводниковой структуры. Была проведена серия экспериментов по проверке коммутации токов различной амплитуды (до 500 А включительно) тиристорным мостом, одна из осциллограмм с датчиков тока (с тиристоров Q2 и Q4) представлена на рис. 3.

Длительность переходного процесса получилась не более 20 мкс (при этом максимальное время выключения тиристорного модуля, согласно его техническому описанию, составляет 200 мкс). Искажения и динамические выбросы в измерениях связаны с ограниченностью полосы пропускания датчика тока (100 кГц). Тем не менее по полученным графикам можно судить о промежутке времени (отмечено на рис. 3 как dt), за которое происходит достижение тока до величины в предыдущей активной паре тиристоров; из графика процесса перехвата тока с амплитудой 500 А также следует, что скорость нарастания тока тиристора составляет не более 45 А/мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проекта NICA была протестирована мостовая схема силового коммутатора в системе питания квадрупольных линз канала транспортировки пучка заряженных частиц из бустера в нуклотрон. Выполненный в виде тиристорного моста коммутатор позволяет на порядки увеличить срок эксплуатации емкостного накопителя и, следовательно, системы питания. Тиристорный мостовой коммутатор успешно прошел испытания. На стенде, где процессы развиваются на порядок быстрее, удалось достигнуть заявленных амплитуд тока. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о временной стабильности разработанного коммутатора. Хотя разработка велась в рамках задачи проекта по реализации системы питания с заданными характеристиками, созданный тиристорный коммутационный аппарат обладает параметрами, позволяющими использовать его в других физических установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко А. В., Волков В. И., Колесников С. Ю., Мешков И. Н., Михайлов В. А., Рабцуцун С. В., Сидорин А. О., Сидоров А. И., Топилин Н. Д., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Фатеев А. А., Швецов В. С. // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1507–1526.
2. Ращенко В. В. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 56–63.
3. Валька И. Е., Токарев Ю. Ф. // 14-е Совещ. по ускорителям заряженных частиц, Протвино, Россия, 25–27 окт. 1994 г. С. 114.

Получено 4 апреля 2021 г.