

ГИД-160 — ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ

А. А. Крылов¹, А. А. Морсин, Ш. Р. Сингатулин, К. Н. Хомяков

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

Описана разработка модуля ГИД-160 — импульсного источника питания магнитных элементов ускорителя. Модуль выполнен как обратноходовое зарядное устройство высоковольтного конденсатора, который коммутируется на магнит тиристорным коммутатором и потребляет постоянную мощность во время зарядки. Он позволяет зарядить емкость до 1 кВ с точностью 0,01%. ГИД-160 имеет как цифровой, так и встроенный аналоговый интерфейс управления. В настоящее время множество модулей работает на таких ускорительных комплексах, как ЛИУ-20, NICA и ВЭПП-2000М.

This paper describes module GID-160 designed as pulse power supply of accelerators magnets. The module made as flyback charger of high-voltage capacitor which commute to magnet by own thyristor switch, and it consumes constant average wattage at charge time. It provides charging capacitor up to 1 kV with an accuracy of 0.01%. GID-160 has both digital and analogous embedded control interface. Currently, a number of modules are operating at accelerators LIU-20, NICA, VEPP-2000M.

PACS: 84.71.-b; 84.71.Ba; 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлена техническая реализация генератора импульсно-двуполярного питания магнитов ГИД-160 транспортного канала (ТК) бустер-нуклотрон комплекса NICA² и линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20, реализуемого на опыте более ранней версии — ЛИУ-2 [1].

ТК предназначен для перевода пучка тяжелых ионов из бустерного синхротрона в кольцо накопителя комплекса NICA. В составе магнитной системы используются корректоры и квадрупольные линзы, параметры которых приведены в табл. 1.

Ускоритель ЛИУ-20 имеет протяженную линейную ускорительную структуру длиной 70 м с финальной энергией электронного пучка на мишени 20 МэВ. По мере поэтапного ускорения расходящийся электронный пучок сводится в центр магнитным полем фокусирующих линз соленоидального типа и в итоге после прохождения финальной линзы попадает на мишень с последующей генерацией тормозного излучения.

¹E-mail: a.a.krylov@inp.nsk.su

²NICA — сверхпроводящий коллайдер протонов и тяжелых ионов ЛФВЭ, сайт проекта: <https://nica.jinr.ru/ru/>.

Таблица 1. Параметры импульсных магнитов. Кху — корректоры, DQ67 и DQ108 — квадрупольные линзы, SQ — соленоидальные линзы

Параметр	Кху	DQ67	DQ108	SQ
Проект	NICA	NICA	NICA	ЛИУ-20
Количество магнитов	6	4	4	72
Частота повторения, Гц	0,25	0,25	0,25	0,1
Максимальный ток, А	125	300	500	600
Общее сопротивление магнита, мОм	770	76	48	130
Индуктивность, мГн	8	14,2	32,55	1,27
Энергия, Дж	63	650	4100	160
Емкость накопителя не менее, мкФ	300	510	1020	300
Максимальное напряжение, В	1000	1500	1800	1000
Расчетное время выхода на максимум тока, мс/ напряжение накопителя, В/ сопротивление потерь, мОм	2,3/750/770	3,5/1350/110	5,2/1670/82	1,0/1000/130
Требуемая стабильность тока магнита	0,5 %	0,05 %	0,05 %	0,05 %

Принятая схема питания фокусирующих элементов — коммутационный разряд предварительно заряженной емкости на обмотку магнита с последующей рекуперацией магнитной энергии после прохождения пучка частиц.

Технические параметры электромагнитных линз и корректоров, задающие параметры емкостного накопителя, приведены в табл. 1.

В предыдущих системах использовалась архитектура [2], где один преобразователь поочередно заряжал набор от одного до 8 каналов емкостных накопителей. Данная система требовала наличия распределителя. Выходная мощность зарядного устройства — 100 Вт и более. В связи с развитием номенклатуры элементной базы электроники наметилась тенденция реализации зарядных устройств малой мощности на индивидуальный накопитель, что позволяет реализовать вариант одноканальной распределенной системы. К примеру, магнитная система ускорителя ЛИУ-20 имеет линейно распределенную структуру, вытянутую в линию длиной 72 м. По-прежнему остается возможность сборки многоканальной системы в пределах одного шкафа. Также низкая частота повторения (частота появления сгустков частиц в магните) в этих установках не противоречит использованию зарядных устройств малой мощности. Все это привело к дальнейшему развитию генераторов малой мощности и появлению мелкосерийного модуля ГИД-160 вслед за предыдущим генератором ГИД-25 [3]. Также параллельно получила развитие управляющая электроника с появлением модуля FADC [4], позволившим свести количество используемых модулей в управляющей части с трех до одного. Тем не менее интерфейс устройства ГИД-160 совместим с предыдущим вариантом управления секции питания.

Генератор импульсного питания выполнен в модульном виде и условно может быть разбит на 5 основных узлов:

- зарядное устройство;
- емкостный накопитель;

- управление генератора;
- силовой тиристорный коммутатор;
- измеритель тока нагрузки.

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО

Основные требования к зарядному устройству емкостного накопителя:

- мощность ~ 25 Вт;
- стабильность напряжения 0,05 %;
- максимальное напряжение 1000 В;
- работа в двухполярном режиме.

Обратноходовой преобразователь — это наиболее простая топология, обеспечивающая зарядку в режиме постоянной мощности и гальваническую развязку через силовой трансформатор. Классическая схема была модифицирована для работы в двухполярном режиме. На рис.1 изображена упрощенная схема зарядного устройства ГИД-160.

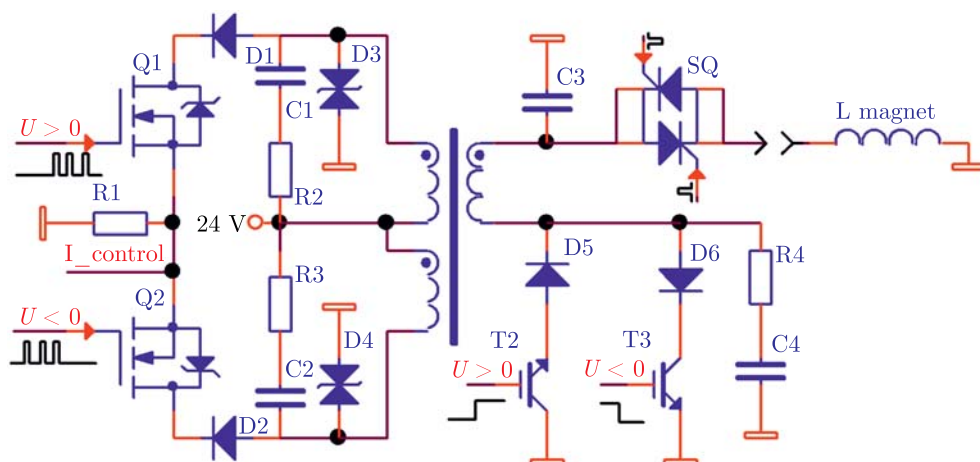


Рис. 1. Схема зарядного устройства

В зависимости от полярности задания включается один из двух асимметричных блоков преобразователя в первичной обмотке трансформатора — на транзисторе Q1 и диоде D1 либо на транзисторе Q2 и диоде D2. Оба зарядных устройства работают на частоте 35 кГц и питаются от источника постоянного напряжения 24 В.

На высоковольтной стороне трансформатора последовательно с силовыми диодами D5, D6 используются IGBT-ключи T2, T3, которые открываются при заряде емкости накопителя C3 с учетом полярности напряжения задания.

ЕМКОСТНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ

Накопитель модуля монтируется на отдельной плате и практически занимает весь внутренний объем. В зависимости от целевого значения емкости и максимального напряжения (не более 1000 В) конденсаторы определяются из серии с широкой номенклатурой. Эта возможность, в отличие от ГИД-25, существенно расширяет диапазон реализуемых параметров выходных импульсов ГИД-160. Текущее исполнение при максимальном выходном напряжении 1000 В позволяет смонтировать накопитель общей емкостью до 320 мкФ (рис. 2). Суммарная энергия в накопителе составляет 160 Дж, однако возможна кратковременная работа (не более 1 мин) с напряжением 1100 В и энергией 180 Дж. Набор меньшей емкости сокращает длительность выходного импульса.



Рис. 2. Корпус источника ГИД-160

УПРАВЛЯЮЩИЙ МОДУЛЬ

Для управления зарядным устройством и силовым коммутатором разработан модуль управления на основе ПЛИС компании Altera семейства MAX V. Обратная связь по напряжению и току нагрузки заводится через 13-битное АЦП с частотой дискретизации 500 кГц. Связь между управляющей CPLD и АЦП осуществляется по протоколу SPI на тактовой частоте 10 МГц.

Модуль управления включает 16 входных и 12 выходных регистров, обрабатываемых с частотой 20 МГц. Основная функция управляющей части — стабилизация напряжения на емкостном накопителе согласно полученному от оператора заданию. При этом режим заряда емкостного накопителя автоматически выбирается исходя из величины заданного напряжения и предполагаемой частоты выстрелов. Таким образом, уменьшается пиковое потребление из служебной энергосети.

В зависимости от конкретной установки модуль может получать задание по напряжению двумя разными путями:

- в виде опорного аналогового сигнала, приходящего на соответствующий вход АЦП;
- в виде 16-битной посылки по каналу I2C.

Помимо работы с зарядным устройством, модуль управляет тиристорным коммутатором (элемент SQ на рис. 1). Алгоритм запуска тиристора является важной частью работы генератора, так как может существенно повлиять на общую эффективность и срок службы устройства. В зависимости от текущего уровня напряжения, полярности и задания от оператора модуль управления может последовательно включать накопитель на нагрузку (показан как элемент «L magnet» на рис. 1) два раза за цикл. Таким образом, система управления может понизить или изменить полярность напряжения на емкостном накопителе посредством «холостого» выстрела (при отсутствии пучка частиц) на индуктивную нагрузку.

В моменты коммутации важно отслеживать динамику протекающих процессов, чтобы перейти в режим блокировки при подозрении на возникновение внештатного состояния. Для динамического контроля за релаксационным разрядом в управлении учитываются ток в нагрузке и напряжение накопителя. Наиболее вероятные аварийные ситуации могут быть связаны с неисправностью тиристорного модуля или магнитной линзы. Для обнаружения пробоя тиристора (или существенного тока утечки) модуль управления отслеживает время до полной зарядки емкостного накопителя перед каждым циклом. В случае срабатывания блокировки отключается зарядное устройство, а сигнал ошибки передается оператору. Неисправность нагрузки и, как следствие, изменение добротности в контуре накопителя — магнитной линзы — также может быть выявлено отслеживанием времени зарядки. Для быстрой блокировки во время выстрела отслеживается форма импульса напряжения и тока. Уже за первую четверть периода колебательного контура можно диагностировать неисправность и при необходимости отменить пролет пучка.

СИЛОВОЙ ТИРИСТОРНЫЙ КОММУТАТОР

Основные требования к коммутатору следуют из табл. 1:

- коммутация тока амплитудой до 600 А и длительностью до 10 мс;
- обратное напряжение ± 1000 В;
- биполярная коммутация;
- частота повторных импульсов 0,25 Гц.

Исходя из поставленных условий коммутатор реализован на основе силового тиристорного модуля, в корпусе которого с габаритными размерами $16 \times 28 \times 40$ мм встроено два встречно включенных тиристора. Модуль способен удерживать напряжение 1,6 кВ и коммутировать импульсный ток 2 кА в течение 10 мс при температуре кристалла 25° . Коммутатор дополнительно зашунтирован снабберной RC-цепочкой и варистором от перенапряжений. Алгоритм управления коммутатором, описанный выше, позволяет использовать один двухканальный драйвер, который управляет сразу обоими тиристорами.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОКА

Выходные импульсы тока в нагрузке соответствуют каноническим процессам индуктивно-емкостного контура LCR с потерями, образуемого индуктивностью магнита, емкостью накопителя и учетом основных омических потерь в проводах подвода нагрузки и обмотки магнита. Типичная амплитуда импульса тока находится в диапазоне от 50 до 600 А, а длительность импульса составляет 0,5–10 мс. Для измерения данного импульсного тока оптимально использование трансформатора на воздушном сердечнике с обратным витком (пояс Роговского) как бесконтактного способа измерений с хорошей стабильностью преобразования ввиду малых дрейфов по температуре в сравнении с токовыми шунтами. К минусам данных датчиков можно отнести наличие собственной резонансной частоты и необходимость фильтрации полученного сигнала. В генераторе используется датчик фирмы PulseElectronics с динамическим диапазоном до 1000 А, частотным диапазоном до 100 кГц и собственной резонансной частотой ~ 200 кГц. В момент старта разряда накопителя в сигнале с датчика тока присутствуют колебания на собственной частоте, так как сигнал на выходе имеет скачкообразный характер. Коррекции масштабного коэффициента по амплитуде и незначительного сдвига времени сигнала с датчика тока вносятся в итоговые программы обработки данных после калибровочных процедур. Генераторы ГИД-160 успешно прошли опытную проверку по стабильности выходного напряжения и тока [4] и обеспечивают стабильность тока на уровне 0,05 % в электромагнитах ускорителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящее время модули ГИД-160 прошли все этапы разработки и выпущено несколько опытных партий с малыми модификациями. Основные параметры генератора сведены в табл. 2.

В настоящее время генератор используется на ЛИУ-20 и на малых физических экспериментальных установках. Для проекта NICA ведется сборка системы питания на 14 каналов. Также предполагается применение генератора при модернизации систем импульсного питания существующих ускорительных комплексов в институте.

Таблица 2. Основные параметры модуля ГИД-160

Параметр	Значение
Выходное напряжение, В	1000
Максимальная емкость накопителя, мкФ	320
Коммутация накопителя	Тиристор
Мощность зарядки, Вт	25
Напряжение питания, В	24
Максимальный ток потребления, А	1,2
Управление аналоговое, В	+ / – 10
Исполнение 19-дюймовая стойка, В × Ш × Г, мм	130 × 100 × 235
Вес, кг	2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логачев П. В. и др.* Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 // ПТЭ. 2013. Т. 4. С. 42–49.
2. *Валыка И. Е. и др.* Многоканальный генератор импульсов тока для питания магнитных элементов комплекса ВЭПП-2М // 14-е Совещ. по ускорителям заряженных частиц, ИФВЭ, Протвино, Россия, 25–27 окт. 1994 г.: Аннот. докл. Протвино, 1994. С. 114.
3. *Ращенко В. В.* Двуполярный импульсный генератор ГИД-25 для питания элементов канала транспортировки пучка К500 // ПТЭ. 2012. Т. 1. С. 56–63.
4. *Морсин А. А. и др.* Модуль контроля импульсного питания // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 2(227). С. 211–217.

Получено 16 июня 2021 г.