

СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ СОЛЕНОИДАЛЬНЫХ ЛИНЗ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-20

*А. А. Крылов¹, М. С. Дмитриев, О. В. Беликов,
Ш. Р. Сингатулин, А. А. Морсин, Д. С. Винник*

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

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН имеет огромный опыт в создании систем импульсного прецизионного питания для ускорительных комплексов. Типичный импульсный источник питания проектируется на основе конденсаторного накопителя и силового коммутатора (тиристорного модуля). Система питания, описанная в данной работе, состоит из четырех каналов зарядных устройств и специального контроллера, обеспечивающих прецизионную зарядку накопителей до ± 1200 В и коммутацию на индуктивные нагрузки — магнитные элементы ускорителя.

Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS has great experience in building power supplies used for accelerator applications where requirements for precise pulsing current are key features. The power supplies are based on a capacitor discharge principle and are typically with thyristors as the switching element. The described power supply system consists of four charging units and a custom designed controller, which ensure the precision charging of the storage capacitors up to 1200 V of any polarity and switching to the winding of the magnetic element.

PACS: 29.20.–c

ВВЕДЕНИЕ

Линейный индукционный ускоритель (ЛИУ-20) работает с несколькими электронными пучками с энергией до 20 МэВ и током до 2 кА. Ускорительная часть имеет линейную структуру протяженностью 75 м из 42 ускоряющих модулей. В процессе поэтапного ускорения электронные пучки фокусируются магнитным полем линз соленоидального типа. Каждая линза запитывается от импульсного источника питания, который обеспечивает синусоидальный импульс тока 1 кА амплитудой поля 3 кГц и длительностью 2 мс. Каждый источник питания представляет собой высоковольтное устройство на основе конденсаторного накопителя и встречно-параллельного коммутатора тиристоров, каждый канал имеет собственную задержку, поэтому начальный момент выставляется по времени с точностью менее 0,1 мкс. Интерфейс управления реализован с помощью модуля VME CAN-Bus.

¹E-mail: A.A.Krylov@inp.nsk.su

ОБЩАЯ СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ

Крейт высоковольтных зарядных устройств подходит для мобильного и стационарного использования благодаря своей компактной конструкции и универсальному 19-дюймовому формфактору. До четырех каналов зарядных устройств (таблица) высоковольтных конденсаторов могут управляться в цифровом виде специальным контроллером крейта. Каждый модуль подключается к кросс-плате с помощью специализированного разъема DIN 41612, который обеспечивает питание модуля и сигналы управления, поступающие от платы контроллера. Как видно из блок-схемы на рис. 1, система питания состоит из следующих модулей: преобразователя AC/DC (500 Вт), зарядных устройств (100 Вт), конденсаторных накопителей с полупроводниковыми ключами и набора контроллеров. В зависимости от специфики задачи оператор может взаимодействовать с источниками питания по различным сценариям. Отдельные модули широко используются на ускорительных комплексах ИЯФ и имеют подробное описание в опубликованных работах.

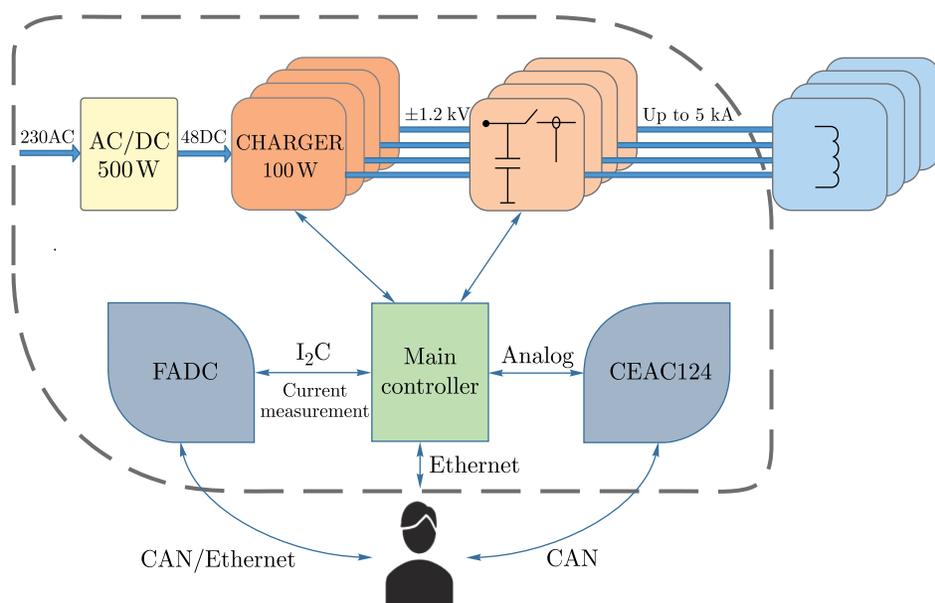


Рис. 1. Блок-схема системы крейта импульсного питания

Параметры источников питания

Параметр	Значение
Количество каналов	4
Частота пусков, Гц	Менее 1
Максимальный ток, А	5000
Максимальное напряжение, В	±1200
Стабильность тока, %	Менее 0,05
Мощность зарядного устройства (отдельного канала), Вт	100

ДВУПОЛЯРНОЕ ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ

В качестве преобразователя напряжения зарядного устройства была выбрана обратноходовая (Flyback) схема, хорошо работающая на емкостную нагрузку и позволяющая легко получать высокие значения выходного напряжения. В отличие от альтернативных решений обратноходовое зарядное устройство заряжает накопитель постоянной мощностью, а не током. В результате этого при той же номинальной мощности заряд накопителя происходит быстрее. В преобразователе разработанного зарядного устройства используется современный силовой GaN-транзистор и выходной SiC-диод Шоттки, которые позволяют схеме эффективно «работать» на высокой рабочей частоте 250 кГц. За счет высокой частоты повышается дискретизация заряда накопителя по энергии и, как следствие, увеличивается точность заряда. Для борьбы с основным недостатком обратноходовой топологии (рис. 2), которым являются выбросы напряжения на силовом ключе преобразователя, связанные с энергией, запасаемой в индуктивности рассеяния, в разработанном устройстве был реализован недиссипативный снаббер LC. Такой снаббер рекуперировывает энергию, запасаемую в индуктивности рассеяния, что повышает КПД преобразователя. Выходной мостовой коммутатор используется в устройстве для переключения полярности выходного напряжения. Это решение позволило не удваивать схему преобразователя напряжения со снаббером для получения обеих полярностей, как это сделано в конкурентных устройствах.

Для обеспечения стабильности заряда накопителя до напряжения задания в зарядном устройстве используется цифровой компаратор напряжения на АЦП. Система измерения напряжения в разработанном устройстве имеет следующую структуру: делитель–буфер–АЦП. Для повышения точности в измерительной системе предусмотрена цифровая фильтрация сигналов АЦП, заключающаяся в хранении в регистрах контроллера восьми крайних измерений и последующем их усреднении для сглаживания шума младших битов, свойственного используемому АЦП.

Также для исключения влияния помех на измерения при достижении напряжения емкости величины напряжения задания контроллер переходит в режим, в котором чередуются стадии подзарядки и измерения. Таким образом, во время измерения силовой преобразователь отключается и не генерирует помех. В корзине имеется запасная дублирующая система измерения напряжения. Аналоговые сигналы с буферов АЦП на платах зарядных устройств передаются также на плату контроллера, на которой имеется собственный АЦП.

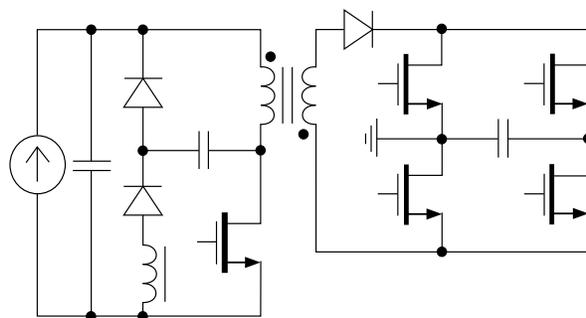


Рис. 2. Топология двуполярного зарядного устройства

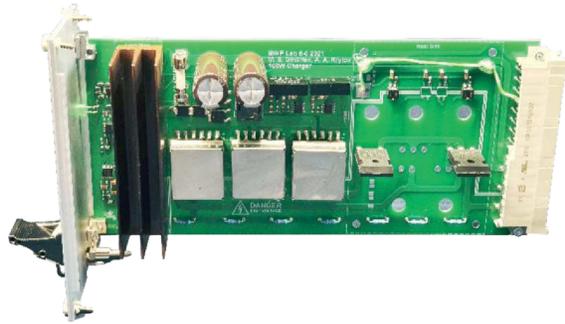


Рис. 3. Двуполярное зарядное устройство

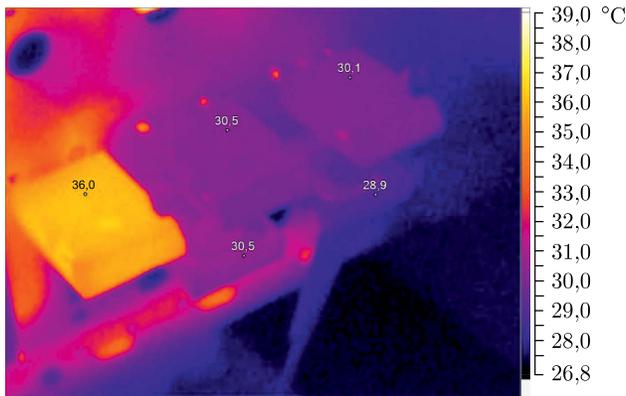


Рис. 4. Результаты измерения температуры без активного охлаждения

Максимальный КПД преобразователя — 91 % (измерено в оптимальном режиме). Общий КПД зарядного устройства — 76 % (измерено при реальном цикле заряда накопителя). Основные потери в зарядном устройстве (рис. 3) происходят на переключающихся элементах — силовом ключе и выходном диоде. Для повышения КПД в мостовом коммутаторе устройства были применены SiC-транзисторы MOSFET. SiC-полупроводниковые приборы имеют низкие значения паразитных емкостей, поэтому при перезаряде паразитных емкостей с высоким выходным напряжением на таких компонентах теряется меньше энергии. В результате измерений с использованием тепловизора (рис. 4) показано практически полное отсутствие нагрева высоковольтных SiC-ключей и SiC-диода Шоттки по сравнению с использованием Si-транзисторов IGBT и сверхбыстрого Si-диода. По сравнению с кремниевыми транзисторами IGBT при использовании карбид-кремниевых MOSFET нет необходимости устанавливать радиатор на мостовой коммутатор.

КОНТРОЛЛЕР

Для обслуживания зарядных устройств и силовых коммутаторов разработан модуль управления на базе CPLD серии MAX V и MCU с ядром ARM 32-bit Cortex-M4. Использование CPLD позволяет добавить 32-битные счетчики для синхронизации ка-



Рис. 5. Модуль контроллера крейта

налов, упрощает работу с набором независимых ШИМ и с быстродействующей периферией (5 АЦП с цифровыми фильтрами) и дает возможность использовать быстрые блокировки. В модуль контроллера заряда (рис. 5) добавлено несколько функций, упрощающих использование и позволяющих проводить более тщательное тестирование. На контроллере работает веб-сервер для мониторинга и взаимодействия с блоками питания. Модуль управления поддерживает несколько сценариев удаленного управления источниками. Это могут быть опорные уровни напряжения, последовательная шина I2C, Ethernet и внешний модуль Bluetooth.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Стабильность заряда с разработанными устройствами проверялась путем измерения пикового значения магнитного поля в соленоидальной магнитной линзе при разряде накопителя на линзу (рис. 6). Тесты проводились при напряжении задания за-

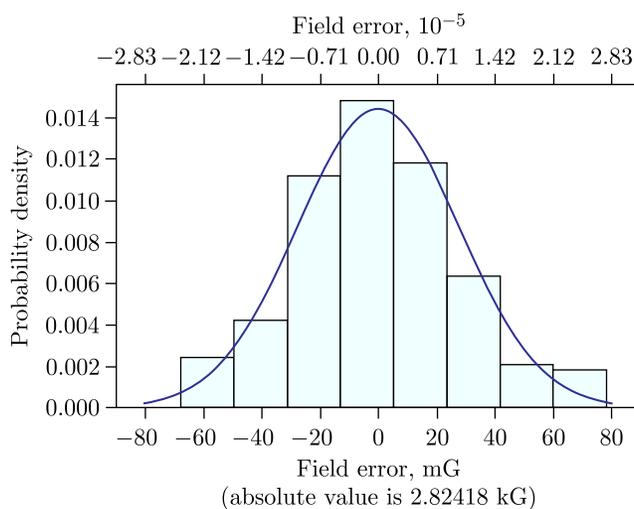


Рис. 6. Измерения стабильности магнитного поля

рядного устройства 750 В — в режиме, близком к реальному использованию на ускорителе. Среднеквадратическое отклонение поля в тестовой линзе составило 61,6 мГс (21,8 ppm) с корзиной без принудительного обдува 27,7 мГс (9,8 ppm) при использовании активного воздушного охлаждения (вставка панели вентиляторов в стойку над корзиной зарядных устройств) при среднем абсолютном значении поля 2,82383 и 2,82418 кГс соответственно.

Пуск линейного индукционного ускорителя состоялся в России в 2019 г. В настоящее время запущена и успешно работает система импульсного питания, которая полностью удовлетворяет заявленным параметрам и легко адаптируется к новым режимам работы ускорителя. Система импульсного питания тиражируется для новых ускорительных комплексов и используется на локальных измерительных стендах ИЯФ.

Получено 18 ноября 2022 г.