

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ КИКЕРОВ ДЛЯ КОЛЬЦА CR В ПРОЕКТЕ FAIR

С. Васильев¹, А. Касаев, Д. Беркаев

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

В данной работе рассматривается проект источника питания, формирующего прямоугольные импульсы тока для питания дипольного ферритового магнитного инфлектора кольца CR проекта FAIR с максимальной амплитудой 6,1 кА, регулируемой длительностью плоской вершины в пределах 0,05–1,5 мкс, длительностью фронта и спада < 318 нс и возможностью реверса направления тока.

This article presents a design of a pulse power source that produces rectangular current pulses for feeding the dipole ferrite magnetic inflector of the CR of the FAIR project. The maximum current during the flat top is 6.1 kA with nominal charging voltage equal to 70 kV. The pulse of magnet current has a flat top with a variable length, the maximum of the flat top pulse length of the kicker is 1.5 μ s. The rise and fall time is not part of the pulse duration and is < 318 ns.

PACS: 29.20.-c

Накопительное кольцо (Collector Ring) CR предложено как российский вклад в проект FAIR (Facility for Anti-proton and Ion Research, Европейский центр по исследованию ионов и антипротонов) и является одной из основных установок проекта FAIR (рис. 1)².

Для впуска и выпуска ионов и антипротонов в CR необходимы импульсные магниты с коротким промежутком существования рабочего магнитного поля, которое отклоняет заряженные частицы. Для этой цели планируется применять дипольные ферритовые магниты — кикеры. Для задач впуска и выпуска необходимо:

- 1) компенсировать или создать поперечный импульс заряженных частиц в противоположных направлениях горизонтальной плоскости;
- 2) создать магнитное поле разной полярности для впуска и выпуска, а также противоположной полярности для ионов и антипротонов;
- 3) отрегулировать длительность действия поля от 50 нс до 1,5 мкс.

Решением этих задач является создание источника питания, позволяющего сформировать импульсы питания магнита с регулируемой длительностью и возможностью реверса направления тока³.

¹E-mail: kreolband@mail.ru

²TDR-CR-V14.

³F-DS-CR-Inj_Extra_Kicker_v1.4_2016_09.

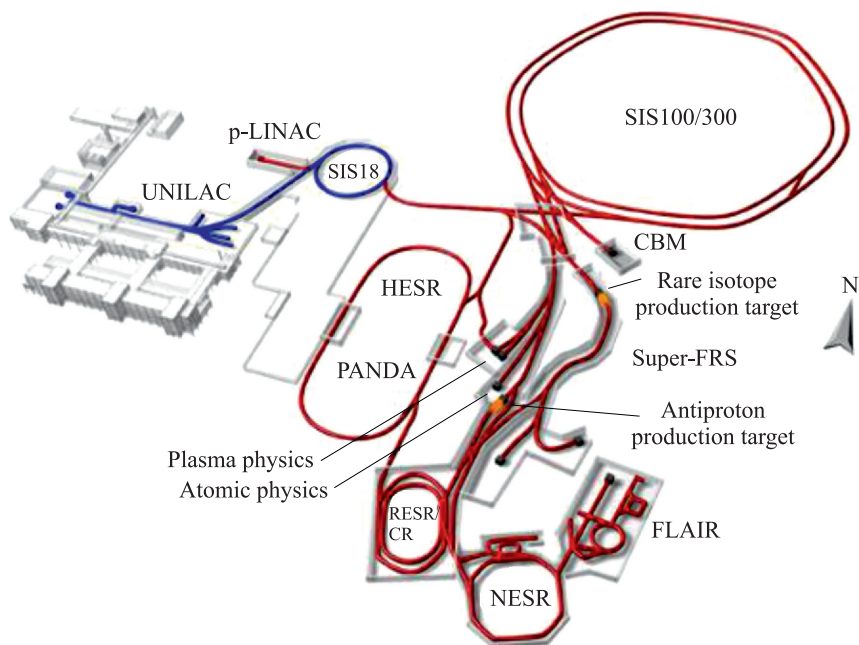


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Ускорительный комплекс FAIR (синим цветом указаны реализованные установки)

Цель данной работы — проектирование и разработка схемы источника питания кикеров, который должен обеспечивать эффективную инжекцию пучка частиц в накопительное кольцо CR и последующую его экстракцию.

ВЫБОР ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИСТОЧНИКА

CR (рис. 2) является специализированным накопительным кольцом, его конструкция определяется нуждами предварительного стохастического охлаждения редких изотопов или антипротонов.

Кикер, разработанный для CR, будет использоваться как для впуска, так и для выпуска пучка в различных антипротонных и ионных оптических режимах. С помощью общего транспортирующего канала один банч длиной 50 нс должен быть инжектирован в CR. После охлаждения в CR должен быть извлечен гораздо более длинный банч с использованием того же кикера.

Система впуска и выпуска пучка должна поддерживать все типы частиц и режимов, использующихся в накопительном кольце (Collector Ring — CR). Цикл работы в антипротонном режиме состоит из инжекции, охлаждения и экстракции. Полный цикл занимает 10 с. Аналогичный цикл для пучков редких изотопов занимает всего 1,5 с.

Кроме того, существует вариант инжекции пучков редких изотопов для дальнейших экспериментов в так называемом изохронном варианте оптики. Эксперименты в изохронном режиме запланированы для дискретного набора значений энергии пучка $\gamma = 1,84; 1,67; 1,43$.

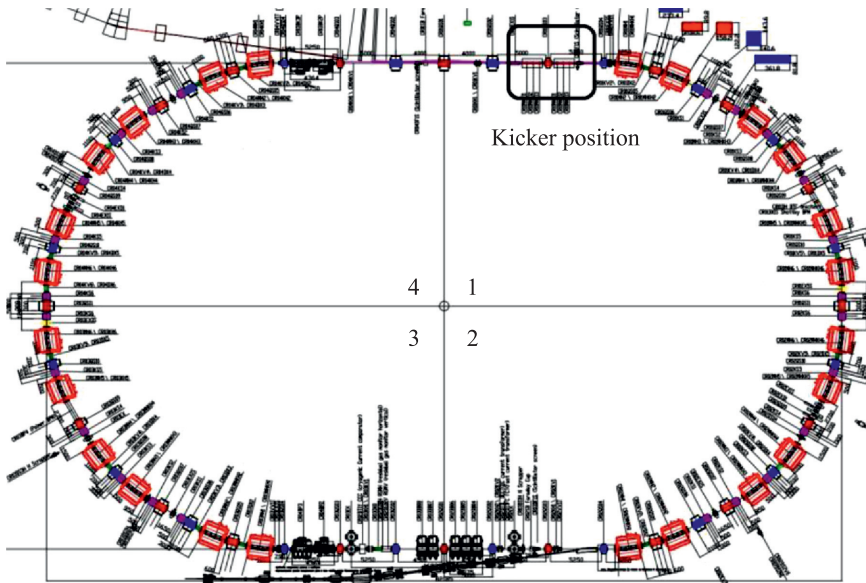


Рис. 2. Накопительное кольцо (CR)

Инжектируемый пучок для всех стандартных рабочих режимов имеет длительность 50 нс в момент инжекции. Однако выпускаемый пучок может иметь и в 10 раз большую длительность (500 нс). Кроме того, на стадии ввода в эксплуатацию кольца CR необходима возможность впуска более длинного пучка, который будет поступать непосредственно из SIS18. После впуска пучок дебанчируется и поворачивается с помощью соответствующих ВЧ-секций. Процесс стохастического охлаждения занимает большую часть времени рабочего цикла. После этого пучок ребанчируется и выпускается.

В случае индуктивной нагрузки (кикер как нагрузка может быть представлен индуктивностью) требования к форме импульсов выходного напряжения источника питания кикеров определяются требованиями к форме тока в индуктивности, которые, в свою очередь, определяются требованиями к форме магнитного поля, создаваемого кикером. Требования к циклам магнитного поля кикера в режиме охлаждения антипротонов и редких изотопов показаны на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что для впуска/выпуска пучка в/из CR требуется биполярная система питания кикеров: источник питания каждого кикерного магнита должен быть способным производить импульсы тока прямой и обратной полярности. Такое биполярное питание кикеров позволяет отклонять пучок частиц (ионов/антипротонов) в прямом или противоположном направлении.

Максимальная величина индукции магнитного поля кикера для отклонения пучка определяется техническим заданием и равняется 54 мТл с точностью $\pm 1\%$ при индуктивности обмотки кикера 1 мкГн. Исходя из этого формулируются требования к силовой части источника питания кикеров, которые приведены в таблице.

Необходимость получения биполярных импульсов напряжения на индуктивной нагрузке, а также возможности реверса (т.е. смены полярности первого и второго им-

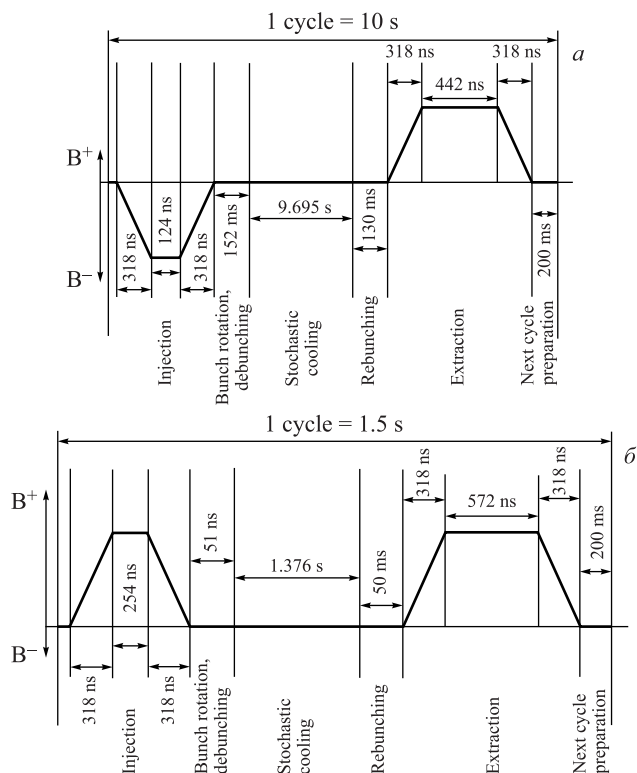


Рис. 3. Требования к циклу магнитного поля кикера в режиме охлаждения антипротонов (а) и редких изотопов (б)

Требования к силовой части источника питания кикеров

Параметр	Значение
Нагрузка	Индуктивная, 1 мкГн
Форма тока в нагрузке	Трапециевидальная
Форма напряжения на сопротивлении нагрузки	Биполярные импульсы с возможностью реверса
Время нарастания/спада тока (0–100 %), нс	< 318
Длительность плоской вершины тока кикера, мкс	Регулировка в пределах 0,05–1,5
Максимальное значение тока I_{max} , кА	6,1
Максимальное значение напряжения U_{max} , кВ	70
Воспроизводимость тока $\Delta I_p / I_p$, %	< 0,5
Осцилляции тока после удара кикера, %	< 2,0
Неравномерность плоской вершины тока, %	< 2,0
Вероятность отказа срабатывания + вероятность ложного срабатывания источника	10^{-3}
Среднеквадратичный разброс момента срабатывания источника питания кикеров (джиттер), нс	± 5
Минимальная временная задержка между импульсами тока, мс	< 200

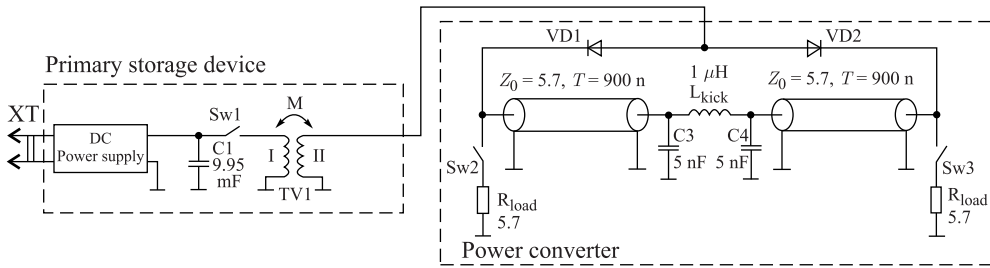


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема источника

пульсов) приводит к тому, что в силовой части источника питания кикера должны содержаться два параллельных канала (рис. 4): один — для генерации первого положительного импульса напряжения, второй — для генерации второго, отрицательного.

Такая схема будет содержать два накопителя энергии (ESD), две формирующие цепи (PFN), два высоковольтных наносекундных коммутатора (Sw). Конструктивно ESD и PFN можно соединить в единый узел, если использовать в качестве накопителя энергии и формирователя импульса коаксиальные линии. При использовании резонансной зарядки линии схема источника принимает вид, представленный на рис. 4.

Принцип работы данной схемы следующий. Конденсатор C1 заряжается от источника постоянного тока (DC Power Supply) 25 А до рабочего напряжения $U_0 = 400$ В в течение ~ 160 мс. Затем зарядка останавливается и срабатывает ключ зарядного устройства Sw1 (данный момент обозначается как $t = 0$), тогда энергия из конденсатора C1 перекачивается в формирующие линии PFN1 и PFN2, которые для зарядного устройства представляют собой сосредоточенные емкости. Зарядка линий в данном случае продолжается в течение 1,2 мс (стоит напомнить, что полное время зарядки не должно превышать 200 мс по условиям технического задания). Трансформатор TV1 имеет коэффициент трансформации $N = 175$ и коэффициент связи $k = 1$. Таким образом, в момент времени 1,2 мс формирующие линии заряжаются до рабочего напряжения $U_{\text{PFN}} = 70$ кВ, срабатывает коммутатор Sw2 и на кикере появляется импульс напряжения, ток через кикер возрастает до рабочего значения 6,1 кА за ~ 240 нс. Спустя 1,8 мкс срабатывает коммутатор Sw3, на кикере появляется импульс напряжения обратной полярности той же амплитуды и длительности, ток через кикер уменьшается до нуля за те же ~ 240 нс. В итоге на кикере формируется импульс тока в форме трапеции величиной 6,1 кА, с длительностью плоской вершины, равной 1,5 мкс, и фронтом и спадом ~ 240 нс (что удовлетворяет требованию технического задания < 318 нс). Регулируя время между коммутациями ключей Sw2 и Sw3, можно регулировать длительность плоской вершины импульса в пределах 50 нс – 1,5 мкс.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММЕ Pspice

В программе Pspice реализована модель вышеприведенной схемы источника питания кикеров CR. Данная модель имеет вид, представленный на рис. 5 и 6.

Источник постоянного тока 25 А (Power Supply), заряжающий конденсатор C1, управляется с помощью ключей U1 и U2. Нормально замкнутый ключ U2 реализует управ-

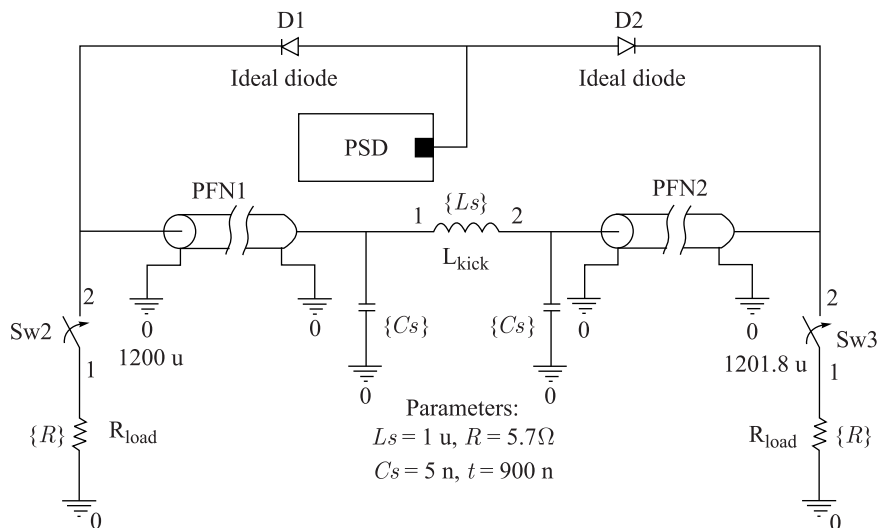


Рис. 5. Модель схемы источника питания кикеров CR

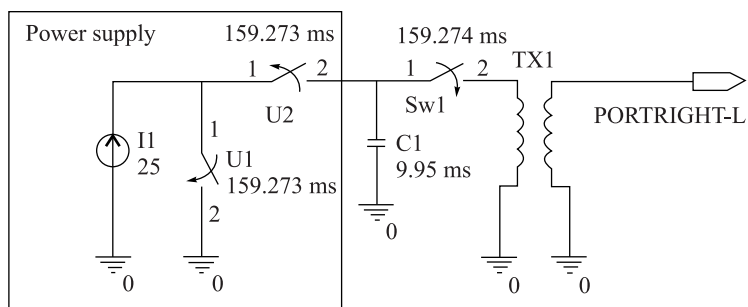


Рис. 6. Модель схемы зарядного устройства (PSD)

ление источником тока во время зарядки конденсатора C_1 . При достижении рабочего напряжения $U_0 = 400 \text{ В}$ этим же ключом осуществляется отключение источника тока (в момент времени $159,273 \text{ мс}$). Так как источник постоянного тока в программе Pspice не может работать в режиме холостого хода (запрещенный режим), ключ U_1 в момент времени $159,273 \text{ мс}$ замыкает источник тока на землю.

В момент времени $159,274 \text{ мс}$ срабатывает ключ Sw_1 и конденсатор C_1 разряжается в первичную обмотку трансформатора TX_1 . Параметры трансформатора подобраны таким образом, чтобы напряжение на формирующих линиях PFN_1 и PFN_2 достигало 70 кВ за $1,2 \text{ мс}$. Индуктивность первичной обмотки составляет $L_I = 7,333 \text{ мкГн}$, индуктивность вторичной обмотки составляет $L_{II} = 0,222 \text{ Гн}$, коэффициент связи равен $k = 1$, коэффициент трансформации $N = 175$. По достижении 70 кВ срабатывают ключи Sw_2 и Sw_3 .

Для того чтобы использовать один общий для обеих формирующих линий зарядный источник, необходима развязка, иначе во время срабатывания ключей Sw_2 и Sw_3

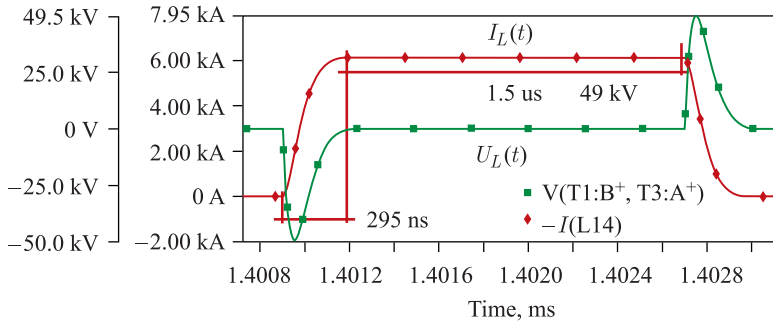


Рис. 7. Выходные импульсы модели силовой части

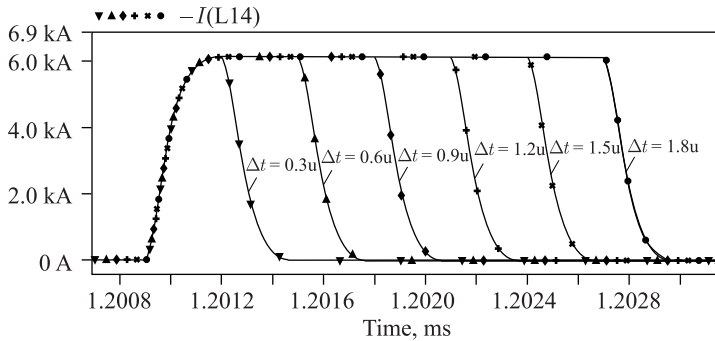


Рис. 8. Импульсы тока кикера при различной величине Δt

на работу схемы будет влиять сопротивление зарядной цепи. В качестве развязывающих элементов в зарядной цепи использованы диоды D1 и D2.

Рассмотрим диаграммы токов и напряжений в модели, представленной на рис. 7 и 8.

Рабочий диапазон длительностей плоской вершины импульса тока кикера определялся техническим заданием и был равен 50 нс–1,5 мкс. Длительность плоской вершины импульса тока в данной модели схемы задается с помощью выбора времен коммутации ключей Sw2 и Sw3, а именно временной разницей между коммутацией ключей Sw2 и Sw3, равной $\Delta t = t_{k-Sw3} - t_{k-Sw2}$, где t_{k-Sw3} — момент коммутации ключа Sw3, а t_{k-Sw2} — момент коммутации ключа Sw2.

Для получения максимальной длительности импульса тока кикера $t_{max} = 1,5$ мкс необходимо установить указанный временной интервал, равный $\Delta t = 1,8$ мкс (см. рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данного этапа работы проведены выбор, обоснование, расчет и компьютерное моделирование принципиальной электрической схемы импульсного источника питания кикеров для кольца CR в проекте FAIR с помощью программы Pspice. На основе результатов проведенного моделирования сформулированы общие требования

к элементам схемы источника питания кикеров для кольца CR, а также выявлены ее критические элементы и параметры. С учетом полученных сведений проведена оптимизация модели импульсного источника питания кикеров.

Работа проводится в рамках проекта ИЦФР и финансируется из средств, поступающих из Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и Объединения им. Гельмгольца научно-исследовательских центров Германии.