

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЫСТРОЙ РАЗВЕРТКИ ПУЧКА НА МИШЕНИ ИЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСА ИЯИ РАН

О.В. Грехов, И.Н. Железов, В.Н. Михайлов, В.Л. Серов, А.В. Фещенко

ИЯИ РАН, Москва, Россия

E-mail: grekhov@inr.ru

Для обеспечения возможности использования при наработке радиоизотопов пучка более высокой интенсивности с целью увеличения эффективности облучения разработана система быстрой развертки пучка. Система включает две пары катушек, создающих взаимно перпендикулярные переменные магнитные поля и являющихся элементами резонансных контуров, а также систему питания и управления. На изотопной мишени создается круговая (эллиптическая) развертка пучка протонов с энергией до 160 МэВ в течение импульса тока пучка длительностью 200 мкс с максимальным отклонением пучка на мишени 4,5 мм. Возбуждение контуров обеспечивается системой управления, построенной на базе контроллера NI cRIO-9076.

ВВЕДЕНИЕ

При облучении мишени происходит быстрый (в течение импульса тока пучка) локальный разогрев облучаемого вещества, в результате чего уменьшается его плотность и, как следствие, снижается эффективность взаимодействия пучка с веществом мишени. Этот эффект ограничивает интенсивность пучка и, следовательно, эффективность и объемы наработки изотопов. Для преодоления данного эффекта необходимо снизить плотность потока частиц ускоренного пучка, что может быть сделано путем увеличения его поперечного сечения, что, однако, невозможно в существующей конфигурации облучательной установки и канала вывода пучка. Проблема может быть решена, если обеспечить быстрое круговое (эллиптическое) сканирование пучка на мишени таким образом, чтобы пучок совершал один полный оборот в течение длительности импульса. Такую развертку можно получить, если отклонять пучок двумя взаимно перпендикулярными переменными магнитными полями, имеющими одну частоту и сдвиг фаз четверть периода колебаний. Были выполнены работы по разработке системы быстрой развертки пучка (СБРП), призванной решить данную задачу. СБРП состоит из двух пар катушек, создающих взаимно перпендикулярные переменные магнитные поля и являющихся элементами резонансных контуров, а также систему питания и управления.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

СБРП должна обеспечить полный оборот пучка в течение его длительности. Длительность пучка составляет 200 мкс, соответственно частота развертки пучка должна быть близкой к 5 кГц.

Требуемое отклонение пучка на мишени при энергии 160 МэВ принято равной 4,5 мм, что составляет около двух среднеквадратических размеров пучка на мишени, как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

Геометрические размеры системы определялись возможностью ее интеграции в существующую геометрию канала вывода пучка. Область отклоняющего поля дефлектора имеет длину $\sim 0,5$ м. Длина участка дрейфа между дефлектором и мишенью $\sim 2,7$ м (Рис. 1).

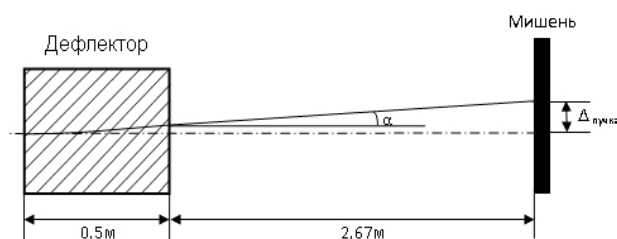


Рис. 1. Расположение дефлектора и мишени

Для отклонения пучка было принято решение использовать переменное магнитное поле, создаваемое протяженными обмотками. Для указанных параметров напряженность поля составляет 54,4 Э.

Требуемое количество ампер-витков рассчитывалось с помощью программы Poisson Superfish и равно 1080. Амплитудное значение тока в обмотке было принято 3,8 А, тогда требуемое количество витков составляет 282.

Каждая отклоняющая обмотка представляет собой последовательное соединение двух одинаковых катушек (Рис. 2).

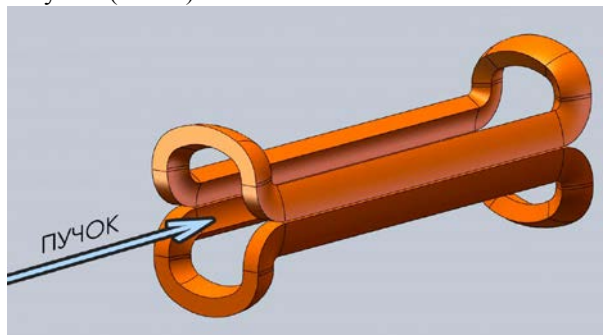


Рис. 2. Отклоняющая обмотка

Величина индуктивности обмотки оценивалась в приближении прямоугольной катушки прямоугольного сечения [1] и составила 36 мГн.

2. СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ

Структурная схема СБРП приведена на Рис. 3. Каждая обмотка включена в параллельный колебательный контур. Возбуждение контуров производится через обмотку возбуждения. Сигналы возбуждения с модуля ЦАП блока управления поступают на вход усилителей мощности.

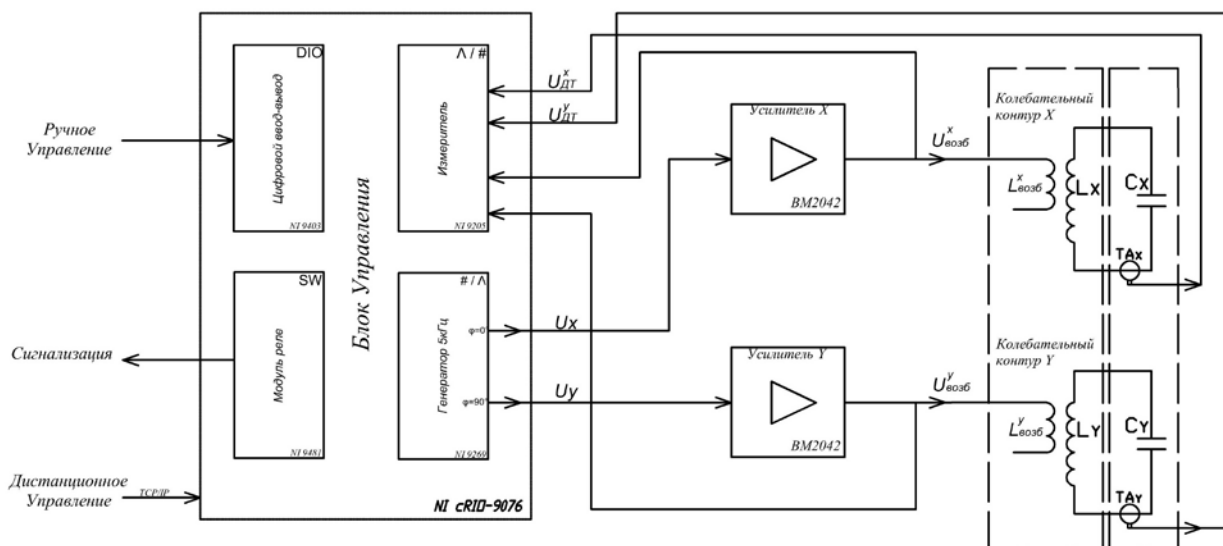


Рис. 3. Структурная схема СБРП

Измерение сигналов (с выходов усилителей мощности, токовых датчиков колебательных контуров и др.) производится модулем АЦП блока управления. Модуль реле сигнализирует о состоянии работы системы. Управление системой осуществляется в дистанционном режиме. Также предусмотрена возможность ручного управления.

2.1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

В колебательном контуре при токе в обмотке 4 А и частоте колебаний 5 кГц амплитудное значение напряжения приближается к 5 кВ. Для колебательного контура выбраны высоковольтные керамические конденсаторы типа К15-У2а на напряжение 6 кВ.

Первые образцы катушек были изготовлены из провода марки ПЭТВ-2 диаметром 0,7 мм. В результате испытаний получено небольшое значение нагруженной добротности колебательного контура, около 30. Для увеличения добротности контура было принято решение перейти на провод литцендрат типа ЛЭЛД-49-0,2, что позволило увеличить добротность до 60. Возбуждение колебательного контура осуществляется через обмотку возбуждения, состоящую из одного витка.

С целью уменьшения продольных размеров дефлектора, что связано с ограниченностью свободного места на канале, обмотки для вертикального и горизонтального отклонений расположили одну на другой. Обмотки дефлектора устанавливаются снаружи стеклянного ионопровода (Рис.4).

2.2. СИСТЕМА ПИТАНИЯ

Для достижения необходимых токов в колебательных контурах сигналы с блока управления усиливаются в усилителях мощности. Необходимая мощность возбуждения определяется точностью настройки резонансных контуров и находится на границе промышленно выпускаемых усилителей. Были опробованы различные варианты усилителей как собственного производства, так и промышленные. Использовать более мощные современные цифровые усилители (D-класса) не позволили боль-

шие искажения при измерении сигналов АЦП на выходе этих усилителей (ШИМ-модуляция).

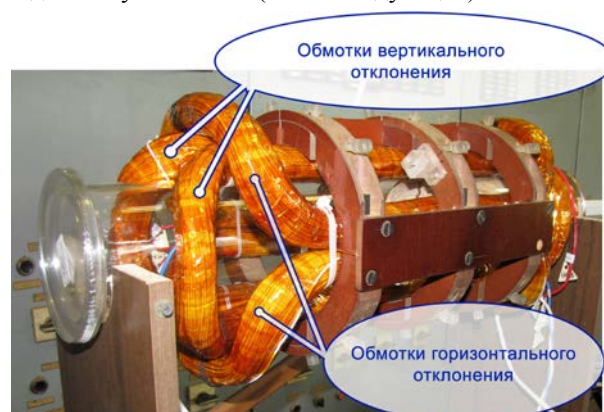


Рис. 4. Внешний вид катушек дефлектора

Для усиления сигнала возбуждения используется аналоговый усилитель звуковой частоты BM2042 (140 Вт).

2.3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Основные функции по контролю и управлению системой возложены на блок управления (Рис. 5). Для выполнения этих функций выбран блок на базе платформы CompactRIO фирмы National Instruments.



Рис. 5. Блок NI cRIO-9076

В состав блока входит контроллер cRIO-9076 и четыре модуля различного назначения. Состав и основные технические характеристики приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Состав блока cRIO-9076

Наименование	Характеристики
Контроллер NI cRIO-9076	ПЛИС Xilinx Spartan-600МГц/128МБ/256МБ/Ethernet/USB/RS-232/4-Slot LX 45 FPGA
Модуль АЦП NI 9205	32-Channel ± 10 V, 250 kS/s, 16-Bit Analog Input Module
Модуль ЦАП NI 9269	4ch voltage output, 16-Bit, ± 10 V, ch-ch ISO
Модуль дискретных входов /выходов NI 9403	32 Ch, TTL Digital Input/Output Module
Модуль реле NI 9481	4-Ch 30V, 60V, 250VAC EM Form A SPST Relay

Имеется возможность загрузить в контроллер программу, выполняющую требуемые функции и обеспечивающую автономную работу системы.

Система управления обеспечивает возможность дистанционного управления по интерфейсу TCP/IP.

2.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение для управления и контроля работой СБРП разработано на основе пакета LabVIEW.

Для формирования на выходе ЦАП синусоидальных сигналов с регулируемой амплитудой и фазой разработана программа, моделирующая работу управляемого генератора. Частота дискретизации выходных сигналов составляет 200 кГц.

Для контроля сигналов используется модуль АЦП. Использование мультиплексного модуля АЦП (NI 9205) позволило измерять множество параметров системы, но не одновременно. Это не дает возможность сразу определить фазовый сдвиг между сигналами, что является важным для определения как фазового сдвига токов контуров, так и соответствия частоты сигнала возбуждения резонансной частоте контуров. Для вычисления фазового сдвига между измеренными сигналами были опробованы различные алгоритмы, как существующие [2], так и разработанные.

Разработанное программное обеспечение интегрировано в систему управления ускорителем [3]. Интерфейс программы управления показан на Рис. 6.

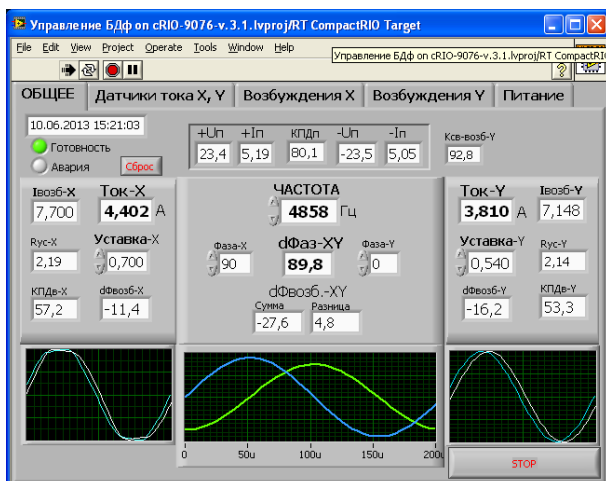


Рис. 6. Интерфейс программы управления

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания СБРП проводились на специализированном стенде. Основные параметры системы приведены в Табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры системы

Параметр	Значение
Входное напряжение питания	~ 220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более Вт	500
Колебательный контур X	
Индукция отклоняющего магнитного поля, Гс	68,5
Номинальный ток контура (амплитуда), А	4,4
Количество витков основной обмотки	308
Индуктивность основной катушки, мГн	36
Колебательный контур Y	
Индукция отклоняющего магнитного поля, Гс	54,4
Номинальный ток контура (амплитуда), А	3,8
Количество витков основной обмотки	282
Индуктивность основной катушки, мГн	36
Система управления	
Количество каналов	2
Форма выходного сигнала	синусоидальная
Диапазон регулировки частоты, Гц	4500...5000
Максимальный выходной ток возбуждения, А	10
Диапазон регулировки тока	0...100%
Диапазон регулировки фазы	$\pm 90^\circ$

По результатам испытаний выполнен ряд доработок системы. Обнаружено сильное влияние положения и формы катушек контуров X и Y на величину связи между контурами и их резонансные частоты, что обусловлено сложной геометрией и ее неидеальностью. Для обеспечения точной настройки резонансных частот контуров и минимизации связи между ними доработана конструкция с добавлением подстроечных элементов в виде ферритовых стержней.

Использование провода типа литцендрат в обмотках дефлектора позволило повысить добротность и, как следствие, уменьшить потребляемую мощность. Это предъявило повышенные требования к настройке резонансных частот и их контролю во время работы системы. Для определения резонансных частот проводится измерение токов в контурах и в обмотках возбуждения, их фазовых сдвигов, а также потребляемой мощности. Наиболее чувствительным параметром оказался фазовый сдвиг между напряжением на выходе усилителя и его выходным током (ток возбуждения), поэтому он стал одним из определяющих при настройке системы. В качестве критерия для оптимальной настройки системы ис-

пользуется отношение измеренного значения тока в контурах к токам возбуждения.

ВЫВОДЫ

Разработанная система быстрой развертки пучка была изготовлена и испытана на стенде. Включение магнитной системы в колебательный контур позволило значительно уменьшить мощность источника питания, но предъявило повышенные требования к настройке и контролю системы. Использование блока управления на основе cRIO позволило в одном устройстве реализовать все основные функции по контролю и управлению системой.

В настоящее время СБРП смонтирована на ускорителе и готовится к испытанию на реальном пучке.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта №16.522.12.2012 «Разработка технологии

производства стронция-82 – сырья для получения радиофармакологических препаратов».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. *Расчет индуктивностей*. Ленинград: «Энергоатомиздат», 1986.
2. Sam Wetterlin. *A Method of Using Quadrature Sampling to Measure Phase and Magnitude*. 2007. <http://www.wetterlin.org/sam/QuadratureSampling.pdf>
3. О.В. Грехов, А.Н. Другаков, Ю.В. Киселев. Система управления линейным ускорителем ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, №3, с. 64-67.

Статья поступила в редакцию 05.09.2013

DEVELOPMENT OF FAST MAGNETIC BEAM RASTER SYSTEM FOR INR ISOTOPE PRODUCTION FACILITY

O.V. Grekhov, I.N. Zhelezov, V.M. Mikhailov, V.L. Serov, A.V. Feschenko

With the aim of increasing of the efficiency of isotope production by providing a possibility of using a higher intensity beam on the target of the isotope production facility the fast magnetic raster system has been developed. The system consists of two pairs of coils included in the resonant circuits for generating of mutually perpendicular alternating magnetic fields as well as of power supply and control systems. The proton beam with the energy up to 160 MeV is scanned circularly (elliptically) with the frequency of about 5 kHz thus providing a full scan within the 200 μ s beam pulse with the maximum deflection up to 4.5 mm. The control system is based on the use of National Instruments cRIO-9076 integrated controller.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ШВИДКОЇ РОЗГОРТКИ ПУЧКА НА МІШЕНІ ІЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСУ ІЯД РАН

O.V. Grekhov, I.M. Zhelezov, V.M. Mikhailov, V.L. Serov, A.V. Feschenko

Для забезпечення можливості використання при напрацюванні радіоізоотопів пучка більш високої інтенсивності з метою збільшення ефективності опромінення розроблена система швидкої розгортки пучка. Система включає дві пари котушок, що створюють взаємно перпендикулярні змінні магнітні поля і є елементами резонансних контурів, а також систему живлення і управління. На ізотопній мішені створюється кругова (еліптична) розгортка пучка протонів з енергією до 160 MeV протягом імпульсу струму пучка тривалістю 200 мкс з максимальним відхиленням пучка на мішені 4,5 мм. Збудження контурів забезпечується системою керування, що побудована на базі контролера NI cRIO-9076.