

## МАГНИТ ЛАМБЕРТСОНА СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ВИТКОМ СИСТЕМ ВВОДА И ВЫВОДА ПУЧКА НУКЛОТРОНА

*А. В. Алфеев, А. В. Бутенко, В. И. Волков, С. Б. Ворожцов, И. Н. Гончаров,  
Д. Е. Донец, О. С. Козлов, В. А. Михайлов, В. А. Мончинский, С. А. Новиков,  
А. О. Сидорин<sup>1</sup>, А. В. Смирнов, В. Л. Смирнов, С. В. Романов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для работы в составе ускорительного комплекса NICA в дополнение к существующей системе медленного вывода пучка на нуклотроне будут созданы система ввода пучка из бустера и система быстрого вывода пучка для инъекции в коллайдер. Все системы реализуются на основе магнитов Ламбертсона. Для компенсации рассеянных полей в камере циркулирующего пучка применяется короткозамкнутый сверхпроводящий виток. Конечная величина сопротивления спая (порядка нескольких нОм) приводит к постепенному накоплению в витке тока, влияющего на пучок при инъекции. Для исключения этого эффекта используется нагреватель, переводящий виток в нормальнопроводящее состояние в паузе между циклами.

In order to provide the Nuclotron operation in the frame of the NICA accelerator complex the system of the beam injection from the Booster and fast extraction system for injection into collider will be constructed in addition to the existing slow extraction system. All the systems are based on Lambertson magnets. The shortened superconducting loop is used for compensation of the residual fields. Non-zero value of the welding resistor (of the order of a few nΩ) leads to storage of a current in the loop, which influences the beam during injection. To avoid this effect a heater converting the loop into normal conducting state during a pause between the cycles is used.

PACS: 29.20.-c; 29.20.db; 29.20.+r

### ВВЕДЕНИЕ

В середине 1980-х гг. в ЛВЭ была начата разработка проекта синхротрона на основе сверхпроводящих магнитов с железным сердечником и обмоткой из трубчатого кабеля. Габариты магнитов позволяли поместить новый ускоритель в кабельном канале синхрофазотрона, что существенно удешевляло его сооружение [1]. В проекте нуклотрона предполагалось реализовать медленный вывод пучка по двум направлениям и быстрый вывод. Для отклонения пучка за пределы ускорителя на каждом из двух направлений медленного вывода были приняты двухступенчатые схемы, расчетная эффективность для

---

<sup>1</sup>E-mail: sidorin@jinr.ru

которых составляет не менее 95 % [2]. В качестве первой ступени используется электростатический септум, отклоняющий частицы в горизонтальной плоскости. Для второй ступени был принят магнит Ламбертсона, применение которого позволяет, во-первых, обеспечить подъем пучка в вертикальной плоскости до уровня каналов транспортировки в экспериментальных залах и, во-вторых, использовать обмотки из трубчатого сверхпроводника, аналогичные обмоткам структурных элементов нуклотрона. Принцип работы системы вывода иллюстрирует рис. 1. Ионы с большой амплитудой горизонтальных колебаний попадают за нож электростатического септума, полем которого они отклоняются на некоторый угол по горизонтали, который дополнительно увеличивается после прохождения дефокусирующей линзы. В результате отклонения ионы попадают за железный септум магнита Ламбертсона, в апертуру, где присутствует горизонтальное магнитное поле, смещающее пучок по вертикали. В камере циркулирующего пучка магнитное поле практически отсутствует. Из конструктивных соображений магнит Ламбертсона был разбит на две секции LM1 и LM2, последовательно расположенные в одном и том же прямолинейном промежутке.

Немаловажным с точки зрения длительности вывода является тот факт, что магниты Ламбертсона питаются током последовательно со структурными дипольными магнитами и способны работать в непрерывном режиме. Одним из недостатков магнита Ламбертсона является относительно большая (по сравнению с другими типами септумных магнитов) величина рассеянных полей в апертуре циркулирующего пучка, когда поле магнита превышает примерно 1,2 Тл. При имеющейся длине прямолинейной секции максимальное поле второй секции магнита для нуклотрона соответствует 1,8 Тл, и эта проблема приобретает принципиальный характер, так как рассеянные поля достигают примерно 3 %, что существенно влияет на динамику циркулирующего пучка. Компенсация рассеянных полей дополнительной обмоткой, питаемой от внешнего источника тока, в случае магнитов нуклотрона технически затруднительна.

В середине 1990-х гг. было предложено оригинальное решение этой проблемы — в апертуре циркулирующего пучка в непосредственной близости от септума магнита Ламбертсона поместить короткозамкнутый виток, находящийся в сверхпроводящем состоянии [3]. Магнитный поток через поперечное сечение сверхпроводящего витка постоянен

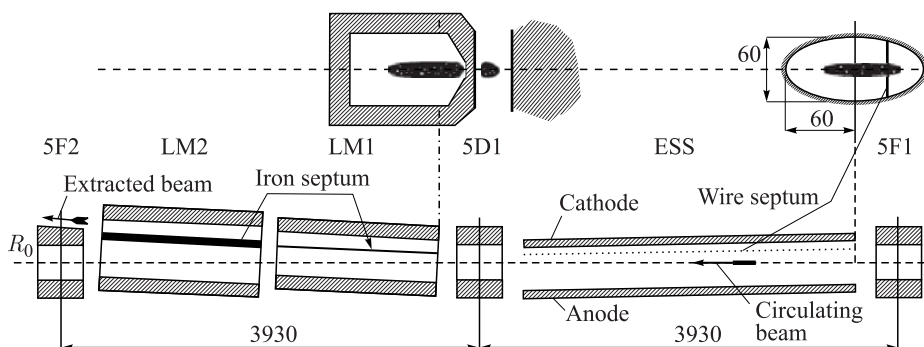


Рис. 1. Расположение устройств отклонения пучка при медленном выводе: ESS — электростатический септум; LM1, LM2 — две секции магнита Ламбертсона. В верхней части рисунка приведено положение циркулирующего и выводимого пучков в поперечном сечении

и не зависит от изменения внешнего магнитного поля. При проникновении поля через септум в витке будет возбуждаться круговой ток, в точности компенсирующий изменение магнитного потока. Таким образом, рассеянные поля будут автоматически компенсированы полем короткозамкнутого витка.

После этого был изготовлен комплект магнитов Ламбертсона для всех проектных направлений вывода пучка и начато сооружение системы медленного вывода в направлении экспериментального зала синхрофазотрона. Сверхпроводящий короткозамкнутый виток был размещен только в камере второй секции магнита Ламбертсона (рис. 2), так как рассеянные поля в первой секции имеют приемлемую величину.

В 2000 г. медленный вывод был реализован и успешно использовался для проведения физических экспериментов вплоть до 2011 г. В этот период нуклотрон эксплуатировался

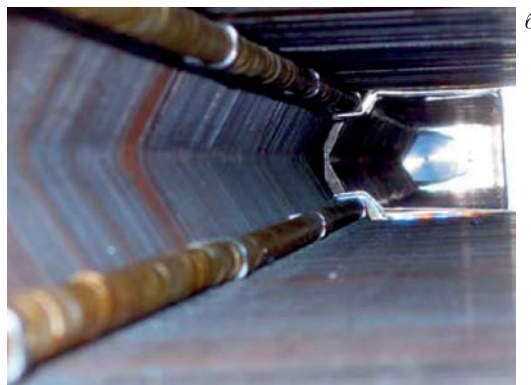
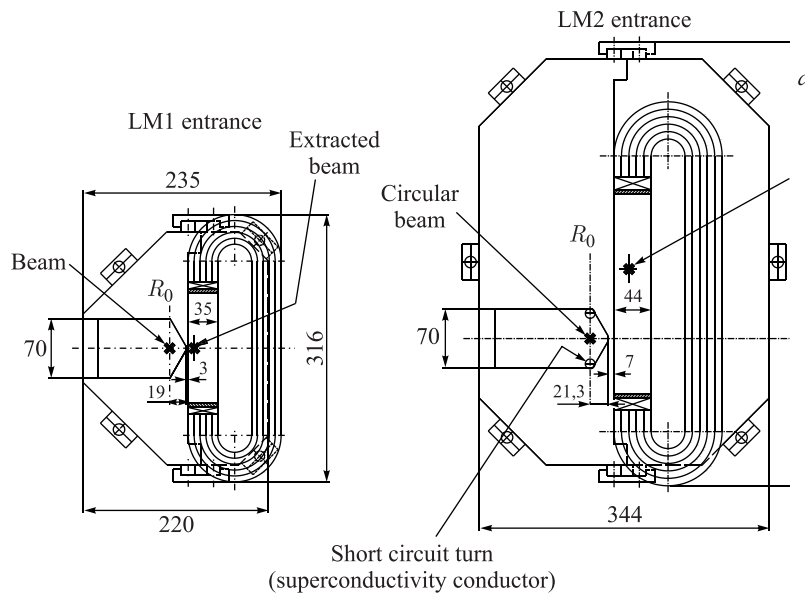


Рис. 2. а) Конструкция секций магнита Ламбертсона LM1 и LM2. б) Размещение короткозамкнутого витка в камере магнита LM2

в основном при поле дипольных магнитов, не превышающем 1,2 Тл. Ограничение было вызвано состоянием систем питания и защиты магнитов. В результате модернизации нуклотрона, проведенной в период с 2007 по 2010 гг., была обеспечена возможность надежной эксплуатации магнитной системы ускорителя при увеличении поля вплоть до максимальной проектной величины. Это позволило начать работы по поэтапному повышению энергии ускоренного пучка, необходимому для реализации программы физических исследований. В ходе сеанса в декабре 2011 г., при работе с полем дипольных магнитов 1,5 Тл, был экспериментально обнаружен эффект снижения интенсивности пучка, захваченного в режим ускорения, вызванной процессами в короткозамкнутом витке магнита Ламбертсона [4]. Причиной этого эффекта является наличие в витке спая, имеющего ненулевое значение сопротивления.

При разработке магнитной системы нуклотрона была предложена оригинальная технология пайки сверхпроводящего кабеля, обеспечивающая рекордно низкое сопротивление участка соединения [5]. Для осуществления спая два соединяемых участка кабеля, предварительно лишенные изоляции и облуженные, сближаются друг с другом и обматываются с натягом также облуженным сверхпроводящим проводом (обычно диаметром 0,5 мм). Далее места соединения пропаиваются тем же припоем. Для пайки кабеля на нуклотроне использовался свинцово-оловянный припой ПОС-61. Основное отличие такой технологии от обычно используемой (с применением медных накладок) состоит в том, что в этом случае длина пути тока через несверхпроводящую медь составляет лишь доли миллиметра. В результате сопротивление спая длиной порядка 100 мм оказывается на уровне 1 нОм. Сопротивление такой величины (даже при наличии нескольких сотен паяных соединений на периметре ускорителя) не оказывает никакого влияния на работу систем питания и детектирования переходов структурных элементов нуклотрона. Однако в случае короткозамкнутого витка его наличие приводит к диссипации небольшой части энергии в ходе цикла магнитного поля. В результате по завершении цикла в витке продолжает циркулировать небольшой ток, имеющий направление, противоположное направлению тока в ходе цикла. От цикла к циклу величина этого «замороженного» тока увеличивается, и магнитное поле, создаваемое этим током, может оказывать возмущающее действие на инжектируемый пучок.

В последующих сеансах этот эффект был детально исследован и выработана методика, позволяющая обеспечить ускорение и вывод пучка при больших полях дипольных магнитов.

Решение этой проблемы имеет большое практическое значение: в настоящее время проводится подготовка нуклотрона к его работе в составе инжекционной цепочки коллайдера NICA. Для этого на орбите ускорителя будут дополнительно размещены система ввода пучка из бустера и система быстрого вывода пучка в коллайдер, которые будут также реализованы на основе использования магнитов Ламбертсона.

## **1. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В КОРОТКОЗАМКНУТОМ ВИТКЕ**

Для изучения процессов, протекающих в короткозамкнутом витке, на него был установлен разборный датчик тока на основе датчика Холла совместно с датчиком температуры. Датчик тока состоит из двух половин стального цилиндра (материал сталь 3) с внешним диаметром 36 мм и высотой 30 мм, между которыми установлены стеклотексто-

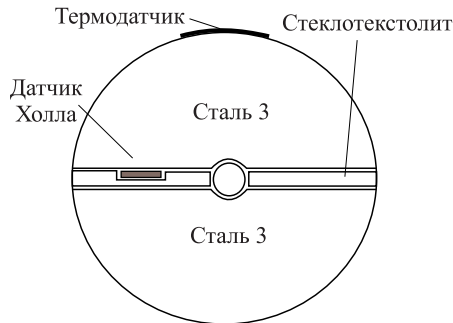


Рис. 3. Конструкция датчика тока, размещенного на короткозамкнутом витке

литовые пластины, в одной из которых находится углубление для датчика Холла (рис. 3). В центре цилиндра — отверстие для сверхпроводящего кабеля, в котором измеряется величина тока. Для измерений был выбран датчик Холла HGCT-3020, работающий при криогенных температурах. Термодатчик припаян к одному из стальных полуцилиндров. Калибровка датчика тока, проведенная при комнатной температуре при значениях силы тока до 200 А вместе со стальными полуцилиндрами и без них, показала, что использование стального экрана позволило увеличить чувствительность примерно в 10 раз.

Кроме того, на короткозамкнутый виток была установлена спираль для нагрева, позволяющая переводить виток в нормальнопроводящее состояние без отепления соседних элементов магнитной системы.

При подаче цикла магнитного поля в короткозамкнутом витке возбуждается ток, амплитуда которого растет линейно с амплитудой поля в дипольных магнитах до уровня поля примерно 1,1 Тл (рис. 4). При дальнейшем повышении поля начинается насыщение железа септума магнита Ламбертсона, что приводит к резкому увеличению амплитуды тока в короткозамкнутом витке, при поле 2 Тл она достигает значения примерно 2,5 кА, что находится в хорошем соответствии с расчетами, выполненными при проектировании магнита Ламбертсона.

Рост тока, «замороженного» в витке в паузе между циклами, при последовательном повторении циклов поля иллюстрирует рис. 5, на котором приведена зависимость тока

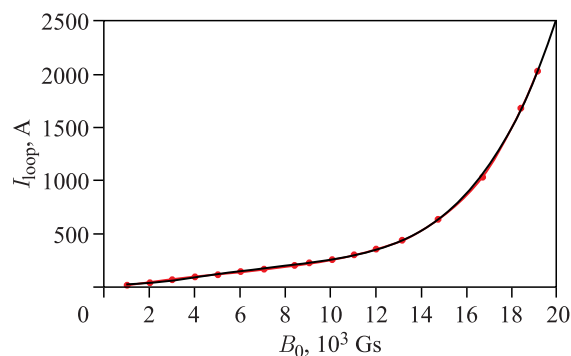


Рис. 4. Амплитуда тока в короткозамкнутом витке как функция поля дипольных магнитов

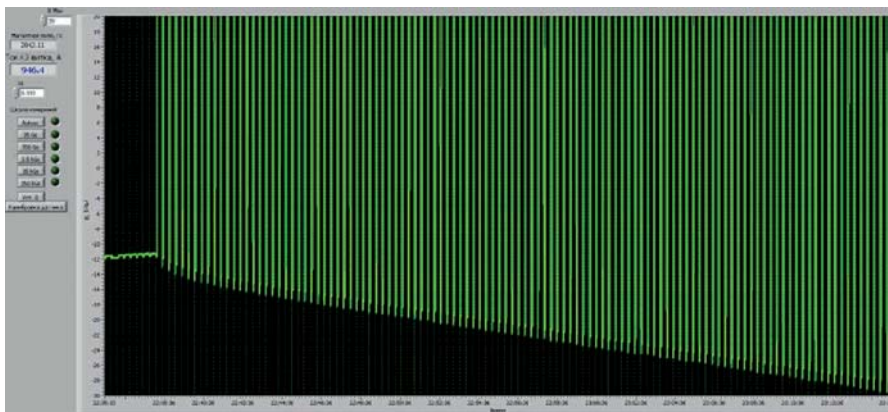


Рис. 5. Ток короткозамкнутого витка (в амперах) в ходе цикла поля как функция времени, время по горизонтальной оси выведено в формате часы : минуты : секунды

витка от времени. Она снята при амплитуде поля дипольных магнитов примерно 1,6 Тл, что соответствует амплитуде тока в витке около 1 кА. Масштаб по вертикали выбран таким образом, чтобы была отчетливо видна величина тока, имеющего отрицательное значение в паузе между циклами. Из рисунка видно, что при выбранных параметрах цикла примерно за 40 мин работы в витке «накопился» ток примерно 30 А.

Для оценки величины сопротивления спая были проведены измерения постоянной времени затухания наведенного тока. При этом с помощью нагревателя виток переводился в нормальнопроводящее состояние, подавался цикл поля, затем нагревательная спираль отключалась таким образом, чтобы виток перешел в сверхпроводящее состояние, когда магнитное поле имеет максимальное значение. По завершении цикла магнитного поля в витке «захватывался» ток величиной до 1,5–2 кА.

На рис. 6 приведена зависимость тока витка от времени, где на экспериментальные точки наложены фитирующие кривые, соответствующие экспоненциальному спаду.

Зависимость имеет отчетливый перегиб в интервале тока примерно 400–800 А, при этом при снижении тока сопротивление спая уменьшается примерно в четыре раза. Пря-

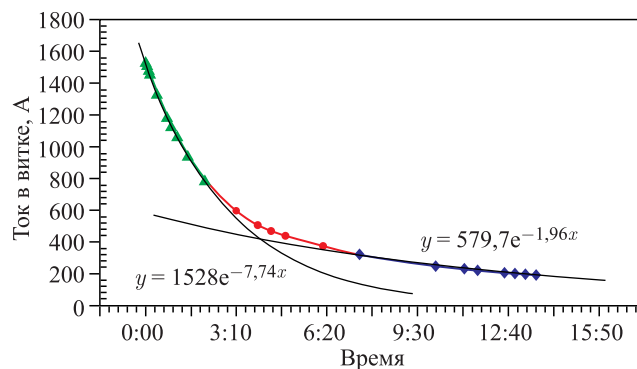


Рис. 6. Зависимость тока короткозамкнутого витка от времени в отсутствие цикла магнитного поля

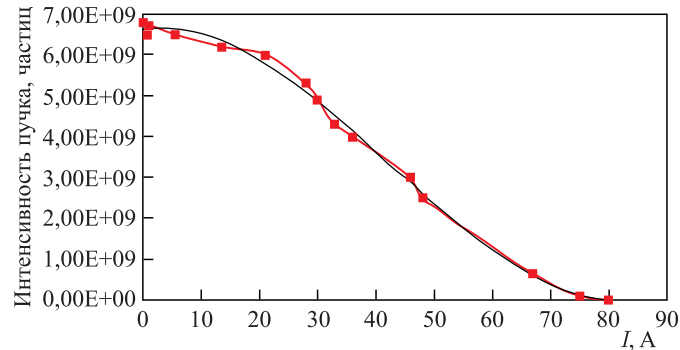


Рис. 7. Зависимость количества ускоренных ионов от тока, «замороженного» в короткозамкнутом витке

мые измерения индуктивности витка не проводились из-за технических трудностей, связанных с такой процедурой. Расчетное значение индуктивности составляет примерно  $3,5 \cdot 10^{-6}$  Гн. Соответственно, сопротивление витка составляет 1,9 нОм при малых значениях тока и 7,5 нОм при токе выше 800 А. Наиболее вероятно, что такое поведение сопротивления объясняется свойствами использованного припоя.

При описанной технологии пайки значение сопротивления спая определяется так называемым внутренним сопротивлением многожильного сверхпроводящего провода, когда ток в нем течет поперек оси кабеля, и сопротивлением припоя. Припой ПОС-61 при рабочей температуре кабеля 4,5 К является сверхпроводником, однако он может переходить в нормальнопроводящее состояние при пропускании через него тока, превышающего критическое значение, или, что в данном случае более вероятно, когда магнитное поле в месте его расположения превышает верхнее критическое значение (обычно несколько сотен Гс).

Для исследования влияния тока, «замороженного» в короткозамкнутом витке, на динамику пучка ионов при инжекции была проведена серия измерений, в ходе которой все настройки ускорителя оставались неизменными. Пучок дейтронов ускорялся до энергии примерно 4 ГэВ/нуклон (что соответствует амплитуде поля дипольных магнитов примерно 1,5 Тл). Ускоритель настраивался таким образом, чтобы при нулевом токе в короткозамкнутом витке все потери частиц происходили только в первые 150–200 мс после импульса инжекции, а затем при ускорении до максимальной энергии потери не превышали нескольких процентов. Наличие в витке тока до  $\sim 20$  А (рис. 7) практически не сказывается на интенсивности ускоренного пучка. При дальнейшем увеличении «замороженного» тока интенсивность пучка начинает снижаться и при  $\sim 75$ –80 А ток ускоренного пучка становится ниже порога регистрации штатного трансформатора тока.

## 2. ПОЛЕ ТОКА КОРТКОЗАМКНУТОГО ВИТКА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ ПУЧКА ПРИ ИНЖЕКЦИИ

Для анализа явлений, наблюдаемых при накоплении тока в короткозамкнутом витке, было проведено моделирование динамики частиц при энергии инжекции с учетом магнитного поля, создаваемого витком [6].

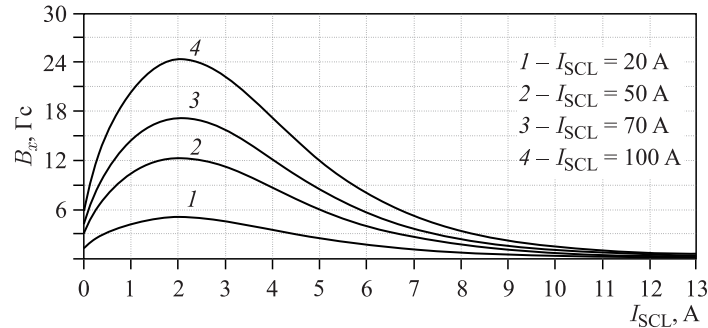


Рис. 8. Горизонтальная компонента магнитного поля короткозамкнутого витка (в гауссах) как функция расстояния от ножа септума (в сантиметрах). Параметр кривых — ток витка (в амперах)

Расчет магнитного поля витка в камере циркулирующего пучка, проведенный в центральном сечении магнита с помощью кода OPERA 2D в интервале токов витка от 20 до 100 А (рис. 8), показывает, что горизонтальная компонента поля линейно зависит от тока и достигает максимального значения в плоскости расположения витка (21,3 мм от ножа септума), которое при 100 А составляет примерно 25 Гс.

В первом приближении действие этого поля на циркулирующий пучок сводится к искажению вертикального положения замкнутой орбиты. При этом магнит Ламбертсона может быть рассмотрен как толстый вертикальный корректор с длиной 1,5 м. Поле дипольных магнитов при инжекции составляет примерно 290 Гс, что соответствует магнитной жесткости  $B\rho = 0,6$  Тл · м. При горизонтальной координате орбиты, соответствующей максимуму поля витка, сила корректора может быть оценена как

$$\frac{0,25 \text{ Гс/А} \cdot 1,5 \text{ м}}{0,6 \text{ Тл} \cdot \text{м}} \approx 0,6 \text{ мрад/А}.$$

Амплитуда возникающего при этом искажения вертикальной орбиты линейно зависит от силы корректора. На рис. 9 приведены результаты расчета программой MAD-X при силе корректора, равной 5 мрад. Результаты моделирования с использованием обоих стандартных средств пакета MAD-X: MICADO и SVD — показали, что из-за отсутствия на нуклотроне вертикального корректора в непосредственной близости от витка глобальная коррекция орбиты без значительного (сравнимого с начальным) локального ее искажения в области витка не представляется возможной.

В качестве примера результат коррекции орбиты методом SVD (применяемым на нуклотроне в ходе нескольких последних сеансов) приведен на рис. 10, из которого видно, что при существующей конфигурации системы коррекции остается остаточное искажение примерно 3 см. С учетом того, что радиус апертуры по вертикали в магните Ламбертсона составляет 3,5 см, можно ожидать, что накопление тока до уровня не более 80 А приведет к полной потере пучка при инжекции.

Если горизонтальное положение замкнутой орбиты смещено относительно плоскости короткозамкнутого пучка, то на орбите существует ненулевая производная поля по горизонтальной координате  $\partial B_x / \partial x$ . Его воздействие на динамику пучка эквивалентно



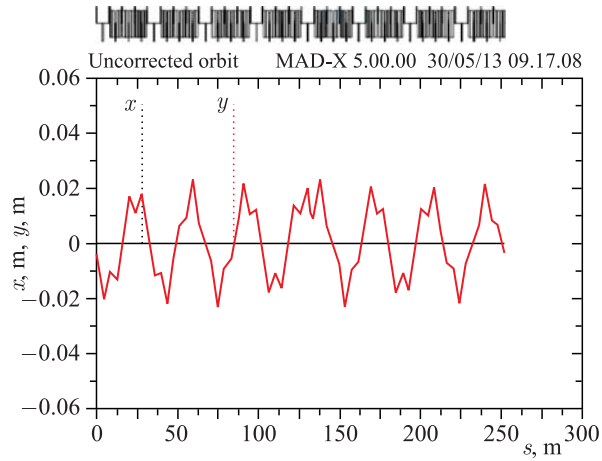


Рис. 9. Искажение вертикальной орбиты, вызванное действием толстого вертикального корректора силой 0,005 рад

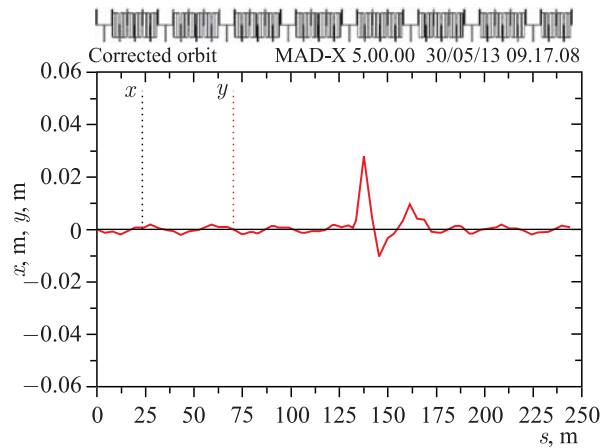


Рис. 10. Результат коррекции орбиты методом SVD. Сила толстого вертикального корректора 0,005 рад

действию «косого» квадрупольной длины 1,5 м с приведенной жесткостью

$$K1S = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_x}{\partial x}.$$

Нуклотрон обычно эксплуатируется вблизи  $Q_x \sim 7,28$ ,  $Q_y \sim 7,28$ . В этой рабочей точке расчет дает следующие значения смещения бетатронных частот из-за квадрупольной компоненты поля витка:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial K1S} \approx -0,8 \text{ м}^2, \quad \frac{\partial Q_y}{\partial K1S} \approx 0,8 \text{ м}^2.$$

Причем  $K1S > 0,2 \text{ м}^{-2}$  соответствует неустойчивости.

Максимальное значение квадрупольная компонента имеет при горизонтальной координате орбиты примерно 4 см от ножа септума и, например, при токе 50 А примерно равна 0,03 Тл/м. Это соответствует значению приведенной жесткости, равной 0,001 м<sup>-2</sup>/А. Ток, соответствующий неустойчивости пучка, составляет примерно 200 А, а смещение частот бетатронных колебаний составляет примерно 8 · 10<sup>-4</sup> А<sup>-1</sup>. Из этой верхней оценки видно, что данный эффект менее критично влияет на динамику частиц, чем искажение орбиты, и становится фатальным для инжектированного пучка при заторможенных больших токах, накопленных в короткозамкнутом витке.

И, наконец, вторая производная поля по горизонтальной координате  $\partial^2 B_x / \partial x^2$  эквивалентна по действию на динамику «косому» секступолю с приведенной жесткостью

$$K2S = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2}.$$

Например, при токе витка 100 А  $\partial^2 B_x / \partial x^2$  примерно равно -6 Тл/м<sup>2</sup> (см. рис. 9), что для приведенной жесткости дает примерно -0,1 м<sup>-2</sup>/А. Наличие секступольной компоненты поля витка приводит к уменьшению динамической апертуры нуклотрона. Форма динамической апертуры зависит от выбранной рабочей точки. В качестве примера на рис. 11 приведен результат расчета, выполненного по 1000 оборотам частиц в нуклотроне, при трех положениях рабочей точки в окрестности штатного.

Расчет выполнен при значении секступольного коэффициента, соответствующего току витка в 50 А. При этом динамическая апертура составляет ~ ±2 см, что уже примерно в два раза меньше, чем геометрический аксептанс ускорителя, рассчитанный с учетом искажения орбиты. При увеличении тока витка до 100 А динамическая апертура практически обнуляется.

Таким образом, снижение интенсивности ускоренного пучка из-за влияния поля, создаваемого током короткозамкнутого витка при инжекции, определяется двумя основными причинами — искажением замкнутой орбиты и уменьшением динамической апертуры ускорителя. При этом ток витка, соответствующий полной потере пучка при ин-

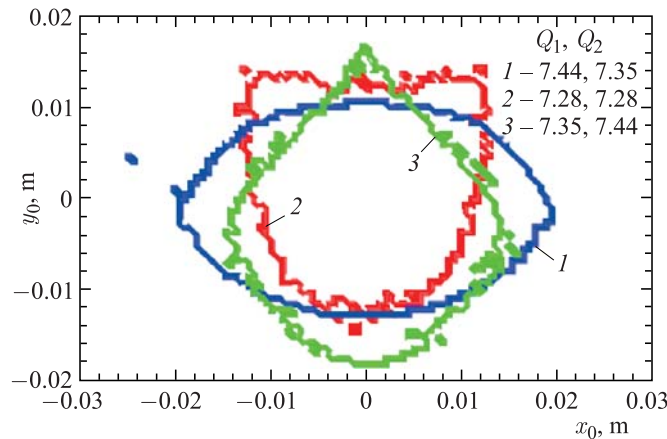


Рис. 11. Динамическая апертура для трех положений рабочей точки при секступольной («косой») нелинейности  $K2S$ , соответствующей току витка 50 А

жекции, составляет около 100 А, что находится в разумном соответствии с результатами измерений (см. рис. 7).

### 3. МЕТОДИКА РАБОТЫ ПРИ БОЛЬШИХ ПОЛЯХ

Проведенные расчеты показали, что влияние тока, накопленного в короткозамкнутом витке, на динамику инжектированного пучка невозможно компенсировать путем динамической коррекции параметров ускорителя. При этом при максимальной проектной амплитуде поля дипольных магнитов 2 Тл ток, соответствующий полной потере пучка при инжекции, накапливается в витке примерно за 50 циклов поля. Таким образом, длительная работа ускорителя при ускорении пучка до максимальной проектной энергии возможна только при периодическом обнулении тока витка, за счет его перевода в нормальнопроводящее состояние в течение паузы между циклами магнитного поля.

Для уменьшения потерь времени, связанных с этой процедурой, была разработана система управления током нагревательного элемента, расположенного на короткозамкнутом витке, позволяющая осуществлять импульсное включение нагревателя и синхронизировать его с требуемой фазой магнитного поля. С помощью этой системы была определена величина тока и длительность работы нагревателя, обеспечивающие надежный перевод витка в нормальнопроводящее состояние и восстановление сверхпроводимости в кратчайшее время. При этом требуемая длительность паузы между циклами составляет примерно 1,5 с (рис. 12), что практически не влияет на эффективность работы ускорителя. (Технологическая пауза между циклами, необходимая для тестирования системы детектирования переходов в нормальнопроводящую фазу, составляет на нуклотроне 1 с.)

Использование этой методики позволило в декабре 2013 г. обеспечить ускорение пучка до максимальной проектной энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 Тл, а в последующих сеансах обеспечить выполнение экспериментов в рамках программы физических исследований на пучках нуклотрона с энергией до 5,4 ГэВ/нуклон.

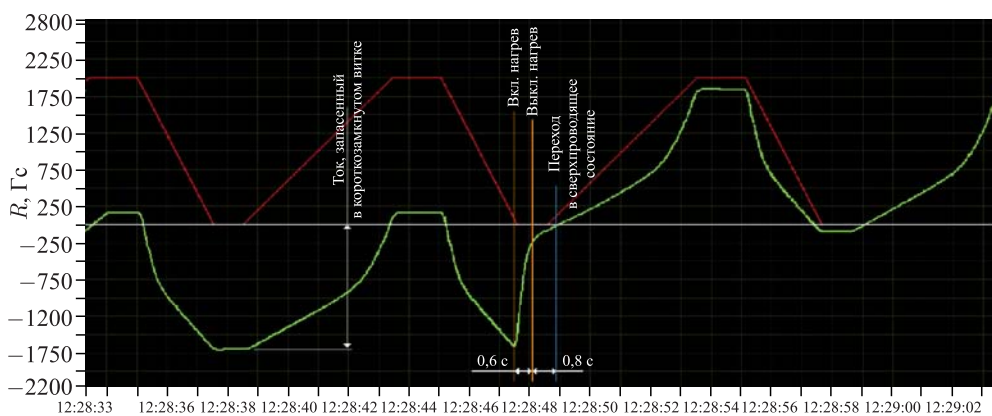


Рис. 12. Ток, протекающий в короткозамкнутом витке, при его переводе в нормальнопроводящее состояние с последующим восстановлением сверхпроводимости

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в ОИЯИ оригинальная разновидность конструкции магнита Ламбертсона, заключающаяся в размещении в камере циркулирующего пучка короткозамкнутого сверхпроводящего витка, обеспечивает требуемое качество магнитного поля вплоть до поля в камере выводимого пучка около 1,8 Тл. Однако при этом из-за ненулевого сопротивления спая на короткозамкнутом витке происходит постепенное накопление в нем тока, поле которого влияет на динамику пучка при инжекции. В результате экспериментальных исследований процессов, протекающих в короткозамкнутом витке магнита Ламбертсона системы медленного вывода пучка из нуклотрона, была отработана методика борьбы с последствиями этого эффекта. Она заключается в периодическом обнулении тока витка, за счет его перевода в нормальнопроводящее состояние в течение паузы между циклами магнитного поля, длительность которой составляет не более 1,5 с. Использование этой методики на нуклотроне обеспечило возможность ускорения и вывода пучка при максимальной проектной энергии.

Одним из неожиданных результатов этой работы явилось открытие явления, заключающегося в резком (примерно в 4 раза) увеличении сопротивления спая при увеличении протекающего через него тока. Наиболее вероятной его причиной является переход материала припоя из сверхпроводящего в нормальнопроводящее состояние.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов А. А., Коваленко А. Д.* Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ: создание, работа, развитие // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 6(123). С. 11.
2. *Vasilishin B. V., Issinsky I. B., Mikhailov V. A.* The Scheme and Main Parameters of the Nuclotron Slow Extraction System. JINR Commun. 9-86-511. Dubna, 1986.
3. *Averichev S. A. et al.* Progress in Manufacturing Main Nuclotron Extraction Elements // Proc. of EPAC. 1996. V. 3. P. 2435.
4. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 44-го и 45-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012.
5. *Гончаров И. Н., Миу Л.* Улучшенные паяные соединения сверхпроводящих токонесущих элементов. Сообщ. ОИЯИ Р8-87-315. Дубна, 1987;  
*Goncharov I. N., Min L.* // Cryogenics. 1988. V. 28, No. 3. P. 183–184.
6. *Валькович А. С.* Частное сообщение.