

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ВЕРШИНЫ ИМПУЛЬСА В НЕФЕРРОМАГНИТНОМ УДАРНОМ МАГНИТЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКОЙ

*Н. И. Лебедев, А. С. Петухов, А. В. Тузиков, А. А. Фатеев*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена концепция конструкции ударного магнита без ферромагнитного сердечника с двумя слабо связанными обмотками. Такая конструкция позволяет формировать плоскую вершину отклоняющего магнитного поля методом суперпозиции двух колоколообразных импульсов. Приведены конструкция макета и результаты тестовых измерений.

The concept of the design of a kicker magnet without a ferromagnetic core with two weakly coupled windings is presented. Such a design makes it possible to form a flat top of a deflecting magnetic field by the method of superposition of two bell-shaped pulses. The design of the layout and the results of test measurements are presented.

PACS: 29.20.-c

### ВВЕДЕНИЕ

В ударных магнитах без ферромагнитных сердечников отклоняющее магнитное поле формируется посредством токонесущих проводников и проводящих экранов. Один из наиболее простых вариантов такого магнита показан на рис. 1. На этом рисунке — достаточно распространенный случай, когда максимальная апертура циркулирующего пучка

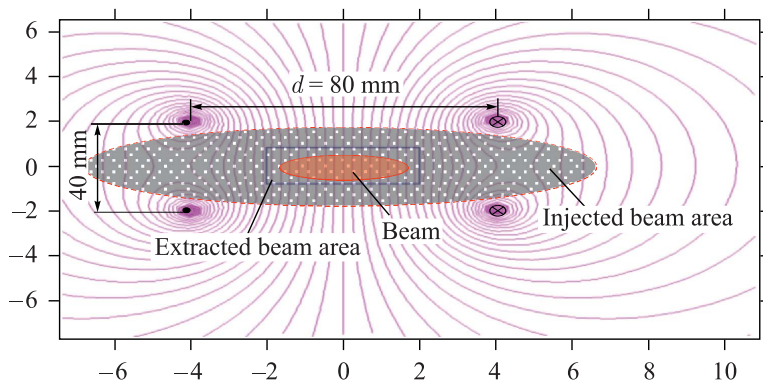


Рис. 1. Схема формирования магнитного поля токонесущими проводниками

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

значительно превосходит апертуру выводимого (инжектируемого) пучка. И именно в таких условиях энергетическая эффективность «безжелезного» варианта может сравниться или даже превышать эффективность традиционных вариантов. При этом однородность магнитного поля в рабочей области может достигать достаточно высоких значений.

Отсутствие ферромагнитного сердечника приводит к значительным рассеянным полям, но позволяет использовать метод суперпозиции для пространственной и временной коррекции магнитного поля.

## 1. «НЕСИММЕТРИЧНЫЙ» КИКЕР-МАГНИТ

При выводе пучков с размерами, значительно меньшими размеров камеры, в зоне вывода часто используют предварительное адиабатическое смещение пучка в сторону вывода — так называемый бамп. Это позволяет существенно снизить требования к величине интеграла поля ударного магнита.

Для таких вариантов вывода пучков была предложена «несимметричная» конструкция ударного магнита без ферромагнитного сердечника [1]. Принципиальная конструкция такого ударного магнита показана на рис. 2.

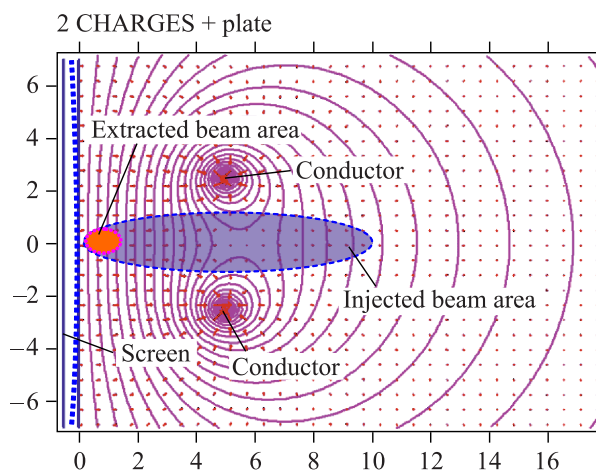


Рис. 2. Расположение элементов ударного магнита

Магнитное поле в области выводимого пучка формируется парой токнесущих проводников и проводящим экраном. В простейшем случае экран плоский. Небольшой изгиб экрана в сторону вывода может существенно улучшить однородность магнитного поля в рассматриваемой области [1].

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ВЕРШИНЫ ИМПУЛЬСА МАГНИТНОГО ПОЛЯ УДАРНОГО МАГНИТА

Импульс воздействия ударного магнита, как правило, должен иметь достаточно высокую плоскостность вершины в течение этого воздействия. При воздействии на короткие и редкие (одиночные) банчи достаточно иметь колоколообразный импульс. При временах воздействия, близких к времени оборота, фронт (при выводе) или спад (при инжекции)

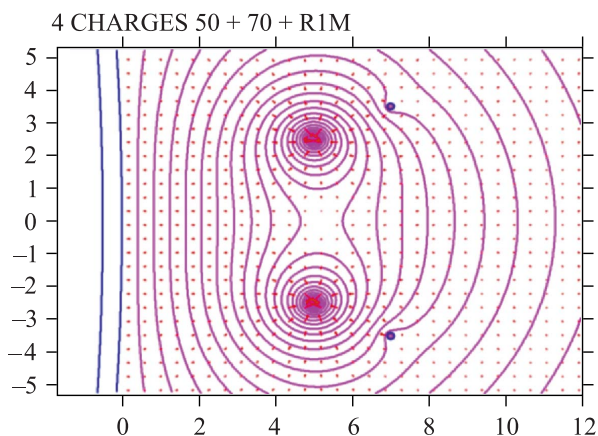


Рис. 3. Расположение элементов ударного магнита с корректирующими проводниками

должен быть намного меньше времени оборота. В таких случаях обычно используют традиционную схему с формирующими линиями, работающими на согласованную нагрузку с включенным последовательно ударным магнитом. Такие схемы имеют довольно низкую энергетическую эффективность (пиковая энергия магнитного поля/запасенная энергия).

Предлагается система питания, основанная на схемах с аperiodическим разрядом сосредоточенной емкости на индуктивную нагрузку. Такая схема позволяет сформировать колоколообразный импульс. Для формирования плоской вершины воздействующего импульса предлагается установить дополнительные токовые проводники (рис. 3) с колоколообразным импульсом воздействия меньшей длительности, амплитуды и противоположным по направлению.

В данном варианте основные проводники расположены на расстоянии 50 мм друг от друга и от проводящего экрана. Корректирующие проводники расположены на расстоянии 70 мм друг от друга и от проводящего экрана. Увеличение расстояний позволяет электрически изолировать цепи питания и снизить между ними индукционную связь.

### 3. КОНСТРУКЦИЯ МАКЕТА УДАРНОГО МАГНИТА С СОВМЕЩЕННЫМИ ФУНКЦИЯМИ ОТКЛОНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ВЕРШИНЫ

Для экспериментальной проверки возможности получения плоской вершины результирующего магнитного поля был изготовлен макет длиной 1 м (рис. 4).

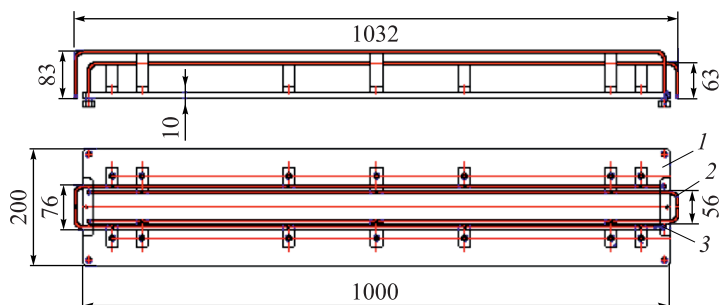


Рис. 4. Конструкция макета: 1 — экран; 2, 3 — основные и корректирующие проводники

С помощью этого макета были измерены реальные индуктивность и коэффициент связи пар проводников на частоте 100 кГц. На основе полученных данных смоделирована эквивалентная электронная схема для предварительных расчетов.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальной проверки рассчитанных данных были разработаны и изготовлены два импульсных генератора с транзисторными коммутаторами и дифференциальный измеритель магнитного поля на основе катушки индуктивности и двух каналов осциллографа (рис. 5).

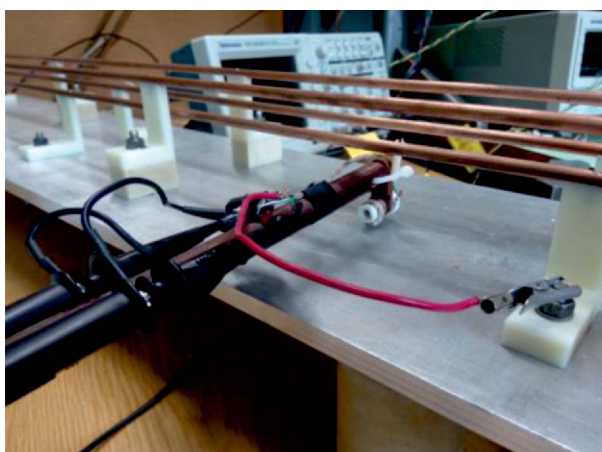


Рис. 5. Дифференциальный датчик магнитного поля

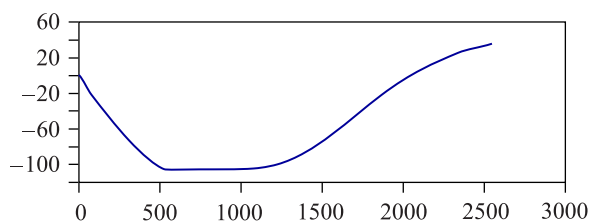


Рис. 6. Восстановленная форма импульса магнитного поля

Разностный сигнал пропорционален производной от величины магнитного поля в области измерительной катушки. Массив данных цифрового осциллографа позволяет легко провести интегрирование и восстановить реальную форму магнитного поля (рис. 6).

В данном эксперименте решалась задача получения плоской вершины длительностью около 500 нс при фронте 500 нс и произвольном спаде (вывод пучка). Гораздо сложнее решать таким способом задачи с ограниченным спадом (инжекция). Абсолютная величина поля на вершине легко вычисляется по значениям тока в проводниках.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотрена концепция формирования плоской вершины отклоняющего магнитного поля методом суперпозиции двух колоколообразных импульсов. Математическое моделирование и экспериментальная проверка показали практическую применимость такого подхода.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Aleksandrov V., Fateev A. A., Tuzikov A.* The Nonsymmetrical Variant of the Nonferromagnetic Extraction Kicker Magnet of the NICA Booster // Proc. of Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2016), St. Petersburg, Russia, 2016. P. 566–568.