

## МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, РАБОТАЮЩАЯ В АДИАБАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

*А.Б. Батраков, В.М. Залкинд, Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров, П.Т. Чупиков*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*

*Харьков, Украина*

*E-mail: anapon@kipt.kharkov.ua*

Спроектирована, рассчитана и изготовлена магнитная система, работающая в адиабатическом режиме от сети переменного тока. Полученные характеристики соленоида хорошо согласуются с расчетными, что позволяет использовать его для работы в сильноточных электронных ускорителях. Разработанная методика управления магнитным полем может быть предложена к использованию и на других сильноточных ускорителях.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, решаемых при транспортировке пучка электронов, является его фокусировка [1,2]. Возможности для фокусировки пучка довольно разнообразны. Однако наибольшее распространение получили методы магнитной фокусировки. Неизбежное влияние на траекторию движения электронов оказывают следующие факторы: рассеяние на остаточных газах, искажения силовых линий магнитного поля, связанные с наличием скин-эффекта, которые даже если и сами незначительны, могут существенно исказить движение частиц при транспортировке по камере дрейфа. На известных работающих ускорителях [3,4] используются импульсные магнитные поля, соленоиды которых запитываются от импульсных источников постоянного тока и создают ряд проблем при их эксплуатации, так как имеют в своей конфигурации накопители, балластные сопротивления, разрядники, трансформаторы и коммутирующие линии.

Целью данной работы являлось создание эффективной магнитной системы для транспортировки высокоэнергетического релятивистского электронного пучка за пределы металлических частей камеры транспортировки.

### РАСЧЕТ СОЛЕНОИДА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Транспортировка сильноточного электронного пучка требует применения фокусирующего продольного магнитного поля достаточно высокой напряженности, при которой ларморовский радиус электронов пучка, движущегося в таком поле, существенно меньше его диаметра (поперечных размеров пучка). При наличии поперечной энергии электронов пучка, которая может достигать нескольких килоэлектронвольт и поперечном размере пучка около 50 мм напряженность продольного фокусирующего магнитного поля должна составлять несколько килоэрсед.

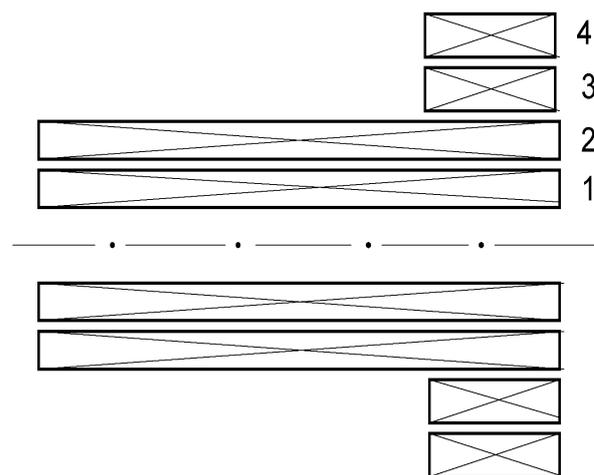
Это можно достигнуть, используя квазистационарный источник питания соленоида, имеющего большое число витков и потребляющего

меньший ток. Такое решение в значительной мере ослабляет требования, предъявляемые к изоляции обмоток соленоида, и существенно уменьшает пондеромоторные силы, действующие на проводники, через которые осуществляется подвод тока к соленоиду, находящемуся внутри камеры ускорителя.

В обмотках соленоида магнитного поля использовался эмалированный медный провод Ø1.2 мм.

Длина камеры дрейфа, на которую намотаны секции соленоида, составляет  $L_0=750$  мм, ее наружный диаметр равен 76 мм.

Для уменьшения тока в проводе обмотки соленоида и уменьшения полного сопротивления соленоида основные секции 1 и 2 соединены параллельно. Корректирующие секции 3 и 4 соединены последовательно с основными секциями 1 и 2 соответственно. Схема расположения секций магнитной системы приведена на Рис.1, а их соединение – на Рис.2.



*Рис.1. Расположение секций магнитной системы:  
1,2 – основные секции соленоида;  
3,4 – корректирующие секции соленоида*

Коммутацией основных и корректирующих секций соленоида, а также оптимизацией длины корректирующих секций удалось получить увеличение напряженности магнитного поля за срезом соленоида. Это дает возможность транспор-

тировать пучок за пределы металлических частей камеры дрейфа. Графики с результатами расчета напряженности соленоида с различными длинами корректирующих секций приведены на Рис.4.



Рис.2. Схема соединения секций обмоток соленоида

Общее число витков основных и корректирующих секций составляет  $N=2640$ .

Вопрос охлаждения и механической прочности соленоида очень важен. Для эффективного рассеяния тепла в магнитной системе должны выполняться следующие условия:

1) тепловое сопротивление между каркасом магнитного поля и обмоткой соленоида должно быть достаточно низким, т.е. примененная изоляция не должна препятствовать отводу тепла;

2) частота импульсов должна быть такой, чтобы соленоид успевал остыть.

Одновременное выполнение этих условий затруднено, поэтому эксплуатация магнитной системы происходит в адиабатическом режиме. Работа магнитной системы включает следующие этапы:

1. Зарядка генератора импульсных напряжений (ГИН).

2. Включение системы запуска магнитного поля, при этом фронт нарастания тока в магнитной системе составляет  $(4...5) \cdot 10^{-3}$  с.

3. Включение разряда ГИНа после достижения стабилизации тока в магнитном поле до нужной величины.

Суммарное время работы источника питания составляет  $(5...100) \cdot 10^{-3}$  с, в зависимости от условий эксплуатации.

Схема управления работой магнитной системы представлена на Рис.3.

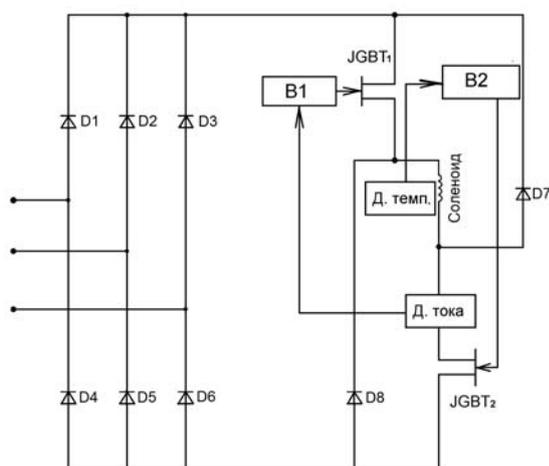


Рис.3. Схема управления магнитной системой

Для выпрямления напряжения использовалась схема Ларионова.

Блок управления В1 включает транзистор JGBT1 с постоянной частотой и переменной длительностью. Блок В2 подает напряжение на затвор транзистора JGBT2 и по соленоиду течет ток. Амплитуда тока в соленоиде регулируется блоком управления В2 транзистора JGBT2 при наличии диода D8.

Длительность импульса тока в соленоиде регулируется блоком управления В1 и транзистором JGBT1. Блок управления В1 регулируется с помощью датчика тока. При наличии диода D7 время, в течение которого ток в соленоиде с рабочего режима спадает до нуля, определяется величиной  $L/R$ . Индуктивность соленоида  $L=10,3$  мГн и полное сопротивление соленоида  $R=3,3$  Ом.

Для определения нагрева магнитной системы за импульс тока используем уравнение теплового баланса:

$$Q=I^2 R t=c m T, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество выделившегося тепла,  $I=180$  А – ток в соленоиде,  $R=3.3$  Ом – сопротивление обмотки соленоида,  $m=3.4$  кг – масса провода соленоида,  $t=50 \cdot 10^{-3}$  с – время работы магнитного поля,  $c$  – теплоемкость меди,  $T$  – температура.

$$T=I^2 R t/c \cdot m. \quad (2)$$

За такое время импульса тока в соленоиде обмотка нагревается на  $7^\circ\text{C}$ .

При нагреве соленоида до  $100^\circ\text{C}$  блок управления магнитной системы отключает ее от источника питания. Ее охлаждение при этом осуществляется в течение времени, которое необходимо для подготовки вакуумной системы к работе.

Напряженность магнитного поля рассчитывалась как суперпозиция напряженностей от всех витков соленоида. Напряженность магнитного поля в центре витка соленоида находилась по формуле:

$$H=0.4\pi I r_{cp}^2 / (r_{cp}^2 + Z^2)^{3/2}, \quad (3)$$

где  $I=180$  А – ток в соленоиде,  $r_{cp}=39$  мм – средний радиус основных секций соленоида,  $r1_{cp}=60$  мм – средний радиус корректирующих секций соленоида,  $r2_{cp}=70$  мм – средний радиус укороченных корректирующих секций соленоида,  $Z$  – длина от центра витка до расчетной точки.

$$H_n=\sum H_i, \quad (4)$$

где  $H_n$  – напряженность в  $n$ -й точке,  $H_i$  – напряженность от каждого витка соленоида.

На Рис.4 (ряд 1) приведено распределение напряженности от основных секций по 2400 витков и корректирующих секций по 240 витков, длиной 80 мм и радиусом  $r1_{cp}=50$  мм, полученной экспериментально.

На Рис.4 (ряд 2) приведены результаты расчета напряженности от основных секций по 2400 витков и корректирующих секций по 240 витков, длиной 80 мм и радиусом  $r1_{cp}=50$  мм.

На Рис.4 (ряд 3) приведены результаты расчета напряженности от основных секций по 2400 витков и корректирующих секций по 240 витков, длиной 40 мм и радиусом  $r2_{cp}=56$  мм.

На основании проведенного расчета видно, что оптимальная длина корректирующих секций – 80 мм. При более коротких корректирующих секциях силовые линии магнитного поля имеют очень крутой спад, а при более длинных корректирующих секциях их удлинение незначительное.

Экспериментально измеренные параметры напряженности магнитного поля согласуются с полученными в расчете. Индуктивность соленоида  $L=12.7$  мГн и полное сопротивление соленоида  $R=3.3$  Ом при частоте 50 Гц близки к расчетным.

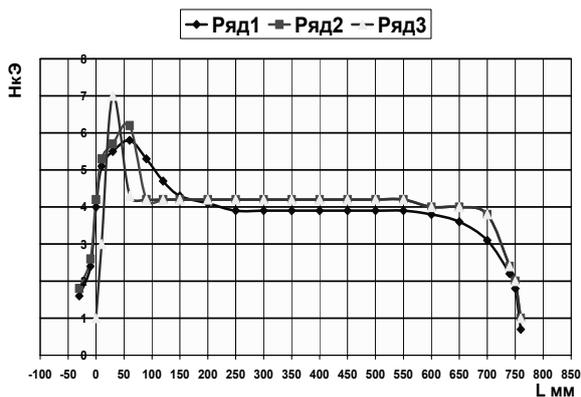


Рис.4. Распределение напряженности магнитного поля

### ВЫВОДЫ

1. Спроектирована, рассчитана и изготовлена магнитная система, работающая в адиабатическом режиме с изменяемой частотой следования

импульсов без использования накопителей, разрядников, трансформаторов, балластных сопротивлений.

2. Проведен расчет напряженности магнитного поля, создаваемого основными и дополнительными секциями соленоида по его длине. Обеспечено удлинение области транспортировки сильноточного РЭП, что позволит вывести область взаимодействия пучка с мишенью за пределы металлических частей камеры транспортировки. Это является определяющим требованием для проведения диагностических измерений.

3. Разработанная схема управления магнитным полем позволяет регулировать амплитуду тока, а также его длительность. Готовность к работе магнитной системы определяется миллисекундами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Ф. Ковалев, М.И. Петелин, М.Д. Райзер, А.В. Сморгонский // *Релятивистская высокочастотная электроника*. Горький: «ИПФ АН СССР», 1979, с.76.
2. А.Н. Диденко, В.П. Григорьев, Ю.П. Усов. *Мощные электронные пучки и их применение*. М.: «Атомиздат», 1977.
3. М.А. Власов, О.В. Никонов // *Радиотехника и электроника*. 1983, т.28, в.5, с.965.
4. Г. Кнопфель. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: «Мир», 1972.

Статья поступила в редакцию 20.05.2008 г.

### MAGNETIC SYSTEM FOR TRANSPORTATION HIGH CURRENT ELECTRON RELATIVISTIC BEAM, WORKING IN ADIABATIC MODE

*A.B. Batrakov, V.M. Zalkind, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, V.T. Uvarov, P.T. Chupikov*

The magnetic system working in adiabatic mode from network of an alternating current is designed, calculated and made. The received characteristics of the solenoid will well be coordinated with settlement that allows using it for work in high current electronic accelerators. The developed technique of management can be offered by a magnetic field to use and on others high current electronic accelerators.

### МАГНІТНА СИСТЕМА ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИЛЬНОСТРУМОВОГО РЕЛЯТИВІСТСЬКОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ЩО ПРАЦЮЄ В АДІАБАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

*О.Б. Батраков, В.М. Залкінд, Ю.Ф. Лонін, А.Г.Пономарьов, В.Т. Уваров, П.Т. Чупіков*

Спроектвано, розраховано та виготовлено магнітну систему, що працює в адиабатичному режимі від мережі змінного струму. Отримані характеристики соленоїда добре збігаються з розрахунковими, що дозволяє використовувати його для роботи в сильноточових електронних прискорювачах. Розроблена методика керування магнітним полем може бути запропонована до використання на інших сильноточових прискорювачах.