На правах рукописи

# Рычков Максим Михайлович

# МАЛОГАБАРИТНЫЙ БЕТАТРОН С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ МАГНИТОПРОВОДА

Специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет".

#### Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Чахлов Владимир Лукьянович

# Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Доктор технических наук, профессор

Москалев Владилен Александрович

Лисин Валерий Андреевич

## Ведущая организация:

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а, ауд. 329.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан "\_\_\_\_ и ноября 2010 г.

Ученый секретарьсовета по защите докторских и кандидатских диссертаций кандидат физикоматематических наук, доцент

*Касси* А.В. Кожевников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность работы.

Бетатрон – индукционный ускоритель электронов в настоящее время находит широкое применение в дефектоскопии различных материалов и промышленных изделий, в различных технологических процессах, в досмотровых системах, в промышленных томографах, в медицине для лечения раковых заболеваний. Такой интерес обусловлен тем, что бетатроны выгодно отличаются от других типов ускорителей электронов простотой, малой массой, удобством в эксплуатации и малыми затратами на изготовление, что, конечно, приводит к сравнительно небольшой цене готового ускорителя и низкой стоимости последующего обслуживания этих установок.

С развитием элементной базы, разработкой новых материалов И технологий бетатроны постоянно совершенствуются, и расширяются области их применения. Однако, как и на протяжении всей истории своего развития, одним из важнейших требований остается уменьшение массогабаритных параметров увеличение мощности экспозиционной излучения И дозы бетатронов. В этих условиях разработка новых дальнейшее И совершенствование существующих способов повышения мощности экспозиционной дозы излучения бетатрона представляет собой весьма актуальную задачу. Одним из способов, направленных на решение этой задачи, является подмагничивание магнитопровода электромагнита бетатрона постоянным или переменным током. За счет подмагничивания можно увеличить размах магнитной индукции в электромагните бетатрона, что либо уменьшить массогабаритные параметры электромагнита позволяет бетатрона, либо, при неизменных массогабаритных параметрах электромагнита, увеличить кинетическую энергию ускоренных электронов и тем самым, повысить мощность экспозиционной дозы излучения. Поскольку мощность экспозиционной дозы излучения связана с энергией ускоренных электронов зависимостью, применение подмагничивания электромагнита кубической представляет наиболее экономичный дальнейшего улучшения способ характеристик бетатрона.

Данная работа является научно-исследовательской работой, проводимой в НИИ интроскопии при ТПУ, по развитию одного из перспективных способов повышения интенсивности излучения бетатрона за счет подмагничивания его электромагнита постоянным или импульсным током.

#### Состояние вопроса.

Работа бетатрона с подмагничиванием магнитопровода (БПМ) для увеличения энергии ускоренных электронов впервые рассмотрена в появившихся почти одновременно статьях Вестендорпа [1] и Керста [2]. Ими

была предложена одна и та же идея, развитию которой в дальнейшем был посвящен ряд работ. Как можно судить по литературным источникам, общее количество разработанных и построенных БПМ для увеличения энергии ускоренных электронов составляет не менее 12 установок, но реальный физический запуск на излучение осуществлен только на некоторых из них, причем во всех работах указано на нестабильное ускорение электронов во времени от цикла к циклу, а полученная мощность экспозиционной дозы оказалась значительно ниже расчетной. Развитие элементной базы, особенно в коммутирующей аппаратуры, позволило повторно рассмотреть области причины неудачных запусков БПМ и предложить более совершенные конструкции магнитных систем и их схем питания [3,4]. Во всех упомянутых выше работах считалось, что применение подмагничивания магнитопровода целесообразно для ускорителей на большую энергию ускоренных электронов (от 10 МэВ и более), поэтому малогабаритные бетатроны (с энергией до 10 МэВ) не исследовались в этом направлении. Однако в 2002 в НИИ интроскопии при ТПУ был разработан малогабаритный бетатрон с подмагничиванием магнитопровода, в котором применяется магнитная система, предложенная Фурманом Э.Г. в [5]. Экспериментальное исследование такого ускорителя было проведено на базе малогабаритного серийно выпускаемого бетатрона ПМБ-6, который был запущен на излучение и показал достоинства БПМ [6]. Однако в дальнейших разработках опыт запуска этого бетатрона мало пригодился, поскольку разработанный малогабаритный БПМ на энергию 2,5 МэВ показал мощность экспозиционной дозы излучения ниже классического бетатрона, а малогабаритный разработанный БПМ энергию 12 МэВ на для интраоперационной терапии, вовсе не был запущен. Это говорит о том, что несмотря на удачный запуск БПМ на энергию 6 МэВ, электромагнитные процессы в таком бетатроне изучены слабо, и методика расчета узлов БПМ требует значительной корректировки.

**Целью работы** является теоретически обоснованное, экспериментальное подтверждение возможности создания малогабаритного БПМ и его исследование. Исходя из сформулированной цели, при выполнении работы решались следующие основные задачи:

- определение требований к магнитным системам бетатронов с подмагничиванием магнитопровода и их схемам питания;
- оценка влияния конструктивных элементов магнитной системы на характеристики управляющего магнитного поля, энергетические и массогабаритные показатели.
- разработка схем питания, позволяющих наиболее эффективным образом использовать преимущества БПМ;
- экспериментальное исследование малогабаритного бетатрона с подмагничиванием магнитопровода;
- оценка перспектив и целесообразности использования БПМ.

Методы исследований, используемые в диссертации, включали в себя математическое моделирование управляющих магнитных полей БПМ, экспериментальное электромагнитов исследование характеристик (энергии ускоренных электронов, потребляемой мощности, мощности экспозиционной дозы излучения) малогабаритных БПМ на энергию 2,5 МэВ и экспериментальное исследование топографии управляющего 7,5 MэB, поля магнитных измерений с использованием магнитного на основе специализированной аппаратуры, анализ схем питания и расчет основных узлов этих схем.

### Научная новизна.

Расчетами показано, что снижение показателя спада поля в межполюсном зазоре БПМ приводит к уменьшению энергии управляющего магнитного поля при сохранении объема области устойчивого движения электронов.

Рассмотрены вопросы изменения конфигурации областей устойчивого движения ускоряемых частиц в зависимости от геометрических размеров компенсационной обмотки. Показано, что выбор ее геометрических размеров оказывает существенное влияние не только на технико-экономические показатели, но и на работоспособность системы в целом.

Предложены, изготовлены и экспериментально проверены схемы питания, позволяющие наиболее эффективным образом использовать преимущества БПМ.

Для разработанных схем оценена величина электрической энергии, электронов необходимой для сброса на внешнюю мишень за счет перераспределения токов в обмотках электромагнита БПМ. Показано, что величина этой энергии в 8-10 раз меньше энергии сброса классического бетатрона.

Экспериментально показано, что коррекцию радиуса равновесной орбиты в начале цикла ускорения, которая обязательна в БПМ из-за нелинейности кривой намагничивания замкнутого магнитопровода, целесообразно инжекции. производить непосредственно В момент В ЭТОМ случае увеличивается конечная энергия ускоренных электронов, а значит, и техникоэкономический эффект от применения подмагничивания магнитопровода.

Экспериментально показано, что применение дополнительной системы контрактора, улучшающей условия захвата электронов в ускорение, позволяет в 1,7-2,3 раза повысить мощность экспозиционной дозы БПМ.

#### Практическая ценность.

На основании проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований можно разрабатывать магнитные системы малогабаритных бетатронов с подмагничиванием магнитопровода с

меньшими, чем у классических бетатронов, потребляемой мощностью и массогабаритными параметрами электромагнита при сохранении

мощности экспозиционной дозы излучения.

Предложена методика оценки фокусирующих свойств управляющего поля на основе магнитных измерений в медианной плоскости ускорителя.

Разработаны и экспериментально исследованы схемы питания, реализующие необходимые условия бетатронного ускорения. На основе этих исследований предложена схема питания с использованием мощных IGBT транзисторов. Данная схема позволяет уменьшить эффективное значение тока в обмотках электромагнита за импульс и повысить частоту следования импульсов, а значит, и мощность экспозиционной дозы излучения.

#### Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы, а именно разработанные магнитные системы и схемы питания, а также полученные математические соотношения для их расчета, внедрены в НИИ интроскопии при ТПУ и используются для разработки бетатронов с подмагничиванием магнитопровода для целей дефектоскопии, медицины и других областей. По результатам диссертационной работы запущен на излучение опытный образец бетатрона с подмагничиванием магнитопровода на кинетическую энергию ускоренных электронов 7.5 МэВ, который используется для проведения физических исследований.

## Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на:

- Десятом международном совещании по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине "Ускорители 2001" (г. Санкт-Петербург, 2001 г.).
- Восьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" (г. Томск, 2002 г.).
- Четвертой международной научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи энергии" посвященной 100-летию со дня рождения ректора ТПИ А.А. Воробьева (г. Томск, 2009г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах, из них 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК. По результатам работы получено 4 патента РФ на изобретение.

## Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Содержит 121 страницу машинописного текста, 50 рисунков, 3 таблицы и 90 библиографических ссылок.

### Тезисы, выносимые на защиту:

- 1. Электромагнит БПМ с увеличенным аксиальным и уменьшенным радиальным размером межполюсного пространства по сравнению с межполюсным пространством классического бетатрона имеет более высокие удельные характеристики.
- 2. Топография управляющего магнитного поля в рабочем объеме БПМ определяется как профильной поверхностью полюсов, так и геометрическими размерами компенсационной обмотки.
- 3. Высота компенсационной обмотки для малогабаритных бетатронов с отношением радиуса равновесной орбиты к внутреннему радиусу камеры в пределах 1,7...2,0 должна быть не более двойной высоты воздушного зазора на равновесном радиусе.
- 4. Применение системы контрактора в малогабаритном БПМ позволяет в 1,7-2,3 раза повысить интенсивность излучения.
- 5. Для увеличения технико-экономического эффекта БПМ на малые энергии коррекцию равновесного радиуса в начале цикла ускорения необходимо производить непосредственно в момент инжекции электронов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приведены обзор работ по проблеме и состояние исследований к моменту начала работы. Определены цель и задачи исследования для данной работы. Выделены основные положения, отражающие новизну проводимых исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

обшим Первая глава посвящена вопросам применения подмагничивания электромагнита бетатрона, обзору магнитных систем БПМ и схем питания, приведены их достоинства и недостатки. Обосновано, что для малогабаритных БПМ наиболее целесообразно применение магнитной системы с двумя обмотками: намагничивающей W1 и компенсационной W2 (рис. 1). магнитную целесообразно Данную систему запитать по схеме С последовательно-встречным включением обмоток (рис.2). В этом случае, в отличие от других схем питания, за счет меньших радиальных размеров компенсационной обмотки следует ожидать наибольший техникоэкономический эффект, а для создания условий бетатронного ускорения не требуется нагружать обмотки электромагнита на дополнительные реактивные элементы.

Схема питания на рис.2 работает следующим образом. В исходном состоянии от низковольтного источника питания ИП1 по обмотке возбуждения W1 через дроссель L0 протекает постоянный ток  $I_p$  (ток подмагничивания). К началу цикла ускорения состояние магнитопровода определяется магнитодвижущей силой обмотки возбуждения W1 и характеризуется начальным значением магнитной индукции в центральном сердечнике магнитопровода  $-B_{cmax}$ ,

которую целесообразно задавать близкой к индукции насыщения материла сердечника (электротехническая сталь).

При этом начальное значение магнитной индукции в области равновесной орбиты к началу цикла ускорения близко к нулю.

С приходом управляющих импульсов на тиристоры  $V1 \dots V4$  (начало цикла ускорения) включаются два тиристора, имеющие требуемую полярность емкостного накопителя Cн, начинается колебательный разряд конденсатора Cн на включенные последовательно и встречно обмотки W1 и W2. За счет магнитодвижущей силы компенсационной обмотки W2 магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения W1, перераспределяется, делясь на две части. Первая часть, определяемая разницей магнитодвижущих сил обмоток W1 и W2, замыкается через центральный сердечник магнитопровода, образуя центральный магнитный поток  $\Phi_c$ . Вторая часть, пропорциональная магнитодвижущей силе обмотки W2 (поток рассеяния между обмотками), замыкается через полюса по воздушному зазору межполюсного пространства, образуя магнитный поток в области равновесной орбиты  $\Phi_o$ .

Выполнение бетатронного соотношения 2:1 на радиусе равновесной орбиты  $r_0$  в таком БПМ достигается путем выбора соотношения витков обмоток *W*1 и *W*2.

Для работы такого бетатрона необходимо, чтобы число витков обмотки возбуждения W1 было больше числа витков компенсационной обмотки W2 ( $W_1 > W_2$ ). При  $W_1 = W_2$  – магнитный поток в центральном сердечнике

магнитопровода  $\Phi_c$  будет равен нулю и весь магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения W1, будет замыкаться в области равновесной орбиты. А при  $W_1 < W_2$  – магнитный поток в центральном сердечнике магнитопровода  $\Phi_c$  будет направлен в обратную сторону.

В отличие от бетатрона классической конструкции, в БПМ в течение процесса ускорения, за счет подмагничивания магнитопровода, получаются размахи магнитных индукций в центральном сердечнике магнитопровода  $\Delta B_c$ , который изменяется от начального значения  $-B_c_{max}$  до конечного значения  $+B_c_{max}$  (в классическом бетатроне от 0 до  $+B_{c_{max}}$ ). При этом магнитная индукция в области равновесной орбиты в течение процесса ускорения изменяется приблизительно от 0 до конечного значения  $+B_{o_{max}}$ . Больший размах магнитной индукции в электромагните БПМ по сравнению с аналогичным в электромагните классической конструкции приводит к увеличению конечной энергии электронов, а значит, и к увеличению мощности экспозиционной дозы излучения.

Электронный пучок в бетатроне выполняет роль витка и нагрузки одновременно. В процессе укорения электронов в магнитную систему бетатрона от внешнего источника поступает энергия, часть которой передается нагрузке – пучку электронов. Эффективность магнитной системы бетатрона тем выше, чем меньше затрачивается энергии для ускорения заданного количества электронов до заданной кинетической энергии. Для сравнения различных магнитных систем удобно использовать показатели:

$$J_{w} = \frac{QE_{k}}{W_{\mathcal{M}}},\tag{1}$$

$$J_{\rm G} = \frac{Q}{G_{\mathcal{M}}} \qquad , \tag{2}$$

где Q - ускоряемый заряд [Кл],  $W_{\mathcal{M}}$  -энергия магнитного поля [Дж],  $G_{\mathcal{M}}$  - масса активных материалов,  $E_{\kappa}$  – кинетическая энергия электронов;

Первый показатель отражает эффективность преобразования энергии питания, запасаемой в электромагните, в энергию излучения, генерируемого ускорителем. Второй определяет степень использования активных материалов электромагнита. Эти показатели зависят от выбора геометрических размеров межполюсного пространства, а именно от отношения:

$$\frac{b}{\delta_0} = \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{(1-n)}},\tag{3}$$

где:  $b=2(r_0 - r_b)$  ширина межполюсного пространства (ширина ускорительной камеры),  $r_b$ -внутренний радиальный размер межполюсного пространства (радиус центральных вкладышей в классическом бетатроне, внешний радиус компенсационной обмотки БПМ),  $r_o$ -радиус равновесной орбиты,  $\delta_o$ - аксиальная величина межполюсного пространства на равновесном радиусе, n – показатель спада поля на равновесном радиусе;

и отношения:

$$\gamma = \frac{r_0}{r_b},\tag{4}$$

Для малогабаритных бетатронов классической конструкции  $J_G$  и  $J_W$  максимальны при  $\gamma=1,7..2,0$  и показателе спада 0,55...0,7. Именно эти значения положены в основу методики расчета малогабаритных бетатронов классической конструкции.

Расчетами показателей *J<sub>G</sub>* и *J<sub>W</sub>* различных конфигураций межполюсного зазора БПМ на энергию 6 МэВ (таблица 1) показано, что критерии выбора геометрических размеров межполюсного зазора БПМ области. происходит удержание пучка электронов его ускорение, где И

Таблица 1

Показатель спада поля на	0,3	0,4	0,6	0,8
равновесном радиусе				
Индукция на равновесном радиусе, Тл	0,40	0,38	0,361	0,34
Расчетный равновесный радиус $r_0$ , м	0,054	0,057	0,060	0,64
Расчетный воздушный зазор	0,054	0,050	0,048	0,048
на равновесном радиусе $\delta_0$ , м				
Расчетный радиус полюсов, м	0,073	0,081	0,085	0,093
Отношение радиуса равновесной орбиты к внутреннему радиусу межполюного пространства у	1,54	1,63	1,71	1,83
Относительный показатель $J_w$	1,14	1,08	1	0,94
Относительный показатель <i>J</i> <sub>G</sub>	1,21	1,1	1	0,97

отличаются от общепринятых для бетатронов классической конструкции. Выделенной колонкой показаны относительные размеры межполюсного зазора и характеристики поля, принятые для серийно-выпускаемого бетатрона МИБ-6, которые для классического бетатрона являются оптимальными. При расчетах учитывалось, что объем области действия фокусирующих сил и плотность ускоряемого заряда должны оставаться неизменными.

Аналогичные зависимости можно получить и для малогабаритных БПМ другие энергии, поскольку магнитные системы классических на малогабаритных бетатронов геометрически подобны. Таким образом, магнитные системы БПМ, в основе которых приняты критерии выбора межполюсного зазора как у классических бетатронов, используемые в предыдущих работах, не позволяют реализовать всех преимуществ БПМ. Для уменьшения массогабаритных и энергетических параметров БПМ необходимо сокращать радиальный и увеличивать аксиальный размер межполюсного пространства и, соответственно, уменьшать показатель спада поля на равновесном радиусе для того, чтобы максимально использовать объем воздушного пространства, где происходит удержание и ускорение электронов.

Вторая глава посвящена исследованию влияния геометрических размеров компенсационной обмотки на топографию управляющего поля.

Поскольку магнитная система БПМ отличается от магнитной системы классического бетатрона наличием обмотки, которая расположена с

внутренней стороны области ускорения, естественно предположить, что эта обмотка влияет на топографию управляющего поля, так же как и блок центральных вкладышей в классическом бетатроне. Экономически выгодно выполнять компенсационную обмотку как можно меньшего радиального размера. Но объем компенсационной обмотки должен сохраняться, поскольку при заданной плотности тока в материале обмотки необходимо получить требуемые ампер-витки для создания определенной индукции магнитного поля в межполюсном зазоре. Следовательно, необходимо увеличивать ее аксиальный размер и располагать ее в пазах профильных полюсов. Во всех предыдущих работах, посвященных БПМ, выбор геометрических размеров обмотки осуществлялся только исходя из необходимого числа витков компенсационной обмотки, а отношение радиального размера к аксиальному лежало в широких пределах. Кроме того, в некоторых работах рассматривались магнитные системы с обмоткой разделенной в аксиальном направлении на две половины, т.е применялись пазовые обмотки. В данной работе показано, что выбор геометрических размеров этой обмотки влияет не только на техникоэкономические показатели магнитной системы БПМ, но и на возможность ускорения в целом.

Поскольку аналитически оценить влияние геометрии этой обмотки на топографию управляющего поля практически невозможно, а физическое моделирование очень трудоемко, на первоначальном этапе было проведено численное моделирование управляющих полей электромагнитов малогабаритных БПМ на энергию от 2,5 до 9 МэВ. Из множества численных методов выбран метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод широко распространен и занимает доминирующее положение при решении различных задач, в том числе и при расчете магнитных полей.

Для анализа фокусирующих свойств магнитного поля бетатрона в качестве расчетной величины удобно использовать векторный потенциал магнитного поля, поскольку знание его распределения в межполюсном пространстве дает наглядную картину области устойчивого движения электронов. При этом распределение векторного магнитного потенциала соответствует дифференциальному уравнению второго порядка:

$$\frac{1}{\mu_a} \left[ \frac{\partial^2 A}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} \right] = J \quad , \tag{5}$$

где:  $\mu_a$  – относительная магнитная проницаемость КЭ, J – плотность тока КЭ.

Граничные условия задаются по периметру магнитной системы и на оси симметрии, на которых векторный потенциал принимает нулевое значение.

В качестве критериев оценки свойств магнитного поля использовались показатель спада поля в медианной плоскости (рис. 3) и сечение области устойчивого движения электронов, которое ограничивается

эквипотенциалью векторного магнитного потенциала, проходящей через радиус в медианной плоскости, где показатель спада равен 1 (рис. 4). Математическое моделирование различных магнитных систем показало, что при аксиальном размере компенсационной обмотки равном величине воздушного зазора на внутреннем радиусе межполюсногого пространства т.е. когда компенсационная обмотка не располагается пазах полюсов, В конфигурация магнитного поля полностью определяется профильной аналогична конфигурации поля классического поверхностью полюсов и бетатрона (рис.3 кривая 1, рис. 4). По мере увеличения аксиального размера обмотки показатель спада в области близком к внутреннему радиусу межполюсного пространства уменьшается (рис. 3 кривые 2,3), однако область устойчивого движения практически не изменяется. При этом показатель спада на равновесном радиусе остается без изменений, при условии неизменности самого равновесного радиуса. Так происходит до тех пор, пока аксиальный размер обмотки меньше двойного воздушного зазора на равновесном радиусе. увеличении размера обмотки значение показателя спада При дальнейшем меняется не только в области малых радиусов, но и на равновесном радиусе (рис. 5). Область устойчивого движения резко изменяется, что приводит к уменьшению ускоряемого заряда, и, следовательно, к снижению мощности экспозиционной дозы излучения. Поэтому предельным аксиальным размером компенсационной обмотки можно принять двойную величину межполюсного зазора на равновесном радиусе.



Рис. 3. Изменение показателя спада поля при увеличении аксиального размера компенсационной обмотки для магнитной системы БПМ на энергию 6 МэВ.

Предельный радиальный размер обмотки необходимо рассчитывать из условий допустимой плотности тока компенсационной обмотки (8 A/мм<sup>2</sup>) и возможности достижения требуемой конечной энергии ускоренных



Рис.4. Область устойчивого движения электронов

при аксиальном размере компенсационной обмотки

меньшем двойной величины межполюсного зазора

на равновесном радиусе.

электронов. Поскольку для магнитных систем малогабаритных БПМ радиальный размер компенсационной обмотки вышеупомянутым ПО может условиям небольших изменяться в пределах, его влияние на топографию магнитного поля незначительно.

Моделирование

магнитных систем БПМ с разбитой компенсационной обмоткой на нижнюю и верхнюю половину и не выходящих из пазов

полюсов, которые предлагались рядом авторов, показало, что в этом случае система будет не работоспособной, поскольку область устойчивого движения становится очень малой, и в пределе вырождается в точку (рис.6).



Рис. 5. Показатель спада поля, когда аксиальный размер компенсационной обмотки больше двойной величины межполюсного зазора на равновесном радиусе БПМ на энергию 6МэВ.

В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных измерений управляющих полей двух магнитных систем БПМ. Первый электромагнит БПМ на энергию 2.5 МэВ, в котором высота компенсационной обмотки равна межполюсному зазору на равновесном радиусе, т.е. почти не входит в пазы полюсов. Второй электромагнит БПМ на энергию 7.5 МэВ, в

котором высота компенсационной обмотки предельно возможная. Для оценки показателей управляющего поля использовалась специализированная аппаратура собственного изготовления и предложенная методика, которая отличается тем, что для определения характеристик магнитного поля во всем межполюсном зазоре электромагнита необходимо выполнить измерение ЭДС на различных радиусах в одной медианной плоскости, наведенных причем все измеренные данные являются начальными условиями при описании управляющего поля. Данная методика предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений относительно векторного магнитного потенциала, и ее можно рассматривать как эффективный компромиссный вариант между быстрым и неточным аналитическим описанием магнитного поля, который требует минимального количества измеренных точек, и очень трудоемким измерением множества точек во всем объеме межполюсного Следует пространства. отметить хорошее согласие расчетных И экспериментальных данных, поэтому в дальнейших работах предполагается физического моделирования управляющих снизить долю полей электромагнитов бетатронов, заменив их численным.



Рис. 6. Эквипотенциаль векторного магнитного потенциала поля БПМ при разбитой на две половины компенсационной обмотке.

Предложена инженерная методика, позволяющая рассчитать электромагнит БПМ И его электрические характеристики, такие энергия магнитного как поля. индуктивности намагничивающей и компенсационной обмоток, взаимная индуктивность этих обмоток, эквивалентная индуктивность последовательно-встречно системы включенных обмоток. Эти данные необходимы при расчете схем питания выборе основных И ЭТИХ схем. На основе элементов данной методики выполнены расчеты малогабаритных БПМ на энергии 3, 6,

9 МэВ. При этом геометрия межполюсного зазора определялась параметрами имеющихся в наличии ускорительных камер, разработанных для классических бетатронов на соответствующие энергии.

На базе этих камер в настоящее время изготавливаются все модели классических бетатронов на энергии от 2,5 до 9 МэВ. Данные расчетов и сравнение с моделями бетатронов классической конструкции представлены в таблице 2. Как видно из таблицы, нельзя сказать однозначно, что все модели БПМ лучше бетатронов классической конструкции. Основной критерий – мощность экспозиционной дозы излучения в моделях БПМ ограничена предельной частотой следования импульсов излучения. В свою очередь частота импульсов излучения в БПМ определяется предельно допустимой плотностью

тока компенсационной обмотки. Плотность тока обмотки можно уменьшить за счет уменьшения энергии магнитного поля, т.е., как было показано в первой главе, изменением размеров межполюсного зазора. Увеличение аксиального и

Таблица 2.

Тип ускорительной камеры	РБК- 3	БУК-6	РБК-14-9
Габаритные размеры камеры (dвн dвнеш $\delta_0$ )	43x160x38	71x184x45	88x202x42
отношение $\gamma = \frac{r_0}{r_b}$	2,3	1,7	1,85
Значение показателя спада поля на равновесном радиусе	0,62	0,57	0,6
Энергия ускоренных электронов, МэВ	3	6	9
Радиус центрального сердечника, мм	15	26	32
Радиальный размер компенсационной обмотки, мм	6	9	12
Аксиальный размер компенсационной обмотки, мм	85	95	90
Максимальная частота следования импульсов излучения, Гц *	200	200	300
частота следования импульсов	100	• • • •	10.0
серийных бетатронов на те же	400	200	400
Энергии			
Расчетная мощность экспозиционной дозы БПМ на расстоянии 1м.	1.0 р/мин	3.0 р/мин	15 р/мин
мощность экспозиционной дозы			
серийных бетатронов на те же	2.0 р/мин	3.0 р/мин	20 р/мин
Уорфиционт I на спорионно с			
Коэффициент J <sub>w</sub> по сравнению с	1 22	1 3 8	1 20
конструкции	1,22	1,38	1,29
Корфиниент Ic по сравнению с			
бетатроном классической	1.12	1.31	1.37
конструкции	-,	-,~ -	-,~ ,

\* при плотности тока компенсационной обмотки 8 А/мм<sup>2</sup> и длительности импульса тока 1000 мкс.

уменьшение радиального размера даст положительный эффект, но для этого необходимо изменить размеры баллона ускорительной камеры. Таким образом, модели БПМ на базе имеющихся ускорительных камер по массогабаритным и энергетическим параметрам будут более выгодными в задачах, где не требуется высокая частота следования импульсов, или где режим работы

бетатрона допускает большую плотность тока обмоток. Например, в медицинских бетатронах длительность облучения пациента составляет несколько минут, а длительность перерыва между повторными включениями гораздо больше. В этом случае допустимая плотность тока может быть увеличена, и, соответственно, увеличена частота следования импульсов.

модели БПМ на базе имеющихся Также ускорительных камер выгодно применять промежуточные значения энергии. Например, на на базе камеры РБК-3 выпускается классический бетатрон на энергию 2,5 МэВ с частотой следования импульсов излучения 300 Гц. БПМ на ту же энергию с камерой РБК-3 будет иметь предельную частоту следования импульсов 400 Гц с таким же потреблением мощности от сети, а масса излучателя будет на 20% меньше. Другой пример – бетатрон на 5 МэВ для промышленного томографа на базе камеры БУК-6. БПМ на базе этой камеры будет иметь такую же частоту следования импульсов – 400 Гц, но потребление мощности от сети и масса излучателя будут меньше на 30% и 20% соответственно. Данные примеры показывают, что применение магнитной системы с подмагничиванием магнитопровода позволит дополнить линейку выпускаемых в настоящее время классических малогабаритных бетатронов более экономичными моделями на некоторые энергии для целей дефектоскопии, медицины и других областей, но полностью заменить модели малогабаритных классических бетатронов в настоящее время не удастся.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию схем питания БПМ, определению требований к схемам питания для обеспечения необходимых условий на этапах инжекции, ускорения и смещения ускоренных электронов, запуску бетатрона на излучение.

В работе приводятся несколько схем питания БПМ для магнитных систем со сбросом электронов на мишень и для систем с выведенным электронным пучком. На некоторые из них получены патенты РФ. Отличие всех предложенных схем питания БПМ от применяемых ранее – наличие возможности регулировки и стабилизации энергии ускоренных электронов. В настоящее время это требование является обязательным.

Одна из предложенных схем приведена на рис.7. В этой схеме, помимо основного колебательного контура W1, W2,  $C_{\rm H}$ , V2-V5, цепи подмагничивания ИП1, L01 параллельно диоду D2 подключена цепь ввода энергии ИП2, V1, которая служит для компенсации потерь за период импульса тока в тиристорномостовой схеме. С помощью тиристора V1 источник постоянного напряжения ИП2 включается на срезе импульса тока последовательно с электромагнитом. Поскольку через источник протекает ток, от него забирается энергия, которая вводится в воздушный зазор электромагнита. В установившемся режиме величина вводимой энергии равна энергии потерь в схеме за период и определяется выражением:

$$Q_{\rm\scriptscriptstyle B} = E * \int_0^t i(t) dt , \qquad (6)$$

где *Е* – напряжение источника питания.

Поскольку эта величина зависит от времени включения тиристора ввода, то, меняя время включения, можно регулировать поступившую в контур электрическую энергию, а значит, и энергию ускоренных электронов. Это и используется для стабилизации энергии ускоренных электронов.

При исследовании БПМ в предыдущих работах указывалось, что таким магнитным системам необходима коррекция равновесного радиуса в начале цикла ускорения. Это связано с нелинейностью кривой намагничивания замкнутого магнитопровода. Поэтому цепь коррекции в таких схемах питания обязательна.

Нами эта цепь (ИПЗ, R3, R4,  $C_{\kappa}$ ,  $V_{\kappa}$ ) была позаимствована из [6], но ее работа в данной схеме несколько отличается.

Во всех предыдущих работах предварительно заряженный конденсатор коррекции подключался к компенсационной обмотке вместе с цепи тиристорами основного контура. Авторы схем не обращали внимания на то, что цепь коррекции является тоже цепью ввода энергии. Но, поскольку эта цепь подключена только к одной обмотке, ввод энергии осуществляется не в межполюсный зазор электромагнита, а в замкнутый магнитопровод. Под действием этой энергии центральный сердечник перемагничивается и его индукция к моменту инжекции будет не  $-B_{c max}$ , а  $-B_{c}$ , которая меньше  $-B_{c max}$ . Действие цепи коррекции равносильно уменьшению тока подмагничивания, что вызывает уменьшение конечной энергии ускоренных электронов. Это уменьшение зависит от сечения центрального сердечника, сечения обратного магнитопровода и напряжения инжекции. По проведенным магнитным измерениям проигрыш по энергии для БПМ на энергию 2,5 МэВ составил 0,6 МэВ, а для БПМ на энергию 7,5 МэВ это значение составило 0,35 МэВ. Поскольку мощность экспозиционной дозы излучения и энергия ускоренных электронов связаны между собой кубической зависимостью, то для бетатронов на большие энергии это несущественно, но для 2,5 МэВ-ного БПМ интенсивность излучения будет в 2,27 раз ниже.

Для того, чтобы этого избежать, необходимо включать тиристор цепи момент ввода коррекции непосредственно В электронов камеру. В Действительно, до момента инжекции абсолютно не важно, что бетатронное соотношение не выполняется, и радиус равновесной орбиты не соответствует расчетному. Важно выполнить все условия после инжекции электронов в камеру бетатрона. Если цепь коррекции начинает работу вместе с инжекцией, то подключенный конденсатор цепи коррекции будет разряжаться, отдавая запасенную энергию в замкнутый магнитопровод, но в этом случае вызванное изменение индукции в центральном сердечнике будет ускорять электроны, причем равновесный радиус будет скорректирован и соответствовать расчетному.

Другой особенностью является то, что в данной схеме эта цепь включается два раза за период ускорения. В первый раз как цепь коррекции равновесного радиуса, второй - как цепь сброса. Первоначально в схеме была предусмотрена отдельная цепь сброса электронов на внешнюю

17

мишень. По своей работе это тоже цепь ввода энергии в замкнутый магнитопровод электромагнита, поэтому схема сброса аналогична цепи коррекции. После подбора элементов цепи сброса (по уровню излучения) оказалось, что энергия цепи сброса БПМ на энергию 2,5 МэВ в 8 раз меньше энергии сброса классического бетатрона, а для БПМ на энергию 7,5 МэВ эти энергии отличаются в 10 раз. Конденсатор цепи коррекции работает в режиме неполного разряда, поэтому в нем остается большая часть запасенной энергии. Хотя величина этой энергии в 2-2,5 раза превышает требуемую для сброса энергию, совмещение цепи коррекции и сброса оправдано, поскольку при этом исключаются несколько элементов, а главное, источник напряжения.

Таким образом, когда эта цепь включается первый раз происходит частичный разряд конденсатора, компенсируя нелинейность кривой намагничивания, когда цепь включается в конце цикла ускорения конденсатор разряжается почти до нулевого значения, вызывая сброс электронов.

Еще одна особенность предложенной схемы питания - это возможность применения системы контрактора. В настоящее время все выпускаемые бетатроны классической конструкции имеют такую систему, поскольку это один из перспективных путей повышения числа ускоренных электронов. В БПМ такие системы не применялись.



Рис. 7. Схема питания БПМ.

При запуске на излучение с системой контрактора получили наибольшую мощность экспозиционной дозы, соответствующую расчетной. Поэтому можно сделать вывод: в БПМ, также как и в бетатроне классической конструкции, целесообразно применение контрактора.

Поскольку контрактор изменяет как равновесный радиус, так и топографию магнитного поля в рабочем зазоре электромагнита, а коррекция только равновесный радиус, то по результатам запуска БПМ на излучение можно сделать вывод: применяемые для улучшения техники ввода механизмы при нашей системе инжекции действуют в основном за счет быстрого изменения топографии управляющего поля.

В диссертационной работе приводятся осциллограммы токов, напряжений и магнитных индукций в схемах питания БПМ. Приведен пример расчета элементов схемы питания БПМ.

На базе исследованной схемы питания предложена схема питания БПМ на основе мощных IGBT транзисторов. Данная схема работает при неполном однополярном разряде основного емкостного накопителя, что позволяет получить в обмотках квазитреугольную форму тока. Данное обстоятельство позволит уменьшить действующее значение тока в обмотках,

что позволит повысить частоту следования импульсов и, следовательно, мощность экспозиционной дозы излучения.

Таким образом, в результате выполненной работы, теоретически и экспериментально показаны преимущества подмагничивания электромагнита бетатрона. Разработанные схемы питания позволяют наиболее экономично обеспечить условия ускорения в БПМ. Определены основные требования, которыми должны обладать схемы питания БПМ. Данные схемы являются простыми и многофункциональными, позволяют изменять положение равновесного радиуса на всем этапе ускорения только путем регулирования небольших дополнительных потоков энергий, поступающих в колебательный контур ускорителя (коррекция равновесного радиуса, работа контрактора, сброс электронов на внешнюю мишень).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- На основе обзора магнитных систем бетатронов с подмагничиванием магнитопровода, применяемых ранее, и их схем питания обосновано, что для малогабаритного БПМ наиболее целесообразно применять систему с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной. В этом случае следует ожидать наибольший техникоэкономический эффект.
- 2. Теоретически обосновано, что для увеличения технико-экономического эффекта от подмагничивания целесообразно увеличивать аксиальный и уменьшать радиальный размеры, сохраняя объем области действия фокусирующих сил.
- 3. Математическим моделированием показано И экспериментально проверено, что конфигурация управляющего поля в рабочем объеме ускорителя определяется как профильной поверхностью полюсов, так и размером компенсационной обмотки, что необходимо аксиальным учитывать при проектировании межполюсного зазора электромагнита. Определены основные требования геометрическим параметрам К магнитных систем БПМ.
- 4. Предложена методика исследования фокусирующих свойств магнитного поля бетатрона на основе магнитных измерений в медианной плоскости электромагнита.
- 5. Показано, что использование магнитных систем БПМ, разработанных на базе имеющихся ускорительных камер малогабаритных бетатронов, позволит дополнить линейку выпускаемых в настоящее время классических малогабаритных бетатронов на энергию 2,5-10 МэВ более экономичными моделями на те же энергии для целей дефектоскопии, медицины и других областей.

- 6. Предложены, разработаны и экспериментально проверены схемы питания, наиболее экономичным которые позволяют образом использовать преимущества БПМ. Исследованы электрические процессы В разработанных схемах на этапах инжекции, ускорения и сброса. Определены требования, предъявляемые схемам к питания, для обеспечения условий ускорения на всех этапах.
- 7. Ha основании проведенных данной работе теоретических В И экспериментальных исследований разработаны И изготовлены электромагниты БПМ на энергию 2,5 и 7,5 МэВ. Бетатрон на 7,5 МэВ запущен на излучение и показал интенсивность излучения не хуже бетатрона классической конструкции при меньшем потреблении энергии и меньшей массе электромагнита.

## Цитируемая литература:

- 1. Westendorp W.F. The use of direct current in induction accelerators.// Journ. Appl. Phys., 1945. V.16, №4, p.657-660
- 2. Kerst D.W. Methodof increasing betatron energy. // Journ. Phys. Rev., 1945, volume 68, № 2, p.233-234.
- Васильев В.В., Москалев В.А., Фурман Э.Г. Бетатрон с подмагничиванием. // ПТЭ. - 1979. - № 4.С.27-29.
- 4. Васильев В.В. Дисс. канд. техн. наук. Томск: ТПИ, 1979.
- 5. Фурман Э.Г. Магнитная система индукционного ускорителя. Авт. свидетельство № 524477. Бюллетень изобретений № 29, 1976.
- 6. Чертов А.С. Дисс. канд. техн. наук. Томск: ТПУ, 2002.

### По теме диссертационной работы опубликованы следующие работы:

- Касьянов В.А., Рычков М.М., Филимонов А.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С., Штейн М.М. Экспериментальное исследование малогабаритного бетатрона с подмагничиванием.// Сборник докладов Х Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001г. - М.: ЦНИИ атоминформ, 2001. - С.113-116.
- 2. Рычков М.М., Чертов А.С. Конструкции электромагнитов бетатронов с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной.//Труды VIII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ,2002-С.102-104.
- **3.** Рычков М.М. Анализатор магнитных полей малогабаритных бетатронов.// Труды VIII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2002 - С.98-100.

- **4.** Рычков М.М., Чертов А.С., Чахлов В.Л. Бетатрон с размагничиванием магнитопровода с выведенным электронным пучком.//Известия Томского политехнического университета. 2002. Том 305.-Вып.5. С.11-16.
- Rychkov M.M. Chertov A.S. Feed circuit of betatron with the controlled energy of the extracted electrons.// 8-th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists "Modern Techniques and Technology". Tomsk – 2002. - P.53-55.
- **6.** Рычков М.М., Фурман Э.Г., Чертов А.С., Чахлов В.Л. Конструкции бетатронов с размагничиванием магнитопровода.// Известия Томского политехнического университета. 2002. Том 305.-Вып.5. С.7-11.
- 7. Рычков М.М., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Бетатрон с размагничиванием магнитопровода с выведенным электронным пучком.// Приборы и техника эксперимента. 2003.- №4. С.1-4.
- 8. Рычков М.М. Чахлов В.Л. Схема питания бетатрона с размагничиванием магнитопровода.// Материалы IV-ой международной научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи энергии", посвященной 100-летию со дня рождения ректора ТПИ А.А. Воробьева. Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2009 С.266-271.
- **9.** Рычков М.М., Чертов А.С. Импульсная система питания бетатрона с размагничиванием магнитопровода. Патент РФ № 2218678 от 22.12.03.
- 10.Рычков М.М., Фурман Э.Г., Чертов А.С. Конструкция электромагнита бетатрона с размагничиванием магнитопровода. Патент РФ №2230441 от 21.06.04.
- 11.Рычков М.М., Чертов А.С. Импульсная система питания бетатрона с размагничиванием магнитопровода. Патент РФ № 2231938 от 27.06.04.
- 12.Волков В.Г., Рычков М.М., Токач Е.Ф., Филипьев А.М., Штейн М.М., Источник излучения радиационного дефектоскопа. Патент РФ №92285 от 10.03.10.