

ЧЕРТОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**БЕТАТРОН С РАЗМАГНИЧИВАНИЕМ
МАГНИТОПРОВОДА**

Специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена в НИИ интроскопии при Томском политехническом университете.

Научный руководитель:

Чахлов Владимир Лукьянович
д.т.н., профессор,
директор НИИ интроскопии при ТПУ, г. Томск

Официальные оппоненты:

Клёнов Геннадий Иванович
д.т.н., с.н.с. МРТИ РАН, г. Москва

Семёнов Валерий Дмитриевич
к.т.н., доцент кафедры
"Промышленной электроники" ТУСУР, г. Томск

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники СО РАН,
г. Томск

Защита диссертации состоится "_____" _____ 2002 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при Томском политехническом университете (634050 г. Томск, пр. Ленина, 30).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета (г. Томск, ул. Белинского, 53).

Автореферат разослан "_____" _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ В.К. Кононов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Бетатроны, разрабатываемые в Томском политехническом университете, последнее время пользуются спросом и поставляются на промышленные предприятия и в медицинские учреждения России и за рубеж. Бетатроны выгодно отличаются от других типов ускорителей электронов простотой, малой массой, удобством в эксплуатации и малыми затратами на изготовление. Несмотря на растущий интерес к использованию бетатронов для дефектоскопии материалов и изделий, в медицине и в других областях, их внедрения в ряде случаев ограничиваются низкой интенсивностью излучения. В этих условиях разработка новых и дальнейшее совершенствование существующих способов повышения интенсивности излучения бетатрона представляет собой весьма актуальную задачу. Решение ее позволит расширить применение бетатронов в промышленности, медицине и других областях.

Одним из способов, связанных с повышением интенсивности излучения является размагничивание магнитопровода электромагнита бетатрона постоянным или переменным током. За счет размагничивания можно увеличить размахи магнитных индукций в частях магнитопровода электромагнита бетатрона. Данное обстоятельство позволяет либо уменьшить массогабаритные параметры электромагнита бетатрона, понизив при этом его стоимость, либо, без изменения массогабаритных параметров электромагнита, увеличить кинетическую энергию ускоренных электронов и, тем самым, повысить интенсивность излучения.

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

Состояние вопроса.

Все разработанные и созданные ранее бетатроны с размагничиванием магнитопровода [1-4] показали невысокую интенсивность излучения, вследствие того, что не был реализован частотный режим работы таких бетатронов ($f \geq 50$ Гц). На практике не было также реализовано одно из основных преимуществ таких бетатронов, по сравнению с классическим бетатроном [5] – уменьшение энергии колебательного контура за счет устранения центрального воздушного зазора в магнитопроводе электромагнита, и не продемонстрировано повышение кинетической энергии ускоренных электронов за счет увеличения размахов магнитных индукций в частях магнитопровода электромагнита.

К настоящему времени наиболее простым и перспективным из

бетатронов с размагничиванием магнитопровода является бетатрон, в котором обмотка возбуждения включена последовательно и встречно с компенсационной обмоткой, т.к. в его магнитной системе содержится минимальное число обмоток – всего две, которые не нагружены на дополнительные, громоздкие реактивные элементы. В дальнейшем будем его называть просто бетатрон с размагничиванием магнитопровода (БРМ). Магнитная система такого бетатрона была предложена Фурманом Э.Г. в [6]. Исследование такого бетатрона не было проведено.

Цель работы.

Исследование и разработка БРМ, в котором обмотка возбуждения включена последовательно и встречно с компенсационной обмоткой.

Исходя из сформулированной цели, при выполнении работы, были поставлены следующие задачи:

- разработка магнитной системы бетатрона с размагничиванием магнитопровода;
- разработка схем питания, позволяющих наиболее эффективным образом реализовать режим работы БРМ;
- вывод основных соотношений, позволяющих производить расчет БРМ;
- экспериментальное исследование бетатрона с размагничиванием магнитопровода;
- оценка перспектив и целесообразности использования БРМ.

Методы исследования.

Включали в себя экспериментальные исследования характеристик БРМ, зависимости изменения радиуса равновесной орбиты от времени и показателя спада магнитного поля от радиуса, расчеты параметров и характеристик такого бетатрона и сопоставление их с экспериментальными данными.

Научная новизна.

Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность формирования в рабочем зазоре БРМ электромагнитного поля удовлетворяющего всем необходимым для ускорения электронов условиям – за счет последовательно-встречного включения обмоток возбуждения и компенсационной.

Экспериментально показано, что в БРМ, при массогабаритных параметрах его электромагнита равным массогабаритным параметрам электромагнита классического бетатрона, за счет размагничивания магнитопровода можно увеличить кинетическую энергию ускоренных электронов и, тем самым, повысить интенсивность излучения.

Экспериментально показано, что в БРМ за счет устранения центрального воздушного зазора энергия колебательного контура будет

меньше, чем у классического бетатрона, на величину энергии запасаемой в этом зазоре.

Предложена, разработана и экспериментально проверена цепь коррекции, позволяющая в широких пределах электрически регулировать радиус равновесной орбиты в начале цикла ускорения.

Предложены, разработаны и экспериментально проверены схемы питания, позволяющие наиболее эффективным образом реализовать режим работы БРМ.

Проверен способ смещения ускоренных электронов на внешнюю мишень – за счет увеличения разницы магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и компенсационной.

Проверен принцип действия БРМ с расположением компенсационной обмотки в пазах полюсов магнитопровода электромагнита.

Практическая ценность.

На основании проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований можно разрабатывать бетатроны с размагничиванием магнитопровода, с меньшими, чем у классических бетатронов, потребляемой мощностью и массогабаритными параметрами емкостного накопителя и электромагнита.

Разработанные на основании диссертационных исследований схемы питания БРМ позволяют:

- за счет цепи коррекции электрически регулировать в широких пределах положение радиуса равновесной орбиты в момент инжекции электронов в вакуумную ускорительную камеру, что упрощает настройку бетатрона на максимальное излучение;
- смещать ускоренные электроны с равновесной орбиты на внешнюю мишень за счет разницы магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и компенсационной, без использования в схеме питания цепи сброса, состоящей из генератора импульсов и обмотки, располагаемой в межполюсном пространстве электромагнита, что упрощает эксплуатацию бетатрона и повышает надежность его работы;
- за счет сокращения спадающей части заднего фронта импульса тока компенсационной обмотки уменьшить эффективное значение тока этой обмотки в 1.5 раза по отношению к эффективному значению тока обмотки возбуждения, что повышает технико-экономический эффект от размагничивания магнитопровода электромагнита;
- реализовать частотный режим работы БРМ.

Реализация.

Результаты диссертационной работы, а именно разработанная магнитная система и схемы питания, а также полученные математические соотношения для их расчета, внедрены в НИИ интроскопии при ТПУ и используются для разработки бетатронов с размагничиванием магнитопровода для целей

дефектоскопии, медицины и других областей. По результатам диссертационной работы был изготовлен опытный образец бетатрона с размагничиванием магнитопровода на кинетическую энергию ускоренных электронов 7.6 МэВ, который используется для проведения физических исследований.

Апробация работы.

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

- Семнадцатом совещании по ускорителям заряженных частиц (г. Протвино, 2000 г.).
- Седьмой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" (г. Томск, 2001 г.).
- 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.).

Тезисы, выносимые на защиту:

1. В рабочем зазоре электромагнита БРМ за счет последовательно-встречного включения обмоток возбуждения и компенсационной можно сформировать магнитное поле, удовлетворяющее всем необходимым для ускорения электронов условиям.
2. В БРМ за счет размагничивания магнитопровода массогабаритные параметры электромагнита будут меньше, чем у классического бетатрона, и технико-экономический эффект будет зависеть от отношения сечения центрального сердечника магнитопровода к сечению обратного магнитопровода, плотности тока в меди обмоток электромагнита, формы тока этих обмоток и кинетической энергии ускоренных электронов.
3. В БРМ за счет устранения центрального воздушного зазора энергия колебательного контура будет меньше, чем у классического бетатрона, на величину энергии запасаемой в этом зазоре, и технико-экономический эффект будет зависеть от отношения объема центрального воздушного зазора к объему межполюсного пространства магнитопровода электромагнита.
4. В БРМ можно электрически регулировать в широких пределах положение радиуса равновесной орбиты в момент инжекции электронов в вакуумную ускорительную камеру, оптимизируя тем самым захват

электронов в ускорение за счет выбора оптимальной вихревой э.д.с. в момент захвата.

5. В БРМ можно осуществлять смещение ускоренных электронов на внешнюю мишень за счет увеличения разницы магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и компенсационной, совмещая этот процесс, с вводом энергии в колебательный контур и улучшением теплового режима компенсационной обмотки.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 16 статей, получены патент Российской Федерации на изобретение и три положительных решения по заявкам на предполагаемые изобретения.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 117 страниц машинописного текста, 49 рисунков, 6 таблиц и 84 библиографические ссылки.

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.

Первая глава посвящена вопросам разработки, исследования и расчета магнитной системы (электромагнита) БРМ (рис.1), в которой обмотка возбуждения $W1$ включена последовательно и встречно с компенсационной обмоткой $W2$ (рис.2).

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 размагничивания). К началу цикла ускорения магнитное состояние магнитопровода определяется магнитодвижущей силой обмотки возбуждения $W1$ и характеризуется начальным значением магнитной индукции в центральном сердечнике магнитопровода $-B_{c \max}$ и начальным значением магнитной индукции в обратном магнитопроводе

$$-B_{o.m.n} = -B_{c \max} \frac{S_c K_c}{S_{o.m} K_{o.m}} \text{ [Тл]}, \quad (1)$$

6. где S_c – сечение центрального сердечника магнитопровода [м^2]; K_c – коэффициент заполнения центрального сердечника магнитопровода ферромагнитным материалом; $S_{o.m}$ – сечение обратного магнитопровода

$[M^2]$; $K_{o.m}$ – коэффициент заполнения обратного магнитопровода ферромагнитным материалом.

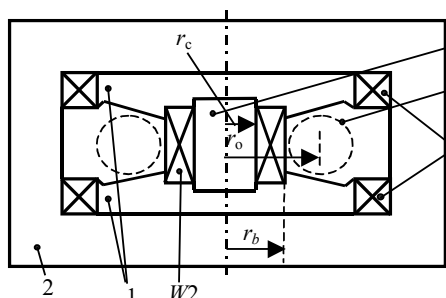


Рис.1. Электромагнит БРМ, где: 1 – полюса магнитопровода; 2 – обратный магнитопровод; 3 – центральный сердечник магнитопровода; 4 – вакуумная ускорительная камера.

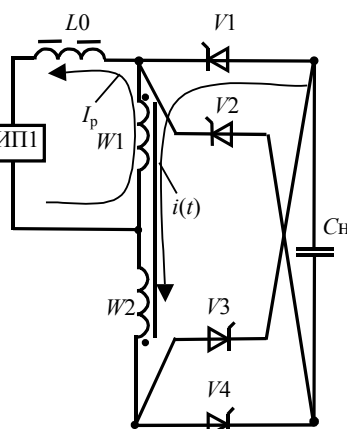


Рис.2. Схема питания БРМ.

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 C_n , начинается колебательный разряд конденсатора C_n на включенные последовательно и встречно обмотки $W1$ и $W2$. За счет магнитодвижущей силы компенсационной обмотки $W2$, магнитный поток в обратном магнитопроводе $\Phi_{o.m}$, 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 Φ_c . Вторая часть, пропорциональная магнитодвижущей силе обмотки $W2$, замыкается через полюса по воздушному зазору межполюсного пространства, образуя магнитный поток в области равновесной орбиты Φ_o .

Выполнение бетатронного соотношения 2:1 на радиусе равновесной орбиты r_o в БРМ достигается путем выбора соотношения витков обмоток $W1$ и $W2$.

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 Φ_c будет равен нулю и весь магнитный поток $\Phi_{o.m}$, создаваемый обмоткой возбуждения $W1$, будет замыкаться в области равновесной орбиты, т.е. $\Phi_{o.m} = \Phi_o$. А при $W_1 < W_2$ – магнитный поток в центральном сердечнике магнитопровода Φ_c будет направлен в обратную сторону.

К концу цикла ускорения магнитное состояние магнитопровода характеризуется конечным значением магнитной индукции в центральном сердечнике магнитопровода $+B_{с \max}$ и конечным значением магнитной индукции в обратном магнитопроводе $+B_{о.м \max}$.

В итоге, в течение процесса ускорения, за счет размагничивания магнитопровода, получаются размахи магнитных индукций в центральном сердечнике магнитопровода $\Delta B_{с}$, который изменяется от начального значения $-B_{с \max}$ до конечного значения $+B_{с \max}$ и в обратном магнитопроводе $\Delta B_{о.м}$, который изменяется от начального значения $-B_{о.м.н}$ до конечного значения $+B_{о.м \max}$. При этом магнитная индукция в области равновесной орбиты в течение процесса ускорения изменяется приблизительно от 0 до конечного значения $+B_{о \max}$.

Таким образом, теоретически обоснован новый способ формирования электромагнитного поля в БРМ – за счет последовательно-встречного включения обмоток возбуждения и компенсационной.

Выделим основные свойства БРМ по сравнению с классическим бетатроном (при выделении свойств полагаем, что у данных бетатронов одинаковые – кинетическая энергия ускоренных электронов, интенсивность излучения, частота следования импульсов излучения и сечение вакуумной ускорительной камеры).

В электромагните БРМ, в отличие от электромагнита классического бетатрона нет центрального воздушного зазора. Следовательно, для возбуждения электромагнита БРМ требуется меньшее количество энергии на величину энергии запасаемой в этом зазоре, что соответственно приводит к уменьшению массогабаритных параметров емкостного накопителя C_n и потребляемой мощности бетатрона

Величина энергии, запасаемая в центральном воздушном зазоре электромагнита классического бетатрона, определяется следующим образом [5]

$$Q_{ц.з} = \frac{F_{ц.з \max} \Phi_{с \max}}{2} = \frac{B_{с \max}^2 \delta_{ц.з} S_{ц} K_{ц}}{2\mu_0} \text{ [Дж]}, \quad (2)$$

где $F_{ц.з \max}$ – амплитудное значение падения магнитного напряжения в центральном воздушном зазоре [Ампервитки]; $\Phi_{с \max}$ – амплитудное значение центрального магнитного потока [Вб]; $B_{с \max}$ – амплитудное значение магнитной индукции в наборе центральных вкладышей [Тл]; $\delta_{ц.з}$ – высота центрального воздушного зазора [м]; $S_{ц}$ – сечение набора центральных вкладышей [м²]; $K_{ц}$ – коэффициент заполнения набора центральных вкладышей ферромагнитным материалом; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ – магнитная постоянная [Гн/м].

Во сколько раз энергия колебательного контура БРМ будет меньше энергии колебательного контура классического бетатрона можно определить из выражения

$$K_1 = \frac{Q_{\max}^{\text{КБ}}}{Q_{\max}} = \frac{1}{(Q_{\max}^{\text{КБ}} - Q_{\text{ц.з}})/Q_{\max}^{\text{КБ}}} = \frac{1}{1 - \frac{\Phi_{\text{с max}} F_{\text{ц.з max}}}{\Phi_{\text{о.м max}} F_{W1 \max}}}, \quad (3)$$

где $F_{W1 \max}$ – амплитудное значение магнитодвижущей силы обмотки возбуждения $W1$ [Ампервитки]; $\Phi_{\text{о.м max}}$ – амплитудное значение магнитного потока в обратном магнитопроводе [Вб].

Полагая $F_{W1 \max} \cong F_{\text{ц.з max}}$, из (3) получаем

$$K_1 \cong \frac{1}{1 - \frac{\Phi_{\text{с max}}}{\Phi_{\text{о.м max}}}}. \quad (4)$$

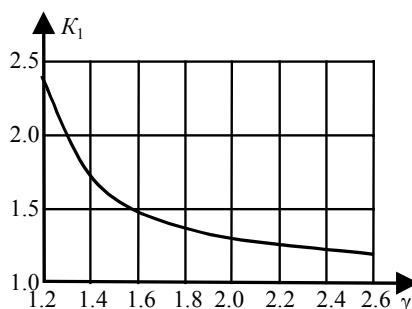


Рис.3. Зависимость отношения энергии колебательного контура классического бетатрона к энергии колебательного контура БРМ (K_1) от $\gamma = r_o/r_{\text{ц}} = r_o/r_b$.

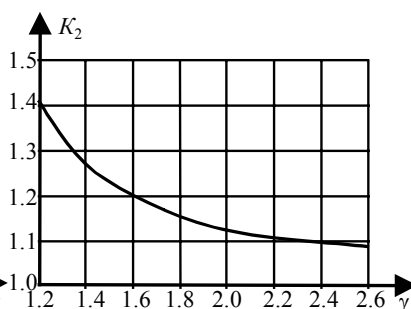


Рис.4. Зависимость отношения сечения обратного магнитопровода классического бетатрона к сечению обратного магнитопровода БРМ (K_2) от $\gamma = r_o/r_{\text{ц}} = r_o/r_b$.

На рис.3 приведена зависимость $K_1 = f(\gamma)$. Из данной зависимости видно, что чем меньше $\gamma = r_o/r_{\text{ц}} = r_o/r_b$ ($r_{\text{ц}}$ – радиус набора центральных вкладышей магнитопровода электромагнита классического бетатрона), т.е. чем большую часть центральный магнитный поток составляет от магнитного потока в обратном магнитопроводе, тем меньше будет энергия колебательного контура БРМ по сравнению с классическим бетатроном.

За счет размагничивания сечение обратного магнитопровода БРМ будет меньше сечения обратного магнитопровода классического бетатрона (в случае, если $\Delta B_{\text{с}} = 2B_{\text{с max}}$, $K_{\text{ц}} = K_{\text{с}} = K_{\text{о.м}}$ и $B_{\text{с max}} = B_{\text{о.м max}}$) в следующее количество раз

$$K_2 = \frac{S_{0.м}^{КБ}}{S_{0.м}} = \frac{\Delta B_{0.м}}{B_{0.м \max}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{S_c}{S_{0.м}^{КБ}}\right)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{S_{ц}}{2S_{0.м}^{КБ}}\right)}. \quad (5)$$

На рис.4 приведена зависимость $K_2 = f(\gamma)$. Из данной зависимости видно, что чем меньше $\gamma = r_o/r_{ц} = r_o/r_b$, т.е. чем большую часть сечение центрального сердечника магнитопровода составляет от сечения обратного магнитопровода, тем меньше будет сечение обратного магнитопровода БРМ по сравнению с классическим бетатроном.

Таким образом, в БРМ:

- за счет размагничивания магнитопровода массогабаритные параметры электромагнита будут меньше, чем у классического бетатрона, и технико-экономический эффект будет зависеть от отношения сечения центрального сердечника магнитопровода к сечению обратного магнитопровода;
- за счет устранения центрального воздушного зазора энергия колебательного контура будет меньше, чем у классического бетатрона, на величину энергии запасаемой в этом зазоре, и технико-экономический эффект будет зависеть от отношения объема центрального воздушного зазора к объему межполюсного пространства магнитопровода электромагнита.

Приведена инженерная методика, позволяющая рассчитать электромагнит БРМ.

Проведено сравнение БРМ и классического бетатрона по весу активных материалов электромагнита при различных кинетических энергиях ускоренных электронов и $\gamma = r_o/r_{ц} = r_o/r_b$.

Установлено, что эффект от размагничивания магнитопровода зависит от плотности тока в меди обмоток электромагнита, формы тока этих обмоток, отношения сечения центрального сердечника к сечению обратного магнитопровода и кинетической энергии ускоренных электронов.

Приводится, разработанная в диссертационной работе, конструкция электромагнита перспективного малогабаритного бетатрона для целей интраоперационной лучевой терапии.

Вторая глава посвящена вопросам разработки, исследования и расчета схем питания БРМ.

Обосновано, что в БРМ необходима коррекция радиуса равновесной орбиты в начале цикла ускорения из-за меньшего от требуемого нарастания магнитного потока в центральном сердечнике магнитопровода, вызванного нелинейностью петли гистерезиса ферромагнитного материала на начальном этапе перемещения.

В диссертационной работе предложена простая цепь коррекции, позволяющая в широких пределах регулировать радиус равновесной орбиты в начале цикла ускорения.

Особый интерес представляют предложенные и разработанные в диссертационной работе схемы питания, позволяющие наиболее эффективным образом реализовать режим работы БРМ. На рис.5 приведена одна из таких схем. В основу данной схемы питания положена идея снижения эффективного значения тока компенсационной обмотки $W2$ за счет сокращения длительности спадающей части импульсов тока в ней.

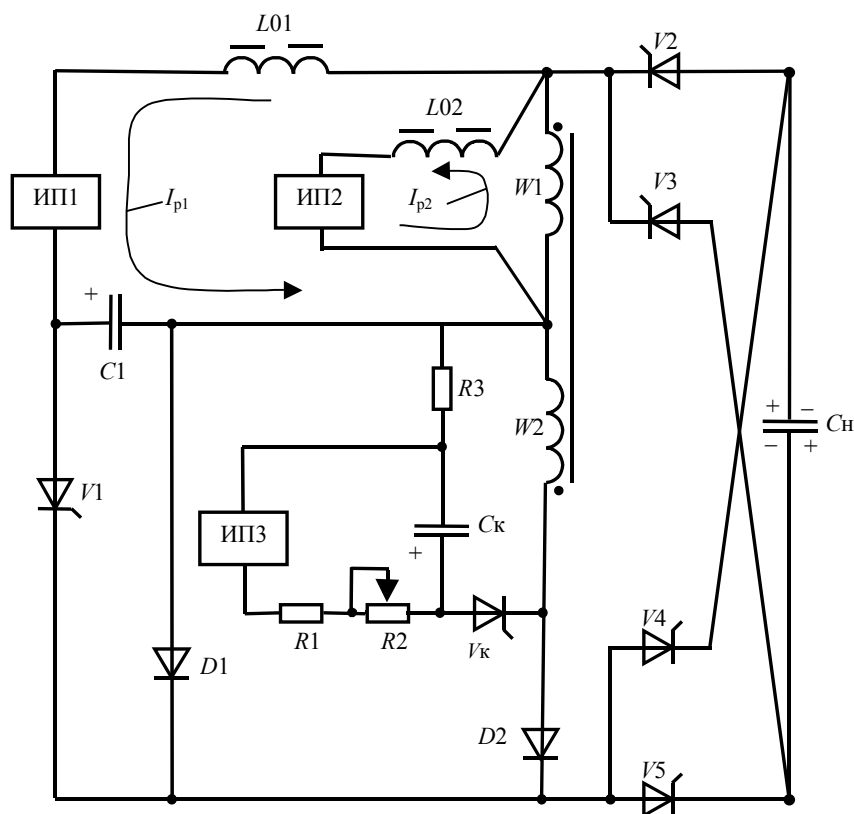


Рис.5. Схема питания БРМ.

В данной схеме питания размагничивание магнитопровода осуществляется токами I_{p1} и I_{p2} . В начале цикла ускорения включается тиристор цепи коррекции V_k и корректирующий конденсатор C_k , заряженный до требуемого напряжения от источника питания ИП3 через резисторы цепи коррекции $R1$, $R2$, начинает разряжаться на компенсационную обмотку $W2$ через резистор цепи коррекции $R3$.

Ток разряда конденсатора C_k направлен встречно току обмотки W_2 и ее магнитодвижущая сила уменьшается, что вызывает появление дополнительного магнитного потока через центральный сердечник магнитопровода, компенсируется начальное сжатие равновесной орбиты, вызванное нелинейностью петли гистерезиса на начальном этапе перемагничивания. Значение сопротивления резистора R_2 определяет величину напряжения на конденсаторе C_k к началу цикла ускорения. Изменяя начальное напряжение на конденсаторе C_k можно в широких пределах электрически регулировать положение радиуса равновесной орбиты в начале цикла ускорения, оптимизируя тем самым захват электронов в ускорение. Данное обстоятельство позволит в схеме питания БРМ не использовать цепь контрактора (состоящую из генератора импульсов и обмотки, располагаемой в межполюсном пространстве электромагнита бетатрона), которая используется в схемах питания классических малогабаритных бетатронов для оптимизации захвата электронов в ускорение.

За счет включения тиристора V_1 в конце цикла ускорения (который подключает конденсатор C_1 , заряженный током I_{p1} до требуемого напряжения, к диоду D_2) происходит обесточивание компенсационной обмотки W_2 . При обесточивании обмотки W_2 за счет увеличения разницы магнитодвижущих сил обмоток W_1 , W_2 магнитный поток в центральном сердечнике магнитопровода возрастает, происходит увеличение радиуса равновесной орбиты. Когда радиус равновесной орбиты достигает значения радиуса установки инжектора r_i , происходит сброс электронов на внешнюю мишень. Данное обстоятельство позволит, в отличие от классического бетатрона, не использовать в схеме питания цепь сброса, состоящую из генератора импульсов и обмотки, располагаемой в межполюсном пространстве электромагнита. При полном разряде конденсатора C_1 ток обмотки W_2 спадает до нуля, включается диод D_1 , тиристор V_1 выключается, а конденсатор C_1 начинает заряжаться от источника питания ИП1 через дроссель L_{01} и обмотку W_1 .

Таким образом, рассмотренная схема питания БРМ позволит:

1. За счет цепи коррекции (состоящей из источника питания ИП3, резисторов R_1 , R_2 , R_3 , тиристора V_k и конденсатора C_k) электрически регулировать в широких пределах положение радиуса равновесной орбиты в момент инжекции электронов в вакуумную ускорительную камеру, что упростит настройку бетатрона на максимальное излучение.
2. Смещать ускоренные электроны с равновесной орбиты на внешнюю мишень за счет разницы магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и компенсационной, что упростит эксплуатацию бетатрона и повысит надежность его работы.
3. За счет сокращения спадающей части заднего фронта импульса тока компенсационной обмотки уменьшить эффективное значение тока этой

обмотки по отношению к эффективному значению тока обмотки возбуждения, что повысит технико-экономический эффект от размагничивания магнитопровода.

Приводятся основные соотношения, позволяющие рассчитать схемы питания БРМ.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию БРМ.

Экспериментальное исследование БРМ было проведено на базе электромагнита малогабаритного бетатрона МИБ-6. В электромагните бетатрона МИБ-6 набор центральных вкладышей был заменен на сплошной центральный сердечник, на который была уложена компенсационная обмотка $W2$. В полюсах магнитопровода электромагнита бетатрона были выточены пазы для размещения центрального сердечника с обмоткой $W2$.

Электромагнит БРМ возбуждался от схемы питания, изображенной на рис.6. Принцип действия данной схемы питания аналогичен принципу действия схемы питания на рис.5 за исключением следующего:

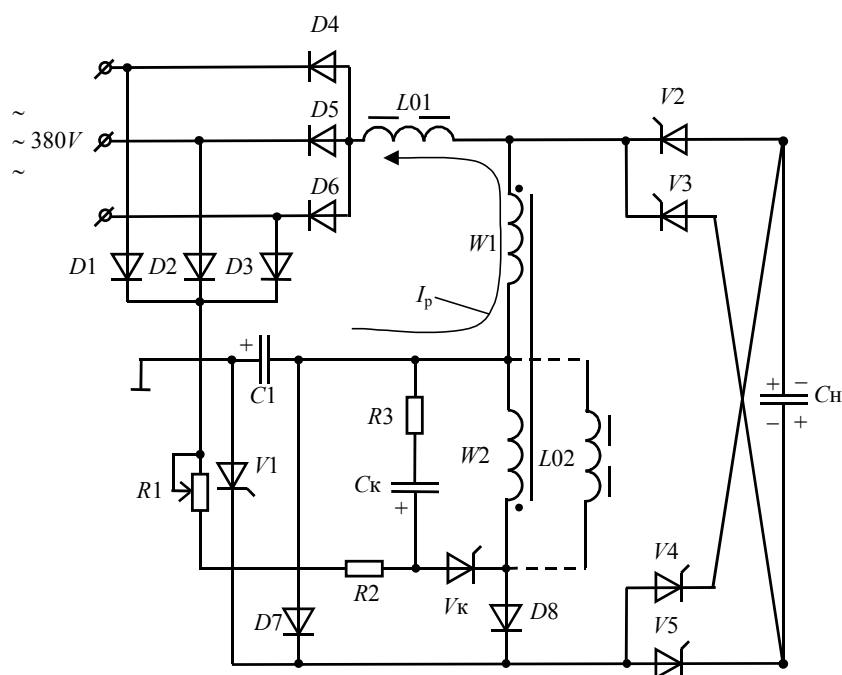


Рис.6. Экспериментальная схема питания БРМ.

- конденсатор ввода энергии $C1$ заряжается до требуемого напряжения от трехфазного однополупериодного выпрямителя, состоящего из диодов $D4$ - $D6$, через дроссель $L01$ (индуктивность которого много больше, чем эквивалентная индуктивность электромагнита БРМ) и обмотку возбуждения $W1$ током размагничивания I_p ;

- корректирующий конденсатор $C2$ заряжается до требуемого напряжения U_0 через резисторы цепи коррекции $R1$, $R2$, $R3$, обмотку $W1$ и дроссель $L01$ от трехфазного двухполупериодного выпрямителя, состоящего из диодов $D1-D6$.

По данной схеме питания был осуществлен запуск БРМ на кинетическую энергию ускоренных электронов $W_k = 6.2$ МэВ, с частотой следования импульсов излучения 50 Гц. Частота следования импульсов излучения была ограничена 50 Гц из-за большой плотности тока в меди компенсационной обмотки $W2$, которая составляла более 6 А/мм² при $f > 50$ Гц и $W_k = 6.2$ МэВ. Энергия колебательного контура БРМ, получилась меньше, чем у бетатрона МИБ-6, на величину энергии запасаемой в центральном воздушном зазоре электромагнита бетатрона МИБ-6. За счет сокращения заднего фронта импульса эффективное значение тока компенсационной обмотки $W2$ получилось в 1.5 раза меньше эффективного значения тока обмотки возбуждения $W1$.

Описаны параметры узлов и элементов БРМ. Приводятся осциллограммы токов, напряжений и магнитных индукций в данной схеме питания БРМ.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что в БРМ за счет устранения центрального воздушного зазора энергия колебательного контура будет меньше, чем у классического бетатрона, на величину энергии, запасаемой в этом зазоре. Данное обстоятельство позволило уменьшить массогабаритные параметры емкостного накопителя и потребляемую мощность бетатрона. Разработанные схемы питания позволили за счет сокращения заднего фронта импульса тока компенсационной обмотки $W2$ уменьшить в 1.5 раза эффективное значение тока этой обмотки по отношению к эффективному значению тока обмотки возбуждения $W1$. Данное обстоятельство позволило улучшить тепловой режим компенсационной обмотки $W2$ и, тем самым, реализовать частотный режим работы БРМ.

Измерение магнитных характеристик магнитного поля в БРМ проводились по известным методикам, основанным на интегрировании э.д.с. витков, помещенных в изменяющееся во время магнитное поле. Контроль за излучением осуществлялся с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и дозиметра. Измерительная камера устанавливалась на расстоянии 1 м от мишени.

Приводится описание примененной измерительной аппаратуры.

По результатам магнитных измерений радиус равновесной орбиты $6.2 \div 6.5$ см при $W_k \cong 6.2$ МэВ был получен при следующих соотношениях витков обмоток $W1$, $W2$ и технологических зазорах между стойками обратного магнитопровода $\Delta_{ст}$:

1. $W_2 = 56$ витков, $W_1 = 62$ витка (верхняя часть обмотки – 30 витков, нижняя часть обмотки – 32 витка), $\Delta_{\text{ст}} = 0.46$ мм,
2. $W_2 = 56$ витков, $W_1 = 61$ виток (верхняя часть обмотки – 30 витков, нижняя часть обмотки – 31 виток), $\Delta_{\text{ст}} = 0.2$ мм,
3. $W_2 = 56$ витков, $W_1 = 60$ витков (верхняя часть обмотки – 30 витков, нижняя часть обмотки – 30 витков), $\Delta_{\text{ст}} = 0.01$ мм.

В первом случае мощность дозы тормозного излучения не превысила 0.1 Р/мин. Сигнал с ФЭУ для данного случая приведен на рис.7 (см. кривую 1), из которого видно, что пучок ускоряемых электронов частично теряется на стенках вакуумной ускорительной камеры из-за несимметрии витков и большого технологического зазора $\Delta_{\text{ст}}$.

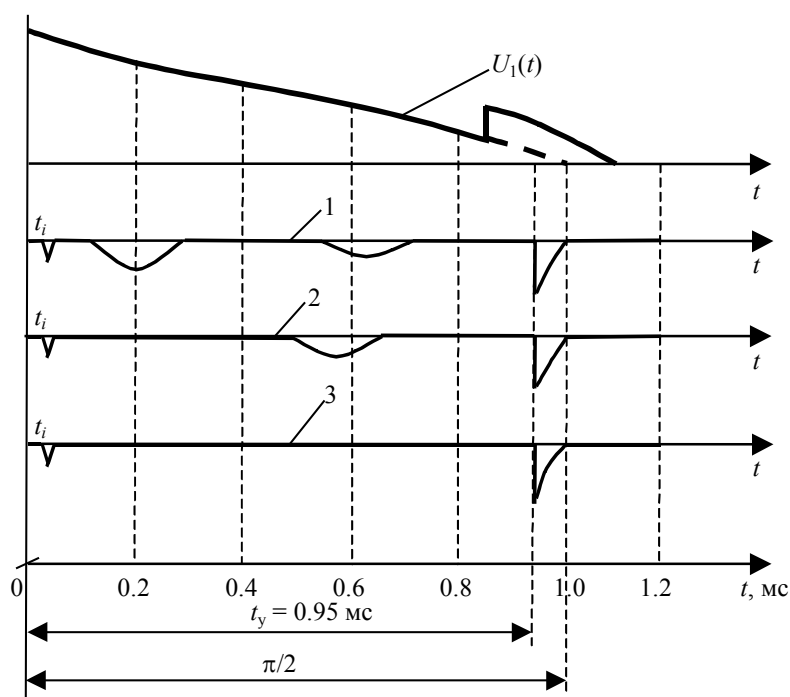


Рис.7. Сигналы с ФЭУ, сфазированные с изменением э.д.с. 6 измерительных витков, расположенных на одной из стоек обратного магнитопровода ($U_1(t)$).

Во втором случае ситуация улучшилась, мощность дозы тормозного излучения составила 0.4 Р/мин. Сигнал с ФЭУ для данного случая приведен на рис.7 (см. кривую 2), из которого видно, что пучок ускоряемых электронов стал меньше теряться на стенках вакуумной ускорительной камеры.

В третьем случае, при равенстве витков верхней и нижней половин обмотки возбуждения $W1$ и минимальном технологическом зазоре $\Delta_{ст}$, была получена наибольшая мощность дозы тормозного излучения – $J = 0.75$ Р/мин, которая соответствует мощности дозы бетатрона МИБ-6 при $W_k \cong 6.2$ МэВ и $f = 50$ Гц. Сигнал с ФЭУ приведен на рис.7 (см. кривую 3), из которого видно, что пучок ускоряемых электронов перестал теряться на стенках вакуумной ускорительной камеры. Для данного случая на рис.8 приведены изменения во времени радиуса равновесной орбиты в течение процесса ускорения t_y , снятые при различных начальных напряжениях U_0 на корректирующем конденсаторе C_k .

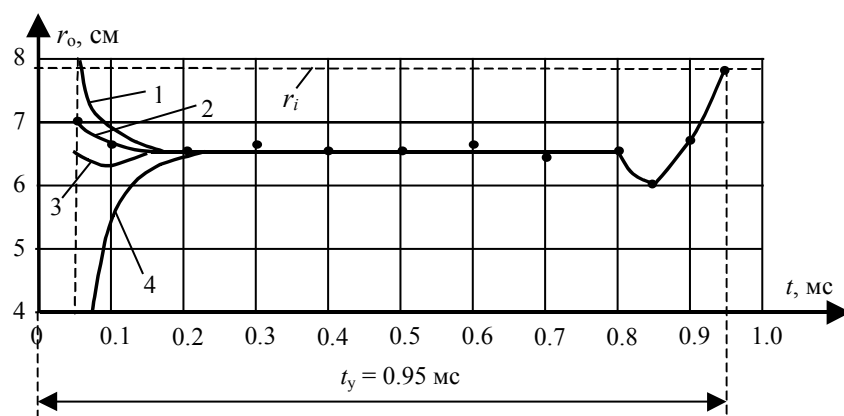


Рис.8. Изменения радиуса равновесной орбиты в течение процесса ускорения t_y при различных начальных напряжениях на корректирующем конденсаторе C_k : 1 – при $U_0 = 700$ В (излучения нет); 2 – при $U_0 = 610$ В (получена наибольшая мощность дозы тормозного излучения – $J = 0.75$ Р/мин); 3 – при $U_0 = 450$ В ($J = 0.3$ Р/мин); 4 – при $U_0 = 0$ (цепь коррекции отключена) – излучения нет.

Значение радиуса равновесной орбиты к моменту времени 50 мкс (радиус равновесной орбиты в интервале менее 50 мкс не позволяла измерять аппаратура) регулировалось в широких пределах путем изменения начального значения напряжения U_0 на конденсаторе C_k , которое регулировалось за счет изменения значения сопротивления резистора $R1$. Данное обстоятельство позволило оптимизировать захват электронов в ускорение и при $U_0 = 610$ В, что соответствовало изменению радиуса равновесной орбиты по кривой 2, были получена наибольшая мощность дозы тормозного излучения – 0.75 Р/мин.

В интервале времени $\sim 150 \div 800$ мкс значение радиуса равновесной орбиты регулировалось путем изменения соотношения витков обмоток $W1$, $W2$ и технологического зазора $\Delta_{ст}$ между стойками обратного магнитопровода.

На рис.9 приведена зависимость радиуса равновесной орбиты от числа витков обмотки возбуждения W_1 , при $W_2 = 56$ витков, $\Delta_{\text{ст}} = 0.01$ мм.

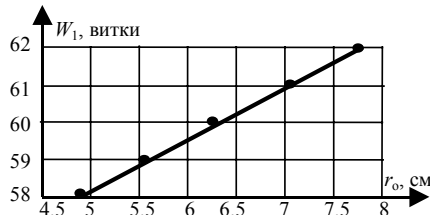


Рис.9. Зависимость радиуса равновесной орбиты в БРМ от числа витков обмотки W_1 , при $W_2 = 56$ витков и $\Delta_{\text{ст}} = 0.01$ мм.

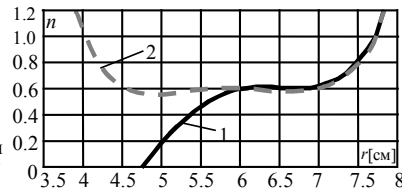


Рис.10. Зависимости показателя спада магнитного поля от радиуса: 1 – в БРМ; 2 – в бетатроне МИБ-6.

В интервале времени $800 \div 850$ мкс уменьшение радиуса равновесной орбиты с 6.5 см до 6 см обусловлено уменьшением магнитной проницаемости электротехнической стали.

В интервале времени $850 \div 950$ мкс (конец цикла ускорения) при вводе энергии в колебательный контур БРМ происходило обесточивание компенсационной обмотки W_2 . За счет увеличения разницы магнитодвижущих сил обмоток W_1 , W_2 радиус равновесной орбиты в этом интервале времени увеличивался от значения 6 см до значения радиуса расположения инжектора ~ 7.8 см, что привело к сбросу электронов на внешнюю мишень.

На рис.10 приведены зависимости показателя спада магнитного поля от радиуса $n = f(r)$: 1 – в БРМ, 2 – в бетатроне МИБ-6. Видно, что при радиусах $r = 6 \div 8$ см эти зависимости мало отличаются друг от друга, поэтому можно сделать вывод, что показатель спада n в БРМ в этой области определяется в основном конфигурацией полюсов магнитопровода. При радиусах $r = 4 \div 6$ см эти зависимости сильно отличаются друг от друга. В БРМ n резко падает и на радиусе $r \cong 4.75$ см переходит через ноль и уходит в отрицательную область. Это объясняется тем, что ход силовых магнитных линий в этой области зависит не только от конфигурации полюсов магнитопровода, но и от расположения компенсационной обмотки W_2 в пазах полюсов магнитопровода электромагнита. В данном случае высота обмотки W_2 была равна двойной высоте полюса магнитопровода.

Таким образом, магнитное поле БРМ удовлетворяет всем необходимым для ускорения электронов условиям. Цепь коррекции позволяет в широких пределах электрически регулировать положение радиуса равновесной орбиты в начале цикла ускорения, что упрощает настройку бетатрона на максимальное излучение. С помощью данной цепи коррекции была получена мощность дозы тормозного излучения такая же,

как у классического бетатрона, что позволило не использовать в схеме питания БРМ цепь контрактора, состоящую из генератора импульсов и обмотки, располагаемой в межполюсном пространстве электромагнита. Впервые используемая в БРМ высота компенсационной обмотки $W2$ равная двойной высоте полюса магнитопровода привела к изменению показателя спада магнитного поля при малых радиусах. Т.к. данное обстоятельство не оказало существенного влияния на мощность дозы тормозного излучения, то такую высоту компенсационной обмотки можно считать вполне приемлемой при расчете электромагнита БРМ. Проверен новый способ смещения ускоренных электронов с орбиты на внешнюю мишень – за счет увеличения разницы магнитодвижущих сил обмоток $W1$ и $W2$, который позволил не использовать в схеме питания БРМ специальную цепь сброса, состоящую из генератора импульсов и обмотки, располагаемой в межполюсном пространстве электромагнита.

По схеме на рис.6 (в которой с целью увеличения энергии колебательного контура катоды диодов $D1...D3$ были подключены к общей точке соединения тиристора $V1$ и конденсатора $C1$; в цепь заряда корректирующего конденсатора C_k включен диод D_k , чтобы блокировать его разряд при $U_{C_k} > U_{C1}$; параллельно к обмотке $W2$ подключен дроссель $L02$ для плавной регулировки положения радиуса равновесной орбиты) был также осуществлен запуск БРМ на кинетическую энергию $W_k = 7.6$ МэВ, с частотой следования импульсов излучения $f = 50$ Гц, при этом мощность дозы тормозного излучения составила 1.3 Р/мин. За счет сокращения заднего фронта импульса эффективное значение тока компенсационной обмотки $W2$ получилось в 1.5 раза меньше эффективного значения тока обмотки возбуждения $W1$.

Приводятся осциллограммы токов, напряжений и магнитных индукций в данной схеме питания БРМ.

Приводятся результаты магнитных измерений для данного случая.

Таким образом, экспериментально показано, что в БРМ, при массогабаритных параметрах его электромагнита равным массогабаритным параметрам электромагнита классического бетатрона, за счет размагничивания магнитопровода можно увеличить кинетическую энергию ускоренных электронов и, тем самым, повысить мощность дозы тормозного излучения.

Приводятся результаты измерения фокусного пятна в БРМ.

Проведено сравнение экспериментальных характеристик БРМ с расчетными.

Приведены результаты тепловых испытаний электромагнита для непрерывного и повторно-кратковременного режима работы БРМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что помощью нового способа – за счет последовательно-встречного включения обмоток возбуждения и компенсационной в БРМ можно сформировать электромагнитное поле, удовлетворяющее всем необходимым условиям для ускорения электронов.
2. Расчетами показано и экспериментально проверено, что в БРМ, при массогабаритных параметрах его электромагнита равным массогабаритным параметрам электромагнита классического бетатрона, за счет размагничивания магнитопровода можно увеличить кинетическую энергию ускоренных электронов и, тем самым, повысить интенсивность излучения.
3. Установлено, что технико-экономический эффект от размагничивания зависит от отношения сечения центрального сердечника магнитопровода к сечению обратного магнитопровода, плотности тока в меди обмоток электромагнита, формы тока этих обмоток и кинетической энергии ускоренных электронов.
4. Расчетами показано и экспериментально проверено, что в БРМ за счет устранения центрального воздушного зазора энергия колебательного контура будет меньше, чем у классического бетатрона, на величину энергии запасаемой в этом зазоре, что позволяет уменьшить потребляемую мощность и массогабаритные параметры емкостного накопителя. Установлено, что технико-экономический эффект будет зависеть от отношения объема центрального воздушного зазора к объему межполюсного пространства магнитопровода электромагнита.
5. Предложена, разработана и экспериментально проверена новая цепь коррекции, которая позволяет в широких пределах электрически регулировать положение радиуса равновесной орбиты в начале цикла ускорения.
6. Впервые проверен принцип действия БРМ с расположением компенсационной обмотки в пазах полюсов магнитопровода электромагнита. Установлено, что высота этой обмотки равная двойной высоте полюса магнитопровода может быть вполне приемлема при расчете электромагнита БРМ.
7. Проверен новый способ смещения ускоренных электронов с орбиты на внешнюю мишень – за счет увеличения разницы магнитодвижущих сил обмоток возбуждения и компенсационной.
8. Предложены, разработаны и экспериментально проверены схемы питания БРМ, которые позволяют:
 - за счет цепи коррекции электрически регулировать в широких пределах положение радиуса равновесной орбиты в момент инжекции электронов в вакуумную ускорительную камеру, что упрощает настройку бетатрона на максимальное излучение;

- смещать ускоренные электроны с равновесной орбиты на внешнюю мишень без использования цепи сброса, состоящей из генератора импульсов и обмотки, располагаемой в межполюсном пространстве электромагнита, что упрощает эксплуатацию бетатрона и повышает надежность его работы;
 - за счет сокращения спадающей части заднего фронта импульса тока компенсационной обмотки уменьшить эффективное значение тока этой обмотки в 1.5 раза по отношению к эффективному значению тока обмотки возбуждения, что повышает технико-экономический эффект от размагничивания магнитопровода;
 - реализовать частотный режим работы БРМ.
9. Получены и экспериментально проверены основные соотношения, позволяющие рассчитать с достаточно высокой точностью БРМ.
 10. На основании проведенных тепловых испытаний определена допустимая плотность тока в меди обмоток электромагнита, при которой БРМ сможет работать в непрерывном и повторно-кратковременном режиме.
 11. На основании проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований можно разрабатывать бетатроны с размагничиванием магнитопровода, с меньшими, чем у классических бетатронов, потребляемой мощностью и массогабаритными параметрами емкостного накопителя и электромагнита.
 12. На основании проведенных в данной работе теоретических и экспериментальных исследований разработан, при непосредственном участии автора, выполнен и запущен на излучение малогабаритный бетатрон с размагничиванием магнитопровода на кинетическую энергию ускоренных электронов 7.6 МэВ, который используется в НИИ ИН при ТПУ для проведения физических исследований.

Цитируемая литература:

1. Kerst D.W., Adams J.D., Koch H.W., Robinson C.S. An 80-Mev model of a 300-Mev betatron. // Journ. The Review of Scientific instruments, volume 21, № 5, p.462-480.
2. Kerst D.W., Adams J.D., Koch H.W., Robinson C.S. Operation of a 300 Mev betatron. // Journ. Phys. Rev., 1950, volume 78, № 3, p.297.
3. Чучалин И.П. Разработка и исследование электрических схем импульсного бетатрона с энергией ускоренных электронов до 100 МэВ. Диссертация, Томск, 1955.
4. Васильев В.В., Москалев В.А., Фурман Э.Г. Бетатрон с подмагничиванием. // ПТЭ. - 1979. - № 4. С.27-29.
5. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. М.: Госатомиздат, 1961.
6. Фурман Э.Г. Индукционный ускоритель. Патент № 2173035, 2000.

По теме диссертационной работы опубликованы следующие работы:

1. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Бетатрон с подмагничиванием. // Сборник докладов XVII Совещания по ускорителям заряженных частиц, ГНЦ РФ ИФВЭ, Протвино, 17-20 октября 2000г. - Протвино, 2000. - Т.2. - С.74-77.
2. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Особенности расчета магнитной системы бетатрона с компенсационной обмоткой. // Изв. вуз. Физика. - 2001.- №1. С.88-90.
3. 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 X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001г. - М.: ЦНИИ атоминформ, 2001. - С.113-116.
4. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Бетатрон с подмагничиванием. // ПТЭ. - 2002.- №1. С.5-9.
5. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Импульсная система питания индукционного ускорителя. Патент РФ на изобретение № 2172574 от 20.08.2001 г. Бюл. № 23.
6. Чертов А.С. Импульсная система питания индукционного ускорителя. Заявка № 2000125468 с приоритетом от 9.10.2000 г. Положительное решение на выдачу патента РФ.
7. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Импульсная система питания индукционного ускорителя. Заявка № 2000124599 с приоритетом от 27.09.2000 г. Положительное решение на выдачу патента РФ.
8. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Импульсная система питания индукционного ускорителя. Заявка № 2000125413 с приоритетом от 9.10.2000 г. Положительное решение на выдачу патента РФ.
9. Чертов А.С. Бетатрон с подмагничиванием. // Изв. вуз. Физика. – Деп. в ВИНТИ 2.02.01, № 280-B2001.
10. Чертов А.С. Применение постоянного тока в индукционных ускорителях типа бетатрон. // Изв. вуз. Физика. – Деп. в ВИНТИ 2.02.01, № 281-B2001.
11. Чертов А.С. Системы питания для магнитных систем бетатронов с компенсационной обмоткой. // Изв. вуз. Физика. – Деп. в ВИНТИ 2.02.01, № 282-B2001.

Furman E.G., Chertov A.S. Equilibrium orbit radius correction in betatron with bias. // 7-th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists "Modern Techniques

12. Technology". Tomsk – 2001. - P.58-60.
13. Chakhlov V.L., Chertov A.S. Betatron with bias and with cathode beam outlet. // 7-th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists "Modern Techniques and Technology". Tomsk – 2001. - P.60-62.
14. Чертов А.С. Магнитная система бетатрона с компенсационной обмоткой. // Труды VII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2001 - С.204-206.
15. Чахлов В.Л., Чертов А.С. Бетатрон с подмагничиванием и с выводом электронного пучка. // Труды VII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2001 - С.206-209.
16. Чертов А.С. Распределение магнитных потоков в магнитной системе бетатрона с подмагничиванием. // Труды VII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2001 - С.209-211.
17. Фурман Э.Г., Чертов А.С. Система питания бетатрона с подмагничиванием. // Труды VII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2001 - С.211-214.
18. Фурман Э.Г., Чертов А.С. Коррекция радиуса равновесной орбиты в бетатроне с подмагничиванием. // Труды VII-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии". Сб. докладов. Томск: Изд-во ТПУ, 2001 - С.214-216.
19. Чертов А.С. Результаты измерения фокусного пятна и тепловых испытаний бетатрона 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, апрель, 2002 г.) – в печати.
20. 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, апрель, 2002 г.) – в печати.