

КОНСТРУКЦИИ БЕТАТРОНОВ С РАЗМАГНИЧИВАНИЕМ МАГНИТОПРОВОДА

В работе рассмотрены конструкции бетатронов для целей дефектоскопии и интраоперационной лучевой терапии с размагничиванием магнитопровода. Формирование управляющих полей в таких установках осуществлено последовательным и встречным включением основной намагничивающей и, уложенной на центральном сердечнике, компенсационной обмоток. Даны сравнительные характеристики данных конструкций с аналогичными бетатронами классической конструкции. Рассмотрен принцип действия схемы питания со стабилизацией энергии ускоренных электронов, позволяющей реализовать некоторые возможности установок с такой магнитной системой.

Введение

Бетатроны, разрабатываемые в Томском политехническом университете, последнее время пользуются спросом и поставляются на промышленные предприятия и в медицинские учреждения России и за рубежом. Бетатроны выгодно отличаются от других типов ускорителей электронов простотой, малой массой, удобством в эксплуатации и малыми затратами на изготовление [1, 2]. Несмотря на растущий интерес к использованию бетатронов для дефектоскопии материалов и изделий, в радиационной технологии, для медицины и в других областях, их внедрения в ряде случаев ограничиваются низкой интенсивностью излучения. Кроме того, как показала практика эксплуатации установок МИБ-6Э и БМ-10Э, в бетатронах для медицинских целей, пространственное положение оси пучка и характеристики излучения зависят от энергии выведенных электронов, что в ряде случаев ограничивает их применение. В этих условиях разработка новых и дальнейшее совершенствование существующих способов повышения интенсивности излучения бетатрона и стабилизация параметров излучения представляет собой весьма актуальную задачу. Наиболее интересным и перспективным направлением является применение магнитных систем с размагничиванием магнитопровода электромагнита (БРМ) постоянным или импульсным током. В связи с успешным запуском бетатрона с последовательным и встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной [3, 4] рассмотрим конструкции электромагнитов и схем питания бетатронов для целей дефектоскопии и интраоперационной лучевой терапии (ИОЛТ).

Схема питания бетатрона с последовательным и встречным включением обмоток

Основные требования, предъявляемые к схеме питания БРМ, заключаются в следующем:

- Схема питания БРМ должна обеспечивать коррекцию радиуса равновесной орбиты в начале цикла ускорения, так как нелинейность петли гистерезиса на начальном этапе перемагничивания приводит к сжатию равновесной орбиты и нарушает условия захвата электронов в ускорение. Для бетатронов с выведенным электронным пучком необходима коррекция радиуса и в конце цикла ускорения, которая используется для стабилизации пространственного положения оси пучка и коррекции поля облучения.
- Схема питания должна обеспечивать стабилизацию энергии ускоренных электронов в заданных пределах. Для бетатронов с выведенным электронным пучком необходима также регулировка в широких пределах энергии ускоренных электронов.
- Для бетатронов с выведенным электронным пучком схема должна обеспечивать питание секторной обмотки вывода, расположенной в межполюсном пространстве бетатрона.

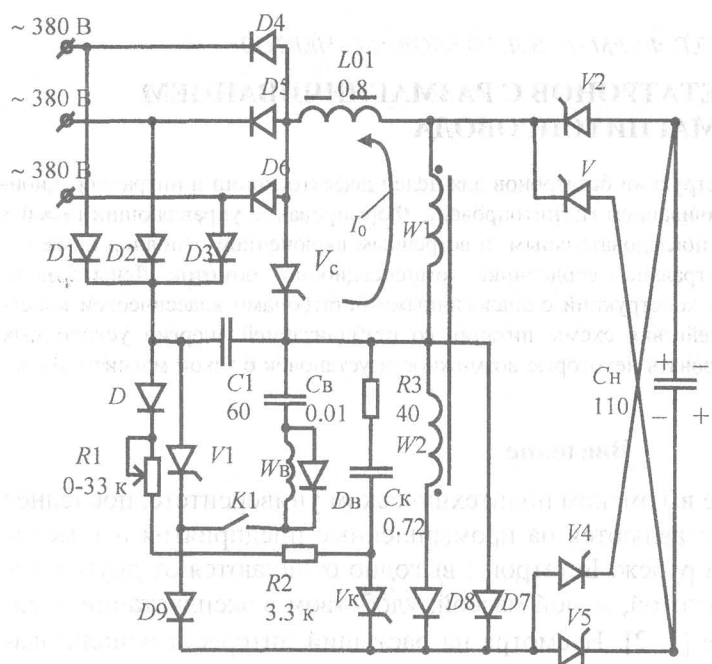


Рис.1. Экспериментальная схема питания: БРМ. $V1-V5$ - Т143-400-20, V_k, V_c - ТБ-251-80-12; $D1-D6$ - Д122-32-6, $D7-D9$ - Д133-400-20, D_k, D_b - Д132-50-10

тиристоры $V2 \dots V5$ включаются два тиристора, имеющие требуемую полярность емкостного накопителя C_n и он начинает разряжаться на включенные последовательно и встречно обмотки $W1$ и $W2$. Процесс осуществляется за счет выбранного соотношения витков обмоток $W1, W2$ технологических зазоров в цепях магнитопровода. В момент времени t_1 включается также тиристор V_k и корректирующий конденсатор C_k , заряженный до требуемого напряжения через резисторы $R1 \dots R2$, начинает разряжаться на обмотку $W2$ через резистор $R3$. Ток разряда конденсатора C_k направлен встречно току компенсационной обмотки $W2$ и ее магнитодвижущая сила уменьшается, что вызывает появление дополнительного магнитного потока через центральный сердечник магнитопровода в интервале времени $t_1 \div t_2$, который компенсирует начальное сжатие равновесной орбиты, вызванное нелинейностью петли гистерезиса на начальном этапе перемagnичивания магнитопровода. Изменение напряжения на конденсаторе C_k осуществляется переменным резистором $R1$ и выбирается исходя из максимальной интенсивности излучения.

Если схема питания работает с излучателем, предназначенным для получения жесткого тормозного излучения, то ключ $K1$ должен быть разомкнут. При достижении необходимой энергии ускоренных электронов включается тиристор $V1$. При этом ток обмотки $W2$ начинает уменьшаться, так как ток разряда конденсатора $C1$ направлен встречно току обмотки $W2$, а ток обмотки $W1$ переходит в цепь конденсатора $C1$ и тиристора $V1$. В течение интервала времени $t_4 \div t_5$ происходит ввод энергии от конденсатора $C1$ в колебательный контур для компенсации потерь энергии в нем за цикл ускорения, а ток обмотки $W2$ спадает до нуля. При полном разряде конденсатора $C1$ (момент времени t_5) включается диод $D7$, тиристор $V1$, выключается и конденсатор $C1$ вновь заряжается током I_0 . Заряд конденсатора $C1$, а следовательно и энергию, вводимую в колебательный контур, можно регулировать (до 30%) временем включения тиристора V_c , что и используется для стабилизации энергии ускоренных электронов.

На рис.1 представлена схема питания БРМ, удовлетворяющая выше приведенным требованиям. Рассмотрим ее работу. В исходном состоянии емкостный накопитель C_n заряжен до напряжения U_{max} , конденсатор $C1$ заряжается от выпрямителя, состоящего из диодов $D1-D6$, через дроссель $L01$ и обмотку возбуждения $W1$ постоянным током (током размагничивания) I_0 (рис. 2), который задает магнитное состояние магнитопровода электромагнита бетатрона. При протекании тока I_0 по обмотке $W1$ в замкнутом магнитопроводе создается постоянный магнитный поток $-Φ_{с.н.}$. В момент времени t_1 с приходом управляющих импульсов на

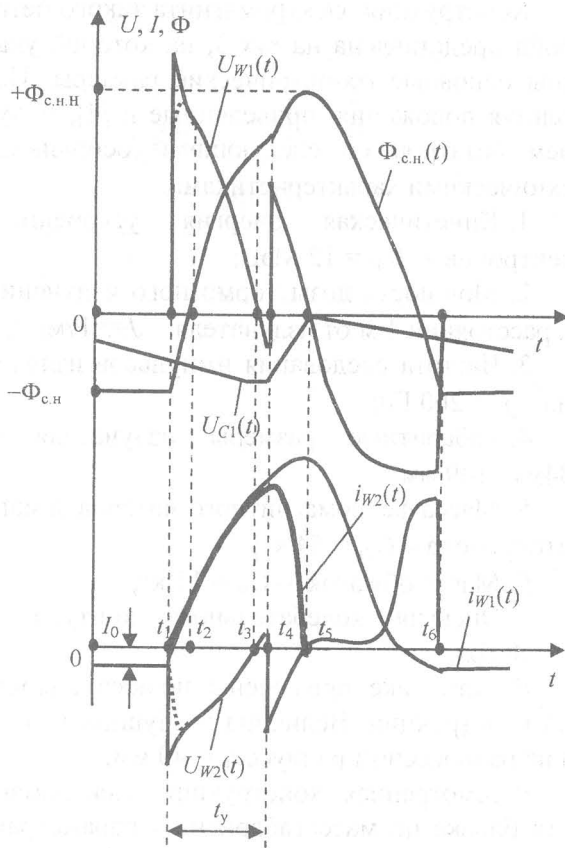


Рис.2. Изменения во времени токов, напряжений, магнитных потоков в схеме питания бетатрона с размагничиванием, где $\Phi_{с.н.}(t)$ – магнитный поток в центральном сердечнике магнитопровода; $U_{C1}(t)$ – напряжение на конденсаторе $C1$; $U_{W1}(t)$ – напряжение на обмотке возбуждения $W1$; $U_{W2}(t)$ – напряжение на компенсационной обмотке $W2$ (пунктиром показаны изменения напряжений $U_{W1}(t)$ и $U_{W2}(t)$ при отключенной цепи коррекции); $i_{W1}(t)$ – ток обмотки возбуждения $W1$; $i_{W2}(t)$ – ток компенсационной обмотки $W2$

т.е. время ускорения не изменяются, и в отличие от бетатронов классической конструкции, энергия электронов определяется не временем смещения ускоренных частиц при неизменном времени ускорения, а величиной реактивной энергии колебательного контура.

Конструкция электромагнита бетатрона для целей дефектоскопии

Основным направлением развития бетатронов для целей дефектоскопии является увеличение мощности дозы тормозного излучения и уменьшение массогабаритных параметров установки. Увеличение интенсивности излучения может осуществляться по нескольким направлениям, одно из которых – увеличение кинетической энергии ускоренных электронов. Теоретические и экспериментальные исследования БРМ открыли новые возможности создания бетатронов с параметрами лучшими, чем у классических бетатронов.

Если схема питания работает с излучателем, предназначенным для вывода электронного пучка, то ключ $K1$ должен быть замкнут. В этом случае наиболее оптимальным моментом начала вывода пучка является момент времени t_3 , когда напряжение на емкостном накопителе C_n близко к 0 и равно активному падению напряжения на обмотке $W2$. В интервале времени $t_3 \div t_4$ обмотка $W2$ закорачивается диодом $D7$, при этом ее ток и магнитодвижущая сила уменьшаются. Это вызывает появление дополнительного магнитного потока через центральный сердечник магнитопровода, и радиус равновесной орбиты увеличивается со скоростью порядка 10^2 м/с. В момент включения тиристора $V1$, запитывается обмотка смещения Wc при зарядке конденсатора $Cв$ от конденсатора $C1$. В обмотке смещения, представляющей сектор протяженностью 180° и уложенной в межполюсном пространстве электромагнита, формируется импульс тока $Iв$, и относительно азимутально-симметричного управляющего поля создается секторное поле, направленное встречно управляющему, и обеспечивающее вывод электронного пучка через выводное окно ускорительной камеры. Более глубокую регулировку энергии выведенных электронов можно осуществить либо изменением емкости конденсатора $C1$, либо изменением напряжения питания. При этом частотные характеристики колебательного контура,

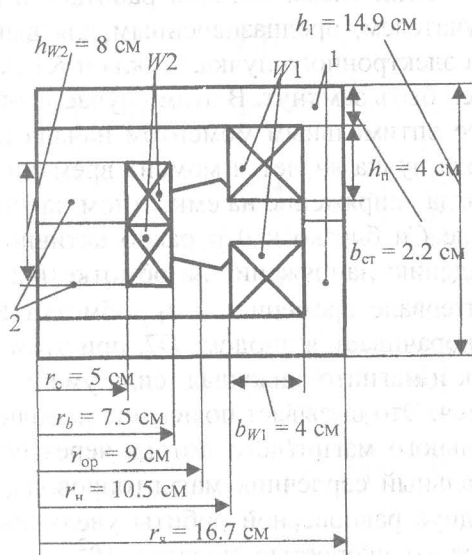


Рис.3. Конструкция электромагнита бетатрона с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной для целей дефектоскопии (с $W_K = 12$ МэВ), где 1 – обратный магнитопровод; 2 – полюса с центральным сердечником в монолитном исполнении; $W1$ – обмотка возбуждения; $W2$ – компенсационная обмотка; $r_{ор}$ – расчетный радиус равновесной орбиты; r_b – наружный радиус компенсационной обмотки; r_c – радиус центрального сердечника магнитопровода; r_n – наружный радиус полюсов; r_x – радиус ярма; b_{W1} – ширина обмотки возбуждения; h_{W2} – высота компенсационной обмотки; h_n – высота обмотки возбуждения; b_{ct} – ширина стойки; h_1 – высота магнитопровода

2 раза меньше), мощность дозы тормозного излучения будет больше в ~ 1.7 раза.

Конструкция электромагнита бетатрона для медицинских целей

Конструкция электромагнита бетатрона для целей интраоперационной лучевой терапии представлена на рис.4, на котором указаны основные геометрические размеры. Используя положения, приведенные в [4], получаем бетатрон со следующими основными техническими характеристиками:

1. Кинетическая энергия ускоренных электронов – $W_K = 14$ МэВ;
2. Мощность дозы электронного излучения на расстоянии 1 м от излучателя – $J =$ не менее 10 Гр/мин;
3. Частота следования импульсов излучения – $f = 150$ Гц;
4. Габаритные размеры излучателя – 340 мм × 164 мм;
5. Масса ферромагнитного материала магнитопровода – $G_{ct} = 64$ кг;
6. Масса обмоток – $G_m = 9.5$ кг;
7. Энергия колебательного контура – $Q = 155$ Дж.

Конструкция электромагнита такого бетатрона представлена на рис.3, на которой указаны основные геометрические размеры. Используя положения, приведенные в [4], получаем бетатрон со следующими основными техническими характеристиками:

1. Кинетическая энергия ускоренных электронов – $W_K = 12$ МэВ;
2. Мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от излучателя – $J = 5$ Р/мин;
3. Частота следования импульсов излучения – $f = 200$ Гц;
4. Габаритные размеры излучателя – 334 мм × 149 мм;
5. Масса ферромагнитного материала магнитопровода – $G_{ct} = 54$ кг;
6. Масса обмоток – $G_m = 11$ кг;
7. Энергия колебательного контура – $Q = 60$ Дж.

В установке применены полюса сплошной конструкции. Величина воздушного зазора на равновесном радиусе $l_0 = 40$ мм.

Рассмотренная конструкция электромагнита близка по массогабаритным параметрам к конструкции электромагнита бетатрона к конструкции электромагнита бетатрона МИБ-6. Если сравнивать бетатрон с такой конструкцией электромагнита с бетатроном МИБ-6 [5], то он будет обладать лучшими техническими характеристиками, так как у него кинетическая энергия ускоренных электронов будет больше в 2 раза, энергия колебательного контура меньше в 2 раза (следовательно, масса емкостного накопителя будет в

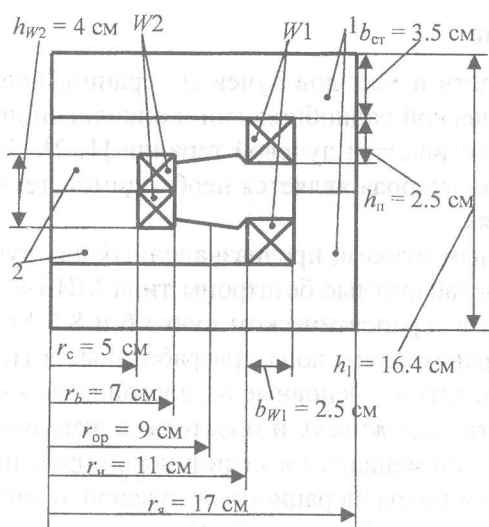


Рис.4. Конструкция электромагнита бетатрона с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной для медицинских целей ($W_k = 14$ МэВ), где 1 – обратный магнитопровод; 2 – полюса с центральным сердечником в монолитном исполнении; W1 – обмотка возбуждения; W2 – компенсационная обмотка

8. Максимальное поле облучения 10×30 см.

В электромагните применены полюса гребневой конструкции. Величина воздушного зазора на равновесном радиусе $l_0 = 34$ мм. Схема питания позволяет регулировать энергию ускоренных электронов в пределах 3...12 МэВ и оперативно корректировать поле излучения. Если сравнивать бетатрон с такой конструкцией электромагнита с бетатроном МИБ-10Э [5], то он будет обладать лучшими техническими характеристиками, так как кинетическая энергия ускоренных электронов будет больше в ~ 1.5 раза, массогабаритные параметры емкостного накопителя меньше в ~ 1.5 раза при сохранении массогабаритных параметров электромагнита.

Таким образом, конструкция электромагнита бетатрона с последовательно-встречным включением обмоток возбуждения и компенсационной позволяет расширить возможности применения бетатронов в целях дефектоскопии и медицинских целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. – М.: Госатомиздат, 1961. – 352 с.
2. Москалев В.А. Бетатроны. – М.: Энергоиздат, 1981. – 168 с.
3. Касьянов В.А., Фурман Э.Г., Чахлов В.Л., Чертов А.С. Бетатрон с подмагничиванием. // ПТЭ, 2002. №1. – С.5-9.
4. Чертов А.С. Бетатрон с размагничиванием магнитопровода. Диссертация. – Томск, 2002.
5. В.Л. Чахлов, В.Г. Волков, А.А. Звонцов и др. – Изв. Вузов: Физика, 2000. №4. – С.134-135.

УДК 621.384.6

М.М. РЫЧКОВ, В.Л. ЧАХЛОВ, А.С. ЧЕРТОВ

БЕТАТРОН С РАЗМАГНИЧИВАНИЕМ МАГНИТОПРОВОДА С ВЫВЕДЕННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В работе рассмотрена магнитная система бетатрона с размагничиванием магнитопровода, в которой обмотка возбуждения включена последовательно и встречно с компенсационной обмоткой. Экспериментальное исследование магнитной системы бетатрона с размагничиванием магнитопровода проведено на базе электромагнита серийно-выпускаемого бетатрона МИБ-6. Для данной магнитной системы разработана схема питания, обеспечивающая вывод электронов за пределы излучателя в конце цикла ускорения. Осуществлен запуск бетатрона с размагничиванием магнитопровода на кинетическую энергию ускоренных электронов в выведенном пучке 6 МэВ, с частотой следования импульсов излучения 50 Гц. Приведены кривые распределения дозных полей выведенного электронного пучка.