

Бетатрон с подмагничиванием

В.А. Касьянов, В.Л. Чахлов, А.С. Чертов
 НИИ ИН ТПУ, Томск, Россия

Э.Г. Фурман
 НИИ ЯФ ТПУ, Томск, Россия

Рассмотрен бетатрон с подмагничиванием на энергию тормозного излучения 6 МэВ, с частотой импульсов излучения 50 Гц и мощностью дозы тормозного излучения $\sim 0,75$ сГр/мин на расстоянии 1 м от мишени. Проведен сравнительный анализ основных характеристик бетатрона с подмагничиванием с серийно выпускаемым бетатроном МИБ-6. Приведены случаи, в которых целесообразно применять магнитную систему бетатрона с подмагничиванием.

Эффективность бетатрона определяется как отношение мощности дозы тормозного излучения к весу установки. Одним из возможных путей повышения эффективности бетатрона является увеличение энергии тормозного излучения. Наиболее интересным и перспективным является применение подмагничивания электромагнита бетатрона постоянным током, позволяющее повысить величину индукции на радиусе равновесной орбиты и тем самым либо повысить энергию тормозного излучения, либо уменьшить вес электромагнита бетатрона.

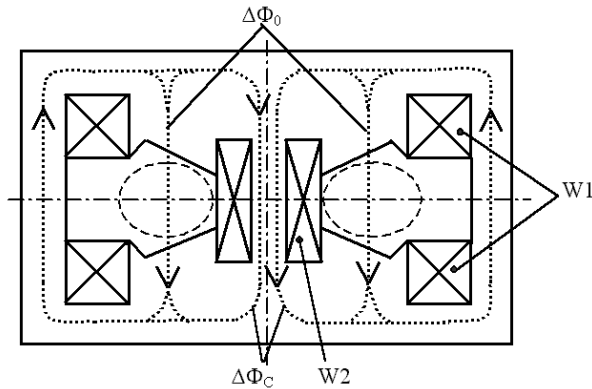


Рис. 1: Магнитная система бетатрона с подмагничиванием.

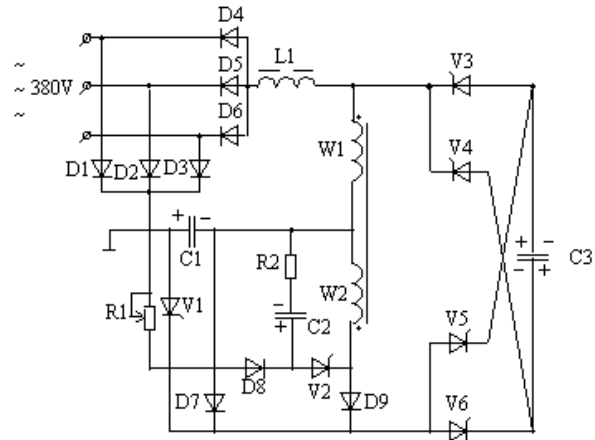


Рис. 2: Система питания бетатрона с подмагничиванием.

В работе рассматривается магнитная система бетатрона с подмагничиванием, изображенная на рис. 1, в которой бетатронное соотношение (значение индукции на равновесной орбите равно удвоенному среднему значению изменения индукции в круге, ограниченном равновесной орбитой) получено в замкнутом магнитопроводе. В отличие от известных магнитных систем бетатронов с подмагничиванием [1, 2, 3], магнитный поток в области ускорительной камеры $\Delta\Phi_0$ формируется потоком рассеяния обмоток возбуждения W1 и компенсационной W2, которые включены последовательно и встречно, а магнитный поток в центральном сердечнике магнитопровода электромагнита бетатрона $\Delta\Phi_c$ формируется за счет разницы магнитодвижущих сил этих обмоток.

На рис. 2-3 изображены система питания бетатрона с подмагничиванием и изменение от времени токов, напряжений, магнитных потоков и магнитодвижущих сил в данной системе питания.

Рассмотрим работу системы питания в установившемся режиме. В исходном состоянии емкостной накопитель С3 заряжен до требуемого напряжения. Конденсатор С1 заряжается от трехфазного однополупериодного выпрямителя, состоящего из диодов D4-D6, через дроссель L1 и обмотку W1 постоянным током, который задает магнитное состояние магнитопровода электромагнита бетатрона. К моменту времени t_1 магнитное состояние магнитопровода определяется магнитодвижущей силой F_{W1} и характеризуется значением $(-B_C)$ в центральном сердечнике и $(-B_{OM})$ в обратном магнитопроводе.

В момент времени t_1 с приходом управляющих импульсов на тиристоры V3, V6 или V4, V5 емкостной накопитель С3 начинает разряжаться на включенные последовательно и встречно обмотки W1 и W2. Начинают формироваться магнитные потоки в области ускорительной камеры $\Delta\Phi_0$ и в центральном сердечнике магнитопровода $\Delta\Phi_C$. Происходит инжекция электронов в вакуумную камеру. В этот же момент времени (в начале цикла ускорения) включаются тиристор V2 и корректирующий конденсатор С2, заряженный до требуемого напряжения через переменный резистор R1, который позволяет регулировать радиус равновесной орбиты, обмотку W1 и дроссель L1 от трехфазного двухполупериодного выпрямителя, состоящего из диодов D1-D6, начинает разряжаться на обмотку W2 через резистор R2. Ток разряда конденсатора С2 направлен встречно току обмотки W2, и ее магнитодвижущая сила F_{W2} уменьшается, что вызывает появление дополнительного потока через центральный сердечник магнитопровода. Тем самым компенсируется начальное сжатие равновесной орбиты, вызванное нелинейностью петли гистерезиса на начальном этапе перемагничивания, снижается отрицательное влияние вихревых токов.

В момент времени t_2 , когда напряжение на конденсаторе С2 сравнивается с напряжением на обмотке W2, разрядный ток конденсатора С2 спадает до нуля, тиристор V2 выключается, и в дальнейшем на оставшейся части цикла ускорения выполнение бетатронного соотношения на расчетном радиусе полностью осуществляется за счет выбранного соотношения витков обмоток W1 и W2.

В момент времени t_3 после окончания процесса ускорения включается тиристор V1 и подключает конденсатор С1, заряженный током дросселя L1 до максисального напряжения, к диоду D9. Ток разряда конденсатора С1 направлен встречно току обмотки W2. Ток обмотки W2 начинает уменьшаться, а ток обмотки W1 переходит в цепь конденсатора С1 и тиристора V1.

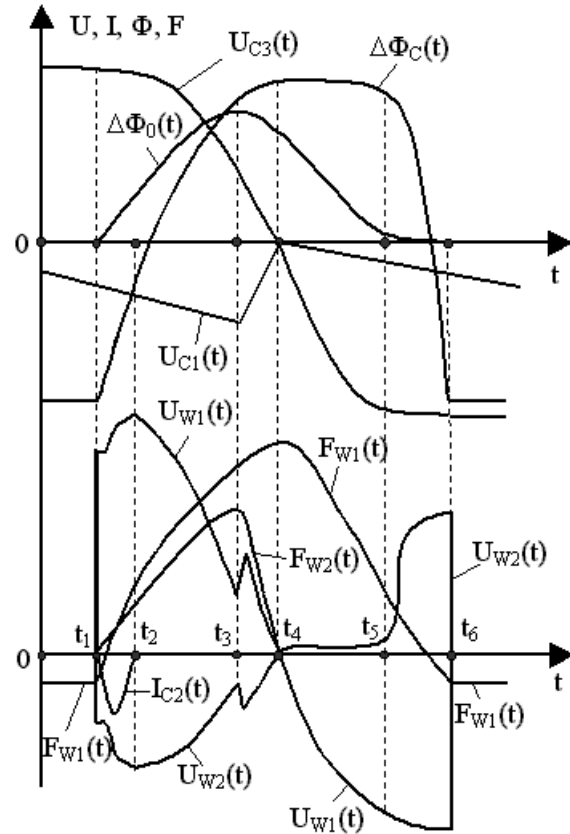


Рис. 3: Изменение от времени токов, напряжений, магнитодвижущих сил и магнитных потоков в системе питания бетатрона с подмагничиванием, где: U_{C3} – напряжение на емкостном накопителе С3, $\Delta\Phi_0$ – магнитный поток в области ускорительной камеры, $\Delta\Phi_C$ – магнитный поток в центральном сердечнике, U_{C1} – напряжение на конденсаторе С1, U_{W1} – напряжение на обмотке W1, U_{W2} – напряжение на обмотке W2, F_{W1} – магнитодвижущая сила обмотки W1, F_{W2} – магнитодвижущая сила обмотки W2, I_{C2} – ток корректирующего конденсатора С2.

В течение интервала времени t_3-t_4 происходит ввод энергии от конденсатора С1 в колебательный контур для компенсации потерь энергии в нем за цикл ускорения, ток обмотки W2 спадает до нуля. Обесточивание обмотки W2 приводит к насыщению центрального сердечника магнитопровода, магнитный поток $\Delta\Phi_0$ уменьшается, а магнитный поток $\Delta\Phi_C$ наоборот резко возрастает, что приводит к сбросу электронов на внешнюю мишень.

В момент времени t_4 после выключения тиристора V1 конденсатор С1 вновь заряжается током дросселя L1, а ток обмотки W1 переходит в цепь диода D7, диод D9 отключает цепь питания обмотки W2.

К моменту времени t_5 , когда ток обмотки W1 спадает до значения тока насыщения, определяемого магнитодвижущей силой F_{W1} , центральный сердечник магнитопровода выходит из насыщения и в интервале времени $t_5 \div t_6$ перемагничивается вновь в исходное состояние ($-B_C$).

В момент времени t_6 тиристоры V3, V6 или V4, V5 выключаются, и магнитное состояние магнитопровода определяется током дросселя L1, протекающим по обмотке W1, и цикл работы бетатрона с подмагничиванием закончился.

Экспериментальное исследование магнитной системы бетатрона с подмагничиванием проведено на базе электромагнита серийно выпускаемого бетатрона МИБ-6 (энергия тормозного излучения 6 МэВ, частота импульсов излучения 200 Гц, мощность дозы тормозного излучения 3 сГр/мин на расстоянии 1 м от мишени, вес излучателя 100 кг, энергия колебательного контура 120 Дж, потребляемая мощность не более 2,5 кВт, $\gamma = \frac{v_0}{rc} = 1.71$), в котором галетный блок был заменен на сплошной центральный сердечник, на который была уложена компенсационная обмотка. В полюсных наконечниках магнитопровода электромагнита были выточены кольцевые пазы для размещения центрального сердечника с компенсационной обмоткой.

По рассмотренной системе питания осуществлен запуск бетатрона с подмагничиванием на энергию тормозного излучения 6 МэВ, с частотой импульсов излучения 50 Гц и мощностью дозы тормозного излучения $\sim 0,75$ сГр/мин на расстоянии 1 м от мишени. Потребляемая мощность составила ~ 500 Вт. Энергия колебательного контура составила ~ 95 Дж, что на 21% меньше, чем у стандартного бетатрона МИБ-6. Следует также отметить, что рассмотренная система питания не содержит специальных схем сброса и контрактора в отличие от системы питания бетатрона МИБ-6.

Магнитные измерения показали, что нестабильность положения равновесной орбиты в течение цикла ускорения, вызываемая неодинаковым изменением магнитных потоков в области ускорительной камеры и в центральном сердечнике (вследствие нелинейности кривой намагничивания стали центрального сердечника электромагнита бетатрона и активного сопротивления меди компенсационной обмотки), не превышает 8% и практически не оказывает влияния на условия ускорения. Испытания показали высокую надежность установки. Следует отметить, что настройка бетатрона на излучение осуществлялась без разборки электромагнита. Данная особенность наиболее важна в ускорителях с большой энергией тормозного излучения, в которых вес электромагнита может достигать нескольких тонн, и его разборка превращается в трудоемкую и продолжительную по времени операцию.

Тепловые испытания показали, что для нормальной работы электромагнита бетатрона с подмагничиванием на частоте импульсов излучения 200 Гц, с энергией тормозного излучения 6 МэВ и мощностью дозы тормозного излучения ~ 3 сГр/мин на расстоянии 1 м от мишени площадь поперечного сечения компенсационной обмотки должна быть увеличена в 2 раза, при этом размах индукции в центральном сердечнике составит $\sim 3,6$ Тл. При этом также потребуется подключение низковольтного источника питания постоянного тока через дроссель к обмотке возбуждения для увеличения тока подмагничивания. За счет подмагничивания магнитопровода масса обратного магнитопровода будет уменьшена на $\sim 15\%$, что приведет к уменьшению массы электромагнита на ~ 5 кг. Потребляемая мощность не превысит 2,5 кВт.

Уменьшение массогабаритных параметров электромагнита будет значительным, если магнитную систему бетатрона с подмагничиванием применять:

— в бетатронах на энергии тормозного излучения >15 МэВ, имеющих значительный объем и вес стали по сравнению с объемом и весом обмотки;

— в бетатронах с $\gamma = \frac{v_0}{rc} \leq 1.4$.

В бетатронах на энергии тормозного излучения <15 МэВ и с $\gamma > 1.4$ применение магнитной системы бетатрона с подмагничиванием в некоторых случаях будет целесообразно, если в электромагнитах таких бетатронов уменьшить объем межполюсного пространства, при этом чтобы мощность дозы тормозного излучения осталась прежней, нужно увеличить частоту импульсов излучения.

В последнее время ведутся разработки малогабаритного бетатрона с подмагничиванием на энергию тормозного излучения 6 МэВ, с мощностью дозы тормозного излучения ~ 3 сГр/мин на расстоянии 1 м от мишени, в электромагните которого будет уменьшен объем межполюсного пространства за счет увеличения частоты импульсов излучения. По предварительным расчетам вес электромагнита такого бетатрона будет уменьшен в 1,5 раза по сравнению с весом электромагнита малогабаритного бетатрона МИБ-6, при этом будут также уменьшены массогабаритные параметры емкостного накопителя. Чтобы потребляемая мощность в установке не превысила 2,5 кВт, для изготовления магнитопровода электромагнита бетатрона планируется использовать сплавы 1-mil и metglas.

Выводы

1. Разработанная система питания для бетатрона с подмагничиванием не содержит специальных схем сброса и контрактора в отличие от системы питания бетатрона обычной конструкции.

2. Проведенный сравнительный анализ бетатрона с подмагничиванием на энергию тормозного излучения 6 МэВ с серийно выпускаемым бетатроном МИБ-6 показывает, что применение магнитной системы бетатрона с подмагничиванием позволяет уменьшить энергию колебательного контура и вес электромагнита бетатрона.

3. Настройка бетатронов с подмагничиванием на излучение осуществляется без разборки электромагнита. Данная особенность наиболее важна в ускорителях с большой энергией тормозного излучения, в которых вес электромагнита может достигать нескольких тонн, и его разборка превращается в трудоемкую и продолжительную по времени операцию.

4. Приведены случаи, в которых целесообразно применять магнитную систему бетатрона с подмагничиванием.

Список литературы

- [1] D.W. Kerst, G.D. Adams, H.W. Koch, C.S. Robinson. *Scient. Instrum.* 1950, 21, № 5, 462.
- [2] W.F. Westendorp. *Phys. Rev.*, 1947, 71, № 4, 271.
- [3] Васильев В.В., Москалев В.А., Фурман Э.Г. Бетатрон с подмагничиванием. ПТЭ, № 4, 1979.