

БЕТАТРОН С РАЗДЕЛЕННЫМИ УПРАВЛЯЮЩИМ И УСКОРЯЮЩИМ ПОЛЯМИ

Рассмотрены особенности построения и расчета электромагнитной системы индукционного циклического ускорителя с прямолинейными промежутками. Благодаря разделению управляющего и ускоряющего электромагнитных потоков такой ускоритель способен обеспечивать ускорение электронов до энергий свыше 300 МэВ при приемлемых массогабаритных параметрах. Приведена оригинальная конструкция ускорительного модуля.

Работа подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Введение

Бетатроны – это дешевые, надежные, простые в эксплуатации ускорители электронов. Преимущество их перед другими типами ускорителей – отсутствие высокочастотной ускоряющей системы. Уступая линейным ускорителям в числе ускоряемых частиц, бетатрон позволяет ускорить электроны вплоть до 100 МэВ и получать сравнимые плотности лучистой энергии на оси пучка.

Недостаток бетатронов состоит в необходимости создания магнитного поля в пространстве, охватываемом орбитой ускоряемых частиц, причем это поле в среднем вдвое больше поля на орбите. Это приводит к быстрому возрастанию массы ускорителя с ростом энергии.

Предельное число ускоряемых в бетатроне частиц определяется энергией инжекции, показателем спада магнитного поля и геометрией электромагнит – камера. Электронный заряд, ускоряемый в сильноточных бетатронах, достигает $3 \cdot 10^{12}$ частиц/цикл [1,2], а в сильноточных безжелезных бетатронах – $(5-6) \cdot 10^{12}$ частиц/цикл [3,4]. Возможности, связанные с повышением энергии инжектируемых частиц (в сильноточных безжелезных бетатронах $E_{инж} \sim 2$ МэВ), в значительной мере исчерпаны.

На пути создания бетатронов на более высокие энергии возникают две проблемы: во-первых, с ростом энергии быстро растет масса излучателя (пропорционально энергии в кубе), и, во-вторых, как было предсказано Д.Д.Иваненко и И.Я.Померанчуком [5], нарушаются условия нормальной работы бетатрона вследствие потери электронами части энергии на синхротронное излучение.

В связи с вышесказанным, в качестве альтернативы классическому бетатрону предлагается рассматриваемый индукционный циклический ускоритель.

Электромагнитная система индукционного циклического ускорителя

От указанного выше недостатка классического бетатрона свободен вариант индукционного циклического ускорителя, описанного М.С.Хвастуновым [6]. В этом ускорителе в качестве магнитной системы используется система ведущего поля слабофокусирующего синхро-

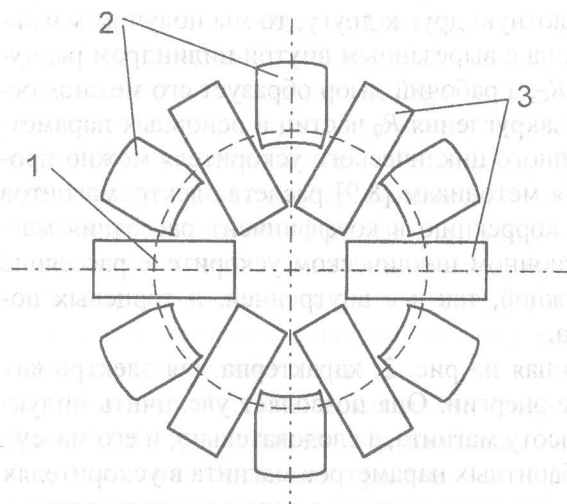


Рис. 1. Индукционный циклический ускоритель электронов: 1-траектория движения ускоряемых частиц; 2 -управляющие электромагниты; 3-ускоряющие сердечники-индукторы

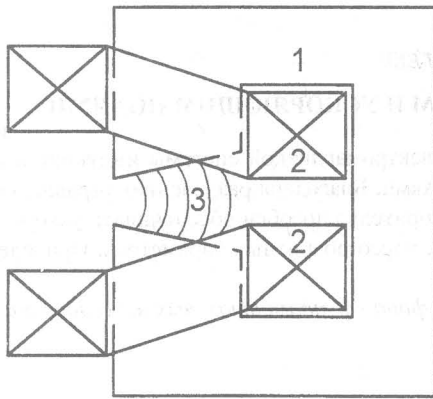


Рис. 2. Разрез магнитного блока, совмещающего фокусировку пучка и искривление траектории ускоряемых частиц: 1-магнитопровод; 2-намагничивающая обмотка; 3-силовые линии магнитного поля

вводит большое число N элементов периодичности. А при малом N сильная фокусировка не имеет существенных преимуществ перед слабой. Поэтому была выбрана слабая фокусировка как наиболее просто реализуемая. Кроме того, слабофокусирующая магнитная структура, которая обычно используется в бетатронах, предпочтительнее сильнофокусирующей, так как её относительно большая оптическая дисперсия позволяет использовать механизм затухания Ландау для управления коллективными неустойчивостями пучка.

Электромагнитная система индукционного циклического ускорителя включает в себя два вида электромагнитов – управляющие электромагниты и ускоряющие сердечники – индукторы.

Разрез магнитного блока управляющих электромагнитов изображен на рис.2. Электромагнит состоит из магнитопровода (1) и намагничивающих обмоток (2). Магнитопровод набирается из листов электротехнической стали и имеет рабочий зазор (3), в котором размещается ускорительная камера. Если в плане (рис.1) свести магнитопроводы управляющих магнитов радиально вплотную друг к другу, то мы получим магнитопровод обычного шестистоечного бетатрона с вырезанным внутри цилиндром радиусом, равным радиусу центральных вставок R_c , а рабочий зазор образует его межполюсное пространство. Поэтому расчет радиуса закругления R_0 частиц и основных параметров межполюсного пространства индукционного циклического ускорителя можно проводить по хорошо зарекомендовавшим себя методикам [8,9] расчета электромагнитов бетатронов. При этом необходимо внести коррекцию в коэффициент рассеяния магнитного потока полюсов, так как в индукционном циклическом ускорителе рассеяние магнитного потока происходит как с наружной, так и с внутренней, и торцевых поверхностей полюсной части магнитопровода.

Конструкция электромагнита, приведенная на рис. 2, характерна для электромагнитов протонных синхротронов на высокие энергии. Она позволяет увеличить индукцию в стали магнитопровода, уменьшить высоту магнита, а следовательно, и его массу.

Для дальнейшего уменьшения массогабаритных параметров магнита в ускорителях на большие энергии намагничивающие обмотки выполняются с водяным охлаждением, как, например, это было сделано в сильноточном бетатроне на 50 МэВ [10]. Примерные значения тока в окне в этом случае могут составить $10 \cdot 10^6$ А/м².

трона (рис.1). Ускоритель выполняется в виде отдельных чередующихся блоков управляющих и ускоряющих электромагнитов. Управляющее магнитное поле, определяющее орбиту электронов (1), создается электромагнитами (2), а ускоряющее частицы электрическое поле возбуждается ферромагнитными сердечниками – индукторами (3), размещенными в прямолинейных участках траектории частиц. На рисунке представлен вариант ускорителя с шестью элементами периодичности. Ускоритель подобен бетатрону с постоянным полем [7], но отличается от последнего тем, что радиальные размеры вакуумной камеры, индукторов и магнитов существенно меньше за счет использования растущего во времени ведущего поля. Магнитная система ускорителя компактна, поэтому нецелесообразно

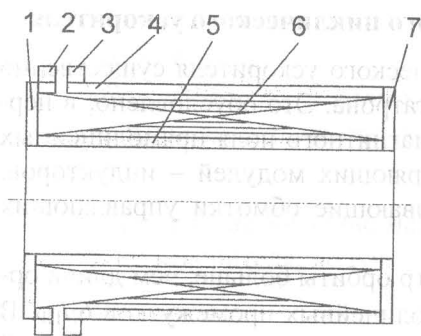


Рис. 3. Ускоряющий модуль:
 1,7-медные шайбы; 2,3-тоководы;
 4,5-медные трубы, 6-ферромагнитный сердечник

Основное назначение управляющих магнитов – фокусировка пучка и искривление траектории ускоряемых частиц. В то же время управляющие электромагниты возбуждают внутри круга радиусом R_0 переменный во времени магнитный поток $\Phi_{упр}$, который вносит свой вклад в ускорение электронов. Но основной вклад в создание ускоряющей ЭДС вносят ускоряющие модули – индукторы, которые возбуждают магнитный поток $\Phi_{уск}$.

В качестве индукторов авторами предлагаются ускоряющие модули в соответствии с работой [11] (рис.3). Ускоряющий модуль состоит из двух коаксиально расположенных медных труб (4) и (5), электрически замкнутых по торцам медными шайбами (1) и (7), что, в совокупности, образует первичную одновитковую распределенную возбуждающую обмотку. К источнику импульсного тока обмотка подключается посредством тоководов (2) и (3), расположенных в месте разрыва внешней трубы. Переменное магнитное поле возбуждается во внутреннем пространстве этой обмотки и за её пределами практически отсутствует. Для уменьшения намагничивающей силы внутри обмотки можно разместить ферромагнитный сердечник в виде цилиндра (6). Вихревое электрическое поле индуцируется внутри цилиндра (5), напряженность этого поля E направлена вдоль оси модуля.

Коаксиальная конструкция ускорительного модуля обладает высокой механической прочностью, что очень важно в условиях, когда необходимо пропускать через обмотку весьма высокие значения импульсов тока, необходимые для возбуждения вихревого электрического поля высокой напряженностью, что приводит к большим механическим напряжениям витков обмотки.

Использование сплошных медных труб для выполнения одновитковой обмотки индукционного ускорительного модуля упрощает технологию изготовления модуля и улучшает массогабаритные характеристики. А практическое отсутствие магнитного поля в окружающем ускорительном пространстве приводит к сокращению потребляемой от источника питания энергии. Оно также приводит к облегчению осуществления сверхпроводящего варианта модуля путем заполнения пространства между трубами вместо ферромагнитного сердечника хладонносителем.

Внутренний радиус сердечников определяется размерами вакуумной камеры и изоляционными расстояниями. В стали сердечников можно легко осуществить подмагничивание. Вопросы работы бетатронов с подмагничиванием и схемные решения устройств электропитания подробно рассмотрены в работах [12, 13]. С учетом подмагничивания размах индукции в стали можно принять равным от -1.75 до $+1.75$ Тл, что соответствует предельной петле гистерезиса. Отсутствие в индукторах воздушных зазоров сводит к минимуму значение магнитодвижущей силы, и намагничивающие обмотки содержат малое число витков

(с) Проведенный анализ показал, что, несмотря на некоторое увеличение радиальных размеров (при уменьшении вертикальных размеров), существенно уменьшается масса электромагнита. Разделение ускоряющего и управляющего электромагнитных полей позволяет осуществить компенсацию потерь энергии ускоряемыми электронами на синхротронное излучение при ускорении частиц до энергий свыше 300 МэВ путем генерирования этих полей на разных приведенных частотах [14,15].

Оценка параметров электромагнита индукционного циклического ускорителя

Электромагнитная система индукционного циклического ускорителя существенно отличается от аналогичной системы классического бетатрона. Это обусловлено, в первую очередь, наличием свободных от управляющего магнитного поля прямолинейных промежутков $l_{\text{ПР}}$, необходимых для размещения ускоряющих модулей – индукторов. Часть длины этих промежутков занимают намагничивающие обмотки управляющих магнитов.

В индукционном циклическом ускорителе периметр орбиты больше, чем длина орбиты $2 \cdot \pi \cdot R_0$ в классическом бетатроне, на длину прямолинейных промежутков $6 \cdot l_{\text{ПР}}$. В этом случае индуцируемая ЭДС недостаточна для ускорения электронов до заданной энергии из-за увеличенной протяженности орбиты. Во-вторых, при расчете магнитных потоков рассеяния полюса надо учитывать, что рассеяние магнитного потока, в отличие от классической конфигурации бетатронного поля, происходит как с наружной поверхности полюса, так и с внутренней поверхности (здесь нет замыкающегося на ярмо потока), и с боковых поверхностей сегментов управляющих магнитов. Поэтому при разработке методики расчета электромагнитной системы индукционного циклического ускорителя полезно использовать методики расчета подобных систем как бетатронов, так и синхротронов и бетатронов с постоянным магнитным полем.

Ускоряющее поле в индукционном циклическом ускорителе возбуждается на оси индукторов и в зазорах управляющих магнитов. Усредненная по периметру орбиты ускоряющая ЭДС описывается уравнением

$$\mathcal{E} = \omega \cdot (\Phi_{\text{уск}} + \Phi_{\text{упр}}) \cdot \cos \omega t = (\mathcal{E}_{\text{уск}} + \mathcal{E}_{\text{упр}}) \cdot \cos \omega t, \quad (1)$$

где индекс «уск» относится к индукторам, а индекс «упр» относится к магнитам; ω – угловая частота возбуждаемого поля.

Эта ЭДС распределяется по периметру Π орбиты:

$$\Pi = 2 \cdot \pi \cdot R_0 + 6 \cdot l_{\text{ПР}}, \quad (2)$$

где R_0 – радиус поворота электронов в управляющих магнитах, $l_{\text{ПР}}$ – длина прямолинейного промежутка между управляющими магнитами.

Анализ результатов расчета электромагнитной системы индукционного циклического ускорителя показал, что суммарная длина свободных промежутков может составлять от 55% до 65% периметра орбиты, а длину одного промежутка можно оценить как

$$l_{\text{пр}} = (0,24 \div 0,25) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_0. \quad (3)$$

Значение энергии, до которой можно ускорить электроны, можно получить путем умножения ускоряющей ЭДС \mathcal{E} (уравнение 1) на число оборотов электронов по орбите и интегрирования полученного выражения от 0 до $\pi/2$. В результате имеем

$$E = \frac{\beta \cdot c}{\pi \cdot (\Phi_{\text{уск}} + \Phi_{\text{упр}}) \cdot \sin \omega t}. \quad (4)$$

Из выражения (4) можно определить магнитный поток индукторов, необходимый для устойчивого движения по орбите с периметром Π

$$\Phi_{\text{уск}} = \frac{W \cdot \Pi}{\beta c \cdot \sin \omega t} - \Phi_{\text{упр}}. \quad (5)$$

Магнитный поток, создающий в управляющих электромагнитах ускоряющую ЭДС:

$$\Phi_{\text{упр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot B_0 \cdot R_0^n}{2 - n} (R_0^{2-n} - R_C^{2-n}) \cdot \sigma_0, \quad (6)$$

где B_0 – максимальное значение индукции на радиусе R_0 в поворотных магнитах, σ_0 –

коэффициент, учитывающий поток рассеяния, который можно принять равным $\sigma_0 = 1 + 0,56 \cdot \delta_0 / R_0$.

Для ускорителей с прямолинейными промежутками вводится понятие о среднем радиусе равновесной орбиты $R_{\text{ср}}$:

$$R_{\text{ср}} = \Pi / (2 \cdot \pi) = R_0 + 3 \cdot I_{\text{ГР}} / \pi. \quad (7)$$

В этом случае значение максимальной индукции управляющего поля, усредненной по кольцу ускорителя, получается равным:

$$B_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot R_0}{\pi R_0 + 3I_{\text{ГР}}} B_0. \quad (8)$$

Ускоритель на энергию 150 МэВ

По запросу Хиросимского университета проведена оценка параметров индукционного циклического ускорителя на 150 МэВ, предназначенного для генерации параметрического рентгеновского излучения.

Были приняты следующие исходные данные:

- воздушный зазор на равновесном радиусе поворота электронов 15 см;
- показатель спада магнитного поля в управляющих магнитах 0,46;
- индукция в стали управляющих магнитов 1,6Тл;
- индукция в стали ускоряющих сердечников (с учетом подмагничивания) 3 Тл.

Эскизное проектирование дало обнадеживающие результаты. При периметре орбиты 7,57 м (средний радиус орбиты 1,2 м) масса активных материалов излучателя не превышает 23 тонн. Основная масса активной стали сосредоточена в шести индукторах – 16 тонн, а общая масса управляющих магнитов составляет четыре тонны.

Высота излучателя определяется диаметром индуктора и равна 1,35 м, а средний радиус излучателя получается равным 1,75 м. Для монтажа такого ускорителя достаточно использовать механизмы грузоподъемностью до трех тонн.

Для сравнения укажем, что масса бетатрона на 150 МэВ в классическом варианте при плотности тока в окне $\Delta = 10 \cdot 10^6$ А/м² (водяное охлаждение) составит более 300 тонн.

Заключение

Индукционный циклический ускоритель представляется перспективным типом ускорителя для получения электронных пучков с энергиями в сотни мегаэлектронвольт. Разделение управляющего и ускоряющего электромагнитных потоков, являющееся отличительной чертой такого ускорителя, позволяет резко снизить массу излучателя и относительно простым способом скомпенсировать потери энергии ускоряемым пучком на синхротронное излучение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москалев В.А. Бетатроны. - М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Гончаров В.Я., Москалев В.А., Николаев В.Л. и др. / Сильноточные бетатроны и стереобетатроны. // Сб. Неразрушающий контроль и диагностика. - Томск: -НТЛ, 1998. - С.45-50.
3. Зенков Д.И., Костин А.Н., Козлов М.Б. и др. / Компактный источник тормозного излучения на базе безжелезного бетатрона. // 12th International Conference on High Power Particle Beams. Highfy, 1998, Proceedings.
4. Pavlovskii A.I., Zenkov D.I., Kuropatkin Yu.P. e.a. / Ironless betatrons – short radiation pulse generators for roentgenog of fast-going processes // 11th International Conference on High Power Particle Beams, Prague, 1996. Proceedings vol. 2. pp 55.
5. Иваненко Д.Л., Померанчук И.И., // Доклады АН СССР, 1944. Т.44. – С. 343-348.

6. Хвастунов М.С. / Циклический индукционный ускоритель // Приборы и техника эксперимента, 1981. №3. - С.- 20-23.
7. Канунников В.Н., Михалев П.С., Симухин Н.Ф. и др. // Сб: Труды шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна.: ОИЯИ, 1979. Т.2. - С. 319.
8. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон. - М.: Атомиздат, 1961.
9. Филиппов М.Ф. Руководство по расчету электромагнита бетатрона. - Томск: ТПИ, 1967.
10. Азимов А., Бабаджанов Р.Д., Москалев В.А. и др. // Прикладная ядерная спектроскопия, 1979. Вып. 8.
11. Москалев В.А. Индукционный ускоритель заряженных частиц (варианты). // Патент РФ № 2153783. Оpubл. БИ. №21. – 2000.
12. Фурман Э.Г. Бетатрон с подмагничиванием. - Томск: Изд. ТПУ, 2000.
13. Касьянов В.А., Рычков М.В., Филимонов А.А. и др. // Сб. Доклады Десятого Международного Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. - М.: ЦНИИАтомИнформ, 2001. - С. 113-116.
14. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. / Компенсация потерь энергии на синхротронное излучение в индукционном циклическом ускорителе. // ЖТФ, 1993. Т.75. Вып.3. - С.200-205.
15. Москалев В.А., Сергеев Г.И. / Бетатрон на 500 МэВ. // Сб. Неразрушающий контроль и диагностика. –Томск: НТЛ, 1998. -С.89-92.

УДК: 621.384. (088.8)

В.А.МОСКАЛЕВ, С.В.ПУСТЫННИКОВ, Г.И.СЕРГЕЕВ

ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ

Для питания мощных электрофизических установок предложен и разработан генератор импульсов тока на основе ударного генератора с индуктивным накопителем. Новая схема заряда индуктивного накопителя с тиристорными ключами позволила исключить быстродействующий электромеханический коммутатор, разрывающий цепь накопителя в момент передачи энергии в нагрузку.

Исследования, проведенные авторами на модели ударного генератора, выполненного в габаритах асинхронного двигателя МТФ-211, показали, что при соотношении параметров $X_H/X_{уд}=2$ наблюдается увеличение запасаемой в накопителе энергии в 1,5 раза.

Работа подготовлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Для питания потребителей импульсов тока большой мощности в настоящее время используются, в основном, три типа источников тока - источники тока с емкостными или с индуктивными накопителями энергии и ударные генераторы [1].

В тех случаях, когда требуются импульсы тока длительностью до 0.02 с - при получении сверхсильных магнитных полей в ускорителях, при питании плазмотронов, в некоторых электроимпульсных технологиях и т.д., предпочтение отдается ударным генераторам и индуктивным накопителям.

В свою очередь, индуктивный накопитель может являться промежуточным звеном между ударным генератором и нагрузкой, что позволяет значительно повысить долю энергии, передаваемой в нагрузку. В работах [1,2] показано, что при соотношении реактивных сопротивлений X_H накопителя и $X_{уд}$ ударного генератора $X_H/X_{уд} = 8$ в индуктивном накопителе можно сосредоточить энергию, равную 3,75 энергии внезапного короткого замыкания генератора.

Основными недостатками, существенно ограничивающими область применения таких устройств, являются: