

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕЗЖЕЛЕЗНОГО БЕТАТРОНА

Д. А. Кидяйкин, Ю. П. Куропаткин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Настоящая работа посвящена разработке электромагнита безжелезного бетатрона витковой конструкции. Безжелезные бетатроны были предложены в пятидесятых годах прошлого века А. И. Павловским [1], как альтернатива ускорителям прямого действия, для решения задачи создания мощного импульсного источника тормозного излучения, предназначенного для рентгенографии быстропотекающих процессов.

В электромагните обычного бетатрона присутствует ферромагнитный сердечник, который обеспечивает концентрацию магнитного поля между полюсами электромагнита. Энергия, до которой ускоряются электроны, ограничивается процессом насыщения сердечника. Это приводит к нарушению условия стационарности орбиты. Для решения этой проблемы во ВНИИЭФ, под руководством А. И. Павловского, была разработана серия безжелезных бетатронов, которые выполняются без ферромагнитного сердечника. В них распределение электромагнитных полей формируется выбором определённой конфигурации системы токонесущих витков. Это позволяет создать компактный электромагнит бетатрона, в котором решена проблема насыщения. Поэтому в безжелезных бетатронах энергия электронов в 2–3 раза больше, чем в обычных бетатронах с таким же радиусом орбиты. Энергия, до которой ускоряются электроны, ограничена лишь предельным током, который может быть пропущен в обмотке без её разрушения.

Существуют и другие преимущества безжелезных бетатронов, например темп ускорения. В обычных бетатронах он ограничен вихревыми токами в сердечнике. В безжелезных бетатронах это ограничение снимается, и темп ускорения может достигать десятков кэВ за оборот.

Безжелезные бетатроны применяются в рентгенографии быстропотекающих процессов в качестве мощного импульсного источника излучения для просвечивания оптически толстых объектов. Реализуется такой источник ускорением электронов до энергии в 50–70 МэВ. Количество ускоряемых частиц сильно зависит от размеров области устойчивости, определяемой структурой магнитного поля электромагнита. Таким образом, оптимизация электромагнита является одним из основных факторов повышения выходных характеристик источника излучения на основе безжелезного бетатрона, а разработка нового бетатрона начинается с разработки электромагнита.

Целью данной работы было овладение методами проектирования электромагнитов безжелезных бетатронов витковой конструкции, разработка и оптимизация электромагнита для нового безжелезного бетатрона. Для чего потребовалось усвоить критерии качества, определяющие геометрию поля, создать оригинальное программное обеспечение для расчёта структуры магнитного поля электромагнита и, исходя из критериев качества, подобрать оптимальную конфигурацию витков. Ориентиром являлось получение области устойчивости с размерами $\Delta r/R_0 \approx \pm 0,3$, $\Delta z/R_0 \approx \pm 0,3$, равновесным радиусом $R_0 \approx 0,25$ м, показателем спада $n_0 \approx 0,4$ и минимальной энергоёмкостью.

Для достижения цели необходимо было решить ряд следующих задач:

1. На основе литературных данных сформулировать критерии качества электромагнита бетатрона.
2. Рассчитать структуру магнитного поля электромагнита витковой конструкции.
3. Подобрать приемлемую конфигурацию витков и их распределение в пространстве с учётом размещения предназначенных для инъекции устройств и элементов конструкции, обеспечивающих механическую прочность.
4. Реализовать переход к спиральной обмотке, формируемой на основе системы круговых витков.
5. Оценить неоднородности магнитного поля, связанные с конфигурацией спроектированной спиральной обмотки.

1. Критерии качества электромагнита безжелезного бетатрона

Для нормальной работы безжелезного бетатрона необходимо соблюдение основных условий, которые сводятся к следующему:

- показатель спада магнитного поля n должен удовлетворять условию одновременной устойчивости в радиальном и вертикальном направлениях:

$$0 < n < 1 \quad (1)$$

- радиус равновесной орбиты будет постоянным, если соблюдается условие стационарности орбиты «2:1» [2]:

$$\overline{B_z}(t) = 2B_z(t) \quad (2)$$

- размеры области устойчивого движения определяются площадью, которую охватывает последняя

замкнутая эквипотенциаль вокруг локального минимума квазипотенциала.

- минимальная энергоёмкость, которая показывает, какая энергия магнитного поля необходима для ускорения электронов до заданной энергии E .
- минимизация неоднородностей компонент магнитного поля обмотки электромагнита.
- переход от системы круговых витков к спиральной двухслойной обмотке посредством подбора оптимальной конфигурации и числа витков.
- механическая прочность элементов конструкции
- совместимость с другими функциональными узлами
- простота изготовления (плоские спирали и соленоиды)

Все вышеперечисленные параметры и условия являются обязательными. Они позволяют разработать и оптимизировать электромагнит безжелезного бетатрона в зависимости от его применения.

2. Алгоритм разработки электромагнита

В начале проектирования электромагнита необходимо задать ориентировочные размеры ускорительной камеры, ориентировочные размеры электромагнита, выбрать ориентировочный радиус орбиты. Определить область недоступную для расположения витков: область занятую ускорительной камерой, инжектирующим устройством и другими функциональными узлами бетатрона. Затем следует определиться с числом витков и задать их начальные координаты. Существование медианной плоскости магнитного поля обеспечивается расположением витков симметрично относительно этой плоскости. Далее проводится начальный расчет структуры магнитного поля системы соосных круговых витков. Рассчитав начальное распределение магнитного поля, нужно, вариацией координат витков, и, при необходимости, вариацией числа витков, подобрать распределение поля так, чтобы выполнялось условие «2:1».

Размеры области устойчивости определяются последней замкнутой линией уровня находящейся в пределах ускорительной камеры. Вариацией координат групп витков в зоне разрыва линий уровня добиваются их замыкания, тем самым, увеличивая размеры области устойчивости.

Одним из критериев качества, по которым можно оптимизировать электромагнит, является удельная энергоёмкость. Она показывает, какая энергия магнитного поля необходима для ускорения электронов до заданной энергии E . В данной работе была выбрана энергия $E = 10$ МэВ. Число витков электромагнита после формирования оптимальной структуры магнитного поля с соблюдением всех необходимых условий равно $N = 114$. Витки обмотки соединены последовательно, поэтому ток в каждом витке будет одинаковым. Также для нахождения

удельной энергоёмкости потребуется найти индуктивность электромагнита, причём необходимо учитывать как собственная индуктивность круговых витков, так и взаимоиндуктивность между двумя любыми витками. Чем меньше удельная энергоёмкость электромагнита, тем меньше энергии тратиться на ускорение электронов до заданной энергии. Чем компактнее и равномернее витки будут распределены вокруг ускорительной камеры, тем меньше будет энергоёмкость.

Далее, на конфигурацию витков накладываются условия, обеспечивающие простоту изготовления. В данном случае, конфигурация витков подбирается таким образом, чтобы электромагнит представлял собой две плоские двухслойные спиральные катушки и два двухслойных соленоида.

При выборе числа витков формирующих электромагнит учитывается, что реальная обмотка будет многозаходной. Поэтому число витков должно быть кратно удвоенному числу заходов на половинке электромагнита для того, чтобы начало и конец катушки находились на одном азимуте.

Выше был описан идеализированный электромагнит, который представляет систему круговых витков. Такое описание сводит задачу к двумерной, азимутально-симметричной, что сокращает объём расчётов. Но в реальном электромагните витки должны соединяться между собой, и от способа соединения зависит степень отклонения реальной картины от идеализированной. Дело в том, что при соединении витков в реальной конструкции образуются неоднородности, которые оказывают влияние на структуру магнитного поля. Для выбора оптимальной конструкции межвитковых переходов необходимо рассчитывать их вклад в структуру поля электромагнита.

Одними из вариантов межвитковых соединений являются радиальные переходы [3]. Это простой и экономичный способ создания обмотки, но существует один недостаток. Качество радиального перехода зависит от его конструкции, которая определяется напряжением, приложенным к витку и энергией на которую рассчитан электромагнит. Такой переход подвержен сильным механическим нагрузкам, которые приводят к нарушению работы электромагнита и разрушению переходов.

В электромагнитах типа БИМ был выбран такой вариант соединений, в котором витки переходят друг в друга непрерывным образом, образуя спиральную обмотку, то есть распределяются по углу. Такой тип соединения уменьшает механические напряжения на проводники, и обеспечивают сохранность электромагнита при ускорении до высоких (~100 МэВ) энергий. Обмотка в данном случае выполняется без разрывов и соединений одним токопроводом. Неоднородность магнитного поля по азимуту распределяется вдоль всей окружности.

При проектировании спиральной обмотки использовались два основных приема – многозаходность и двухслойность обмотки. За счет многозаход-

ной обмотки неоднородности поля уменьшаются на порядок, а за счет двухслойной обмотки компенсируется азимутальная составляющая магнитного поля [4].

3. Описание модели электромагнита

Идеализированная модель электромагнита состоит из системы круговых витков. Задав их координаты и область рассмотрения, необходимо рассчитать компоненты магнитного поля B_z и B_r и азимутальную компоненту вектор потенциала A_ϕ . Все характеристики магнитного поля не зависят от азимутального угла ϕ . Компоненты B_z , B_r , и A_ϕ выражаются через геометрические факторы GB_z , GB_r , G_A и ток в витке. Геометрические факторы компонент поля, которые генерируются круговым витком с координатами R , Z , в произвольной точке пространства r , z , представляются через эллиптические интегралы $E(k)$ и $K(k)$:

$$G_A(r, z, R, Z) = 4\sqrt{R/r} \left[(1 - k^2/2)K(k) - E(k) \right] / k;$$

$$GB_z(r, z, R, Z) = \frac{k}{\sqrt{rR}} \left[K(k) - \frac{1 - k^2(1 + R/r)/2}{1 - k^2} E(k) \right];$$

$$GB_r(r, z, R, Z) = \frac{(z - Z)k}{r\sqrt{rR}} \left[-K(k) + \frac{1 - k^2/2}{1 - k^2} E(k) \right],$$

(3)

где k – модуль эллиптических интегралов, который является комбинацией координат витка R , Z и точки наблюдения r , z :

$$k = \{ 4rR / [(r + R)^2 + (z - Z)^2] \}^{1/2} \quad (4)$$

При последовательном соединении витков все характеристики определяются суммированием геометрических факторов от каждого витка и не зависят от времени. Для существования медианной плоскости необходимо расположить витки симметрично относительно плоскости $z = 0$.

В данном случае были рассчитаны только геометрические факторы компонент поля и векторного потенциала. При необходимости их можно перевести в компоненты магнитного поля.

Чтобы определить ток в обмотке при энергии ускорения 10 МэВ воспользуемся соотношением

$$E = 300 B_z R_0 = 300 G_{B_z}(R_0) R_0 I \quad [5], \quad (5)$$

откуда

$$I = 1 / (30 G_{B_z} R_0) \quad (6)$$

Для системы из N круговых витков энергия магнитного поля равна $W = LI^2/2$, где L – индуктивность системы витков:

$$L = \sum_i^N L_i + \sum_{i \neq k}^N M_{ik} = \sum_i^N L_i + 0.4\pi \sum_{i \neq k}^N R_k G_A(i, k);$$

$$L_i = 0,4\pi \log(16R(i)/D) - 1,75 \quad (7)$$

L_i – индуктивность кругового витка из провода диаметром $D = 6$ мм, а M_{ik} – взаимная индуктивность круговых витков, которая выражается через геометрический фактор векторного потенциала $G_A(i, k)$, определяющий магнитный поток i -го тока через k -й контур [6]. В приведенных формулах индуктивность измеряется в микрогенри, ток в кА, и энергия в Дж. Зная индуктивность системы витков и ток обмотки можно рассчитать удельную энергоёмкость.

Движение электрона в постоянном во времени азимутально-симметричном магнитном поле можно описать с помощью потенциальной функции или квазипотенциала $U(r, z)$ [7]. Распределение магнитного поля с вращательной симметрией в пространстве связано с единственной отличной от нуля азимутальной компонентой геометрического фактора векторного потенциала $G_{A\phi}$. Для удобства будем обозначать $G_{A\phi} = G_A$. Квазипотенциал частицы, движущейся в электромагнитном поле, определяется начальными условиями и структурой магнитного поля системы витков: $U(r, z) = G_A^2$. Расчёты квазипотенциала выполняются в двух вариантах: в первом находится кривая, описывающая зависимость $U(r, 0)$; а во втором рассчитывается зависимость $U(r, z)$ и находятся линии равного уровня. Последняя замкнутая линия равного уровня определяет границу области устойчивости.

4. Изложение результатов разработки конфигурации виткового электромагнита

После оптимизации электромагнита, конфигурация витков приобрела вид, показанный на рис. 1.

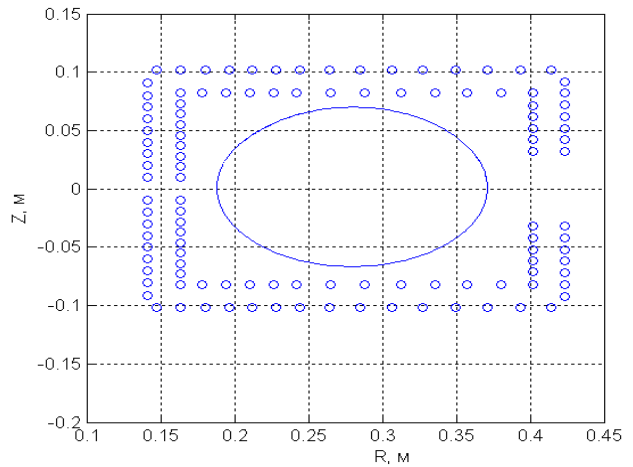


Рис. 1. Геометрия круговых витков: эллипс представляет собой сечение ускорительной камеры

Затем был произведен расчёт и получена зависимость нормированного геометрического фактора GB_z от координаты точки наблюдения r , представ-

ленного в безразмерном виде при $z = 0$. Также была получена зависимость нормированного геометрического фактора среднего поля в круге радиусом R_0 от r (рис. 2).

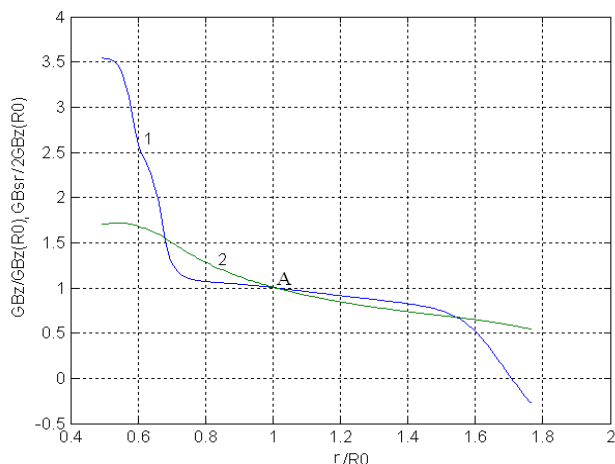


Рис. 2. Графики зависимостей нормированных функций $GB_z(r)/GB_z(R_0)$ и $\overline{GB}_z(r)/2GB_z(R_0)$, представленных в безразмерном виде: 1 – геометрический фактор $GB_z(r)/GB_z(R_0)$, 2 – среднее поле $\overline{GB}_z(r)/2GB_z(R_0)$

Из рис. 2 видно, что в пределах области устойчивости бетатронное условие выполняется в точке А.

На рис. 3 представлен график зависимости нормированной потенциальной функции от координаты точки наблюдения r при $z = 0$. Радиус равновесной орбиты R_0 рассчитывается с помощью определения локального минимума функции $U_{\text{norm}}(r, 0)$

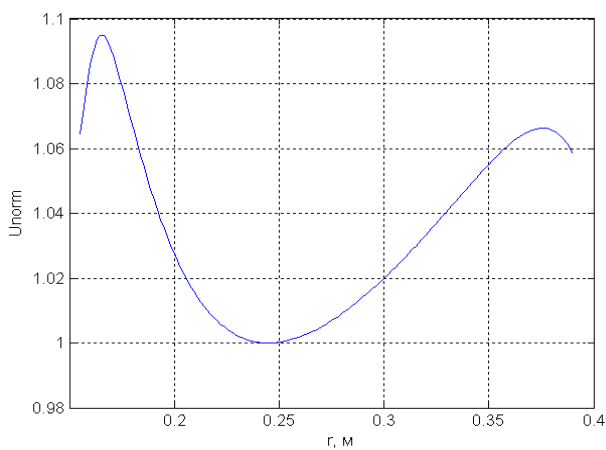


Рис. 3. График зависимости нормированной потенциальной функции U_{norm} от координаты точки наблюдения r при $z = 0$

Координата локального минимума соответствует радиусу равновесной орбиты $R_0 = 0,243$ м.

На рис. 4 приведено распределение линий уровня $U_{\text{norm}}(r, z)$ в безразмерном виде.

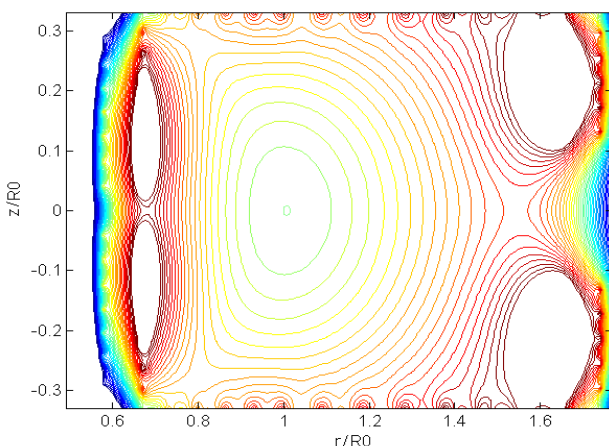


Рис. 4. Распределение линий уровня $U_{\text{norm}}(r, z)$, представленное в безразмерном виде. Разница между уровнями составляет 0,5%

Размеры области устойчивости: $\Delta r/R_0 = 0,51$, $\Delta z/R_0 = 0,52$. Глубина потенциальной ямы составляет 4 %.

Для определения показателя спада n_0 в точке R_0 использовалось численное дифференцирование по пятиточечной схеме [8]. Зависимость показателя спада от координаты точки наблюдения r представлена на рис. 5.

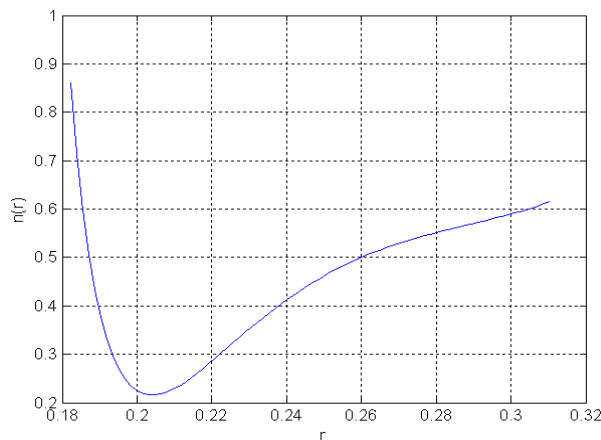


Рис. 5. Зависимость показателя спада от радиуса r

Для ускорения электронов до 10 МэВ блок питания должен обеспечивать ток в 1,65 кА. Индуктивность данного электромагнита за счёт трёхзаходной обмотки составляет 122 мкГн. Удельная энергоёмкость равна 5,19 кДж/10МэВ.

Разработанный электромагнит является более экономичным по сравнению с электромагнитом БИМ 234, удельная энергоёмкость которого составляет $W = 800$ кДж/100 МэВ.

5. Разработка спиральной обмотки

Чтобы перейти от идеализированной модели электромагнита к реальной все круговые витки необходимо соединить между собой. Поэтому следующим шагом является создание спиральной обмотки на основе системы круговых витков. Для её создания необходимо подобрать контрольные точки, в которых изменяется шаг витков.

Были подобраны 12 контрольных точек по координатам R , Z и углу φ и на основе этого получены координаты спирали. Также были рассчитаны шаги спирали между контрольными точками.

При проектировании спиральной обмотки использовались два основных приема – трёхзаходность и двухслойность обмотки. За счет трёхзаходной обмотки неоднородности поля уменьшаются на порядок, а за счет двухслойной обмотки компенсируется азимутальная составляющая магнитного поля. Для построения второго и третьего заходов необходимо увеличить угол φ на 120 и 240 градусов соответственно. На основе данной системы круговых витков были рассчитаны координаты спиральной обмотки.

По расчётам координат и шагов спирали была построена трёхмерная модель обмотки трёхзаходного электромагнита (рис. 6). Он состоит из двух плоских спиральных катушек и двух двухслойных соленоидов – внешнего и центрального. Расстояние между слоями соленоидов составляет 20 мм.

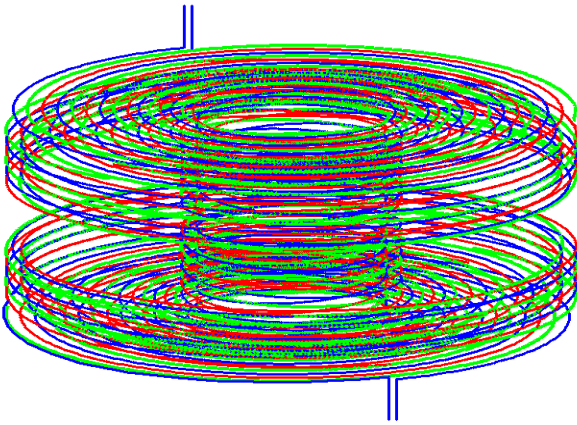


Рис. 6. Трёхмерная модель обмотки электромагнита

6. Оценка неоднородностей магнитного поля

Выше был описан идеализированный электромагнит, который представляет систему круговых витков. От способа соединения витков зависит степень отклонения от идеализированной картины, величина и характер неоднородностей, которые имеют место в реальной конструкции обмотки электромагнита.

Для выбора приемлемой конструкции межвитковых переходов необходимо рассчитывать их вклад в структуру поля электромагнита. Межвитковые со-

единения являются источником неоднородностей магнитного поля. В спроектированном электромагните витки переходят друг в друга, образуя, таким образом, спиральную обмотку. Такое соединение витков является оптимальным по сравнению с радиальными переходами, так как они подвержены сильным нагрузкам, приводящим к их разрушению.

Схема вычисления неоднородностей основана на представлении электромагнита в виде встречно включенных идеализированной и реальной обмоток [9]. Они разбиваются на отдельные участки. Каждый криволинейный участок заменяется прямолинейным отрезком. Затем необходимо просуммировать компоненты поля каждого участка и вычесть из них поле, которое создаётся симметричной обмоткой.

Воспользовавшись формулой для магнитной индукции, можно найти поле, создаваемое прямолинейным отрезком:

$$\vec{B} = \mu_0 I / 4\pi \int_i [d\vec{l} \vec{R}] / R^3 \rightarrow \mu_0 I / 4\pi \sum_m dl_m R \sin(dl \wedge R) / R^3, \quad (8)$$

где \vec{R} – расстояние от точки наблюдения до середины участка с током; dl_m – длина участка. Затем, с учётом приближения дуг прямолинейными участками, можно найти компоненты поля:

$$B_r = \mu_0 I / 4\pi (l_\varphi R_z - l_z R_\varphi);$$

$$B_\varphi = \mu_0 I / 4\pi (l_z R_r - l_r R_z);$$

$$B_z = \mu_0 I / 4\pi (l_r R_\varphi - l_\varphi R_r) \quad (9)$$

Результаты расчета неоднородностей магнитного поля для спроектированного электромагнита, обмотка которого изображена на рис. 6, приведены на рис. 7.

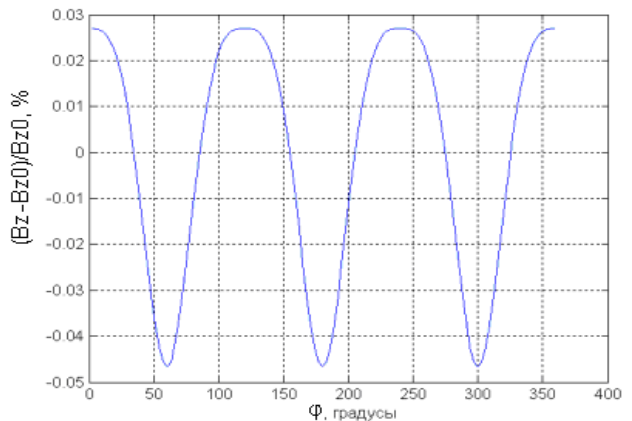


Рис. 7. Результаты расчета неоднородности компоненты B_z магнитного поля

В данном случае, симметричная обмотка получена поворотом половины электромагнита на 180 градусов относительно оси, лежащей в медиан-

ной плоскости. Компоненты магнитного поля симметричной части электромагнита будут иметь противоположные знаки.

Существует другой способ задания симметричной обмотки, в котором вторая половина электромагнита получается зеркальным отображением первой половины. В этом случае компоненты магнитного поля двух половинок электромагнита складываются.

В первом случае неоднородность примерно в 2 раза меньше. Практически всегда выбор делается в сторону минимизации неоднородности по z -ой компоненте. Следовательно, наиболее верным способом будет задать симметричную обмотку поворотом половины электромагнита на 180 градусов.

Заключение

В ходе проделанной работы был спроектирован трёхзаходный электромагнит, состоящий из двух плоских спиральных катушек и двух двухслойных соленоидов. Производился расчёт структуры магнитного поля электромагнита безжелезного бетатрона. В результате, подобрана оптимальная конфигурация из 114 витков, и удалось получить приемлемую область устойчивости с равновесным радиусом $R_0 = 0,243$ м, показателем спада $n_0 = 0,429$ и удельной энергоёмкостью 5,19 кДж/10МэВ. Индуктивность электромагнита составляет 122 мкГн. Ток, которым необходимо запитать электромагнит для ускорения электронов, равен 1,65 кА.

Спроектирована спиральная обмотка на основе подобранной конфигурации круговых витков и рассчитаны неоднородности компонент поля этой обмотки.

Литература

1. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Зысин Ю. А., Герасимов А. И. Сильноточные безжелезные бетатроны // ДАН СССР, 1965. Т. 160 № 1 С. 68.
2. Ананьев Л. М., Воробьёв А. А., Горбунов В. И. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон – Госатомиздат, Москва, 1961.
3. Накопление релятивистских частиц. Сборник статей – Госатомиздат, 1963.
4. Зенков Д. И., Куропаткин Ю. П. Электромагнит бетатрона / Авт. св. RU-2397627 С1 // Бюлл. № 23, 2009.
5. Коломенский А. А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 302.
6. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Часть третья – Государственное энергетическое издательство, 1959.
7. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей – Госатомиздат, Москва, 1969, С. 352.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике, 1973.
9. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М., 1964.