

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 537.8+621.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕЗГЕЛИЕВОГО
МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА**

© 2022 г. А. Н. Багдинова^{a,*}, А. С. Рыбаков^a, Е. И. Демихов^a, Т. Е. Демихов^a,
В. В. Лысенко^a, В. П. Тарасов^{a,b}, Б. А. Шумм^a, Д. С. Дмитриев^a

^a Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991 ГСП-1, Москва, Ленинский просп., 53

^b Институт проблем химической физики РАН
Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., просп. академика Семенова, 1

*e-mail: anna.bagdinova@gmail.com

Поступила в редакцию 18.05.2021 г.

После доработки 27.07.2021 г.

Принята к публикации 17.08.2021 г.

В настоящее время многие ведущие мировые производители магнитно-резонансных томографов (м.р.т.) уделяют значительное внимание сокращению потребления жидкого гелия в современных магнитных системах для м.р.т. Это определяется, в первую очередь, значительным удорожанием жидкого гелия в последние годы и сохранением этой тенденции в перспективе, а также дополнительными расходами и трудностями, связанными с его доставкой, хранением и использованием. По этим причинам ведутся разработки сверхпроводящих магнитных систем для м.р.т., не требующих жидкого гелия. Одной из проблем безгелиевых магнитных систем является повышенный риск перехода из сверхпроводящего состояния даже при кратковременном превышении теплопритока над производительностью охладителя, что в традиционных системах компенсируется испарением жидкого гелия. Наряду с теплопритоком, происходящим за счет теплопроводности криостата и подводных элементов, источником тепла являются также вихревые токи, возникающие в проводящих конструкциях магнита при генерации переменного магнитного поля градиентной системой м.р.т. При разработке градиентной системы безгелиевого м.р.т. был учтен подобный дополнительный теплоприток. В данной работе представлены расчет и моделирование градиентной системы для безгелиевого м.р.т.

DOI: 10.31857/S0032816222010013

ВВЕДЕНИЕ

Основными элементами градиентной системы магнитно-резонансного томографа (м.р.т.) являются градиентно-корректирующий модуль (г.к.м.) и блок градиентных усилителей. На сегодняшний день существуют законченная теория и математические методы расчета характеристик модуля г.к.м. для различных типов магнитов.

Основными исходными данными для проектирования этих систем являются их конфигурация и геометрические размеры, определяемые внутренним и внешним размерами туннеля магнитной системы. Для направления поля, параллельного продольной оси магнита, характерного для м.р.т. на сверхпроводящих магнитах [1–6], конфигурация модуля г.к.м. хорошо проработана и представлена в различных патентах, статьях и научной литературе.

Достигаемые при заданной конфигурации характеристики разрабатываемой системы полно-

стью определяются их геометрическими размерами. Однако нужно учитывать тепловыделение в обмотках г.к.м. Поэтому простое масштабирование в данном случае не работает, и для конкретных геометрических размеров необходимо рассчитывать основные характеристики методами математического моделирования.

В данной работе выбрана конфигурация модуля г.к.м., заданы его геометрические размеры и представлены результаты математического моделирования распределения электромагнитных полей градиентных катушек, по которым можно теоретически оценить основные характеристики разрабатываемого модуля:

- линейность градиентных полей;
- развиваемый градиент магнитного поля системы градиентных катушек в зависимости от расстояния от изоцентра г.к.м.;
- эффективность активного шиммирования;

– размеры рабочей зоны г.к.м.

Блок градиентных усилителей предназначен для усиления градиентных импульсов, формируемых спектрометром магнитно-резонансного сканера, и создания токов необходимой величины в системе градиентных катушек. Характеристики градиентных усилителей, для заданного импеданса градиентных катушек, определяют максимальные значения градиентных полей и скорость их изменения.

Нами проведен анализ градиентных усилителей и выбор из имеющейся на рынке линейки устройств, которые способны обеспечить заданные технические характеристики градиентной системы.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАДИЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Градиентная система состоит из

- блока градиентных усилителей с тремя градиентными усилителями и источником питания;
- модуля г.к.м., включающего в себя систему пассивного шиммирования магнита и три пары градиентных катушек X , Y , Z .

Основное назначение градиентной системы состоит в создании дополнительных магнитных полей, накладываемых на основное поле магнита, которые совпадают по направлению с основным полем и линейно изменяются по трем пространственным осям X , Y , Z . Наличие дополнительных линейных магнитных полей позволяет кодировать пространство по частоте и, тем самым, обеспечивать возможность получения послойных изображений. Включая градиентные поля в процессе сканирования, можно за счет их комбинации задавать частоту электромагнитных колебаний в любой точке (пространственной координате) исследуемого объекта. В отсутствие градиентов все пространственные элементы объекта (воксели) после возбуждения радиочастотным импульсом излучают электромагнитный сигнал на одной и той же частоте, не зависящей от пространственных координат.

В условиях наложения градиентных полей, линейно зависящих от координат, частота F излучения вокселя в общем случае будет зависеть от его пространственного положения:

$$F(x, y, z) = \gamma(B_0 + G_x x + G_y y + G_z z),$$

где x , y , z – координаты вокселя; G_x , G_y , G_z – градиенты дополнительного поля по соответствующим осям; B_0 – индукция поля основного магнита; γ – гиромагнитное отношение.

Таким образом, комбинация трех градиентов обеспечивает пространственное кодирование по

частоте, что в свою очередь делает возможным реконструкцию изображения $I(x, y, z)$ как функции интенсивности излучаемого сигнала в зависимости от пространственных координат.

Градиентные поля реализуются с помощью трех градиентных катушек, располагаемых в туннеле магнита и отвечающих за соответствующее направление в пространстве (X , Y или Z). Конфигурация катушек рассчитывается таким образом, чтобы создаваемые ими поля линейно и симметрично изменялись от минимума до максимума в рабочей зоне томографа и имели нулевое значение в центре системы г.к.м.

Кроме того, г.к.м. предназначен для создания дополнительного постоянного магнитного поля, корректирующего поле основного магнита томографа для достижения необходимой пространственной равномерности (однородности).

Блок градиентных усилителей служит для формирования мощных токовых импульсов в градиентных катушках г.к.м., создающих градиентные поля заданной формы и величины.

2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ Г.К.М.

Основой г.к.м. служит каркас, выполненный из шести стеклотекстолитовых колец, расположенных соосно и соединенных перемычками. Трехслойная система экранирующих катушек надевается на каркас снаружи, а трехслойная система основных вставляется внутрь, образуя цилиндрическую коаксиальную систему обмоток г.к.м. В образовавшееся свободное пространство между основными и экранирующими катушками через пазы в кольцах закладываются 24 короба прямоугольного сечения, в которых размещены ферромагнитные элементы системы пассивного шиммирования. В торце цилиндрической системы выведены кабели питания г.к.м. Вплотную к внутренней поверхности катушек г.к.м. смонтирован радиочастотный экран.

В соответствии с принципами магнитно-резонансной томографии, приведенными, например, в работах [7–9], для выполнения своей функции г.к.м. должен создавать три независимо управляемые компоненты поля, градиенты проекций которых на основное магнитное поле лежат в трех ортогональных направлениях X , Y , Z , причем оси X и Y перпендикулярны основному полю, а ось Z параллельна. Общий вид г.к.м. представлен на рис. 1.

Часть г.к.м., предназначенная для создания изменяющегося во времени магнитного поля, представляет собой систему катушек, располагаемых в туннеле магнита. Проводники катушек проложены таким образом, что пропускаемые по

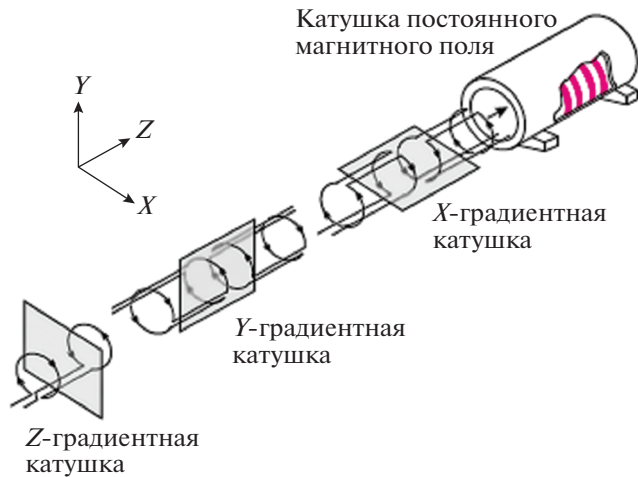


Рис. 1. Общий вид г.к.м.

ним токи создают магнитные поля необходимой конфигурации. Часть г.к.м., предназначенная для корректировки однородности поля основного магнита, так называемая система пассивного шиммирования, представляет собой набор стержней из ферромагнитного материала, установленных параллельно образующей поверхности внутреннего цилиндра магнита в определенных позициях. Кроме того, корректировка линейных по координатам отклонений поля проводится за счет подачи дополнительных постоянных токов в катушки г.к.м.

Система катушек г.к.м. состоит из трех независимых частей, каждая из которых создает градиент поля вдоль одной из трех взаимно перпендикулярных осей X , Y , Z . Расположение проводников катушек г.к.м. рассчитывается так, чтобы в рабочей области туннеля магнита выполнялись условия линейности градиентов:

$$B_z(x) = g_x I_x x, \quad B_z(y) = g_y I_y y, \quad B_z(z) = g_z I_z z,$$

где g_x, g_y, g_z — характеристики г.к.м., I_x, I_y, I_z — токи в катушках X, Y, Z . Максимальная достижимая величина $g_x I_x, g_y I_y, g_z I_z$ характеризует “силу” градиентной системы магнитно-резонансного томографа, обычно приводимую в единицах мТл/м. “Сила” градиентов определяется конфигурацией и импедансом градиентных катушек и характеристиками системы градиентных усилителей.

Расчет катушек г.к.м. проводится по заданным основным геометрическим размерам с оптимизацией по линейности градиентов, по подавлению вихревых токов, по индуктивности, по рассеиваемой мощности и по “силе” градиентной системы. Базовыми элементами цилиндрического г.к.м. являются так называемые катушки Максвелла (круговые, для создания градиента поля вдоль оси магнита) и катушки Голея (седловидные, для создания градиента поля перпендикулярно к оси магнита), схематично изображенные на рис. 2.

Современные катушки г.к.м., рассчитанные с использованием принципов целевого поля (target field) [10] и функции потока (stream function (SF)) [11], имеют более сложные формы витков и обладают большей эффективностью. Схематические изображения примеров подобных катушек приведены на рис. 3.

3. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Кроме свойства линейности градиентов, г.к.м. должен иметь свойство подавления вихревых токов, возникающих в проводящих элементах конструкции магнита, таких как криостат, тепловой экран и т.п. Если не приняты меры, то при создании зависящих от времени градиентных полей за счет индуктивной связи катушек г.к.м. с указанными проводящими элементами в последних возникают вихревые токи. Поля вихревых токов отличаются от исходных градиентных полей как по пространственному распределению, так и по

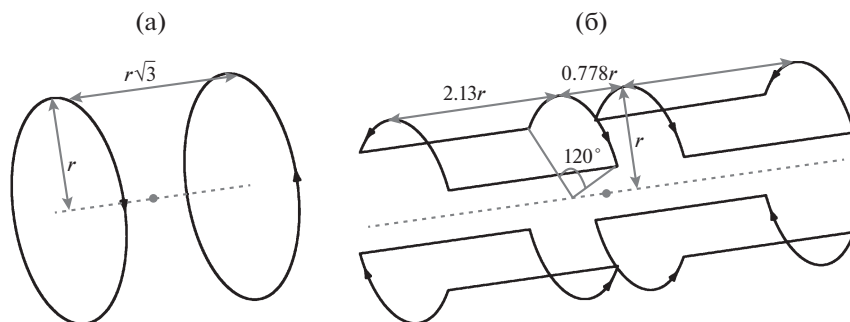


Рис. 2. Базовые элементы катушек г.к.м.: а — катушка Максвелла, б — катушка Голея.

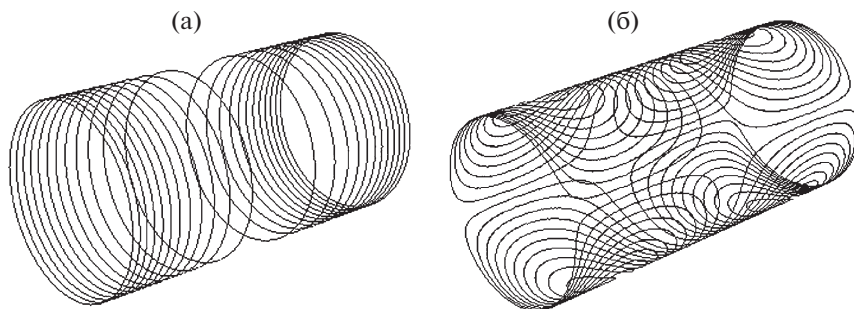


Рис. 3. Примеры катушек г.к.м. для создания градиента поля вдоль оси магнита (а) и перпендикулярно к оси магнита (б).

временной зависимости. При сложении конфигурация результирующего поля отличается от заданной импульсной программы и на изображении появляются различного рода артефакты, препятствующие применению м.р.т. в диагностических целях.

При изменении тока в градиентных катушках в окружающих проводящих конструкциях наводится э.д.с., пропорциональная изменению магнитного потока.

Поскольку любой замкнутый контур, в котором наводится э.д.с., можно представить как индуктивность L и сопротивление R , по контуру будет протекать ток I_ϕ в соответствии с уравнением

$$LdI_\phi/dt + I_\phi R = -k dI/dt, \quad (1)$$

где I_ϕ – ток Фуко (вихревой ток), I – ток в градиентной катушке, k – коэффициент пропорциональности.

Результирующее магнитное поле $B_{рез}$ в любой точке пространства будет представлять собой сумму

$$B_{рез} = B + B_\phi,$$

где B – поле, создаваемое током в градиентной катушке; B_ϕ – поле, создаваемое током Фуко. Со-

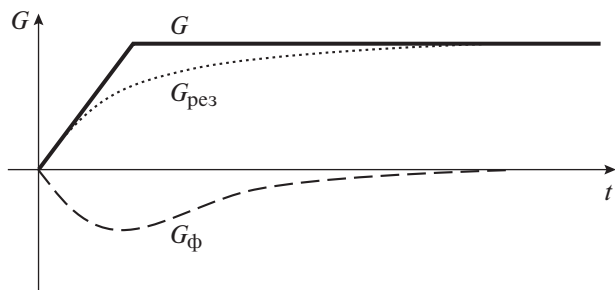


Рис. 4. Изменения во времени градиентов магнитного поля.

ответствующим образом будут вести себя и градиенты этих полей.

На рис. 4 изображены изменения во времени трех градиентов магнитных полей: G – для тока в градиентной катушке, G_ϕ – для тока Фуко, $G_{рез}$ – для суммы этих двух токов.

Обычный метод компенсации искажений – математический. Исходный градиент задается в виде суммы желаемого градиента и расчетного, создаваемого токами Фуко:

$$G_{корр} = G + MG_\phi,$$

где M – весовой коэффициент.

Поскольку G известно, нужно вычислить G_ϕ . В соответствии с формулой (1) G_ϕ можно искать в виде решения уравнения

$$TdG_\phi/dt + G_\phi = dG/dt.$$

При заданной постоянной времени T уравнение решается в численном виде. Таким образом, задав G , постоянную времени T и весовой коэффициент M , можно сформировать градиент $G_{корр}$. Значения T и M подбираются экспериментально с использованием специальной импульсной программы.

Сначала собирается сигнал спада свободной индукции (с.с.и.) без градиента и запоминается фаза с.с.и. $T_0(t)$. Затем с.с.и. собирается вторично, но при включенном градиенте, и снова запоминается фаза $T_1(t)$.

Комбинируя T и M , добиваются приближения $T(t)$ к нулю. Коррекция может состоять из нескольких экспонент с различными значениями T и M :

$$G_{корр} = G + M_1G_{1\phi}(T_1) + M_2G_{2\phi}(T_2) + M_3G_{3\phi}(T_3).$$

Если одной экспонентой не удастся свести $T(t)$ к нулю, то добавляются следующие экспоненты, находя для них оптимальные T и M .

Такая коррекция возможна при симметричных вихревых токах, так как градиентные катушки симметричны относительно центра магнита. Если имеет место асимметрия, то градиентами вихревые токи полностью компенсировать нельзя. Допустим, по оси Y сверху находится больше проводящих конструкций, чем снизу. Тогда поля, вызванные токами Фуко, будут присутствовать в плоскости $Y = 0$. (В случае симметричных токов в центре магнита $X = Y = Z = 0$ полей от них не будет.)

Можно компенсировать несимметричные токи Фуко с помощью катушки B_0 . Если в центре магнита во время действия градиента появляются поля от токов Фуко, то их можно обнаружить, поместив фантом малого размера в центр и воспользовавшись приведенной выше импульсной последовательностью. Если в центре фаза $T(t)$ ненулевая, то на катушку B_0 надо подавать коррекцию, рассчитываемую аналогичным образом, с той разницей, что в этом случае коррекция G_ϕ не прибавляется к заданию градиента, а подается в чистом виде на B_0 :

$$B_0^{\text{corr}} = MB_0G(TB_0).$$

На вход вычислителя уравнения (1) подается настраиваемый градиент G и параметрами TB_0 и MB_0 добиваются, чтобы величина $T(t)$ была близка к нулю. При этом выход вычислителя подается на усилитель B_0 . Описанный математический метод компенсации вихревых токов хорошо работает только в случае малых вихревых токов. Если токи велики, то их надо предварительно ослабить аппаратными средствами.

Из развитых к настоящему времени методов подавления вихревых токов наиболее эффективным считается применение так называемых активно экранированных градиентных катушек [9]. Активно экранированная катушка состоит из двух коаксиально расположенных последовательно соединенных обмоток — внутренней основной и внешней экранирующей. Проводники обмоток расположены так, что при прохождении тока поле, создаваемое вне катушки, существенно уменьшается по сравнению с неэкранированной катушкой, не взаимодействует с окружающими элементами конструкции и не вызывает появления вихревых токов. По принципу действия экранирующая обмотка имитирует идеальный сверхпроводящий экран, полностью изолирующий магнитное поле.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ Г.К.М.

4.1. Исходные данные для моделирования

Внешние геометрические размеры г.к.м. должны обеспечивать размещение модуля внутри цилиндрического туннеля магнита со следующими размерами: внутренний диаметр туннеля 910 мм; длина туннеля 1650–1750 мм.

Внутренний диаметр г.к.м. должен обеспечивать размещение электромагнитного экрана и передающей катушки и составляет 660 мм.

Технические характеристики градиентной системы (при использовании современных градиентных усилителей) должны быть следующими: максимальные градиенты — не менее 30 мТл/м; максимальная скорость изменения — не менее 100 мТл/м/с; минимальное время переключения — не более 300 мс; нелинейность градиентных полей в сфере 450 мм — не более 5%; рабочий цикл — до 100%.

Эксплуатационные характеристики модуля г.к.м.: водяное охлаждение градиентных катушек, наличие активных экранирующих катушек.

4.2. Методика расчета

Главная проблема при проектировании градиентной катушки — получить необходимую пространственную зависимость поля и при этом обеспечить минимальную индуктивность, минимальное омическое сопротивление и хорошую равномерность поля катушки в рабочей зоне. В работах [9, 10] рассмотрено несколько критериев для оптимизации градиентных катушек:

- $\min(P)$ — минимальная рассеиваемая мощность;
- $\min(W)$ — минимальная запасенная энергия в катушке;
- $\min(\max(|j|))$ — критерий минимизации максимальной плотности тока в областях, где концентрация проводников максимальна; это позволяет увеличить расстояние между проводниками и тем самым уменьшить эффект от джоулевого нагрева в данной области;
- $\min(P) \& \max(|j|)$ — минимальная рассеиваемая мощность и максимальная плотность токов, создаваемая катушкой.

Последний критерий является наиболее интересным с точки зрения практической реализации катушек и получения требуемых параметров.

Для расчета электромагнитных полей катушек г.к.м. обычно используется метод конечных разностей, однако метод моментов оказался более продуктивным, в результате чего быстро стал популярным. В частности, метод моментов удобен для расчета изогнутых металлических поверхно-

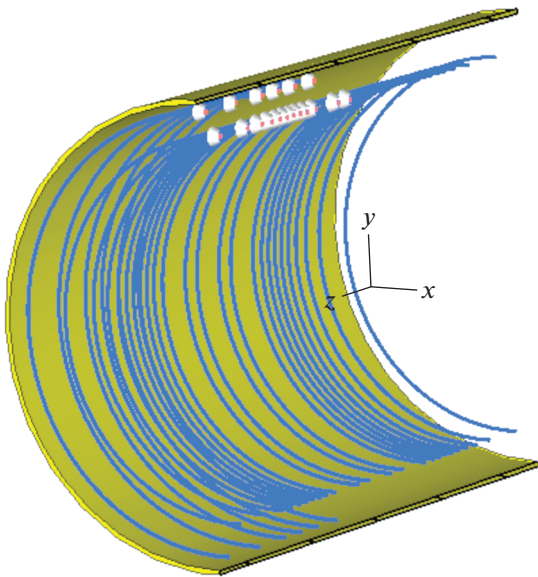


Рис. 5. Конфигурация Z-катушки.

стей и проводов, которые входят в конструкцию рассчитываемой катушки. Преимуществом расчета интегральных уравнений методом моментов является то, что вычисления проводятся не по объему, а по поверхности, что избавляет от необходимости расчета свободных пространств внутри интересующего объекта. Метод моментов также позволяет точно описать поле от изогнутых поверхностей и проводов, не требуя задания специальных граничных условий. Металлические поверхности разбиваются на треугольные сегменты конечного размера, а провода – на линейные сегменты. Магнитные поля рассчитываются из решения, полученного методом моментов.

Согласно принципу эквивалентности поверхностей рассчитываются эквиваленты магнитных и электрических полей. Металлические поверхности, провода и диэлектрические объекты могут быть объединены в единую задачу расчета, при этом находясь внутри, на границе и снаружи в любой диэлектрической области.

Не существует теоретических ограничений по числу закрытых диэлектрических областей, которые могут быть рассчитаны при помощи метода моментов.

4.3. Результаты расчета Z-катушки

При моделировании катушки для Z-градиента выбрана конструкция в виде 24 концентрических окружностей, расположенных на цилиндре. Экранирующая катушка расположена между основной градиентной катушкой и “рубашкой” томографа. Число витков экранирующей катушки

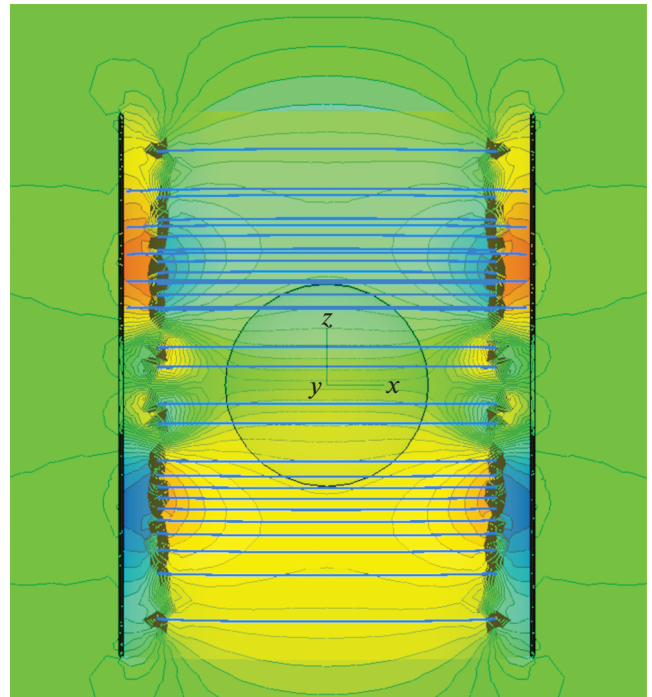


Рис. 6. Магнитное поле B_z , создаваемое градиентной катушкой Z.

выбрано вдвое меньшим – 12. Обе катушки симметричны относительно плоскости XY. Конфигурация Z-катушки, принятая при моделировании, показана на рис. 5.

Базовые геометрические размеры градиентной катушки Z: длина рабочей катушки 1196 мм, экранирующей – 1130 мм; диаметр рабочей катушки 750 мм, экранирующей – 860 мм.

При моделировании всех характеристик катушки величина тока, протекающего через катушку, принималась равной 200 А.

На рис. 6 показано рассчитанное магнитное поле B_z , создаваемое совместным действием рабочей и экранирующей катушек. В центре рисунка показана зона однородности радиусом 225 мм. Хорошо видно, что за пределами экранирующей катушки напряженность поля резко уменьшается.

Неравномерность градиента, рассчитанная для всей зоны однородности поля, составила менее 4%.

Для расчета вихревых токов, которые возникают в “рубашке” магнита, рассматривался градиентный импульс длительностью 200 мс с фронтом 1 мс, что близко к форме сигналов, используемых в реальных импульсных последовательностях.

Вихревые токи рассчитывались через время 5 мс после завершения импульса.

На рис. 7 показана плотность токов на внутренней поверхности криостата вдоль оси Z при

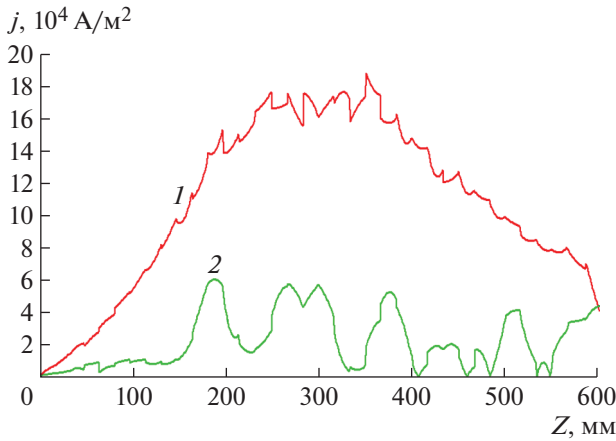


Рис. 7. Плотность токов на внутренней поверхности криостата вдоль оси Z при отключенной (1) и работающей (2) экранирующей катушке.

отключенной (кривая 1) и работающей (кривая 2) экранирующей катушке. Оптимизация экранирующей катушки была проведена по критерию минимальной плотности тока на внутренней поверхности криостата.

На рис. 8 приведено распределение плотности вихревых токов по внутренней поверхности криостата с экранирующей катушкой (рис. 8а) и без нее (рис. 8б). Шкала плотности токов в обоих вариантах одинаковая.

При всех положительных моментах от использования экранирующей катушки возникают и проблемы, связанные с уменьшением магнитного поля в зоне однородности, так как токи в экранирующей катушке направлены в противоположную сторону по отношению к токам в основной катушке. Уменьшение поля иллюстрируется на

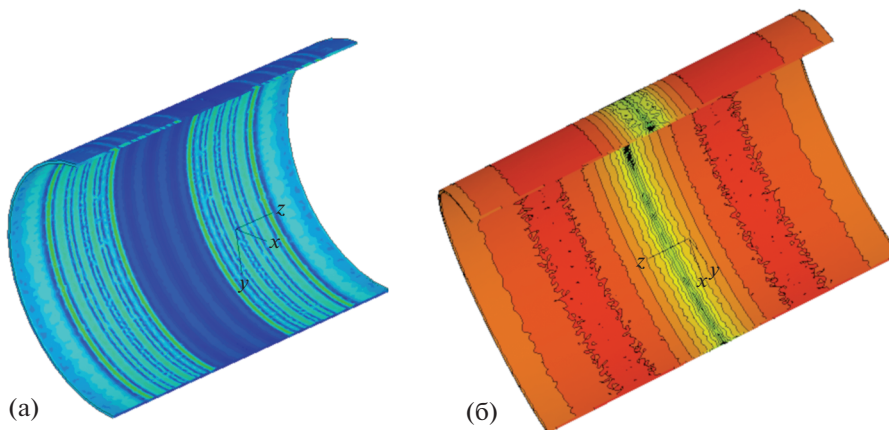


Рис. 8. Распределение плотности вихревых токов по внутренней поверхности криостата с экранирующей катушкой (а) и без нее (б).

рис. 9. Это следует учитывать при выборе мощности градиентного усилителя.

4.4. Результаты расчета X/Y-катушки

Катушки для X - и Y -градиентов выполнены в виде четырех одинаковых частей, симметрично расположенных относительно плоскостей XY и YZ . Число витков каждой части выбиралось равным 12. Катушка Y -градиента отличается от катушки X -градиента взаимным расположением в пространстве. Поворот катушки X -градиента на 90° относительно оси Z позволяет получить катушку Y -градиента. Поэтому в дальнейшем при вычислении характеристик катушек будем использовать термин X/Y -градиент, относящийся к обеим катушкам.

Конфигурация X/Y -катушки, принятая при моделировании, показана на рис. 10.

Экранирующая катушка X/Y расположена между основной градиентной катушкой и экраном. Экранирующая катушка также состоит из четырех частей, содержащих по 5 витков, расположенных на цилиндре, и симметрична относительно плоскостей XY и YZ . Вид экранирующей катушки показан на рис. 11.

Базовые геометрические размеры градиентных катушек X и Y : длина градиентной катушки X (Y) — 1056 мм (1056 мм), ее диаметр — 700 мм (725 мм); длина экранирующей катушки X (Y) — 1196 мм (1196 мм), ее диаметр — 820 мм (845 мм).

При моделировании всех характеристик катушки величина тока, протекающего через катушку, принималась равной 200 А.

Рис. 12 иллюстрирует неравномерность в процентах градиента поля на границе зоны однородности относительно значения в центре. Зона од-

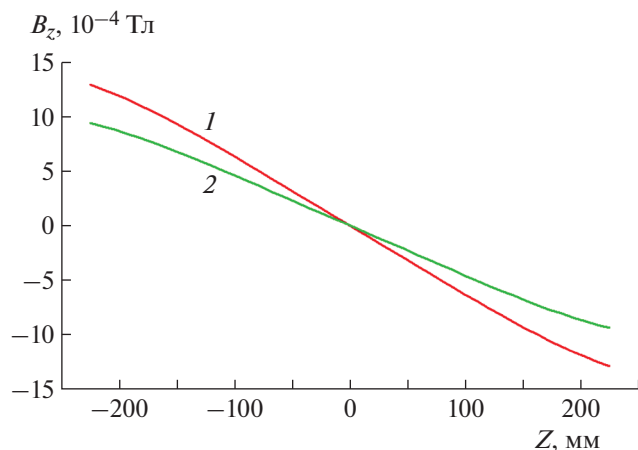


Рис. 9. Рассчитанное поле Z-катушки: 1 – с экранирующей катушкой, 2 – без экранирующей катушки.

нородности представляет собой сферу радиусом 225 мм. Зона однородности рассечена плоскостями с шагом угла наклона $\Delta\varphi = 22.5^\circ$. Как видно из приведенных графиков, максимальная неоднородность поля составляет $-4.3...+3.5\%$.

Для расчета вихревых токов, наводящихся на внутренней поверхности криостата, моделировался сигнал длительностью 200 мс с фронтом 1 мс, что близко к форме сигналов в реальных импульсных последовательностях. Вихревые токи рассчитывались через время 5 мс после завершения импульса.

На рис. 13 представлено распределение плотности токов на внутренней поверхности криостата вдоль оси Z соответственно при отключенной (кривая 1) и при работающей (кривая 2) экранирующей катушке. Оптимизация экранирующей катушки была проведена по критерию минимальной плотности тока на внутренней поверхности криостата.

На рис. 14 приведено распределение плотности вихревых токов по внутренней поверхности криостата с экранирующей катушкой (рис. 14а) и без нее (рис. 14б). Шкала плотности токов на обоих рисунках одинаковая.

Аналогично рассмотренной выше Z-катушке, токи в экранирующей X/Y-катушке направлены в противоположную сторону по отношению к токам в основной катушке и уменьшают полезный градиент магнитного поля в зоне однородности. Рассчитанное уменьшение поля показано на рис. 15. Кривая 1 соответствует полю B_x (B_y) при отсутствии тока в экранирующей катушке, кривая 2 – при протекании тока через экранирующую катушку. Результаты моделирования уменьшения полезного градиента магнитного поля должны учитываться при выборе градиентного усилителя.

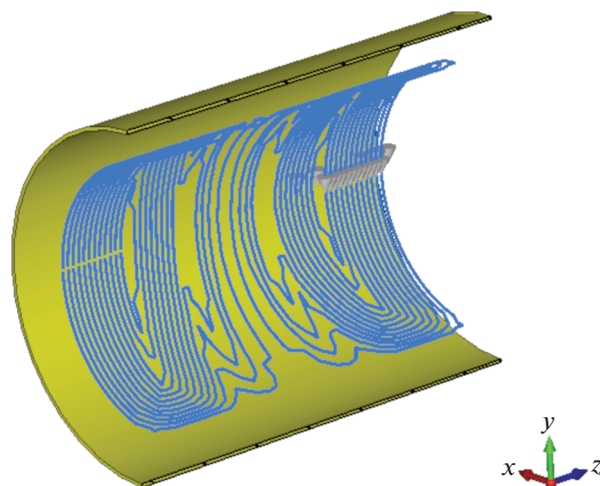


Рис. 10. Конфигурация X/Y-катушки.

5. РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭКРАН

Обязательной частью системы г.к.м. является радиочастотный экран, отделяющий приемные и передающую катушки от катушек г.к.м. Он представляет собой цилиндр из тонколистовой меди с разрезами, края которых соединены конденсаторами. Разрезы предназначены для размыкания экрана по низкой частоте (для устранения вихревых токов от градиентных импульсов). Конденсаторы замыкают экран по высокой частоте, устраняя связь между приемной катушкой и катушкой г.к.м.

В отсутствие экрана часть энергии радиочастотного сигнала, излучаемого объектом и принимаемого радиочастотной катушкой, рассеивается в градиентных катушках.

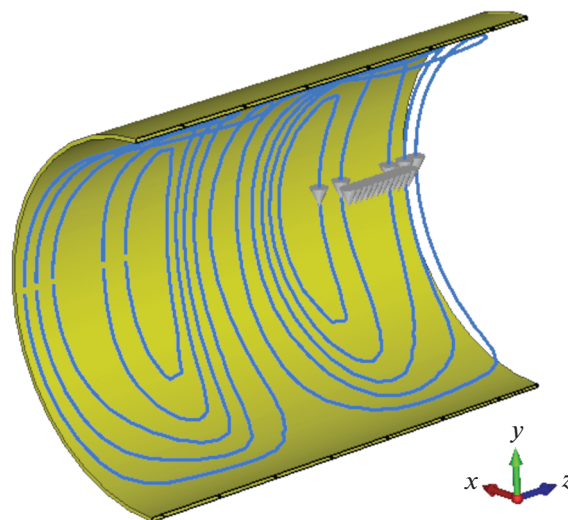


Рис. 11. Экранирующая X/Y-катушка.

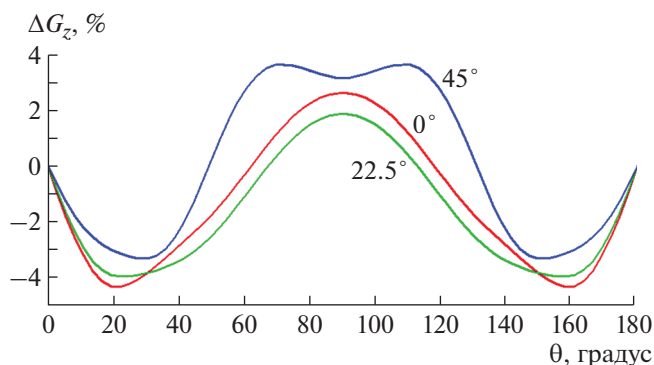


Рис. 12. Неравномерность градиента поля на границе зоны однородности — сферы с радиусом 225 мм под разными углами плоскости сечения с шагом 22.5°.

Принимаемый я.м.р.-сигнал (я.м.р. — ядерный магнитный резонанс) можно рассматривать как источник электромагнитного излучения, который индуцирует высокочастотные токи в замкнутых контурах градиентных катушек.

При этом в приемной катушке уровень сигнала уменьшается, а часть электромагнитной энергии расходуется на нагрев проводников градиентной катушки. В итоге получаемые изображения становятся более зашумленными.

Радиочастотный экран препятствует проникновению электромагнитного поля и развитию индукционных токов в градиентных катушках.

Для того чтобы индукционные токи не возникали в самом экране, последний делается разрезным таким образом, чтобы в нем не было замкнутых контуров в плоскости, перпендикулярной оси магнита. Замыкание разрезного экрана по высокой частоте осуществляется соединением каждой проводящей полосы с соседними полосами с помощью шести конденсаторов номиналом 200 пФ каждый.

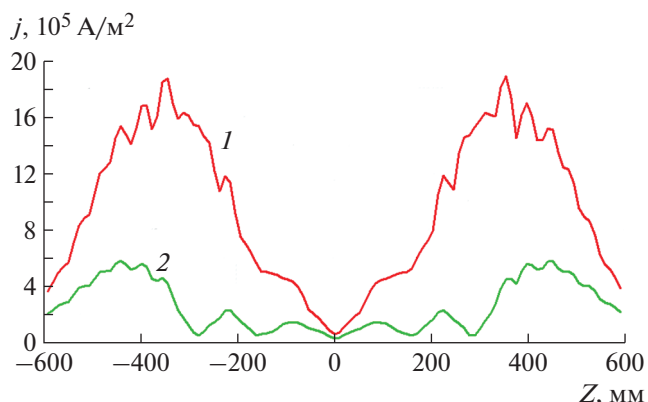


Рис. 13. Плотность токов на внутренней поверхности криостата вдоль оси Z при отключенной (1) и работающей (2) экранирующей катушке.

При подаче возбуждающего радиоимпульса имеет место аналогичная картина. В отсутствие экрана часть энергии передатчика, направляемой в передающую катушку, уходит не на возбуждение спиновой системы объекта, а на нагрев проводников катушек градиентного модуля. Развертка радиочастотного экрана с конденсаторами представлена на рис. 16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование градиентно-корректирующего модуля для безгелиевого магнитно-резонансного томографа. Расчетная неравномерность градиента для всей зоны однородности поля составила менее $\pm 4.3\%$. За счет экранирующих обмоток градиентно-корректирующего модуля значительно уменьшаются вихревые токи, возникающие в проводящих конструкциях магнита при генерации переменного магнитного поля градиентной системой м.р.т., что уменьшает

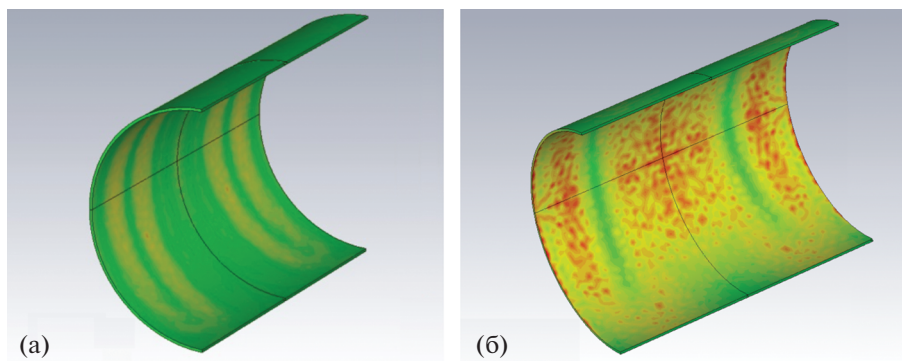


Рис. 14. Распределение плотности вихревых токов по внутренней поверхности криостата с экранирующей катушкой (а) и без нее (б).

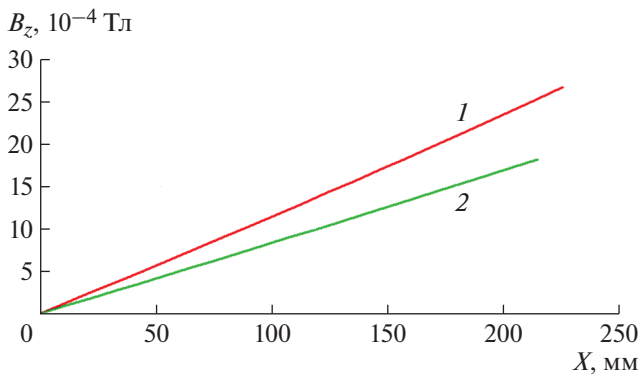


Рис. 15. Подавление полезного градиента магнитного поля при использовании экранирующей катушки: 1 – поле без экранирующей катушки, 2 – поле с экранирующей катушкой.

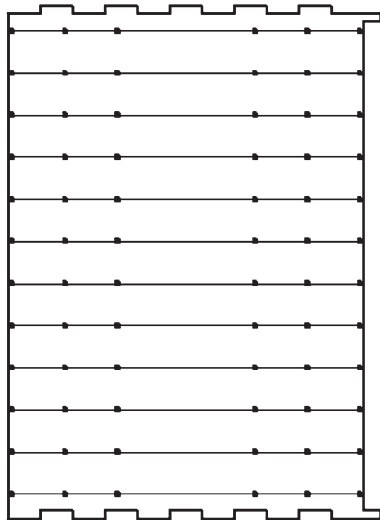


Рис. 16. Развертка радиочастотного экрана.



Рис. 17. Макет катушки градиентно-корректирующего модуля.

дополнительный теплоприток в криогенную систему магнита. На рис. 17 в качестве иллюстрации представлен макет градиентно-корректирующего модуля, изготовленный в ФИАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-29-10007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bagdinov A., Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V., Piskunov N., Rybakov A., Tsyachnykh Y.* // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2018. V. 28. № 3. Article Number 4400704. <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2784402>
2. *Rybakov A., Bagdinov A., Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V., Piskunov N., Tsyachnykh Y.* // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2016. V. 26. № 4. Article Number 4400403. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2517328>
3. *Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Krokhin O.N., Mikhailova G.N., Mikhailov B.P., Nikulin V.Ya., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Troitskii A.V.* // Phys. Metals and Metallography. 2011. V. 111. № 2. P. 158. <https://doi.org/10.1134/S0031918X11010169>
4. *Demikhov T., Kostrov E., Lysenko V., Demikhov E., Piskunov N.* // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2012. V. 22. № 3. Article Number 9501004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2178994>
5. *Багдинова А.Н., Чехонин В.П., Абакумов М.А., Ма-жуга А.Г., Рыбаков А.С., Демихов Е.И., Демихов Т.Е., Лысенко В.В.* // ПТЭ. 2019. № 2. С. 149. <https://doi.org/10.1134/S00328162190201986>
6. *Демихов Е.И., Протопопов А.В., Дмитриев Д.С., Багдинова А.Н., Лысенко В.В., Рыбаков А.С., Константинов М.В., Ивлев Д.А., Буякас В.И., Гунциус А.А.* // ПТЭ. 2021. № 1. С. 128. <https://doi.org/10.31857/S0032816221010067>
7. *Brown R., Cheng Yu-Chung N., Haacke E., Thompson M., Venkatesan R.* // Magnetic Resonance Imaging. Physical Principles and Sequence Design. New York: John Wiley, 1999.
8. *Джонс Р.А., Квернесс Й., Ринк П.А., Сатон Т.Е.* // Магнитный резонанс в медицине. Основной учебник Европейского форума по магнитному резонансу. Blackwell Sci. Publ., Oxford, 1995. Пер. с англ. П.А. Федина.
9. *Mansfield P., Chapman R.* // J. Phys. E-scient. Instrum. 1986. V. 19. № 7. P. 540. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/19/7/008>
10. *Turner R.* // J. Phys. D-applied Physics. 1986. V. 19. № 8. P. L147.
11. *Tomasi D.* // Magnetic Resonance in Medicine. 2001. V. 45. № 3. P. 505. [https://doi.org/10.1002/1522-2594\(200103\)45:3<505::AID-MRM1066>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1522-2594(200103)45:3<505::AID-MRM1066>3.0.CO;2-H)