

Синтез градиентной системы мультифазного расходомера

М. Я. МАРУСИНА, Б. А. БАЗАРОВ, П. А. ГАЛАЙДИН, М. П. МАРУСИН,
А. А. СИЛАЕВ, Е. Ю. ЗАКЕЛОВСКАЯ, Ю. Н. МУСТАФАЕВ

С.-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: marusina_m@mail.ru

Приведен алгоритм расчета градиентной системы мультифазного расходомера, основанного на явлении ядерного магнитного резонанса. Спроектированная система формирует градиентное поле с заданной степенью нелинейности ($\pm 1\%$), что обеспечивает требуемую точность измерения параметров многофазного потока.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, расходомер, магнитная индукция, градиентная система.

An algorithm of gradient system of multiphase flowmeter calculation based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance is presented. The designed system forms the gradient field with a given degree of nonlinearity ($\pm 1\%$). That provides the required accuracy of multiphase flow parameters measurement.

Key words: nuclear magnetic resonance, flowmeter, magnetic induction, gradient system.

Основными преимуществами ядерного магниторезонансного (ЯМР) измерителя состава и расхода многофазного потока по сравнению с остальными расходомерами являются бесконтактное измерение расхода, анализ состава и времени релаксации вещества, непрерывно текущего в трубопроводе. Решением технической задачи создания ЯМР-расходомера может стать устройство, содержащее: трубопровод для многофазного потока; корпус магнитной системы (МС) для поляризации ядер с датчиком, работающим на ЯМР; градиентные катушки с блоком управления током этих катушек; передающую и приемную системы радиочастотных катушек с системой управления; процессор для обработки поступающей информации по заданным алгоритмам; датчики давления и температуры, управляемые МС и дающие прецизионную стабильность магнитной индукции (МИ) в широком диапазоне внешних дестабилизирующих факторов; предполяризирующую МС на постоянных магнитах.

Магнитные системы должны обеспечивать значение МИ в рабочей области измерителя $B_1 \geq (0,380 \pm 0,005)$ Тл. Неоднородность МИ в центре МС, ограниченном объемом цилиндра диаметром 50 мм и длиной 60—90 мм вдоль оси трубопровода, должна быть не более $(20—30) \cdot 10^{-6}$.

Авторами был рассчитаны параметры МС на постоянных магнитах и электромагнитных систем, кроме того создан алгоритм синтеза МС, обеспечивающей явление ЯМР в рабочей области расходомера с минимальными массой и габаритными размерами.

В комплекс МС измерителя многофазного потока входит система для создания градиентных магнитных полей с заданной степенью нелинейности, равной $\pm 1\%$, для получения информации от конкретного сечения рабочей области. Данная статья посвящена синтезу градиентной системы мультифазного расходомера.

Расчет магнитных полей градиентных катушек. Рассмотрим методы синтеза градиентных систем, создающих магнитные поля заданных конфигураций.

Локальный метод синтеза является наиболее распространенным. Это исторически первый метод синтеза, разви-

тый в работах Максвелла, Мак-Кихена, Гаррета [1]. При использовании этого метода функция индукции магнитного поля раскладывается в ряд в окрестности одной, чаще всего, центральной точки системы. В зависимости от требований к соответствующей системе ее параметры — расположение и геометрия обмоток, соотношение числа витков в них и др. — выбирают так, чтобы один или несколько членов ряда обращались в нуль.

Разработка по локальному методу сводится к решению системы нелинейных уравнений вида $B_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, где B_i — члены разложения функции индукции в ряд. Заметим, что при обнулении n членов разложения полученная система называется системой $(n+1)$ -порядка. Максимальное число членов ряда, которое может быть обращено в нуль, составляет $N+1$, где N — число независимых параметров системы. Однако обнуление такого числа членов является довольно сложной задачей, особенно для систем, синтезируемых с учетом конечного сечения их обмоток.

Локальный метод разработан достаточно полно и позволяет конструировать сложные системы. Основной его недостаток состоит в том, что условия синтеза сформулировало локально лишь для одной точки системы: чем дальше от этой точки, тем больше отклонение поля от желаемого. Магниторезонансной технике приходится работать в относительно больших рабочих объемах и, следовательно, необходимо следить за отклонениями поля от заданных характеристик во всем рабочем пространстве. Этой задаче соответствует интегральный метод синтеза.

Интегральный метод. При его использовании параметры соответствующей системы подбирают так, чтобы отклонения индукции поля от желаемого значения в некоторых заданных точках объема были минимальными. Синтез этим методом легко осуществить для простых систем, имеющих мало свободных параметров. При усложнении системы и увеличении числа параметров задача сводится к решению системы уравнений, которая при большом числе параметров становится плохо обусловленной, а ее решение неустойчивым.

Основной недостаток интегрального метода — невозможность получения первоначальной конфигурации системы, поэтому задание правильной начальной конфигурации зависит здесь от опыта разработчика.

Локально-интегральный метод. Из изложенного выше следует, что с помощью локального метода можно синтезировать начальную конфигурацию системы, но точность воспроизведения желаемого магнитного поля в рабочем объеме может оказаться недостаточной, так как условия синтеза в этом методе формулируются лишь в одной точке. При синтезе системы интегральным методом заданная функция точнее воспроизводится магнитным полем, но первоначальную конфигурацию системы должен задавать разработчик. Процесс синтеза интегральным методом часто приходится повторять многократно, последовательно подбирая эффективную конфигурацию системы.

Основных недостатков локального и интегрального методов можно избежать, применив их комбинацию — локально-интегральный метод синтеза, позволяющий увеличить относительный рабочий объем систем. Рассмотрим его применение.

Известно, что скалярный магнитный потенциал Φ является решением уравнения Лапласа

$$\Delta^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0,$$

где Δ — оператор Лапласа.

От скалярного магнитного потенциала Φ к магнитной индукции B можно перейти, используя соотношение:

$$B = -\Delta\Phi.$$

Как правило, индукция основного магнитного поля B_0 в магнитно-резонансной томографии направлена вдоль оси Z . В общем случае пространственные вариации ΔB по объему образца содержат все пространственные компоненты вдоль осей X, Y, Z . Так как $|\Delta B| \ll |B_0|$, резонансную угловую частоту ω в некоторой точке можно записать в виде

$$\omega = \gamma |B_0 + \Delta B| = \gamma \left[(B_0 + \Delta B_z)^2 + \Delta B_x^2 + \Delta B_y^2 \right]^{1/2} \approx \\ \approx \left[B_0 + \Delta B_z + (2B_0)^{-1} (\Delta B_x^2 + \Delta B_y^2 + \dots) \right],$$

где γ — гиромагнитная постоянная.

Если $|\Delta B_x|, |\Delta B_y| \ll |B_0|$, то только B_z является определяющей составляющей магнитного поля. Величина B_z и ее производные раскладываются в ряд по сферическим гармоникам с помощью соотношения

$$B_z = -\cos \Theta \partial \Phi / \partial r + \sin \Theta \partial \Phi / (r \partial r),$$

где Θ, r — сферические координаты.

В прямоугольной системе координат для первых членов этого ряда получим

$$B_z = A_{10} + 2A_{20}z + 3A_{21}x + 3B_{21}y + 3A_{30}(2z^2 - x^2 - y^2)/2 + \\ + 12A_{31}zx + 12B_{31}zy + 15A_{32}(x^2 - y^2) + 15B_{32}(2xy) + \\ + 15A_{41}x(4z^2 - x^2 - y^2)/2 + 15B_{41}y(4z^2 - x^2 - y^2)/2 + \\ + 90A_{42}z(x^2 - y^2) + 90B_{42}z(2xy) + 105A_{43}x(x^2 - 3y^2) + \dots$$

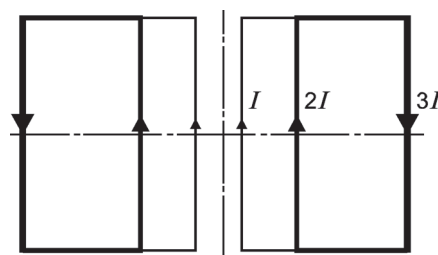


Рис. 1. Градиентная система:

$I, 2I, 3I$ — одинарный, двойной, тройной токи, соответственно

Расположение проводников выбирается так, чтобы в начале координат обращались в нуль нежелательные B_z -компоненты индукции поля. Затем уточняется конфигурация обмоток системы с целью повышения точности воспроизведения ее магнитным полем желаемой функции. Этому добиваются, например, методами многопараметрической оптимизации, минимизируя отклонение поля системы от желаемого.

Синтез градиентной системы расходомера. Эта тема подробно изложена в [1—6]. Для получения поперечного линейно изменяющегося градиентного поля использована градиентная система (ГС), схема которой представлена на рис. 1. На двух параллельных пластинах, находящихся на расстоянии 50 мм друг от друга, расположены два рабочих проводника с одинарным I и двойным $2I$ токами, обратные проводники с тройным током $3I$ и боковые, соединяющие рабочие и обратные, проводники.

Проведем расчет параметров разрабатываемой градиентной системы. Синтезируем обмотки для создания линейных градиентов в поперечном направлении с помощью степенного ряда, первоначально используя формулы для поля рабочих и обратных проводников бесконечной длины. Такое допущение на этом этапе расчета позволяет найти предварительные положения проводников, затем уточняем их положение путем оптимизации параметров с учетом конечной длины и поля боковых проводников.

Расположим начало декартовой системы координат в геометрическом центре устройства, а ось Z направим перпендикулярно плоскостям обмоток. Градиент магнитного поля, создаваемый рассматриваемой системой, направлен вдоль одной из осей, например X , параллельной плоскости полюсных наконечников основного магнита. Направим ось X перпендикулярно оси симметрии обмоток. Обозначим расстояние между пластинами $2z_0$. Тогда параллельная оси Z составляющая индукции поля бесконечно длинного прямолинейного проводника, расположенного на расстоянии x_0 , с током I в точке с координатами x, y , определяется выражением

$$B_z = \mu_0 I (x - x_0) / [2\pi \{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2\}],$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

При $x = y = z = 0$, введя относительную координату положения проводника $\eta = x_0/z_0$, получим

$$B_z = -\eta \mu_0 I / [2\pi z_0 (1 + \eta^2)].$$

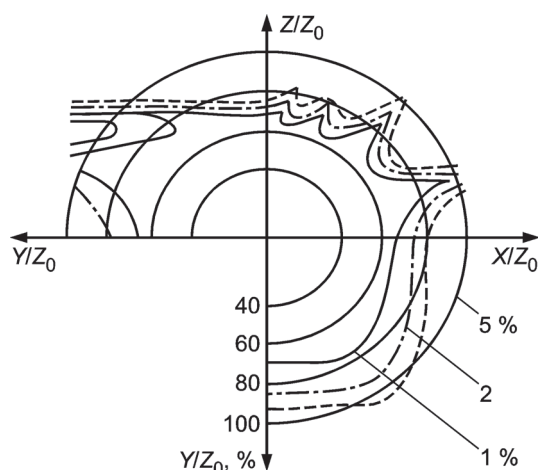


Рис. 2. Область градиентного поля:
1, 2, 5 % — степени однородности

Для системы прямоугольных витков (см. рис. 1) с идентичными по величине и направлению токами в двух плоскостях это выражение раскладывается в ряд

$$B_z = 2[G_1 x + G_3 x^3 + \dots + G_n x^n + \dots], \quad (1)$$

где $G_n = \partial^n B_z / (n! \partial x^n)$ — коэффициент n -го члена ряда; $n = 1, 3, 5, \dots$

Из (1) следует, что линейный характер градиента определяется первым членом разложения, а все последующие члены ряда искажают линейный закон изменения индукции. Таким образом, задача получения линейного градиента магнитного поля сводится к минимизации коэффициентов третьего и выше порядков.

Проведем оценку нежелательных градиентов третьего, пятого и седьмого порядков. Запишем более подробно выражение для B_z -составляющей индукции магнитного поля

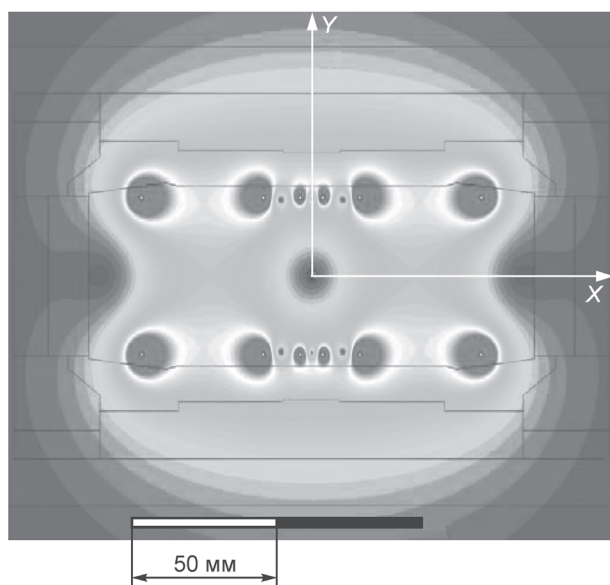


Рис. 3. Эпюра градиентных магнитных полей в рабочей зоне

$$B_z = \frac{\mu_0 I (1 - \eta^2)}{2\pi z_0^2 (1 + \eta^2)} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{x^4 (1 - 15\eta^2 + 15\eta^4 - \eta^6)}{z_0^4 (1 + \eta^2)^4 (1 - \eta^2)} + \frac{x^6 (1 - 28\eta^2 + 70\eta^4 - 28\eta^6 + \eta^8)}{z_0^6 (1 + \eta^2)^6 (1 - \eta^2)} - \frac{x^8 (1 - 45\eta^2 + 210\eta^4 - 210\eta^6 + 45\eta^8 - \eta^{10})}{z_0^8 (1 + \eta^2)^8 (1 - \eta^2)} + \dots \right]$$

Нетрудно рассчитать, что изменения поля, определяемые градиентами третьего, пятого и седьмого порядков, составляют соответственно 5,0; 1,0; 0,2 % изменения, создаваемого требуемым линейным градиентом $\partial B / \partial x$. С учетом разрешающей способности вклад нежелательных градиентов должен составлять не более 1 %. Следовательно, для создания необходимой линейности нужно компенсировать градиенты, вносящие в магнитное поле изменения порядка 1 %.

Проведенные расчеты позволили сделать вывод о необходимости компенсации градиентов $\partial^n B_z / \partial x^n$ до седьмого порядка включительно, так как их вклад в изменение поля наиболее ощутим. Для этого необходимо число секций в обмотках должно быть не менее трех. Система прямоугольных обмоток, состоящая из трех секций с одинаковым числом витков K , имеет четыре независимых параметра: x_{01} , x_{02} , x_{03} — расстояния от оси симметрии до первой, второй и третьей секций, x_{00} — расстояние от оси симметрии до общей стороны (обратных проводников). Подбором этих параметров можно скомпенсировать три члена ряда — третьего, пятого и седьмого порядков.

Значения параметров были получены из решения системы уравнений

$$K \frac{\partial^n B_z(x_{01})}{\partial x^n} + K \frac{\partial^n B_z(x_{02})}{\partial x^n} + K \frac{\partial^n B_z(x_{03})}{\partial x^n} - 3K \frac{\partial^n B_z(x_{00})}{\partial x^n} = 0, \quad (2)$$

где $n = 3, 5, 7$.

По полученным результатам $x_{01} = 1,13z_0$, $x_{02} = 0,33z_0$, $x_{03} = 0,34z_0$, $x_{00} = 1,2z_0$ нельзя построить высококачественную градиентную систему, так как использованный метод не учитывает конечную длину секций и действие боковых проводников. Однако влияние этих факторов невелико и положения секций можно применить в качестве начальных при дальнейшем уточнении их положений, оптимизировав параметры.

Выведем выражения для составляющей индукции поля рабочих и боковых проводников конечной длины, лежащих в плоскости Z_0 , учитывая, что рабочие проводники параллельны оси X , а боковые — оси Y .

Составляющую индукции поля рабочего или обратного проводника с координатами начала $(x_0; y_0; z_0)$ и конца $(x_0; -y_0; z_0)$ определим из выражения

$$B_z = \frac{\mu_0 I (x - x_0)}{4\pi r^2} \left[\frac{y_0 - y}{\sqrt{r^2 + (y_0 - y)^2}} - \frac{-y_0 - y}{\sqrt{r^2 + (-y_0 - y)^2}} \right], \quad (3)$$

где $r^2 = (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2$.

Составляющую индукции поля бокового проводника с координатами начала $(x_0; y_0; z_0)$ и конца $(x_{00}; y_0; z_0)$ вычислим по формуле

$$B_z = \frac{\mu_0 I (y - y_0)}{4\pi r^2} \left[\frac{x_0 - x}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{-x_{00} - x}{\sqrt{r^2 + (x_{00} - x)^2}} \right], \quad (4)$$

где $r^2 = (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$.

Для увеличения рабочего объема системы воспользуемся методом оптимизации. Для этого на периферии рабочего объема расположим n точек наблюдения. Изменив положения секций $x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}$, минимизируем модуль суммарного отклонения магнитного поля в точках наблюдения от линейного закона, используя формулы (3), (4).

В результате расчета с учетом конечной длины всех проводников получены следующие положения секций: центр общей стороны секций должен находиться по оси X на расстоянии $x_{00} = 60$ мм (см. рис. 1), а параллельные ей стороны секций — на $x_{01} = 4$ мм; $x_{02} = 16$ мм; $x_{03} = 18$ мм. Если секции обмоток содержат более одного витка, то в указанных точках должны располагаться центры секций. При этом область с нелинейностью градиента менее $\pm 1\%$ составляет 47,5; 40 и 30 мм соответственно вдоль осей X, Y, Z .

На рис. 2 показаны области градиентного поля с нелинейностями 1, 2 и 5 % в плоскостях ZOX, ZOY, XOY . Конфигурация области линейности градиента подтверждает полученные результаты.

Таким образом, предложенная методика расчета ГС позволяет, не увеличивая габаритные размеры основного магнита, расширить рабочий объем магнитного резонансного расходомера.

Алгоритм расчета градиентной системы.

1. Решая систему уравнений (2), находим предварительное положение x_{01}, x_{02}, x_{03} рабочих и x_{00} обратных проводников, считая их бесконечно длинными.

2. Определяем функцию индукции магнитного поля всей градиентной системы $B(x, y, z, x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00})$ с учетом конечной длины всех проводников, включая боковые. Эта функция содержит координаты $(x; y; z)$ расчетной точки и координаты $x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}$ рабочих и обратных проводников.

3. Находим тангенс угла наклона прямой графика идеального градиента, рассчитав индукцию в точке с малой координатой x ($x = y = 0$) и разделив ее на эту координату:

$$K(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}) = B(0,001; 0; 0; x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}) / 0,001.$$

4. В соответствии с интегральным методом расчета задаем координаты n расчетных точек желательно на периферии рабочего объема ЯМР.

5. Рассчитываем относительные отклонения реального поля градиентной системы от идеального в каждой i -й расчетной точке:

$$S(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}, i) = \frac{B(x(i), y(i), z(i), x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00})}{K(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}) x(i)} - 1.$$

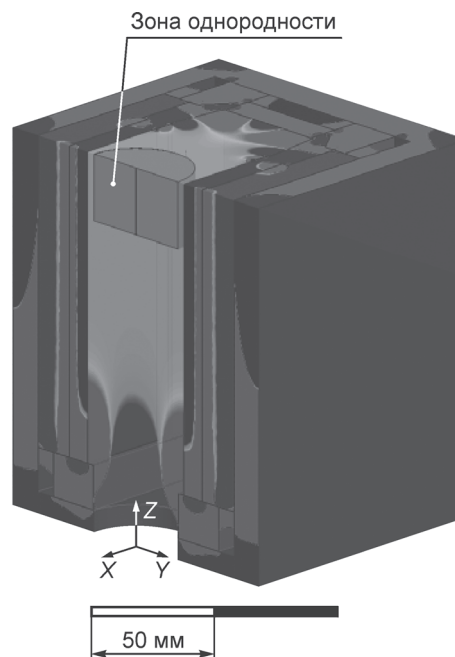


Рис. 4. Трехмерная модель МС с результатами расчета зоны однородности ($20 \cdot 10^{-6}$)

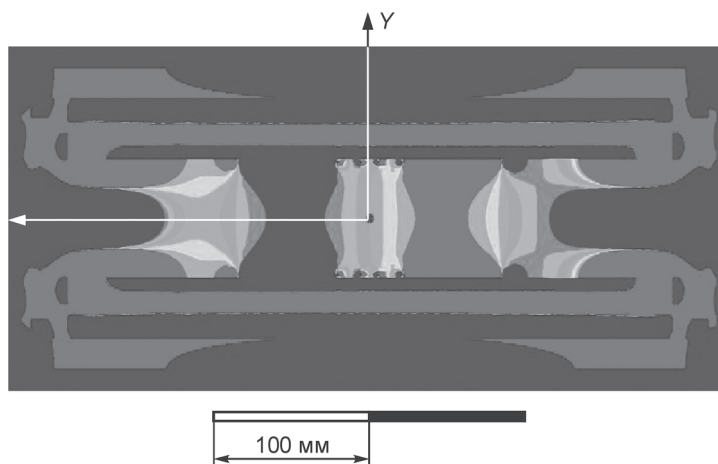


Рис. 5. Эпюра суперпозиции магнитных полей зоны однородности в плоскости XOZ и градиентных полей

6. Определяем среднее относительное отклонение индукции реального поля системы от идеального

$$G(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00}, i)|.$$

7. Изменяя положения рабочих и обратных проводников, находим минимальное значение $G(x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{00})$. Этому минимуму соответствует оптимальное расположение рабочих и обратных проводников, т. е. оптимальная конфигурация градиентной системы.

Магнитная система мультифазного расходомера. На рис. 3 приведена эпюра рассчитанных градиентных магнит-

ных полей в рабочей зоне измерителя. На основе двухмерной модели МС был выполнен расчет трехмерной модели с определением окончательных геометрических размеров и компоновки основных узлов измерителя продукции (рис. 4, 5).

Выводы. Спроектированная магнитная система формирует градиентное поле с заданной степенью нелинейности $\pm 1\%$ и создает в рабочей области мультифазного расходомера магнитное поле с требуемой степенью однородности $(20...30) \cdot 10^{-6}$. Это позволяет измерять содержание воды в составе жидкой смеси в диапазоне 0—100 % с погрешностью $\pm 2,5\%$ и объемный расход жидкости в диапазоне 0—60 м³/сут с погрешностью $\pm 2,5\%$. Разработанная магнитная система мультифазного расходомера не имеет аналогов в отечественных и зарубежных разработках расходомеров на основе ядерного магнитного резонанса.

Л и т е р а т у р а

1. **Монтгомери Д.** Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971.

2. **Марусина М. Я.** Коррекция неоднородности основного магнитного поля МР-томографа на постоянных магнитах: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. СПб: ГИТМО, 1993.

3. **Галайдин П. А.** Исследование и разработка элементов и устройств компьютерных магниторезонансных томографов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. СПб: ГИТМО, 1996.

4. **Пат. 2054662 РФ.** Устройство для создания магнитного поля с поперечным градиентом индукции / П. А. Галайдин, А. И. Замятин, М. Я. Марусина // Изобретения. Полезные модели. 1996. № 5. С. 209.

5. **Галайдин П. А., Замятин А. И., Марусина М. Я.** Проектирование корректирующей катушки ХZ для МР-томографа с учетом влияния сердечника магнита // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 1993. № 3. С. 43—48.

6. **Галайдин П. А., Замятин А. И., Марусина М. Я.** Расчет токовых шиммов с учетом влияния магнитной системы // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 1993. № 5. С. 59—64.

Дата принятия 20.02.2014 г.