Модифицированный датчик приборов ЯМР

А.И. Вагин, Б.А. Макаров, В.Г. Рыжов
Федеральное Государственное унитарное предприятие
«Московский радиотехнический институт РАН», Россия

Сигнал ядерного магнитного резонанса, детектируемый приборами ЯМР, возникает в результате взаимодействия магнитных моментов $\vec{\mu}$ ядер образца с сильным постоянным поляризующим магнитным полем $\vec{B}_0$, создаваемым специальным магнитом, и ортогонально направленным первому радиочастотным (РЧ) магнитным полем $\vec{B}_1$ датчика. В ЯМР-спектроскопии предъявляют повышенные требования к однородности поляризующего поля, поэтому в приборах магнитного резонанса применяют магниты специальной конструкции (например, катушки Гельмгольца). В магнитах с железным ярмом диаметры полюсов изготавливают значительно больше расстояний между ними, используют специальные токовые корректирующие катушки (шиммы), а также быстрое вращение образца. Комплекс этих методов позволяет достичь относительного разрешения порядка $10^{-9} - 10^{-10}$. В импульсном ЯМР для исключения влияния неоднородности постоянного поля применяют специальные радиочастотные импульсные последовательности [1 – 3].

Переменные магнитные поля обычно получают при помощи цилиндрической катушки радиочастотного колебательного контура, которая является определяющим элементом датчика. Катушка должна обеспечивать высокую однородность РЧ-поля при возможно большем коэффициенте заполнения. Однако требования получения высокой однородности при максимальном коэффициенте заполнения противоречивы. Поэтому в ЯМР-спектроскопии высокого разрешения с целью повышения однородности радиочастотного поля применяют катушки, длина которых значительно превосходит размеры образца, при этом коэффициент заполнения может составлять $\eta = 0{,}07$ [2]. Так как величина сигнала ЯМР пропорциональна коэффициенту заполнения, этот прием не является оптимальным. Кроме того, в импульсном магнитном резонансе для исследования сигналов с малыми временами релаксации необходимо применять сильные магнитные поля B_1, в результате при разумных значениях радиочастотной мощности для создания большего B_1 следует уменьшать размеры РЧ-катушек. Это приводит к тому, что неоднородность поля B_1 практически увеличивается значительно быстрее, чем значение B_1 [1].

В современных условиях значительно возросли требования к точности измерений параметров (спиновой плотности, времен релаксаций) больших образцов, размеры которых сравнимы с размерами катушки, при этом особенно большие погрешности возникают при исследовании гетерогенных и неоднородных по магнитным свойствам объектов. Для обеспечения прецизионных измерений индукции слабых или неоднородных магнитных полей, когда диаметр и длина катушки сравнимы по размерам, также необходим анализ распределения переменного магнитного поля катушки.

В настоящей работе проанализировано движение вектора макроскопической ядерной намагниченности в неоднородном радиочастотном поле, получены выражения для определения среднего значения поля на оси цилиндрической катушки при различном расположении образца в катушке, полного значения составляющей вектора макроскопической ядерной намагниченности и полной величины ЭДС в катушке, а также средних значений намагниченности и ЭДС. Предложен способ корректировки амплитуды наблюдаемого сигнала ЯМР с учетом конечной длины РЧ-катушки, а также пути улучшения однородности радиочастотного поля.

В постоянном магнитном поле $\vec{B}_0$, параллельном оси z, магнитные моменты $\vec{\mu}$ ядер образца совершают прецессионное движение с частотой, равной [1]

$$\vec{\omega}_0 = \gamma \vec{B}_0 . \qquad (1)$$

Если создать в катушке радиочастотное поле $\vec{B}_1$ частоты $\omega = \omega_0$, направленное перпендикулярно полю $\vec{B}_0$, то вектор макроскопической ядерной намагниченности $\vec{M}_0$ наряду с прецессионным движением вокруг направления поля $\vec{B}_0$ будет совершать нутацию вокруг направления радиочастотного (РЧ) поля $\vec{B}_1 = B_x \vec{i}$ с частотой [1]

$$\vec{\omega}_1 = \gamma \vec{B}_1 = \gamma B_x \vec{i} . \qquad (2)$$

Во вращающейся с частотой $\vec{\omega} = \vec{\omega}_0$ системе координат (ВСК) для компоненты поглощения $M_y = \pm v$ при $\gamma B_1 >> 1 / T_2$ можно записать [1]

$$M_y \approx M_0 \exp[-\frac{t}{2}(\frac{1}{T_1}+\frac{1}{T_2})]\sin\omega_1 t\,, \qquad (3)$$

где M_o – статическая ядерная намагниченность; T_1, T_2 – время продольной и поперечной релаксации соответственно. Считаем, что длительность РЧ-импульса намного меньше времен релаксаций, в этом случае за время его действия величина намагниченности практически не изменяется.

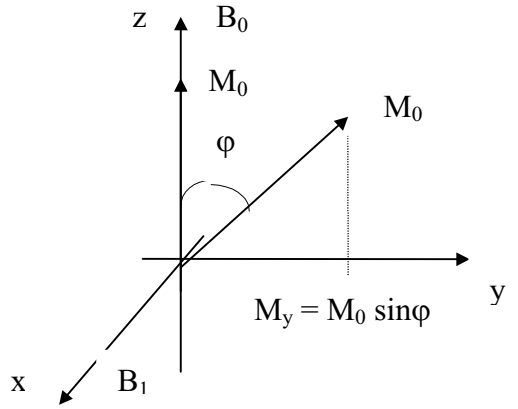

Рис. 1. Движение вектора ядерной намагниченности во вращающейся системе координат под действием радиочастотного поля B_x, направленного вдоль оси ох.

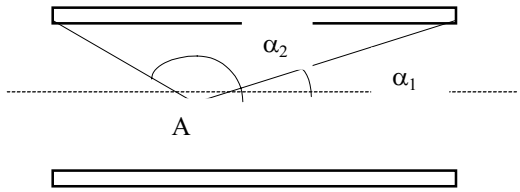

Рис . 2. Вид соленоида в разрезе по оси симметрии, А – точка на оси, в которой определяется поле.

В однородном РЧ-поле угол поворота магнитных моментов во всех точках образца и, следовательно, результирующего вектора $\vec{M}_0$ одинаков (рис.1) и равен в ВСК

$$\varphi = \omega_1 \Delta t_w = \gamma B_1 \Delta t_w = \gamma B_x \Delta t_w\ , \qquad (4)$$

где Δt_w – длительность радиочастотного импульса [1].

В неоднородном поле $B_1 = B_1(x)$ в каждом i-м элементе объема вектор намагниченности $\vec{m}_{0i}$ от этого объема повернется на угол

$$\varphi_i(x_i) = \omega_{1i}(x_i)\Delta t_w = \gamma B_{1i}(x_i)\Delta t_w = \gamma B_{xi}(x_i)\Delta t_w\,. \qquad (5)$$

Таким образом, в неоднородном поле $B_1(x)$ угол поворота вектора намагниченности от различных элементов образца, вообще говоря, различен и определяется значением поля в этом элементе.

Обычно в приборах ЯМР используют соленоидальные катушки. Как известно, индукция магнитного поля в среде с абсолютной магнитной проницаемостью μ_a в точке на оси тонкого соленоида, из которой края намотки видны под углами α_1 и α_2 (рис. 2), равна

$$B_x = \frac{\mu_a IN}{2L}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) = kf(x)\,, \qquad (6)$$

где I, N и L – ток, число витков в соленоиде и его длина соответственно [4]. Член $k = \mu_a I N / (2 L)$ выражает линейную плотность тока, постоянную по длине соленоида, будем называть его «токовым». Второй член – разность косинусов – дает зависимость величины поля от расстояния от центра соленоида, назовем его «угловым». В случае соленоида бесконечной длины $f(x) = \cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 = 2$, и поле внутри него строго одно-

родно и равно $B_x = 2\ k$. В реальных катушках поле максимально в центре и спадает к концам (рис. 3–5). В центре конечного соленоида $\cos\alpha_1^o = \cos\alpha_2^o = \cos\alpha^o$ и

$$B_x = 2k\cos\alpha^0 . \tag{7}$$

Среднее поле на оси катушки в пределах от x_1 до x_2, считая от центра соленоида, можно записать

$$\overline{B}_x = \frac{k}{(x_2 - x_1)}[\sqrt{(l+x_2)^2 + r^2} - \sqrt{(l+x_1)^2 + r^2} - \sqrt{(l-x_2)^2 + r^2} + \sqrt{(l-x_1)^2 + r^2}] , \tag{8}$$

где L и r – длина и радиус соленоида, $l = L / 2$.

При симметричном относительно центра расположении интервала интегрирования (образца), т.е. $x_2 = - x_1 = x$, выражение (2) упрощается до

$$\overline{B}_x = \frac{k}{x}(\sqrt{(l+x)^2 + r^2} - \sqrt{(l-x)^2 + r^2}) . \tag{9}$$

Согласно (3) намагниченность по оси *oy* в ВСК в однородном поле B_1 равна (рис.1)

$$M_y = M_0 \sin\varphi = M_0 \sin(\gamma B_1 \Delta t_w) . \tag{10}$$

Величина ЭДС, соответствующая сигналу поглощения и наводимая в РЧ-катушке компонентой M_y после действия импульса Δt_w, в лабораторной системе координат (ЛВС) равна [2]

$$E = aM_y \exp(-\frac{t}{T_2})\sin\omega_0 t = aM_0 \exp(-\frac{t}{T_2})\sin(\gamma B_1 \Delta t_w)\sin\omega_0 t , \tag{11}$$

где a – коэффициент пропорциональности, ω_0 – ларморова частота прецессии ядерных спинов в поляризующем поле H_0, определяемая согласно (1).

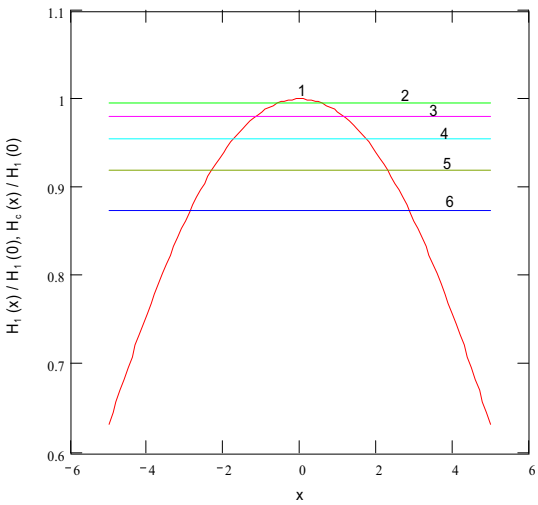

Рис. 3. Распределение поля на оси тонкого соленоида с постоянной плотностью тока в обмотке, длиной L = 10 мм и диаметром D = 10 мм (1), среднее значение поля в образце, расположенном симметрично относительно центра катушки и имеющем длину: 2 – 20%, 3 – 40%, 4 – 60%, 5 – 80%, 6 – 100% от длины катушки.

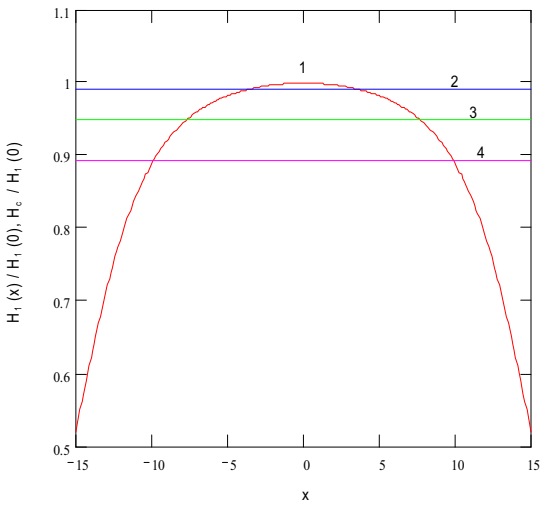

Рис. 4. Распределение поля на оси тонкого соленоида с постоянной плотностью тока в обмотке, длиной L = 30 мм и диаметром D = 10 мм (1), среднее значение поля в образце, расположенном симметрично относительно центра катушки и имеющем длину: 2 – 40%, 3 – 80%, 4 – 100% от длины катушки.

Соответственно в неоднородном поле составляющая магнитного момента на ось *oy* от каждого i-го элемента объема образца будет равна

$$m_{yi}(x_i) = m_{0i}(x_i)\sin\varphi_i(x)_i = m_{0i}(x_i)\sin(\gamma B_{1i}(x_i)\Delta t_w), \qquad 12)$$

и амплитуда наводимой им ЭДС

$$E_i(x_i) = am_{yi}(x_i) = am_{0i}(x_i)\sin\varphi_i(x_i) = am_{0i}(x_i)\sin(\gamma B_{1i}(x_i)\Delta t_w). \qquad 13)$$

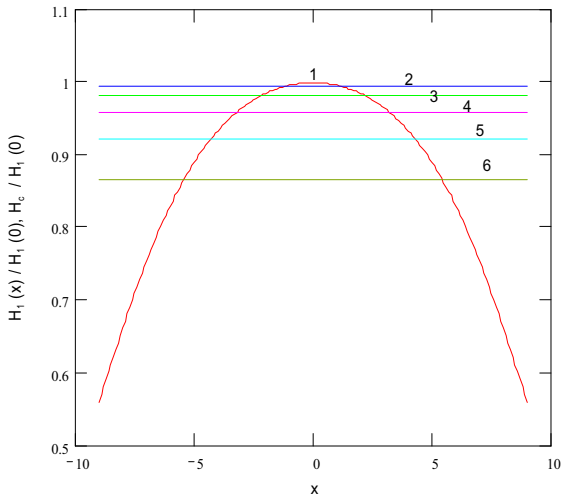

Рис. 5. Распределение поля на оси тонкого соленоида с постоянной плотностью тока в обмотке длиной L = 18,0 мм и диаметром D = 11 мм (1), среднее значение поля в образце, расположенном симметрично относительно центра катушки и имеющем длину: 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 60%; 5 – 80%; 6 – 100% от длины катушки.

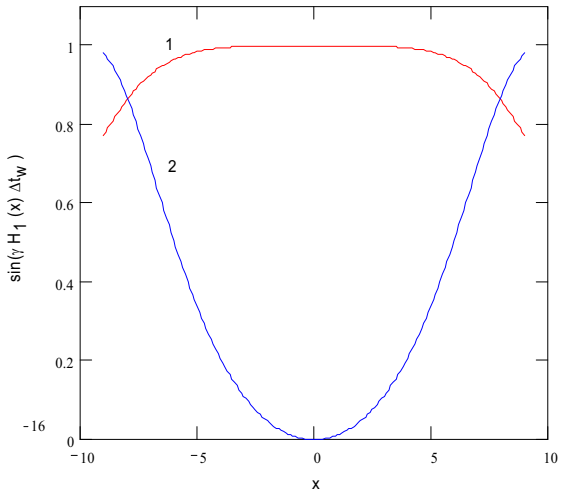

Рис. 6. Зависимость амплитуды y-компоненты намагниченности образца для РЧ-катушки ЯМР-релаксометра «Протон-20» при углах поворота вектора намагниченности, равных 90^0 (1) и 180^0 (2) в центре катушки (x = 0).

В общем случае величина магнитного момента от элемента объема m_0 непостоянна, она зависит от однородности поляризующего поля B_0 и равномерности распределения спиновой плотности по образцу. В ЯМР-спектроскопии поле B_0 постоянно в пределах образца с высокой точностью. Если положить также, что ядерные спины имеют одинаковую плотность, то из (5) следует, что угол поворота магнитного момента элемента объема пропорционален значению поля в данной точке, в то время как проекция этого вектора на ось *oy* и значение ЭДС в катушке пропорциональны синусу от этого угла – (12), (13). Если $m_0 = m_0(x)$, то две последние величины пропорциональны произведению $m_0(x)\sin(\gamma B_1(x)\Delta t_w)$.

Полная проекция магнитного момента образца на ось *oy*

$$M_y = \int_{x_1}^{x_2} m_y(x)dx = \int_{x_1}^{x_2} m_0(x)\sin(\gamma B_1(x)\Delta t_w)dx \qquad (13')$$

и полная амплитуда наводимой этой проекцией ЭДС

$$E = \int_{x_1}^{x_2} am_y(x)dx = a\int_{x_1}^{x_2} m_0(x)\sin(\gamma B_1(x)\Delta t_w)dx\ . \qquad (14)$$

Среднее значение составляющей намагниченности на ось oy в неоднородном поле B_1 равно

$$\overline{M}_y = \frac{1}{x_2 - x_1}\int_{x_1}^{x_2} m_0(x)\sin\varphi(x)dx = \frac{1}{x_2 - x_1}\int_{x_1}^{x_2} m_0(x)\sin(\gamma B_1(x)\Delta t_w)dx \qquad (15)$$

и среднее значение амплитуды ЭДС в этом случае

$$\overline{E} = \frac{1}{x_2 - x_1}\int_{x_1}^{x_2} am_0(x)\sin(\gamma B_1(x)\Delta t_w)dx = a\overline{M}_y \qquad (16)$$

пропорционально среднему значению составляющей намагниченности на ось *oy*, которая согласно (15) пропорциональна среднему значению произведения магнитного момента единицы объема на синус угла поворота φ этого момента

$$\overline{M}_y = \overline{m_0 \sin(\gamma B_1 \Delta t_w)} = \overline{m_0 \sin\varphi}\,. \qquad (16')$$

В случае постоянной по образцу величины m_0 среднее значение y-компоненты вектора намагниченности

$$\overline{M}_y = \frac{m_0}{x_2 - x_1}\int_{x_1}^{x_2} \sin(\gamma B_1(x)\Delta t_w)dx = m_0\overline{\sin(\gamma B_1 \Delta t_w)} \qquad (17)$$

пропорционально среднему синусу угла поворота.

Таким образом, среднее значение амплитуды ЭДС, наводимой в катушке датчика усредненным магнитным моментом образца ядерных спинов при m_0 = const , равно

$$\overline{E} = a\overline{M}_y = am_0 \exp(-\frac{t}{T_2})\overline{\sin(\gamma B_1 \Delta t_w)} = am_0 \exp(-\frac{t}{T_2})\overline{\sin\varphi}\ . \qquad (18)$$

Так как $\overline{\sin\varphi} \le \sin\varphi$, причем равенство имеет место в однородном поле, в неоднородном B_1 среднее значение компоненты вектора намагниченности и среднее значение амплитуды ЭДС меньше, чем величины M_y и E_y, определяемые формулами (10) и (11). Физически полученный результат объясняется тем, что в однородном поле все элементы образца поворачиваются на один угол, в неоднородном поле на этот угол поворачиваются спины только в центральной части образца, спины в других частях имеют меньший угол поворота.

В однородном поле максимальное значение сигнала поглощения в приемной катушке ЯМР-прибора имеет место согласно (10) и (11) при sinφ = ±1 и, соответственно, углах φ кратных π / 2. Если Δt_{90} – длительность 90° -го импульса, при установке длительности импульса в два раза большей $\Delta t_{180} = 2\ \Delta t_{90}$ вектор ядерной намагниченности повернется на угол, равный 180°, и E = 0.

На рис. 6 приведены кривые изменения синуса угла поворота вектора намагниченности φ при φ = 90^0 и φ = 180^0 в центре катушки ЯМР-релаксометра «Протон-20». Непосредственно из рисунка следует, что поскольку синус углов, близких к 90^0, почти не меняется, имеет место эффект «дополнительного увеличения зоны однородности» катушки. Для углов, близких к 0^0, 180^0 и т.д., sinx ~ x, и такого эффекта не наблюдается. Графики этого рисунка объясняют, почему настройка по 180° более чувствительная, и в однородном поле B_1 точную настройку 90^0 предпочтительнее производить по 180°-импульсу. Из рис. 6 следует также, что максимальное значение y-проекции магнитного момента образца, и соответственно ЭДС достигается для углов, превышающих 90^0 и непосредственно зависящих от длины образца. И, кроме того, двухкратное увеличение в этом случае длительности РЧ-импульса уже не приводит к нулевому сигналу ЯМР, т.е. к «180°-импульсу». Соответственно увеличение длительности РЧ-импульса в 3 раза не приводит к полной инверсии сигнала поглощения. Простой способ проверки неоднородности радиочастотного поля приведен в [9].

Согласно вышеизложенному, мы предлагаем способ корректировки амплитуды наблюдаемого сигнала спада свободной индукции (ССИ). Рассмотрим сначала случай однородного образца. Возьмем небольшую по объему часть образца так, чтобы она находилась в достаточно однородной области поля. В этом случае работают формулы (10) и (11). Настроим сигнал на максимум, что будет соответствовать углу поворота вектора намагниченности на 90^0. Далее для данной катушки и образцов других объемов строим экспериментально калибровочную кривую, показывающую во сколько раз необходимо увеличить измеряемую амплитуду сигнала ЯМР при данной длине образца (образец при этом располагается симметрично относительно центра катушки). Эту кривую также можно рассчитать, исходя из формулы (14), считая при этом, что угол поворота в центре катушки равен 90^0.

Если в образце спиновая плотность распределена неравномерно и если есть такая возможность, следует приготовить для различных плотностей небольшие образцы, поместить их по отдельности в центральную часть катушки, измерить сигналы от них. Далее измерить сигнал от полного образца и построить экспериментальную калибровочную кривую. Эту кривую также можно рассчитать по формуле (14). Такая кривая будет служить только для данного распределения спинов по образцу. Предлагаемый способ применим,

если имеется возможность разделить образец на части и исследовать каждую из этих частей. В противном случае необходимо иметь равномерное распределение радиочастотного поля по образцу.

Как известно, в технике сильных магнитных полей в зависимости от стоящей задачи для получения однородного поля применяют системы различной конструкции [5,6]. Если в качестве источника магнитного поля используют соленоид, то в этом случае улучшение однородности поля достигают размещением корректирующих витков с противоположным направлением тока в средней части соленоида или при помощи щели в плоскости симметрии. Размещение на концах соленоида дополнительных витков, компенсирующих убывание магнитного поля от центра к периферии, позволяет получить однородное поле в значительном объёме. Этот метод используется наиболее часто. Если дополнительные витки оформлены как две катушки, симметрично удаленные от центра соленоида и включенные последовательно с его витками, то в этом случае соленоид называют трехсекционным. Для получения более высокой однородности применяют не три, а пять секций [5, 6].

Рассмотренные приемы повышения однородности поля за счет создания непостоянной плотности тока по длине применяют в соленоидах, имеющих тысячи и сотни витков. Подавляющее большинство приборов ЯМР работают в мегагерцовом диапазоне. Радиочастотные катушки обычно являются однослойными, имеют небольшое количество витков (~10 – 20), как правило, ограничен их размер по диаметру, или увеличение диаметра дополнительного витка ведет к значительному усложнению конструкции датчика в целом. В случае однослойной катушки непостоянную плотность тока можно создать за счет неравномерного шага намотки витков, однако этот прием сложен технологически. В связи с этими замечаниями нами рассмотрен вариант улучшения однородности поля в результате введения дополнительных витков, симметрично расположенных относительно центра и включенных последовательно с витками катушки.

Поле одиночного витка по линии, проходящей через центр витка и перпендикулярной плоскости витка, на расстоянии x от центра дается выражением

$$B_x = (\mu_a I r^2) / (x^2 + r^2)^{3/2} ,$$

где r – радиус витка [5].

На рис. 7 представлено распределение поля в катушке отечественного ЯМР-релаксометра «Протон-20», работающего на протонной частоте 20 МГц. В этом приборе применена однослойная цилиндрическая катушка диаметра D = 11 мм, числом витков N = 17, длиной L = 18,3 мм, диаметр провода d = 0,65 мм, шаг намотки равен h = 1,1 мм. Обычно используют образцы, размер которых не превышает половины длины катушки, т.е. коэффициент заполнения не превышает $\eta \leq 0,5$. Заметим, что для штатной катушки прибора уменьшение поля на ее конце составляет 46%, на половине ее длины – 9%. Из рис. 7 следует, что оптимальным является расположение пяти дополнительных витков, намотанных плотно один за другим в интервале ±(9,5÷11,5) мм от центра катушки. При этом на расстоянии x = ±9 мм от центра катушки поле уменьшилось относительно центра менее чем на 4%, а на концах – на 23%, спад поля на 9% происходит при x = ±10 мм, при этом коэффициент заполнения $\eta = 0,87$. На расстоянии x = ±9 мм $\eta = 0,78$, т.е. также превосходит аналогичную величину штатной катушки прибора. Неоднородность поля в центральной части катушки не превышает 0,1%.

На рис.8 показано распределение поля на оси той же катушки при следующем расположении корректирующих витков - ±8,5; ±9,5; ±10,0 и ±10,5 мм. Для трех корректирующих витков (первые три витка) отклонение составляет для x = ±8 мм, x = ±9 мм и на концах соответственно 10,2; 17,5 и 27,5%. Поле монотонно спадает от центра. Коэффициент заполнения $\eta = 0,75$ при x = ±7,75 мм и спаде поля на 9%. В случае четырех витков для x = ±8 мм, x = ±9 мм и на концах отклонения равны 4,2; 10 и 24,2%. В этом случае $\eta = 0,86$ при x = ±9 мм (уменьшение поля на 9%). Неоднородность поля в центральной части не превышает 0,3%.

Нами исследован также следующий вариант расположения корректирующих витков: ±7,5; ±9,5; ±10,5 и ±11,0 мм. При этом погрешность на расстоянии x = ±8 мм, x = ±9 мм и на концах катушки при использовании только первых трех витков составляет 11,6; 19,6 и 40,6%, для четырех витков – 6,2; 12,5 и 31,5%. Коэффициенты заполнения в случае трех и четырех витков соответственно равны $\eta = 0,68$ при x = ±7,5 мм и $\eta = 0,77$ при x = ±8,5 мм (при спаде поля на 9%). При применении трех корректирующих витков поле монотонно спадает от центра, четырех – имеет неоднородность с максимумом при x = ±4 мм равным 0,5%.

Из рассмотренных вариантов наилучшие результаты получены в первом случае, причем во всех случаях коэффициент заполнения (при спаде поля на 9%) существенно выше штатной катушки прибора «Протон-20». Это обеспечивает более высокое отношение сигнал /шум. Недостаток рассмотренного метода – сдвиг резонансной частоты в ~1,6, ~1,5 (для четырех витков) или ~1,4 (для трех витков) раза в результате увеличения индуктивности катушки, который можно компенсировать соответствующим уменьшением емкости колебательного контура, равной 55 пФ. В случае 10 корректирующих витков ее величину необходимо уменьшить до ~20 пФ, 8 витков – до ~25 пФ, 6 витков – до ~30 пФ. Заметим также, что во всех трех случаях результирующее поле больше исходного, и соответственно длительность РЧ-импульса будет меньше.

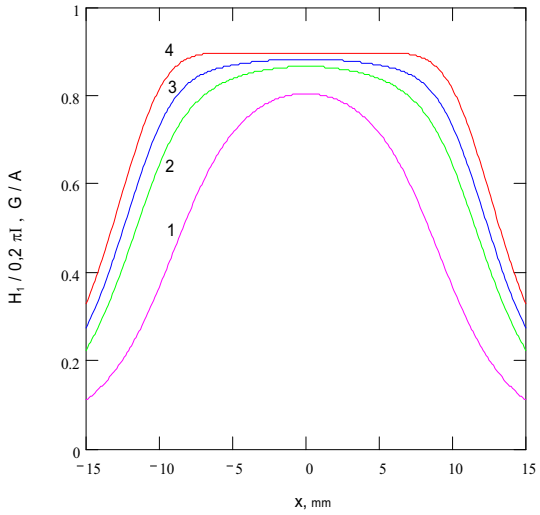

Рис. 7. Зависимость поля на оси катушки: 1 – катушка датчика ЯМР-релаксометра «Протон-20» (диаметр катушки D =11 мм, длина L = 18,3 мм, число витков N = 17, диаметр провода d = 0,65 мм, шаг намотки h = 1,1 мм); 2 – та же катушка плюс три витка коррекции с каждой стороны (координаты витков ±9,5, ±10, ±10,5 мм); 3 – добавлен четвертый виток коррекции (±11 мм), 4 – добавлен пятый виток коррекции (±11,5 мм).

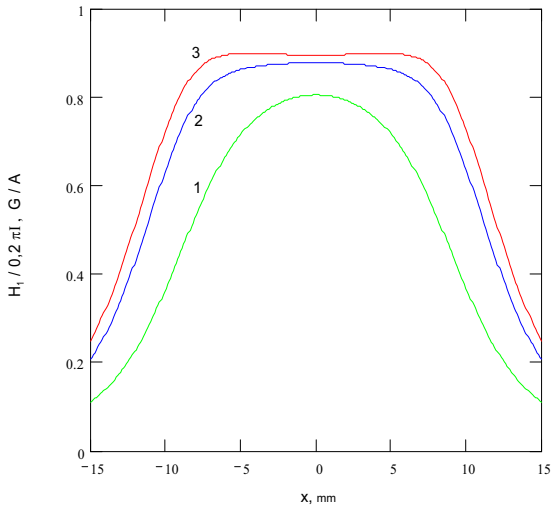

Рис. 8. Зависимость поля на оси катушки: 1 – катушка датчика ЯМР-релаксометра «Протон-20»; 2 – та же катушка плюс три витка коррекции с каждой стороны (координаты витков ±8,5, ±9,5, ±10,0 мм); 3 – добавлен четвертый виток коррекции (±10,5 мм).

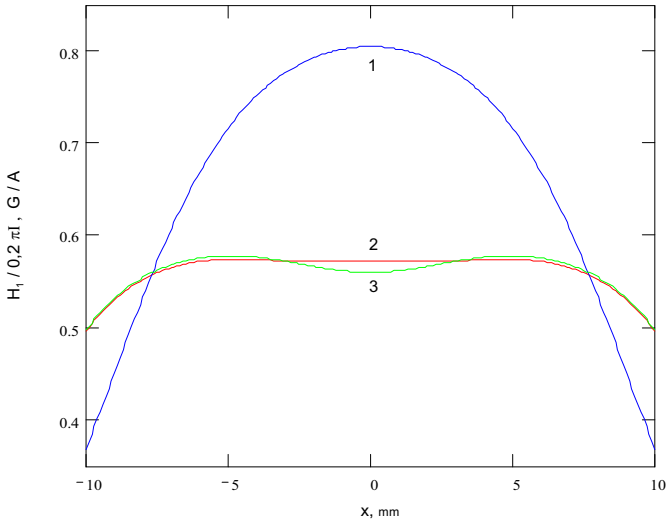

Рис. 9. Зависимость поля на оси катушки: 1 – катушка датчика ЯМР-релаксометра «Протон-20»; 2 – катушка с тем же количеством витков и измененным шагом: a1(0)-a2(1,5)-a3(3,5)-a4(5)-a5(6,5)-a6(8)-a7(9,5)-a8(10,5)-a9(12). Здесь в скобках указаны координаты соответствующего витка в миллиметрах в одну сторону от центрального витка a1(0), координаты витков по другую сторону имеют такую же величину с обратным знаком. Шаг намотки везде равен h = 1,5 мм, кроме h23 = 2,0 мм и h78 = 1,0 мм – расстояний между вторым и третьим, а также седьмым и восьмым витками; 3 – изменены координаты второго витка – a2(2) по сравнению с кривой 2.

Для частот f > 20 МГц увеличивать число витков катушки при коррекции нежелательно, так как емкость конденсатора радиочастотного контура датчика невелика. Поэтому на примере той же катушки мы рассмотрели возможность улучшения однородности поля без изменения числа витков при минимальном варьировании шага намотки, причем шаг изменялся на расстояние, кратное 0,5 мм. Анализ показал, что достаточно хорошие результаты получаются при следующих промежутках между витками: a1(0)-a2(1,5)-a3(3,5)-a4(5)-a5(6,5)-a6(8)-a7(9,5)-a8(10,5)-a9(12). Здесь в скобках указаны координаты соответствующего витка в миллиметрах в одну сторону от центрального витка a1, координаты витков по другую сторону имеют такую же величину с обратным знаком. Шаг намотки везде равен h = 1,5 мм, кроме h23 = 2,0 мм и h78 = 1,0 мм – расстояний между вторым и третьим, а также седьмым и восьмым витками. На расстоянии x = ±2 мм относительно центра имеется небольшая «яма» порядка 0,1%, при x = ±5 мм – «горб» на 0,3%, далее идет монотонный спад поля. Снижение поля на 9% имеет место на расстоянии x = ±9,3 мм от центра, при этом η=0,78 (рис.9).

Небольшое видоизменение катушки: a2(2)-a3(3,5), т.е. установка шага между первым и вторым витками h12 = 2,0 мм, и между вторым и третьим – h23 = 1,5 мм приводит к провалу в центре относительно наивысшей точки при x = ±5 мм на 3%. Уменьшение поля на 9% имеет место на расстоянии x = ±9,7 мм от центра, при этом η=0,81. Уменьшение шага между вторым и третьим витками до h23 = 1 мм (a2(2)-a3(3)) снижает «горб» до 0,5%, причем его координата также уменьшается – x = ±3 мм. Коэффициент заполнения η = 0,77 при x = ±9,2 мм. Таким образом, уменьшение неоднородности поля приводит к уменьшению коэффициента заполнения.

Теперь рассмотрим катушки, имеющие достаточно большое число витков. Несколько тысяч витков имеют приемные катушки протонных измерителей слабых магнитных полей, например магнитного поля Земли [8], а также спектрометров ЯМР, работающих в земном поле [10]. Из нескольких сотен витков выполнены датчики ЯМР-магнитометров непрерывного типа в нижней области диапазона измерений. Так, в диапазоне измеряемых полей 250 -346 Гс число витков N = 519, диаметр ампулы D = 7 мм, диаметр провода d = 0,06 мм, длина катушки примерно равна ее диаметру [11]. Методы расчета числа корректирующих витков при заданной неоднородности поля для таких катушек разработаны [5].

Таким образом, в работе рассмотрено движение вектора макроскопической ядерной намагниченности в неоднородном радиочастотном поле, получены выражения для определения среднего значения поля на оси цилиндрической катушки при различном расположении образца в катушке. Для определения полного значения составляющей вектора макроскопической ядерной намагниченности и полной величины ЭДС в катушке, а также средних значений намагниченности и ЭДС при однородном и неоднородном распределениях спинов по образцу предложен способ корректировки амплитуды наблюдаемого сигнала ЯМР с учетом конечной длины РЧ-катушки и свойств образца, разработаны простые способы корректировки однородности магнитного поля радиочастотных катушек мегагерцового диапазона.

Литература

1. Абрагам А. Ядерный магнетизм. - М.: ИЛ, 1963, 551 с.
2. Леше А. Ядерная индукция. - М.: ИЛ, 1963, 684 с.
3. Лундин А.Г., Федин Э.И. Ядерный магнитный резонанс. Основы и применения. - Новосибирск: «Наука», 1980, 192 с.
4. Парселл Э. Электричество и магнетизм. - М.: «Наука», 1971, 447 с.
5. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. - М.: «Наука», 1964, 347 с.
6. Монтгомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. - М.: «Мир», 1971, 359 с.
7. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н. и др. Средства измерений параметров магнитного поля. – Л.: «Энергия», Ленингр. отделение, 1979, 320 с.
8. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В. Магнитные измерения. – М.: Изд-во ком- та стандартов, мер и измерительных приборов, 1969, 248 с.
9. Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и фурье спектроскопия ЯМР. - М.: «Мир», 1973, 164 с.
10. Лундин А.Г., Федин Э.И. ЯМР-спектроскопия. - М.: «Наука», 1986, 224 с.
11. Ивашкевич С.А. Автоматический широкодиапазонный ядерный магнитометр. - Пр. ОИЯИ, N 13-80-130, Дубна, 13 с.
12. Van Putte K. Elimination of H_1 inhomogeneity and spin -spin relaxation in the determination of spin-lattice relaxation times. – Journal of Magnetic Resonance, V.2, 1970, p. 174-180.