

13

Уравнения движения вектора намагниченности в катушке нутации ядерно-магнитных измерителей с текущей жидкостью

© В.В. Давыдов, В.И. Дудкин, А.Ю. Карсеев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: Davydov_vadim66@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2014 г.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований зависимости формы линии нутации ядерно-магнитных измерителей с текущей жидкостью от неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации, а также от времени нахождения намагниченной жидкости под действием радиочастотного поля в катушке нутации. Проведено их сопоставление и определены направления дальнейших исследований.

Для проведения различных исследований, а также при измерении магнитных полей, скорости и констант релаксации текущего потока жидкой среды в ядерно-магнитных (ЯМР) измерителях (магнитометры, спектрометры и расходомеры-релаксометры) используется зависимость амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР от амплитуды радиочастотного поля H_1 или частоты f_n переменного радиополя в катушке нутации (линия нутации) [1–3]. Механизм формирования линии нутации достаточно сложен — зависит от свойств жидкой среды, скорости ее потока, от величины и неоднородности магнитного поля, в котором располагается катушка нутации, а также геометрических размеров самой катушки [4–6].

Теория движения вектора намагниченности текущей жидкости в катушке нутации на основе феноменологических уравнений Блоха рассмотрена в многочисленных публикациях, но все рассмотрения объединяет один недостаток. В представленных вариантах уравнений нет зависимости в явном виде компонент вектора намагниченности от неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации и времени нахождения жидкости t_n под действием переменного радио-

поля H_1 в этой катушке. В некоторых работах [7,8] после приближенного решения системы дифференциальных уравнений для компонент вектора намагниченности по времени при непосредственном численном определении самих компонент M_x , M_y и M_z появляется данное время (t_n), от которого зависят условия полной инверсии сигнала ЯМР и получение линии нутации с высоким отношением сигнал/шум (S/N). Согласно [2–6,8,9], для проведения измерений параметров магнитных полей и текущей среды с погрешностью не выше 0.5% необходимо обеспечить отношение $S/N \geq 3$. Проведенные авторами эксперименты показали, что неоднородность магнитного поля и t_n оказывают существенное влияние как на формирование линии нутации, так и на величину S/N , они должны присутствовать в уравнениях для компонент вектора намагниченности на начальном этапе их решения, чтобы объективно отражать физические процессы в катушке нутации. Поэтому целью работы является разработка уравнений движения вектора намагниченности текущей жидкости, учитывающих изменение неоднородности магнитного поля ΔH_0 в катушке нутации, а также время нахождения жидкости t_n под действием поля H_1 . На рис. 1 представлена экспериментальная установка, собранная на основе классических схем меточного ЯМР расходомера и нутационного ЯМР магнитометра для исследования формирования линии нутации от различных параметров. Принцип работы этих устройств и методы регистрации линии нутации рассмотрены в [4,5,8,10–12]. Новыми элементами в собранной экспериментальной установке являются магнитные экраны 16 и постоянный магнит 17, создающий постоянное магнитное поле с индукцией $B_0 = 0.038 \text{ Т}$ с неоднородностью $1.4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

На рис. 2 представлены полученные экспериментальные линии нутации в отсутствие магнитных экранов 16, после их установления и при расположении катушки нутации в магнитном поле H_0 при расходе жидкости $q = 29 \text{ ml/s}$ — это оптимальный расход для данной конструкции экспериментальной установки. Данное значение q соответствует максимальному отношению S/N регистрируемого сигнала ЯМР [1,2,10,11]. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода при температуре $T = 14.5^\circ\text{C}$ с временами продольной $T_1 = 1.23 \text{ с}$ и поперечной $T_2 = 1.38 \text{ ms}$ релаксации. Частота модуляции поля магнита-анализатора 9 — $f_{mod} = 50 \text{ Hz}$.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что амплитуда инвертируемого сигнала ЯМР увеличивается с уменьшением неод-

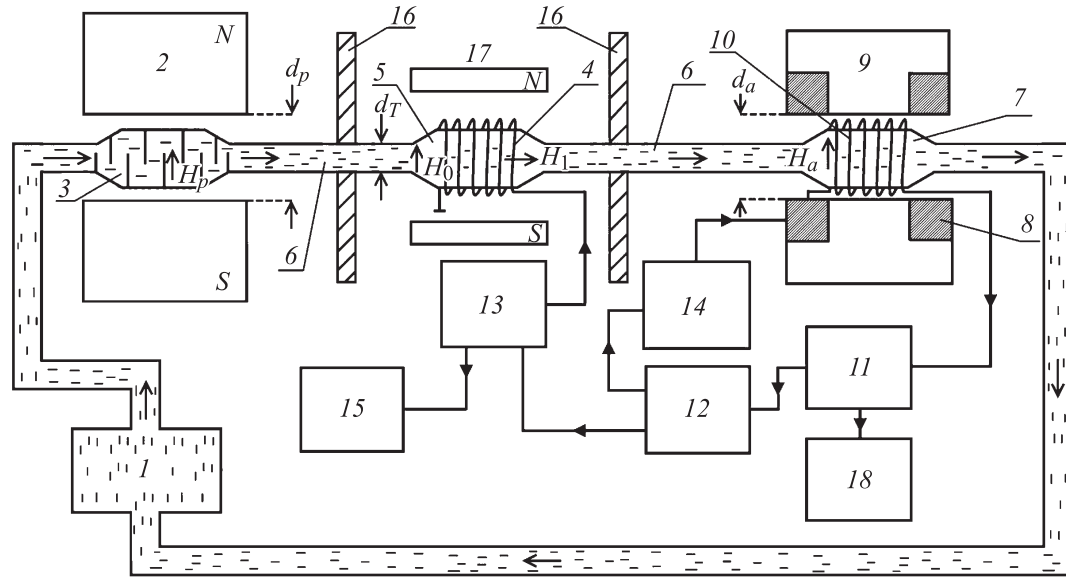


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 — помпа; 2 — магнит-поляризатор; 3 — сосуд-поляризатор; 4 — катушка нутации; 5 — объем катушки нутации; 6 — соединительный участок трубопровода; 7 — сосуд-анализатор; 8 — катушка модуляции; 9 — магнит-анализатор; 10 — катушка регистрации; 11 — устройство регистрации сигнала ЯМР; 12 — устройство управления и обработки сигнала ЯМР; 13, 14 — радиочастотные генераторы; 15 — частотомер; 16 — магнитные экраны; 17 — постоянный магнит; 18 — осциллограф.

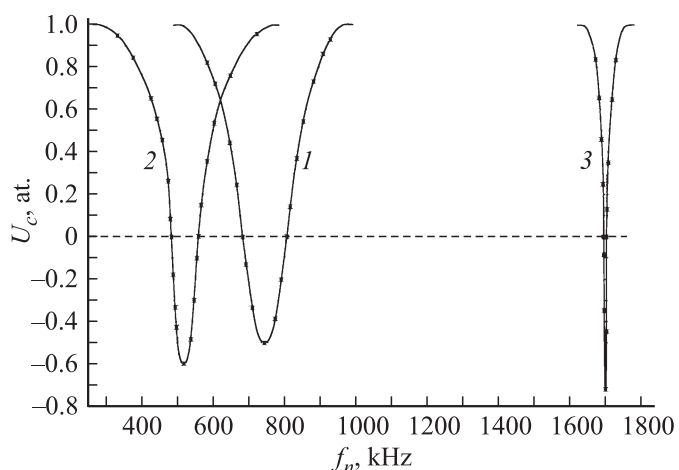


Рис. 2. Форма линии нутации регистрируемого сигнала ЯМР. Кривая 1 соответствует размещению катушки нутации на трубопроводе с $H_1 = 13.16$ A/m, 2 — $H_1 = 12.43$ A/m при наличии экранов 16, 3 — $H_1 = 15.11$ A/m в магните 17 при наличии экранов 16.

нородности магнитного поля ΔH_0 и достигает максимального значения при размещении катушки нутации в магните 17 (график 3). Ширина линии нутации Δf_n с уменьшением неоднородности ΔH_0 уменьшается, а для графика 3 выполняется соотношение $\Delta f_n \approx \gamma^* \Delta H_0$. Также хорошо видно, что изменение величины ΔH_0 неразрывно связано с изменением величины магнитного поля H_0 в зоне размещения катушки нутации. Частота нутации f_n соответствующая условию полной инверсии намагниченности (максимальное отношение S/N инвертируемого на 180° регистрируемого сигнала ЯМР) определяется соотношением [1,5,8]:

$$f_n = f_0 = \gamma^* H_0. \quad (1)$$

На основании полученных результатов можно предположить, что величину ΔH_0 надо учитывать в уравнениях для вектора намагниченности одновременно с частотой нутации в одном слагаемом с расстройкой частоты радиополя $\Delta\omega$ от частоты полной инверсии намагниченности (резонанса).

Следует также отметить, что для получения максимального отношения S/N инвертируемого на 180° регистрируемого сигнала ЯМР кроме выполнения (1) необходимо также выполнение [1,4,10,11]:

$$\gamma^* H_1 t_n = \pi, \quad (2)$$

где $t_n = V_n/q$ (V_n — объем катушки нутации).

При этом также необходимо учесть, что жидкость, протекая по сечению катушки нутации 4 (рис. 1), за время t_n проходит по магнитному полю, величина которого изменяется во времени из-за неоднородности ΔH_0 . В выпускаемых ЯМР измерителях применяются катушки нутации длиной $L_n = 2-3$ мм, расстояние между магнитом-поляризатором 2 и магнитом-анализатором 9 (рис. 1) обычно не менее 30 см. Поэтому на таком небольшом участке, как катушка нутации, можно считать, что изменение ΔH_0 происходит по линейному закону в направлении течения жидкости.

На основании полученных экспериментальных результатов, а также ранее проведенных исследований [4,5,13] и сделанных выводов, авторы предлагают систему уравнений для описания движения вектора намагниченности в катушке нутации в системе координат с осями x , y и z вращающимися с частотой ω_n ($f_n = \omega_n/2\pi$) вместе с полем H_1 вокруг оси z , по которой направлено постоянное магнитное поле H_0 в следующем виде:

$$\begin{aligned} dM_x/dt + M_x/T_2 + (\Delta\omega + (\Delta H_0/t_n)^* \gamma^* t) M_y &= 0, \\ dM_y/dt + M_y/T_2 - (\Delta\omega + (\Delta H_0/t_n)^* \gamma^* t) M_x + \gamma H_1 M_z &= 0, \quad (3) \\ dM_z/dt + M_z/T_1 - \gamma H_1 M_y - M_0/T_1 &= 0, \end{aligned}$$

где $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_n$ — расстройка частоты нутации ω_n от частоты прецессии намагниченности в поле H_0 ($\omega_0 = \gamma H_0$). Причем вектор линейно поляризованного поля H_1 направлен по оси x . Кроме того, выполняется условие, которое подтверждается экспериментально $M_p = \chi_0 H_p \gg M_0 = \chi_0 H_0$. Это означает, что постоянным слагаемым M_0/T_1 в уравнениях можно пренебречь [12–15].

На рис. 3, *a, b* представлены в качестве примера результаты расчета линий нутации на основании решения уравнений (3) для T_1 и T_2 соответствующих водопроводной воде при $T = 14.5^\circ\text{C}$ и для

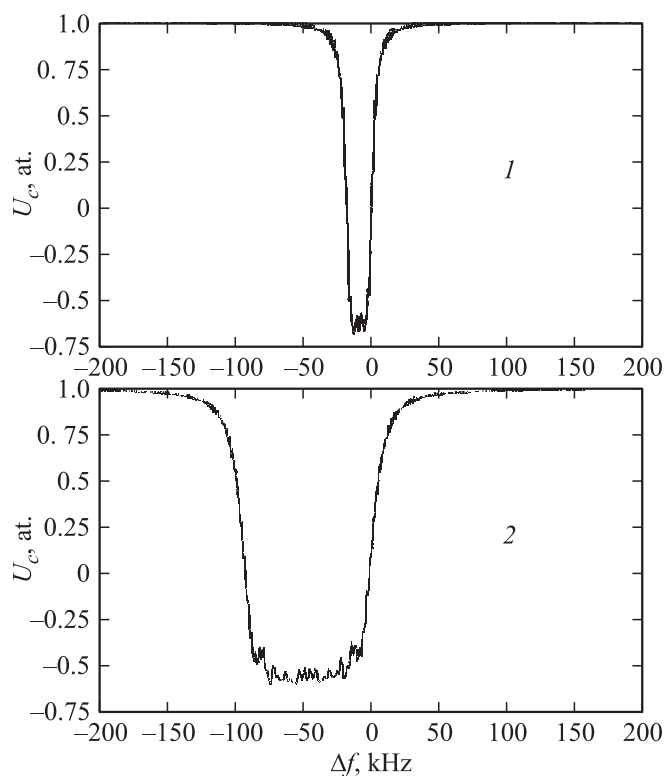


Рис. 3. Расчетная форма линии нутации сигнала ЯМР при $t_n = 2.58$ ms, $T_1 = 1.23$ s, $T_2 = 1.38$ ms. На фрагментах *a, b, c, d* H_1 и ΔH_0 составляют 12.43 и 1344.05, 13.16 и 2403.23, 15.34 и 2403.23, 24.54 и 2403.23 A/m соответственно.

значений H_1 , ΔH_0 и t_n — экспериментально измеренных. А также на рис. 3, *b, c, d* представлено теоретическое исследование зависимости формы линии нутации в случае высокой неоднородности магнитного поля ΔH_0 в зоне расположения катушки нутации от величины поля ΔH_1 для водопроводной воды при $T = 14.5^\circ\text{C}$. Полученные по результатам расчета (3) графики (рис. 3, *1, 2*) отображают полученные экспериментальные линии нутации (рис. 2 — кривые *1* и *2*). При увеличении неоднородности ΔH_0 увеличивается ширина линии нутации

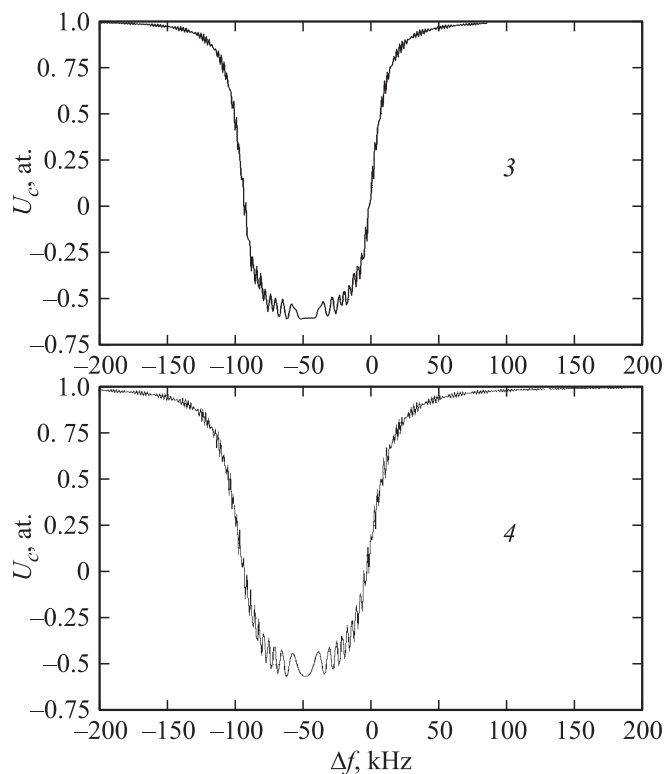


Рис. 3 (продолжение).

Δf_n , а амплитуда инвертируемого на 180° сигнала ЯМР уменьшается. Полученные графики (рис. 3, *b*, *c*, *d*) решением (3) показывают, что в случае невыполнения (2) амплитуда инвертируемого регистрируемого сигнала ЯМР, а также крутизна склона линии нутации уменьшается, что отображает характер процесса нутации, наблюдаемый в эксперименте.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод, что разработанные авторами уравнения (3) позволяют теоретически более корректно описывать процесс формирования линии нутации в ЯМР измерителях с текущей жидкостью в отличие от ранее предложенных математических моделей [1,4–8,10,11,16]. Но объяснение причин воз-

никновения „изрезанных“ участков в районе максимума инвертируемого сигнала ЯМР в линиях нутации (рис. 3), требует проведения дополнительных исследований, что будет продолжением нашей работы.

Список литературы

- [1] Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. СПб.: Изд. СПбГПУ, 2012. 496 с.
- [2] Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 10. С. 64–68.
- [3] Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.U. Nuclear Magnetic Flowmeter–Spectrometer with Fiber–Optical Communication Line in Cooling Systems of Atomic Energy Plants // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2013. V. 22. N 2. P. 112–117.
- [4] Давыдов В.В., Семенов В.В. // РЭ. 1999. Т. 44. № 12. С. 1528–1531.
- [5] Давыдов В.В., Семенов В.В. // ПТЭ. 1999. № 3. С. 151–153.
- [6] Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация. Л.: Изд. ЛГУ, 1991. 256 с.
- [7] Жерновой А.И., Латышев Г.Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М.: Атомиздат, 1964.
- [8] Жерновой А.И. Измерение магнитных полей методом нутации. Л.: Энергия, 1979.
- [9] Александров Е.Б., Вершовский А.К. // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 605–637.
- [10] Жерновой А.И. Ядерно-магнитные расходомеры. Л.: Машиностроение, 1985.
- [11] Давыдов В.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2002. Т. 45. № 5. С. 49–51.
- [12] Давыдов В.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 1999. Т. 42. № 9. С. 50–53.
- [13] Кабардина С.И., Шеффер Н.И. Измерения физических величин. М.: Бинوم, 2009.
- [14] Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 3. С. 44–49.
- [15] Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: Иностранная литература, 1967. 686 с.
- [16] Давыдов В.В., Семенов В.В. // РЭ. 1990. Т. 35. № 10. С. 2179–2183.