

03

## Формирование линии нутации в ядерно-магнитных измерителях с текущим образцом

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

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: Davydov\_vadim66@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 сентября 2014 г.

Представлены результаты исследований зависимости формы линии нутации от величины и неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации для различных значений констант релаксации и температуры текущей жидкости. Экспериментально установлено, что форма линии нутации в ядерно-магнитных измерителях не зависит от изменения времени поперечной релаксации  $T_2$  текущей жидкости.

При проведении различных исследований, а также во время решения технических задач возникает необходимость в измерении магнитных полей, скорости и констант релаксации потока жидкой среды. Для этих целей разработано большое количество измерительных приборов [1,2]. Стоит отметить, что прецизионные измерения магнитных полей составляют наиболее быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество различных применений как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях [3,4]. В отличие измерителей магнитных полей большинство измерителей скорости или расхода применяются в основном в производственной сфере или для контроля технологического процесса. Константы релаксации в потоке жидкой среды вместе с ее расходом могут измерять только приборы, принцип работы которых основан на использовании явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [5,6]. Это — ядерно-магнитные расходомеры-релаксометры.

В ЯМР-магнитометрах на текущей жидкости и расходомерах-релаксометрах при проведении измерений используется зависимость амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР от амплитуды  $H_1$  или частоты  $\omega_n$  радиополя в катушке нутации (линия нутации) [2,7–9]. Зная особенности механизма формирования линии нутации от различных

параметров, можно разрабатывать новые методы измерений и совершенствовать конструкцию приборов для улучшения их метрологических характеристик. Поэтому целью работы является исследование формы линии нутации для выявления особенностей механизма ее формирования от величины и неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации при различных значениях констант релаксации и температуры жидкой среды.

Рассмотрим жидкость с намагниченностью  $M_p = \chi_0 H_p$  ( $\chi_0$  — статическая ядерная магнитная восприимчивость,  $H_p$  — поле магнита поляризатора), поступающую в катушку нутации, в объеме которой ортогонально постоянному магнитному полю  $H_0$  с неоднородностью  $\Delta H_0$  индуцируется поле  $H_1$  [1,2,7,8]. Время нахождения жидкости под действием поля  $H_1$  в катушке нутации  $\Delta t = V_n/q$  ( $V_n$  — объем катушки нутации,  $q$  — расход жидкости). Авторами было установлено, что для получения инверсии намагниченности текущей жидкости на выходе из катушки нутации необходимо выполнение следующего соотношения:

$$\Delta t \geq 2T_n, \quad (1)$$

где  $T_n = 2\pi/\omega_n$  — период действия радиополя  $H_1$ .

При описании поведения вектора намагниченности в скрещенных переменном и постоянном магнитных полях вводят величину  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_n$  — расстройка частоты нутации  $\omega_n$  в зависимости от частоты прецессии намагниченности в поле  $H_0$  ( $\omega_0 = \gamma H_0$ ). Тогда в принятых обозначениях уравнение движения вектора намагниченности в системе координат с осями  $x$ ,  $y$  и  $z$ , вращающимися с частотой  $\omega_n$  вместе с полем  $H_1$  вокруг оси  $z$ , по которой направлено постоянное магнитное поле  $H_0$  согласно [10,11] представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} dM_x/dt + M_x/T_{2n} + \Delta\omega M_y &= 0, \\ dM_y/dt + M_y/T_{2n} - \Delta\omega M_x + \gamma H_1 M_z &= 0, \\ dM_z/dt + M_z/T_{1n} - \gamma H_1 M_y &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Причем вектор линейно поляризованного поля  $H_1$  направлен по оси  $x$ . Кроме того, выполняется условие, которое подтверждается экспериментально  $M_p \gg M_0 = \chi_0 H_0$ . Введены  $T_{1n}$  — эффективное время релаксации, характеризующее уменьшение при нутации компоненты  $M_z$

Значения индукции и неоднородности магнитного поля и частоты  $f_n$ , измеренные нутационным ядерно-магнитным магнитометром на текущей жидкости (соответствующие полной инверсии намагниченности). В качестве жидкости использовалась водопроводная вода при  $T = 291.55$  К с константами релаксации  $T_1 = 1.21$  с и  $T_2 = 2.16$  мс

Место измерения	$f_n$ , Hz	$H_0$ , A/m	$\Delta H_0$ , A/m <sup>2</sup>	$\Delta f_{\text{NMR}} = 2/T_2$ , Hz
На стенде	830.26	98.78	2716.45	925.92
Там же	746.54	88.82	2442.55	925.92
Там же	503.14	59.86	1646.15	925.92

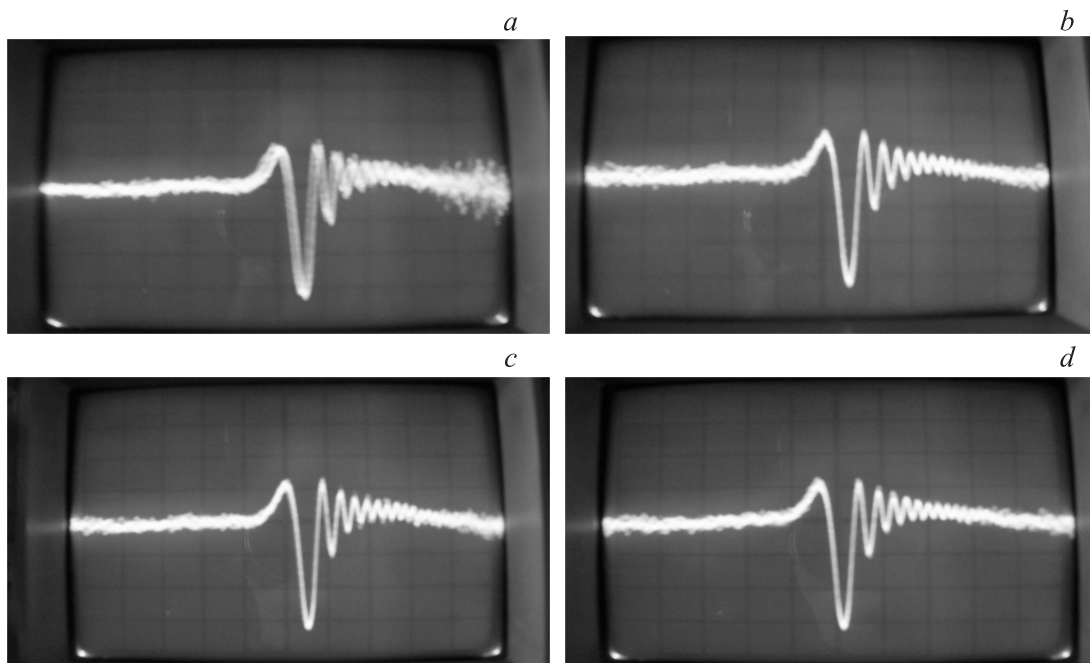
намагниченности ядер, и  $T_{2n}$  — эффективное время релаксации, характеризующее уменьшение при нутации компонент  $M_x$  и  $M_y$  намагниченности ядер. Чтобы учесть неоднородность магнитного поля  $\Delta H_0$  в уравнениях (2)  $T_{2n}$  заменяли на  $T_{2n}^*$  и подставляли ее в уравнения (2), определяя следующим образом:

$$\frac{1}{T_{2n}^*} = \frac{1}{T_2} + \gamma \frac{\Delta H_0}{\pi}. \quad (3)$$

В работах [10,11] для воды с  $T_1 \approx T_2 = 2$  с в поле  $B_0 = 50 \mu\text{T}$  с  $\Delta B_0 = 4 \mu\text{T/cm}$  для  $B_1 = 16.6 \mu\text{T}$  получено на ламинарном потоке  $T_{2n} = 0.003$  с. Для  $T_{1n}$  численных значений не приведено, но отмечено, что  $T_{2n} \ll T_{1n} \ll T_1$ . Можно предположить, что  $T_{1n}$  составляет не более 0.1 с. Полученная авторами статьи теоретическая зависимость  $M_z$  от  $\Delta\omega$  на основании решения (2) представляет собой линию нутации с большим числом дополнительных нулей по частоте  $\omega_n$  поля  $H_1$ , что в эксперименте не наблюдается.

В работах [12,13] авторы проводили исследования по уменьшению времени продольной релаксации  $T_1$  чистой воды ( $T_1 = 3.62$  с,  $T_2 = 1.98$  с при  $T = 292.55$  К). Жидкость находилась в магнитном поле с  $B = 0.67$  Т ( $H = 533165$  А/м), неоднородность 0.005 Т/см. Кроме того, на поляризованную жидкость действовало электрическое поле с  $E = 29.6$  кВ/см. И только для турбулентного потока жидкости удалось получить уменьшение времени продольной релаксации жидкости с 3.62 до 3.16 с. При ламинарном потоке время  $T_1$  воды не уменьшалось.

В таблице представлены значения индукции и неоднородности магнитного поля, в которых были размещены катушка нутации и

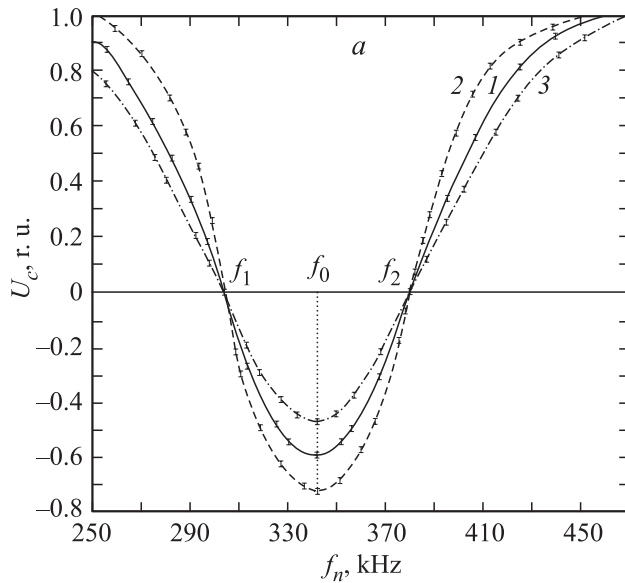


**Рис. 1.** Форма линии регистрируемого сигнала ЯМР с полной инверсией намагниченности водопроводной воды при  $T = 291.55$  К. Расход воды  $q = 3.5$  ml/s. *a* —  $f_n = 830.26$  Hz, длина катушки нутации  $L_n = 4$  mm; *b* —  $f_n = 746.54$  Hz,  $L_n = 4$  mm; *c* —  $f_n = 503.14$  Hz,  $L_n = 4$  mm; *d* —  $f_n = 6.82$  Hz,  $L_n = 8$  mm.

частоты  $f_n$ , соответствующие инверсии намагниченности (значения  $H_1$  для этих случаев почти не отличаются друг от друга). В соответствии с (1), например, для частоты  $f_n = 6.8$  Hz жидкость находится в катушке нутации не менее 0.29 s. Если при этом в соответствии с [10,11] время продольной релаксации уменьшится до  $T_{1n} = 0.1$  s, то сигнал ЯМР наблюдаться не должен, так как согласно [10,11,14] для полного намагничивания жидкости необходимо время, равное трем временам релаксации, и столько же требуется времени для полного размагничивания. Текущая жидкость уже приходит в катушку нутации размагниченной, так как преодолевает некоторое расстояние до нее от поляризатора, в катушке нутации она находится почти  $3T_{1n}$ . А потом ей еще надо преодолеть некоторое расстояние от катушки нутации до анализатора, где происходит регистрация сигнала ЯМР. При таком рассмотрении в момент регистрации значение  $M$  должно быть около 0, и сигнала ЯМР нет. На рис. 1, *a-d* представлены регистрируемые сигналы ЯМР с полной инверсией намагниченности для частот, указанных в таблице.

На основе анализа экспериментальных данных (рис. 1) можно сделать вывод о неправомерности введения  $T_{1n}$  и  $T_{2n}$  в (2). Кроме того, в соответствии с (3) изменение неоднородности магнитного поля должно изменять значение  $T_{2n}$  или  $T_{2n}^*$ . Для регистрации сигналов в ЯМР-измерителях с текущим образцом существует отдельный узел, называемый анализатором, построенный на основе генератора слабых колебаний, имеющего сильную зависимость условий генерации от параметров используемого колебательного контура. Это анализирующее устройство всегда регистрирует только  $M_z$ -компоненту вектора намагниченности жидкости, втекающей в катушку регистрации сигнала ЯМР, расположенную в анализаторе, так как поперечная компонента вектора намагниченности разрушается в неоднородных магнитных полях по пути течения жидкости от катушки нутации до катушки регистрации. Из этих рассуждений следует вывод об отсутствии вклада в ширину линии нутации процессов релаксации поперечной компоненты вектора намагниченности текущей жидкости, что доказано проведенными экспериментами.

На рис. 2, *a* представлены экспериментальные линии нутации для различных температур воды. Величина магнитного поля и неоднородность в зоне размещения катушки нутации не изменялись. Расход  $q$  соответствует максимальному отношению сигнал/шум (SNR) для воды при  $T = 291.55$  K. Любое изменение температуры жидкой среды при-



**Рис. 2.** Форма линии нутации регистрируемого сигнала ЯМР водопроводной воды при различных ее температурах  $T(a)$  и значениях поля  $H_1$  ( $b$ ). Расход воды  $q = 3.5$  ml/s. Объем катушки нутации  $V_n = 0.029$  ml.  $a$  — температура, К: 284.45 (1), 291.55 (2), 310.35 (3). Поле  $H_1 = 14.40$  А/м.  $b$  — напряженность поля  $H_1$ , А/м: 14.40 (1), 11.21 (2), 8.43 (3). Температура воды  $T = 291.55$  К.

водит к изменению ее констант релаксации [15]. Из представленных зависимостей видно, что произошло уменьшение амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР — это связано с изменением  $T_1$ , нарушилось условие оптимального соотношения между процессами намагничивания жидкости и релаксации, при котором SNR максимален [1,9,14]. Положение нулей линии нутации регистрируемого сигнала ЯМР не изменилось. Это еще раз подтверждает, что форма линии нутации не зависит от  $T_2$ , и в очередной раз показывает необоснованность введения  $T_{2n}$  в (2).

На рис. 2,  $b$  представлены экспериментальные линии нутации воды при  $T = 291.55$  К для различных значений поля  $H_1$  для оптимального расхода  $q = 16.5$  ml/s. Величина магнитного поля и неоднородность в зоне размещения катушки нутации не изменялись. Установлено,

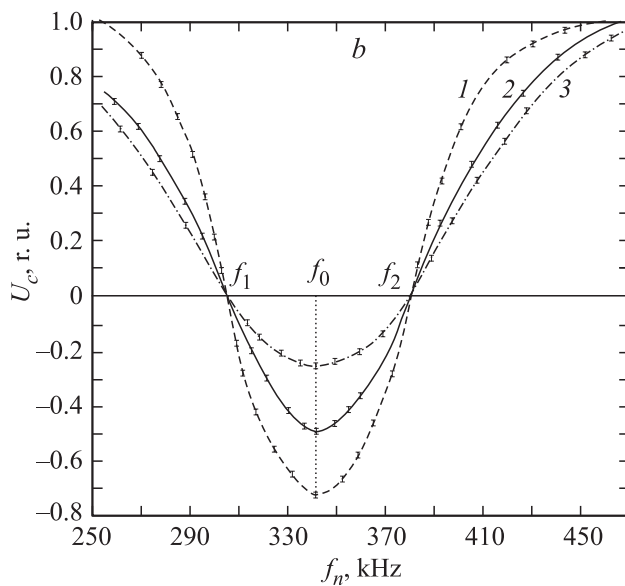


Рис. 2 (продолжение).

что в некотором диапазоне значений  $H_1$  амплитуда регистрируемого сигнала инверсии намагниченности (нутации) изменяется, но нули линии нутации, соответствующие частотам  $f_1$  и  $f_2$ , своего положения не изменяют. Это еще раз подтверждает, что форма линии нутации не зависит от  $T_2$ .

Кроме того, приведенные в таблице результаты измерения магнитного поля в зоне размещения катушки нутации показывают, что нижний предел измерения магнитного поля с использованием линии нутации, связанный с естественной шириной линии текущей среды, так определять нельзя. Считалось, что нельзя измерить магнитное поле методом нутации ниже величины  $2/(T_2^* \gamma)$ . Полученные авторами экспериментальные результаты в таблице опровергают это утверждение. Это еще раз подтверждает, что время поперечной релаксации не влияет на формирование линии нутации.

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующий вывод: для описания движения компонент вектора

намагниченности в катушке нутации использовать систему уравнений (2) нельзя, так как она полностью не отражает физические явления, определяющие механизм формирования линии нутации (например, неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки нутации). Решение данной задачи будет являться одним из дальнейших направлений исследований авторов.

## Список литературы

- [1] Давыдов В.В., Дудкин В.И., Величко Е.Н., Карсеев А.Ю. // Метрология. 2014. № 5. С. 32–41.
- [2] Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 496 с.
- [3] Александров Е.Б., Вершовский А.К. // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 605–637.
- [4] Кошурников Е.К. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 9. С. 126–133.
- [5] Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 10. С. 64–68.
- [6] Davudov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.U. // Optical Memory & Neural Networks. 2013. V. 22. N 2. P. 112–117.
- [7] Давыдов В.В., Семенов В.В. // РЭ. 1999. Т. 44. № 12. С. 1528–1531.
- [8] Давыдов В.В., Семенов В.В. // ПТЭ. 1999. № 3. С. 151–153.
- [9] Давыдов В.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 1999. Т. 42. № 9. С. 50–53.
- [10] Жерновой А.И., Латышев Г.Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М.: Атомиздат, 1964. 254 с.
- [11] Жерновой А.И. Ядерно-магнитные расходомеры. Л.: Машиностроение, 1985. 136 с.
- [12] Карсеев А.Ю., Давыдов В.В., Дудкин В.И. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1. С. 196–199.
- [13] Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 3. С. 44–49.
- [14] Давыдов В.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2001. Т. 44. № 8. С. 49–52.
- [15] Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: Иностран. лит., 1967. 686 с.