

Особенности управления структурой линии нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов для измерения параметров потока жидкости

© В.В. Давыдов,¹ А.А. Гольдберг,¹ Р.В. Давыдов,^{1,2,3} В.И. Дудкин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

² Алферовский университет,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
193232 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 20 апреля 2024 г.

Принято к публикации 21 апреля 2024 г.

Рассмотрены проблемы, возникающие при проведении экспериментов с использованием потоков жидких сред, а также при технических измерениях их параметров в различных сферах деятельности человека. Обоснована необходимость проведения новых исследований в области ядерного магнитного резонанса, связанная с использованием потоков жидких сред для решения сложных научных и технических задач. Разработан новый метод формирования структуры линии нутации на уровне шумов от потока жидкой среды с инверсией намагниченности и установлены особенности управления процессами формирования данной структуры. Проведены экспериментальные исследования и доказана адекватность применения данного режима для измерений расхода жидкости. Предложены новые коэффициенты в уравнениях Блоха, которые описывают движение трех компонент намагниченности в катушке нутации в потоке жидкости в сильном неоднородном поле. Рассчитаны структуры линий нутации для различных параметров. Установлено минимальное значение неоднородности магнитного поля с учетом расхода жидкости и параметров текущей среды, которое надо обеспечить в секторе расположения катушки нутации для формирования структуры линии на уровне шумов. Проведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: поток жидкости, магнитное поле, ядерный магнитный резонанс, линия нутация, инверсия намагниченности, релаксация, неоднородность магнитного поля, резонансная частота, ширина линии, отношение сигнал/шум.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58137.288-23

Введение

В современном мире постоянно появляются новые задачи, которые необходимо решать в рамках технической физики [1–5]. Для их успешного решения требуется разработка новых методов исследования, а также приборов для их реализации [3–7]. С другой стороны, ряд новых задач возможно решить модернизацией имеющегося оборудования, в котором можно реализовать новые разработанные режимы измерения. Для разработки этих режимов и модернизации конструкций действующих приборов необходимо проведение дополнительных исследований для получения новых данных [4–9].

Одним из разделов технической физики, в котором возникают такие задачи, является ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Особое место в нем занимает ЯМР в текущей жидкости, в котором для проведения различных исследований используются расходомеры-релаксометры, магнитометры, вариометры [5–7, 10–12]. Применение этих приборов позволяет решать различные задачи, в которых другие приборы для реализации необходимых

измерений использовать крайне сложно. Кроме того, в ряде случаев измерения с использованием других приборов не позволяют получить полную информацию о параметрах потока для принятия адекватного решения по результатам исследований. К таким ситуациям относятся исследования в потоках жидких сред, когда кроме расхода жидкости q необходимо контролировать ее состояние (например, в системах охлаждения ускорителей, токамаков, ядерных энергетических установок и пр.) с быстрым изменением скорости потока.

В экспериментальных установках и промышленных ЯМР-приборах (расходомерах-релаксометрах и проточных спектрометрах) для регистрации сигнала ЯМР используется импульсный метод СРМГ (последовательность импульсов Карра–Парселла–Мельбума–Гилла) или последовательность импульсов спинного эха. Спинное эхо для регистрации сигнала ЯМР в основном используется только на малых диаметрах трубопровода. Однако применение указанных методов в условиях быстрого изменения скорости потока при измерениях сталкивается с рядом непреодолимых в настоящее время

мя проблем, возникающих как при измерении времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксаций, так и при отстройке частоты регистрации сигнала ЯМР на резонансные частоты других ядер. Основная регистрация сигнала ЯМР осуществляется на резонансной частоте протонов. Классический спектр, который регистрируется в ЯМР-спектрометрах с неподвижным образцом, в проточном ЯМР-спектрометре отсутствует.

Кроме того, для обеспечения измерений значения q , которое изменяется в диапазоне более двух порядков, при быстром изменении скорости потока требуются большие габариты магнитных систем. Длина всей конструкции прибора может достигать до 8–10 м, а масса — до 4000 кг и более. Это создает огромные проблемы с монтажом, ремонтом и т.п. Практические примеры данных проблем рассмотрены в [4,5,13–16].

Анализ работы программ управления работой промышленных ЯМР-расходомеров-релаксометров (например, модель M-PHASE 5000) показал, что в них заложена функция перестройки параметров последовательности импульсов. Параметры последовательности импульсов изменяются до включения прибора оператором в случае изменения жидкой среды, которая протекает по трубопроводу. В основном это относится к топливу на нефтеперегонных заводах (НПЗ). В остальных случаях последовательность импульсов выбирается с учетом возможных изменений значений T_1 и T_2 в исследуемой среде, которая в процессе эксплуатации прибора не изменяется.

При больших изменениях температуры текущей среды T значения T_1 и T_2 изменяются. Это приводит к прекращению процесса измерения (нет автоматического переключения с достоверным выбором параметров последовательности) — среда не изменилась при эксплуатации прибора. Поэтому в основном модели промышленных ЯМР-приборов разрабатываются для измерений параметров определенного класса текущих сред, что существенно ограничивает возможности эксперимента с их использованием.

Очень большая проблема при проведении экспериментов возникает при быстром значительном изменении расхода текущей жидкости, что приводит к выходу за диапазон измерения q (измерения прекратятся и прибор надо будет перезапускать). Эксперименты придется начинать заново.

Использование модуляционной методики для регистрации сигнала ЯМР в расходомерах-релаксометрах и режима „магнитной“ метки для измерения q [13,16,17] позволяет решить отмеченные проблемы. Магнитная метка была реализована с использованием модуляции постоянного магнитного поля в секторе размещения катушки нутации [13,16,17]. Длительная эксплуатация ЯМР расходомеров-релаксометров с режимом магнитной метки позволила выявить ряд проблем, которые влияют на достоверность результатов экспериментальных исследований.

В результате исследования было установлено, что существенное изменение температуры T оказывает влияние на формирование структуры магнитной метки. Необходимо отметить, что для разных жидких сред и их смесей зависимости изменения T_1 и T_2 от T различаются. Все это вместе с изменением расхода q при смене рабочей жидкости или попадания в ее состав примесей приводит к увеличению погрешности измерения q , T_1 и T_2 до 3.0% и более, что неприемлемо как для научных исследований, так и промышленных измерений.

Для случаев проведения экспериментальных исследований с текущей средой при значениях q , которые близко расположены к верхнему пределу измеряемого расхода (данный режим часто применяется в токамаках и системах охлаждения экспериментальных реакторов) сбой в формировании магнитной метки при быстром изменении q (в сторону увеличения) приводит к прекращению измерений q . Экспериментальные исследования после перезапуска прибора необходимо будет начать заново. Это приводит к потере времени и расходу ресурсов. Кроме того, при продолжительных исследованиях есть вероятность повторения данного случая.

Установленные нами в результате исследований закономерности существенно ограничивают функциональные возможности применения ЯМР расходомера-релаксометра с модуляционной магнитной меткой для проведения экспериментальных исследований и других технических приложений. Поэтому целью настоящей работы является разработка нового метода формирования структуры линии нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов, применение которого не обладает отмеченными ограничениями и позволяет получать достоверные результаты в большом диапазоне изменения q и состава потока жидкости при быстрых изменениях его скорости.

1. Особенности формирования линии нутации на уровне шумов и экспериментальная установка для исследования процессов управления ее структурой

Проведенные нами ранее исследования [12,13,16–18] показали, что с увеличением неоднородности магнитного поля ΔB_0 в секторе расположения катушки нутации ширина линии нутации Δf_n увеличивается. Кроме того, увеличение значения ΔB_0 приводит к уменьшению амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности, который используется для измерений q в ЯМР расходомерах-релаксометрах [6,7,10,13,16]. Полученные данные на разработанной ранее экспериментальной установке [17,18] позволили установить, что изменения T потока жидкости оказывают влияние на амплитуду регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности по причине изменения T_1 от T . В этом случае изменяются процессы намагничивания жидкости

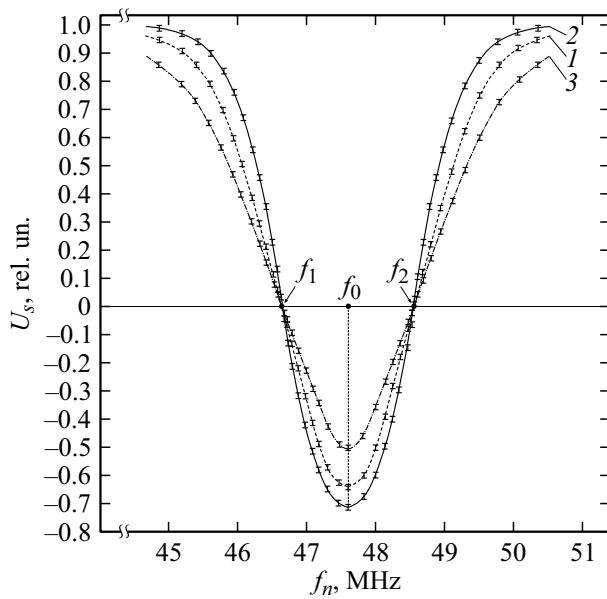


Рис. 1. Зависимость изменения амплитуды сигнала ЯМР U_s от f_n (линия нутации) для потока водопроводной воды при различных температурах T . Расход воды $q_{opt} = 2.59$ ml/s. Индукция поля $B_1 = 32.16 \mu\text{T}$. Кривым 1–3 соответствуют температуры 288.2, 293.1, 308.6 К.

в магните-поляризаторе и ее размагничивания за счет релаксационных процессов в рассеянных магнитных полях, когда она протекает от магнита-поляризатора до катушки регистрации сигнала ЯМР. На рис. 1 представлены результаты исследований изменения структуры линии нутации от T для водопроводной воды. Анализ полученных данных (рис. 1) показывает, что структура линии нутации не изменяется, в отличие от режима „магнитной“ метки, который сформирован с использованием модуляции постоянного магнитного поля в секторе размещения катушки нутации [13,16].

На рис. 2 представлены результаты исследования изменения структуры линии нутации от изменения значения ΔB_0 в секторе размещения катушки нутации. Анализ данных зависимостей показывает существенное влияние неоднородности магнитного поля ΔB_0 на величину Δf_n (ширина линии нутации). Необходимо также отметить, что с изменением ΔB_0 изменяется время t_n , за которое осуществляется взаимодействие поля B_1 с намагниченной жидкостью в окрестности резонансной частоты $f_0 = \gamma B_0$ (в данном случае протонов, так как они обладают наибольшей чувствительностью к методу ЯМР по сравнению с другими ядрами) в катушке нутации. Это создает сложности с формированием сигнала ЯМР с инверсией намагниченности с максимальным отношением сигнал/шум, которое составляет по амплитуде максимум 72–75% от амплитуды сигнала ЯМР, регистрируемого при отключенной катушке нутации. Погрешность при измерениях в экспериментах увеличивается, достоверность полученных результатов снижается.

На основе проведенных исследований [12,13,16–18] и анализа разработок других ученых [2–7,10,11,19,20] нами предлагается новый метод управления структурой линии нутации с использованием воздействия сильного неоднородного магнитного поля на вектор намагниченности в катушке нутации с учетом установленных особенностей формирования линии нутации в сильных неоднородных полях. Управляя направлением вектора намагниченности в катушке нутации за счет изменения ΔB_0 , можно получить устойчивый к быстрому изменению расхода q режим его измерения, аналогичный режиму с использованием магнитной метки, в котором амплитуда сигнала ЯМР формируется на уровне шумов.

На рис. 3 представлен разработанный нами лабораторный стенд с функцией ЯМР расходомера-релаксометра и возможностью управления неоднородностью магнитного поля в широких пределах в секторе размещения катушки нутации. Данная конструкция стенда обеспечивает возможность исследования особенностей формирования структуры линии нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов и реализации на основе этого явления нового режима измерения q потока жидкости.

Процессы создания намагниченности в текущей жидкости подробно рассмотрены во многих работах [4–7,10–17,19,20]. Необходимо отметить, что конструкции систем (2 и 3, рис. 3) для формирования намагниченной текущей жидкости отличаются между собой индукцией магнитного поля, размерами и конфигурацией 2, а также диапазоном времен нахождения потока жидкости в поле B_p , который обеспечивает в

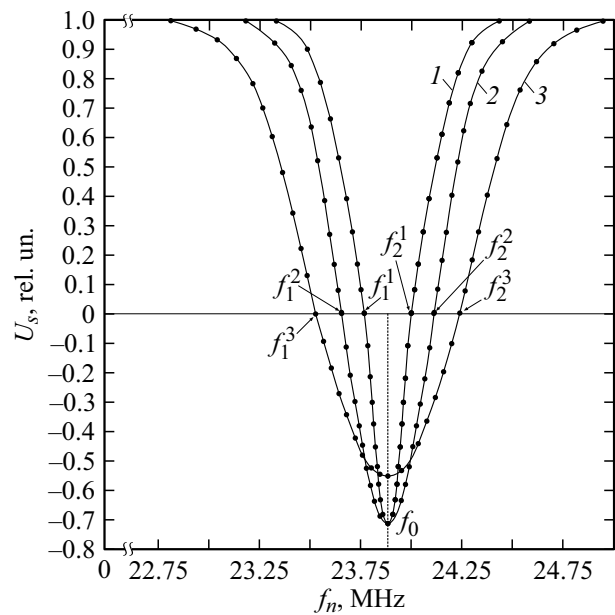


Рис. 2. Зависимость изменения амплитуды сигнала ЯМР U_s для потока намагниченной жидкости (водопроводная вода) от изменения f_n (линия нутации) при индукции $B_0 = 0.56071$ Т, $q_{opt} = 2.59$ ml/s. Кривым 1–3 соответствует неоднородность ΔB_0 в $\text{mT}\cdot\text{cm}^{-1}$ и индукция B_1 в μT : 5.58, 2.69; 11.45, 2.69 и 17.01, 4.06.

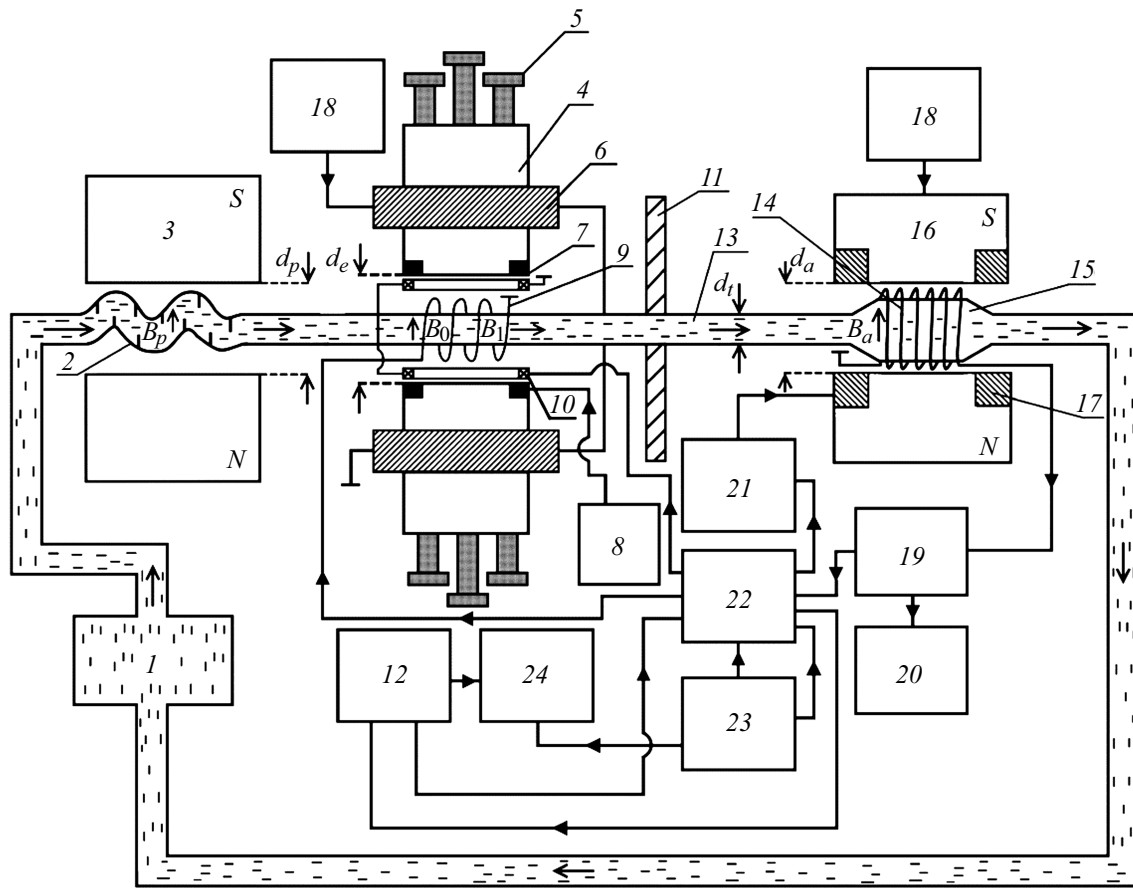


Рис. 3. Экспериментальный стенд для исследований потоков жидких сред в различных условиях с функцией ядерно-магнитного расходомера-релаксометра: 1 — циркулярный насос, 2 — сосуд специальной формы из немагнитного материала, 3 — магнит-поляризатор, 4 — полюсные наконечники электромагнита, 5 — регулировочные винты положения полюсов электромагнита, 6 — катушки магнитного поля для полюсных наконечников, 7 — коррекционные катушки, 8 — специальный блок питания коррекционных катушек, 9 — катушка нутации, 10 — катушки модуляции поля B_0 , 11 — магнитный экран, 12 — генератор нутации, 13 — соединительный участок трубопровода, 14 — катушка регистрации сигнала ЯМР, 15 — сосуд-анализатор, 16 — электромагнит с управлением значения поля B_a , 17 — катушки модуляции поля B_a , 18 — многофункциональный блок питания электромагнитов 6 и 16, 19 — устройство регистрации сигнала ЯМР, 20 — осциллограф, 21 — радиочастотный генератор, 22 — устройство управления и обработки, 23 — радиочастотный генератор, 24 — частотомер двухканальный.

схеме регистрации сигнала ЯМР отношение сигнал/шум $(S/N) > 2.5$ [13,16,19,20]. В разработанной экспериментальной установке для проведения исследований использовалось поле с $B_p = 1.272$ Т при $d_p = 22$ мм с однородностью поля 0.0104 см $^{-1}$. Внутренний диаметр трубопровода d_t , на котором расположена катушка нутации 9, составлял 3.0 мм. По нему жидкость из 2 поступает в катушку нутации 9.

Принципиально новым элементом в разработанной конструкции лабораторного стенда, в отличие от ранее используемых в экспериментальных установках, является специальный электромагнит (рис. 3), в котором значение B_0 изменяется от 0 до 1.427 Т, однородность — от 0.0001 до 0.1 см $^{-1}$. Управление величиной однородности поля осуществляется с помощью вспомогательных катушек 7 и регулировочных винтов 5 (рис. 3). Магнитное поле создается между полюсными наконечниками с диаметром 150 мм, расстояние d_e между ними можно

регулировать в пределах от 2 до 58 мм. Созданные нами широкие функциональные возможности позволяют управлять неоднородностью поля с различной скоростью, в том числе с использованием импульсного напряжения, которое подается на катушки 7. Поворот вектора намагниченности M_p в катушке нутации 9 осуществляется воздействием поля B_1 на текущую намагниченную жидкость. Под действием поля B_1 в 9 вектор намагниченности M_p поворачивается на угол ϕ_n . Значение ϕ_n зависит от параметров магнитного поля в секторе расположения катушки 9. Особенностью управления структуры линии нутации является то, что между катушками 9 и 14 для потока жидкости с намагниченностью действует условие адиабатической теоремы (ориентация вектора M_p не изменяется). Это позволяет сохранить структуру линии нутации с амплитудой на уровне шумов до момента регистрации сигнала ЯМР в 14, куда поступает поток жидкости по 13 из 9 (рис. 3).

В лабораторном стенде в качестве магнитоанализатора 16 используется электромагнит, так как необходима отстройка на различные резонансные частоты (по изменению индукции поля B_a) регистрации сигналов ЯМР, на которых уровень внешних помех минимальный. В условиях лаборатории минимальный уровень помех соответствовал резонансной частоте поля индукции $B_a = 0.354$ Т, которая и была установлена между полюсами магнита 16 (рис. 3) в секторе расположения катушки регистрации 14. Однородность поля в зоне размещения 14 при $d_a = 1.8$ см составляла 0.0001 см^{-1} . Для регистрации ЯМР сигнала в лабораторном стенде применяется генератор слабых колебаний (автодин) [5–7,12,13,17–20], к которому подключалась катушка регистрации 14. Структурно генератор слабых колебаний является частью схемы регистрации 19 (рис. 3).

Для обеспечения возможности сравнения полученных нами экспериментальных данных с результатами исследований других ученых все исследования на лабораторном стенде проводились с использованием потока водопроводной воды при температуре T , которая изменялась в диапазоне от 288 до 308 К (базовая температура жидкости при исследованиях $T = 293.1$ К). При $T = 293.1$ К времена релаксации водопроводной воды имеют следующие значения: $T_1 = 1.27$ с, $T_2 = 0.89$ мс. Сигнал ЯМР регистрировался от протонов.

2. Результаты экспериментальных исследований формирования структуры линии нутации и обсуждение

В разработанном нами лабораторном стенде с реализацией функции ядерно-магнитного расходомера-релаксометра управление структурой линии нутации, которая формируется в катушке нутации 9 (рис. 3) между полюсами 4 в электромагните было выполнено с использованием регулировочных винтов 5 и коррекционных катушек 7 посредством изменения неоднородности поля ΔB_0 . Контроль значения неоднородности ΔB_0 осуществляется по ширине линии нутации $\Delta f_n = f_2 - f_1$, где f_2 и f_1 — частоты, при которых амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР после воздействия поля B_1 равна нулю (рис. 1).

На рис. 4 представлены результаты исследования влияния неоднородности магнитного поля ΔB_0 на изменение структуры линии нутации. Необходимо отметить, что амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР с инверсией намагниченности изменяется с изменением ΔB_0 .

Для одного из вариантов сформированной линии нутации (рис. 4, кривая 1) была измерена неоднородность магнитного поля в секторе расположения катушки нутации в электромагните, которая составила $29.01 \pm 0.29 \text{ мТ} \cdot \text{см}^{-1}$. Данный результат совпадает (в

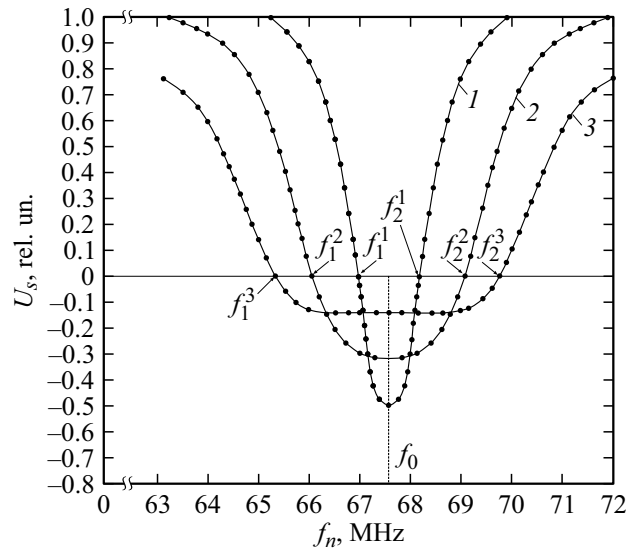


Рис. 4. Структура линии нутации потока водопроводной воды с намагниченностью при $q_{opt} = 2.59$ мл/с в поле $B_0 = 1.5871$ Т (центральная зона между полюсными наконечниками магнитной системы). Кривым 1–3 соответствуют неоднородности магнитного поля ΔB_0 в зоне размещения катушки нутации в $\text{мТ} \cdot \text{см}^{-1}$ и значения B_1 в μT : 29.36, 2.69; 70.93, 3.42 и 98.88, 5.45.

пределах погрешности измерений) с величиной неоднородности $29.09 \pm 0.29 \text{ мТ} \cdot \text{см}^{-1}$, полученной с использованием измерителя магнитной индукции „Ш1–1“, а также значением $28.96 \pm 0.29 \text{ мТ} \cdot \text{см}^{-1}$, измеренным с использованием многофункционального тесламетра Measure ac & dc magnetic field DX–160 (компания Xiamen Dexing Magnet Tech. Co., Ltd, Китай).

Особенностью управления структурой линии нутации в разработанном нами экспериментальном стенде является применение двух режимов управления величиной неоднородности ΔB_0 . Реализация данной особенности позволила получить два варианта линии нутации для двух режимов формирования неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации (рис. 5), которые представляют в дальнейшем интерес для измерения q . Кривая 1 (рис. 5) соответствует режиму формирования ΔB_0 с использованием регулировочных винтов 5 и специальных изготовленных коррекционных катушек 7 (неоднородность магнитного поля в зоне расположения катушки нутации выставлена на максимум). Кривая 2 (рис. 5) соответствует преобразованию структуры линии нутации при отключении корректирующих катушек 7.

Анализ полученных результатов показал, что при данных значениях неоднородности магнитного поля ΔB_0 от 10^{-4} до 0.1271 Т/см в разработанной нами конструкции экспериментального стенда при внутреннем диаметре трубопровода 2 мм, внешнем диаметре трубопровода 4 мм, диаметре каркаса катушки нутации 8 мм, длине катушки нутации 10 мм, расстоянии между полюсами 14 мм и более сформировать структуру линии

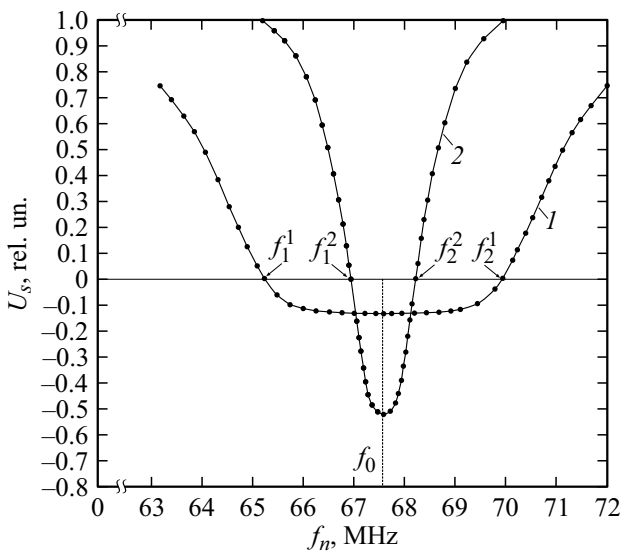


Рис. 5. Структура линии нутации потока водопроводной воды с намагниченностью при $q_{\text{opt}} = 2.59$ ml/s в поле $B_0 = 1.5871$ Т (центральная зона между полюсными наконечниками магнитной системы). Кривым 1 и 2 соответствуют неоднородности магнитного поля ΔB_0 в зоне размещения катушки нутации в $\text{mT}\cdot\text{cm}^{-1}$ и значения B_1 в μT : 27.62, 2.69 и 114.43, 5.67

нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов не получится. Необходимо отметить, что увеличение расстояние между полюсами приводит к увеличению неоднородности магнитного поля ΔB_0 в относительных единицах, по абсолютной величине значение ΔB_0 может уменьшиться, так как с увеличением d_e значение B_0 уменьшается. Поэтому управление структурой линии нутации изменением значения ΔB_0 за счет изменения d_e является нерациональным способом, который может создать неопределенность в измерениях. В приборном варианте такой способ в автоматическом режиме реализовать крайне сложно.

С другой стороны, установлено, что уменьшение амплитуды сигнала ЯМР с инверсией намагниченности с увеличением ΔB_0 — ярко выраженная функция, стремящаяся к нулю. При этом необходимо подстраивать значение B_1 , так как с изменением ΔB_0 сокращается зона взаимодействия поля B_1 с намагниченной жидкостью на резонансной частоте поля B_0 . Кроме того, с увеличением расхода жидкости происходит уменьшение времени t_n , за которое на намагниченную жидкость в катушке нутации действует поле B_1 :

$$t_n = V_n/q, \quad (1)$$

где V_n — объем катушки нутации, который зависит от диаметра трубопровода d_t .

Изменение t_n приводит к нарушению условия π -импульса, которое обеспечивает инверсию намагниченности [3,4,6,7,12–14,16–20]. Это обстоятельство также необходимо учитывать при разработке магнитной системы для управления формой линии нутации.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что в разработанном нами лабораторном стенде, который, по сути, является ЯМР расходомер-релаксометром (в нем заложены функции измерения q , T_1 и T_2) можно реализовать новый режим измерения расхода q с использованием принципа магнитной метки, который был ранее реализован при модуляции поля B_0 [13,16]. Измерения в данном режиме реализуются цифровом коде 0 и 1. Формируется меандр, который исключает влияние многих факторов на результат измерения длительности импульса и соответственно на погрешность определения q .

В разработанной нами конструкции лабораторного стенда с функцией ЯМР расходомера-релаксометра (рис. 3) режим измерения q в цифровом коде 0 и 1 можно сформировать следующим образом. Разница между амплитудами сигналов ЯМР с инверсией намагниченности (рис. 5, кривая 1 с широкой площадкой по уровню -0.13 в относительных единицах) и кривая 2 — близкая к классической неуширенной линии нутации) составляет более 3.5 раза.

Особенностью управления структурой линии нутации в разработанном лабораторном стенде является то, что при изменении ΔB_0 с помощью регулировки положения полюсов 4 регулировочными винтами 5 разница между амплитудами сигналов ЯМР на кривых 1 и 2 (рис. 5) в 3.5 раз почти не изменится при изменении ΔB_0 в интервале от 0.056 до 0.127 Т/см. Это позволит в дальнейшем сформировать структуру линии нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов для реализации устойчивого режима измерения q к быстрым изменениям скорости потока, как это реализовано в режиме магнитной метки с использованием модуляции магнитного поля B_0 [16–18]. Сигнал ЯМР (кривая 1, рис. 5) при достижении уровня шумов после инвертированного операционного усилителя с коэффициентом усиления 4–5 будет в окрестностях нуля. Этот сигнал будет соответствовать для цифрового кода логическому нулю. Максимальная амплитуда U_{max} сигнала ЯМР (кривая 2) после усиления будет равна 1.0, что соответствует логической единице. В результате сформируется сигнал для измерения времени протекания жидкой среды в форме меандра, что позволяет компенсировать большое число негативных факторов, как в [13,16], которые влияют на измерение длительности импульса и соответственно на погрешность измерения q . Для формирования такого режима необходимо определить соотношения между ΔB_0 , B_1 и t_n с учетом расхода жидкости q , размеров катушки нутации, а также зависимость ΔB_0 от d_e .

Еще одной особенностью в проведении исследований структуры линии нутации, которая обеспечит возможность адекватного использования данных зависимостей для управления структурой линии, является обеспечение выполнения условия адиабатической теоремы в соединительном трубопроводе 13 (рис. 3) для потока намагниченной жидкости.

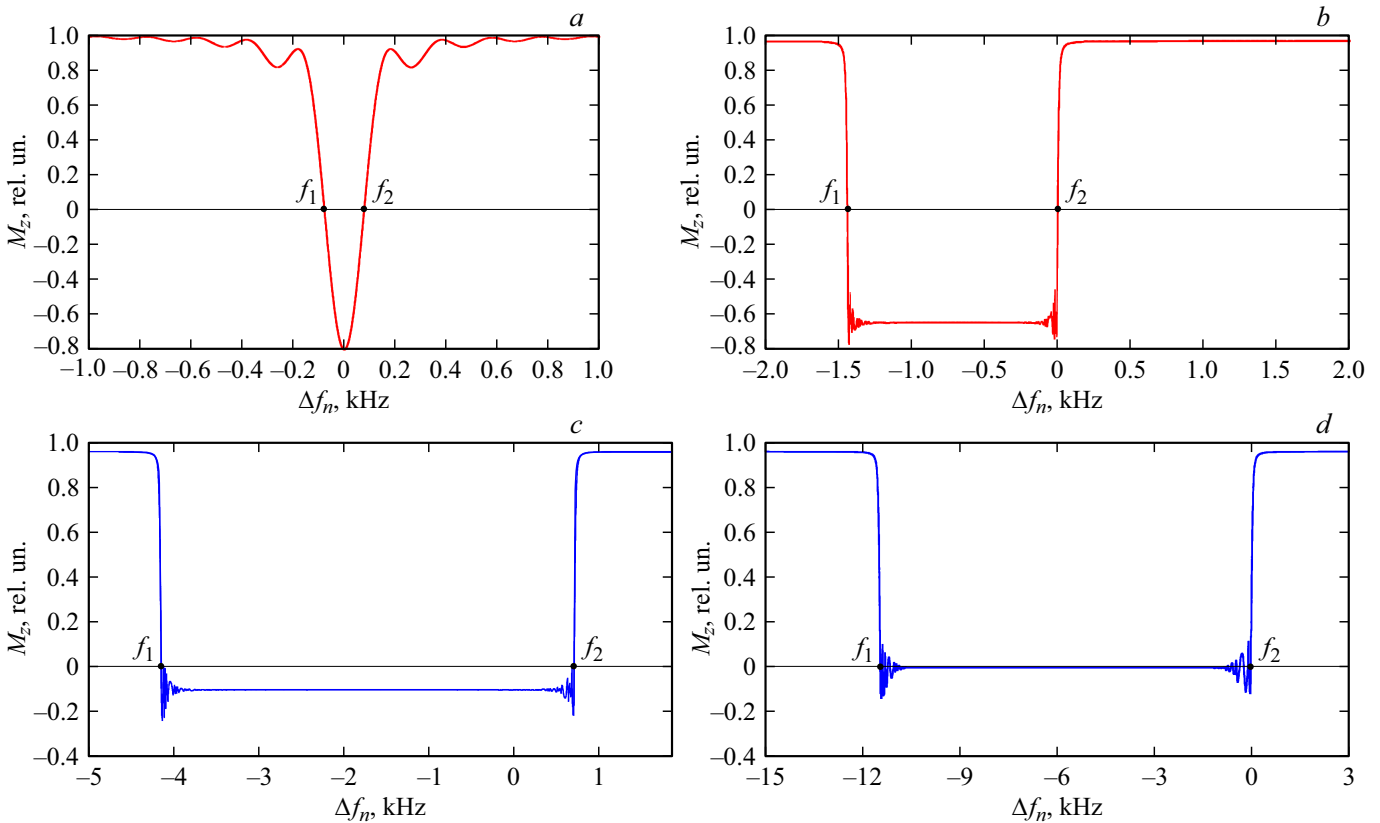


Рис. 6. Структура линии нутации по результатам расчета компоненты намагниченности M_z для потока водопродной воды при $t_n = 62$ ms, $T_1 = 1.27$ s, $T_2 = 0.89$ ms, графикам *a–d* соответствуют неоднородности магнитного поля ΔB_0 в зоне размещения катушки нутации в $\text{mT}\cdot\text{cm}^{-1}$ и значения B_1 в μT : 0.0047, 2.69; 34.9252, 3.11; 102.0519, 5.45 и 274.3253, 12.97.

Стоит также отметить, что в текущей среде, которая используется в технологических процессах, может изменяться температура T , особенно в системах охлаждения ядерных реакторов, спектрометров, мощных электромагнитов, токамаков и ускорителей [16–19]. Изменение температуры приводит к изменению значений T_1 и T_2 , которые оказывают влияние на режим формирования магнитной метки, так как они входят в уравнения Блоха [21,22]. Проведенные ранее нами исследования для режима формирования магнитной метки с использованием модуляции магнитного поля B_0 это подтверждают [16–19]. Все это показывает, что экспериментально определять отмеченные соотношения крайне сложно и дорого, поэтому данную задачу более целесообразно решить с использованием математического моделирования.

3. Новая методика расчета формирования линии нутации на уровне шумов в условиях сильного неоднородного поля

Движение компонент намагниченности текущей жидкости M_x , M_y и M_z в катушке нутации описывается

уравнениями Блоха [21,22]. В ранее проведенных исследованиях [15–20] потоков жидких сред было установлено, что амплитуда и фаза регистрируемого сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики определяется значением и фазой компоненты M_z в катушке 9 (рис. 3). Компоненты M_x и M_y затухают до катушки регистрации 14 сигнала ЯМР в рассеянных магнитных полях между катушками 9 и 14 (рис. 3). Для решения задачи определения амплитуды и фазы компоненты M_z на выходе из катушки нутации 9 нами в уравнения Блоха вводится новый коэффициент $S(\Delta B_0)$, который учитывает изменение ΔB_0 в секторе расположения катушки нутации, а также время t_n , в течении которого на сегмент намагниченной текущей жидкости действует поле B_1 в катушке 9. С новым коэффициентом уравнения Блоха, трансформированные во вращательную систему координат по методу Вагнесса [23,24] принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} dM''_x/dt + M''_x/T_2 &= [\Delta f_n + S(\Delta B_0)]M''_y, \\ dM''_y/dt + M''_y/T_2 &= [\Delta f_n + S(\Delta B_0)]M'_x - \gamma \cdot H_1 M'_z, \\ dM'_z/dt + M'_z/T_1 &= \gamma \cdot H_1 M'_y + M_0/T_1. \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом особенностей управления неоднородностью магнитного поля в используемом нами электромагните 4

(рис. 3) в секторе расположения катушки нутации 9, были разработаны несколько вариантов функции, которая описывает изменение ΔB_0 по мере протекания намагниченной жидкости по катушке нутации 9:

$$1. S(\Delta B_0) = \left(\frac{\Delta B_0}{t_n}\right) \cdot \gamma \cdot t,$$

$$2. S(\Delta B_0) = \left(\frac{\Delta B_0}{t_n^2}\right) \cdot \gamma \cdot t^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{t_n}\right) \cdot \gamma \cdot t,$$

$$3. S(\Delta B_0) = \left(\frac{\Delta B_0}{t_n}\right)^2 \cdot \gamma^2 \cdot t^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{t_n}\right) \cdot \gamma \cdot t,$$

$$4. S(\Delta B_0) = \left(\frac{\Delta B_0}{t_n^2}\right) \cdot \gamma \cdot t^2,$$

$$5. S(\Delta B_0) = \left(\frac{\Delta B_0}{t_n^3}\right) \cdot \gamma \cdot t^3 + \left(\frac{\Delta B_0}{t_n^2}\right) \cdot \gamma \cdot t^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{t_n}\right) \cdot \gamma \cdot t.$$

В качестве примера на рис. 6 представлены результаты расчета структуры линии нутации от расстройки частоты Δf_n поля B_1 от резонанса для $S(\Delta B_0)$, которая соответствует варианту 1.

Анализ полученных результатов показывает, что для формирования структуры линии нутации, которая воспроизводит режим магнитной метки на уровне шумов, необходимо обеспечить в секторе размещения катушки нутации 9 значение $\Delta B_0 = 0.27432$ Т/см и более. Данное значение ΔB_0 определено через $\Delta f_n = 11.679781$ МГц, которое установлено по зависимости на рис. 6, *d*. Это минимальное значение ΔB_0 , которое необходимо обеспечить в секторе расположения катушки 9 (рис. 3) для получения структуры линии нутации на уровне шумов. В реальной конструкции ЯМР расходомера-релаксометра необходимо будет ввести 15% запас по дополнительному изменению значения ΔB_0 от определенного минимального значения ΔB_0 для получения линии нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов. Это необходимо для компенсации различных температурных факторов, которые могут привести к изменению значения B_0 с последующим изменением ΔB_0 . Это изменение необходимо будет компенсировать. Отмеченное обстоятельство является еще одной особенностью формирования структуры линии нутации с инверсией намагниченности на уровне шумов в сильных неоднородных полях.

Заключение

Полученные нами результаты подтверждают возможность, с учетом установленных особенностей, сформировать с использованием нового метода структуру линии нутации в потоке жидкости с инверсией намагниченности на уровне шумов, как в ранее разработанном режиме магнитной метки. Данная структура устойчива к изменению температурного режима (в широких пределах) как текущей жидкости, так и окружающей

среды, что исключает ошибки при проведении исследований или промышленных измерений в потоках жидких сред. В ранее разработанных конструкциях ЯМР расходомеров-релаксометров с использованием режима магнитной метки, сформированной с применением модуляции поля B_0 [13,16], обеспечить такой устойчивый режим работы при исследованиях было невозможно.

Необходимо также отметить, что установленная зона $\Delta f_{\text{нп}}$ формирования сигнала ЯМР с инверсией намагниченности на уровне шумов (рис. 5, *d*) с использованием управления неоднородностью магнитного поля в секторе размещения катушки нутации составляет по частоте порядка 11 МГц (с учетом отмеченного 15% запаса на изменение температуры T текущей среды). Анализ данных, полученных нами для разработанных ранее конструкций ЯМР расходомеров-релаксометров с применением для измерения q режима магнитной метки, которая формируется с использованием модуляции поля B_0 [13,16], показал, что значения $\Delta f_{\text{нп}} \approx 60$ кГц достаточно для обеспечения устойчивых измерений q при резком изменении скорости потока (в три раза). Это позволяет сделать вывод, что новый метод формирования структуры линии нутации обеспечивает устойчивую работу прибора во время исследований при резком изменении скорости потока жидкости минимум на порядок и больше, что в ряде случаев происходит на экспериментальном реакторе или в системах охлаждения токамаков и ускорителей частиц. Этого достаточно для проведения исследования продолжительное время.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Davydov, I. Gureeva, R. Davydov, V. Dudkin. *Energies*, **15** (2), 457 (2022). DOI: 10.3390/en15020457
- [2] M. Gui, J. Shan, Y. Liu, P. Wu, Y. Liang, F. Zhang. *Annals Nuclear Energy*, **194**, 110084 (2023). DOI: 10.1016/j.anucene.2023.110084
- [3] Z. Zhang, H. Liu, T. Song, Q. Zhang, L. Yang, K. Bi. *Annals Nuclear Energy*, **165**, 108766 (2022). DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108766
- [4] K. Safullin, V. Kuzmin, A. Bogaychuk, A. Klochkov, M. Tagirov. *J. Petroleum Sci. Eng.*, **210**, 110010 (2022). DOI: 10.1016/j.petrol.2021.110010
- [5] R.S. Kashaev, N.C. Kien, T.V. Tung, O.V. Kozelkov. *J. Appl. Spectr.*, **86** (5), 890 (2019). DOI: 10.1007/s10812-019-00911-4
- [6] А.И. Жерновой, А.А. Комлев, С.В. Дьяченко. *ЖТФ*, **86** (2), 146 (2016). [A.I. Zhernovoi, A.A. Komlev, S.V. D'yachenko. *Tech. Phys.*, **61** (2), 302 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216020274]
- [7] С.В. Дьяченко, А.И. Жерновой. *ЖТФ*, **86** (12), 78 (2016). [S.V. D'yachenko, A.I. Zhernovoi. *Tech. Phys.*, **61** (11), 1835 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216120112]

- [8] В. Антонов, П. Ефремов. ЖТФ, **90** (9), 1506 (2020). [V. Antonov, P. Efremov. Tech. Phys., **65** (9), 1446 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220090042]
- [9] В. Gizatullin, M. Gafurov, F. Murzakhanov, C. Mattea, S. Stapf. Langmuir, **37** (22), 6783 (2021). DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c00882
- [10] K.T. O'Neill, L. Brancato, P.L. Stanwix, E.O. Fridjonsson, M.L. Johns. Chem. Eng. Sci., **202**, 222 (2019). DOI: 10.1016/j.ces.2019.03.018
- [11] М.Я. Марусина, Б.А. Базаров, П.А. Галайдин, М.П. Марусин, А.А. Силаев, Е.Ю. Закемовская, Ю.Н. Мустафаев. Измерительная техника, **5**, 68 (2014). [M.Y. Marusina, B.A. Bazarov, P.A. Galaidin, M.P. Marusin, A.A. Silaev, E.Y. Zakemovskaya, Y.N. Mustafaev. Measurement Techniques, **57** (6), 580 (2014). DOI: 10.1007/s11018-014-0501-5]
- [12] В.В. Давыдов, В.И. Дудкин, Е.Н. Величко, А.Ю. Карсеев. Метрология, **5**, 32 (2014). [V.V. Davydov, E.N. Velichko, V.I. Dudkin, A.Y. Karseev. Measurement Techniques, **57** (6), 684 (2014). DOI: 10.1007/s11018-014-0519-8]
- [13] В.В. Давыдов, Н.С. Мязин, Р.В. Давыдов. Измерительная техника, **6**, 52 (2022). [V.V. Davydov, N.S. Myazin, R.V. Davydov. Measurement Techniques, **65** (6), 444 (2022). DOI: 10.1007/s11018-022-02103-7]
- [14] S. Srikantha, P. Ashok, K. Mritunjay. Flow Meas. Instrum., **66**, 190 (2019). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.008
- [15] Р.С. Кашаев, В.О. Козелкова, Г.А. Овсенко, В.И. Карачин, О.В. Козелков. Измерительная техника, **5**, 52 (2023). DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-5-52-60 [R.S. Kashaev, V.O. Kozelkova, G.A. Ovseenko, V.I. Karachin, O.V. Kozelkov. Measurement Techniques, **66** (5), 349 (2023). DOI: 10.1007/s11018-023-02234-5]
- [16] В.В. Давыдов, Н.С. Мязин, Р.В. Давыдов. Измерительная техника, **4**, 49 (2022). DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-4-49-58 [V.V. Davydov, N.S. Myazin, R.V. Davydov. Measurement Techniques, **65** (4), 279 (2022). DOI: 10.1007/s11018-022-02080-x]
- [17] В.В. Давыдов, В.И. Дудкин, А.Ю. Карсеев. Известия вузов. Физика, **58** (2), 8 (2015). [V.V. Davydov, V.I. Dudkin, A.Y. Karseev. Russ. Phys. J., **58** (2), 146 (2015). DOI: 10.1007/s11182-015-0475-z]
- [18] В.В. Давыдов, В.И. Дудкин. ЖТФ, **86** (7), 154 (2016). [V.V. Davydov, V.I. Dudkin. Tech. Phys., **61** (7), 1115 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216070094]
- [19] M. Zargar, M.L. Johns, I.M. Aljindan, M.N. Noui-Mehidi, K.T. O'Neill. SPE Production & Operation, **36** (2), 423 (2021). DOI: 10.2118/205351-PA
- [20] А.И. Жерновой. Известия вузов. Физика, **58** (1), 119 (2015). [A.I. Zhernovoi. Russ. Phys. J., **58** (1), 133 (2015). DOI: 10.1007/s11182-015-0472-2]
- [21] A. Leshe. *Nuclear Induction* (Veb Deustscher Verlag Der Wissenschaften, Berlin, 1963)
- [22] A. Abragam. *The Principles of Nuclear Magnetism* (Oxford at the Clarendon Press, Oxford UK, 1961)
- [23] F. Bloch, R.K. Wangsness. Phys. Rev., **78** (1), 82 (1950).
- [24] В.А. Якобсоhn, R.K. Wangsness. Phys. Rev., **73** (9), 942 (1948).