

УДК 53.082.79

ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЙ МИНИРЕЛАКСОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ И ВЯЗКИХ СРЕД

В.В. Давыдов^а, Е.Н. Величко^а, А.Ю. Карсеев^а

^а Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Адрес для переписки: Davydov_vadim66@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.04.14, принята к печати 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-115-121

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Давыдов В.В., Величко Е.Н., Карсеев А.Ю. Ядерно-магнитный минирелаксометр для контроля состояния жидких и вязких сред // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 115–121

Аннотация. Предложена новая методика регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса от малого объема исследуемой среды (0,5 мл) в слабом магнитном поле B_0 (0,06–0,08 Тл) и измерения констант релаксации T_1 и T_2 жидких и вязких сред. Для решения задач, связанных с регистрацией сигнала ядерного магнитного резонанса, разработана новая конструкция магнитной системы ядерно-магнитного минирелаксометра, в которой значение неоднородности магнитного поля в зазоре между полюсами в месте размещения катушки регистрации составляет $0,4 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при индукции поля $B_0 = 0,079 \text{ Тл}$. Для новой конструкции магнитной системы релаксометра разработана схема автономного детектора (генератора слабых колебаний) с использованием слабощумящих дифференциальных усилителей, а также схема управления и обработки сигнала ядерного магнитного резонанса для проведения измерений констант релаксации в автоматическом режиме, выполненная на базе микроконтроллера STM32. Применение новых технических решений позволило повысить быстродействие и увеличить динамический диапазон измерения констант релаксации T_1 и T_2 в разработанном релаксометре с сохранением точностных характеристик по сравнению с ранее предлагаемыми авторами малогабаритными измерителями. Разработанные схемы автоподстройки частоты регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса, амплитуды генерации магнитного поля H_1 в катушке регистрации, а также частоты и амплитуды поля модуляции позволили проводить измерения T_1 и T_2 при отношении сигнал/шум около 1,2 с погрешностью не выше 0,5% в диапазоне температур окружающей среды (воздуха) от 3 до 40 °С. Разработанная конструкция электронных схем позволила уменьшить вес минирелаксометра до 4 кг (включая автономный блок питания), что повысило удобство его транспортировки и использования.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, константы релаксации, релаксометр, магнитное поле, микроконтроллер, жидкая среда.

NUCLEAR-MAGNETIC MINI-RELAXOMETER FOR LIQUID AND VISCOUS MEDIA CONTROL

V.V. Davydov^а, E.N. Velichko^а, A.Yu. Karseev^а

^а Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

Corresponding author: Davydov_vadim66@mail.ru

Article info

Received 28.04.14, accepted 08.12.14

doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-115-121

Article in Russian

Reference for citation: Davydov V.V., Velichko E.N., Karseev A.Yu. Nuclear-magnetic mini-relaxometer for liquid and viscous media control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 115–121 (in Russian)

Abstract. The paper deals with a new method for registration of nuclear magnetic resonance signal of small volume liquid and viscous media being studied (0.5 ml) in a weak magnetic field (0.06 –0.08 T), and measuring of longitudinal T_1 and transverse T_2 relaxation constants. A new construction of NMR mini-relaxometer magnetic system is developed for registration of NMR signal. The nonuniformity of a magnetic field in a pole where registration coil is located is $0,4 \times 10^{-3} \text{ sm}^{-1}$ (the induction is $B_0 = 0.079 \text{ T}$). An electrical circuit of autodyne receiver (weak fluctuations generator) has been developed with usage of low noise differential amplifier and NMR signal operating and control scheme (based on microcontroller STM32) for measuring of relaxation constants of liquid and viscous media in automatic operating mode. New technical decisions made it possible to improve relaxometer response time and dynamic range of measurements for relaxation constants T_1 and T_2 in comparison with small sized nuclear-magnetic spectrometer developed by the authors earlier (with accuracy characteristics conservation). The developed schemes for self-tuning of registration frequency, generating amplitude

of magnetic field H_1 in registration coil, and amplitude and frequency of modulating field provide measuring of T_1 and T_2 with error less than 0.5 % and signal to noise ratio about 1.2 in temperature range from 3 to 400 C. A new construction of mini-relaxometer reduced the weight of the device to 4 kg (with independent supply unit) and increased transportability and operating convenience.

Keywords: nuclear magnetic resonance, relaxation constants, relaxometer, magnetic field, microcontroller, liquid medium.

Введение

В условиях сложной экономической ситуации в нашей стране и обостряющейся конкуренции многие производители вынуждены уменьшать издержки на производство, чтобы не поднимать цену на свою продукцию. Это мгновенно сказывается на ее качестве, причем отслеживать такую продукцию, особенно если она представляет собой жидкую или вязкую среду, очень сложно [1–3]. Непрерывное ухудшение экологического состояния большинства водоемов также требует проведения различных мероприятий по экологическому мониторингу водных объектов и прибрежных зон [1, 2, 4]. В данной ситуации возрастает роль методов экспресс-контроля состояния жидких и вязких сред в полевых условиях [1, 4].

Кроме того, одним из условий получения надежных результатов при проведении исследований с использованием жидких и вязких сред является наличие достоверной информации о состоянии самой среды (например, о наличии в ней примесей, возможном структурном изменении, произошедшем по различным причинам и т.д.). Особенно это становится актуально, если среда используется после длительного хранения, транспортировки, смены емкости или другого воздействия, способного изменить ее состояние [2, 5]. Многофункциональные рентгеновские, оптические, магниторезонансные спектрометры (в основном зарубежных фирм Bruker, Marjan, Toshiba, Maran и пр.), позволяющие проводить полный анализ таких сред, являются дорогостоящим лабораторным оборудованием, требующим специальных условий эксплуатации и материальных затрат на обслуживание [3–6]. Надежная и доступная по цене аппаратура, позволяющая оперативно проводить экспресс-контроль жидких и вязких сред в лаборатории, была бы одним из решений данной проблемы.

Задачу экспресс-контроля жидких и вязких сред может решить разработанный авторами ранее малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр (ЯМР-спектрометр) [1, 2, 4]. Однако в процессе эксплуатации данного прибора были выявлены определенные проблемы и недостатки, устранение которых повысит эффективность его использования. В связи с этим разработка нового прибора на базе имеющегося малогабаритного ЯМР-спектрометра позволит сделать его более многофункциональным, повысит его конкурентоспособность и востребованность.

Особенности экспресс-контроля жидких и вязких сред методом ЯМР

В работах [1–6] подробно описаны методики измерения констант релаксации (время продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации) и конструкция малогабаритного ЯМР-спектрометра, а также обоснована необходимость одновременного измерения T_1 и T_2 для исключения ошибки в определении состояния среды. Выпускаемые в настоящее время модели ЯМР-спектрометров и ЯМР-релаксометров зарубежных компаний, измеряющие одновременно T_1 и T_2 , весят более 40 кг и потребляют значительное количество электроэнергии, которое не всегда можно обеспечить даже в передвижной лаборатории, и требуют особых условий эксплуатации. Но они позволяют исследовать все существующие жидкие и вязкие среды, как чистые, так и их смеси.

При регистрации сигнал ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с помощью модуляционной методики возникают проблемы, связанные с исследованием жидких и вязких сред с большими временами поперечной релаксации T_2 . В соответствии с методикой определения T_2 по спаду сигнала ЯМР [1, 5, 7–9] необходимо наблюдать данный сигнал в форме «виглей» по времени не менее $2T_2$, чтобы провести измерения T_2 с погрешностью не выше 0,5%. Период следования сигнала ЯМР в форме «виглей» определяется частотой модуляции магнитного поля B_0 , в котором регистрируется сигнал ЯМР [4, 10]. Исходя из этого, в новой конструкции ядерно-магнитного минирелаксометра (ЯМР-минирелаксометра) необходимо разработать систему автоматического управления частотой модуляции f_m , а также амплитудой поля модуляции H_m по максимальному сигналу регистрации. Кроме того, в соответствии с разработанной методикой измерения T_1 значение f_m необходимо будет уменьшить в 5 раз по сравнению с первоначальной, на которой измерялось T_2 [1, 7, 9, 10]. Для этого значения частоты модуляции $f_m/5$ необходимо также будет осуществить автоподстройку амплитуды поля модуляции H_m по максимальному сигналу регистрации.

Уменьшение размеров катушки регистрации в ранее разработанной схеме с целью уменьшения величины ΔH для повышения точности измерения T_2 [1, 9, 10] привело к уменьшению количества исследуемого вещества и, соответственно, к уменьшению числа ядер с магнитными моментами, от которых регистрируется сигнал ЯМР. Следствием этого уменьшения стало ухудшение отношения сигнал/шум (SNR). Причем для различных жидких и вязких сред число протонов N или ядер с магнитными моментами в 1 см^3 существенно различается, поэтому SNR в схеме регистрации сигнала ЯМР зависит также от величины поля H_1 в катушке регистрации [4–7, 11, 12]. По этой причине для регистрации сигнала ЯМР

при оптимальных условиях необходимо разработать схему автоматической подстройки уровня генерации автодинного детектора [1, 13, 14] (величины поля H_1) по максимальному сигналу регистрации.

Частота регистрации сигнала ЯМР $f_{\text{ямп}}$ связана с индукцией магнитного поля B_0 следующим образом [4, 7]:

$$f_{\text{ямп}} = \gamma B_0, \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение.

По умолчанию, минирелаксометр настроен на регистрацию ЯМР-сигнала от протонов (что соответствует гиромагнитному соотношению $\gamma = 42,57637513$ МГц/Тл), но имеется возможность перестройки частоты регистрации $f_{\text{ямп}}$ для регистрации сигналов от ядер фтора, лития и натрия (гиромагнитные отношения 40,106214 МГц/Тл; 16,561322 МГц/Тл и 11,277214 МГц/Тл соответственно). Такая возможность перестройки по частоте предусмотрена для исследования сред, в которых протоны либо отсутствуют, либо их количество значительно меньше числа других ядер (для эффективных измерений количество ядер фтора и лития должно превышать количество протонов в 5 раз, натрия – не менее 20).

Измерения констант релаксации T_1 и T_2 разработанным ЯМР-минирелаксометром предполагается проводить в различных климатических условиях при температуре окружающей среды 3–40 °С, поэтому необходимо будет модернизировать схему автоматической подстройки частоты регистрации сигнала ЯМР $f_{\text{ямп}}$ автодинного детектора по величине индукции магнитного поля B_0 в соответствии с (1), которая меняется с изменением температуры магнитов и магнитной системы при значительных колебаниях температуры окружающей среды (более 10 °С).

Исходя из этого, кроме сохранения различных ранее выполненных требований в изготовленной конструкции малогабаритного ЯМР-спектрометра [1, 4], для разрабатываемой новой конструкции ЯМР-минирелаксометра была поставлена задача разработать новую схему регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле, перечисленные схемы автоподстройки частот ($f_{\text{ямп}}$ и f_m), а также магнитных полей (H_1 и H_m) с использованием микроконтроллера. При этом в новой конструкции ЯМР-минирелаксометра сохраняется методика измерений, позволяющих одним и тем же измерительным устройством определять константы релаксации T_1 и T_2 жидкой или вязкой среды без внесения изменений в конструкцию прибора [1].

Ядерно-магнитный минирелаксометр и методики измерения T_2 и T_1

Структурная схема разработанного ЯМР-минирелаксометра представлена на рис. 1. Для регистрации сигнала ЯМР была разработана и изготовлена новая малогабаритная конструкция магнитной системы на основе двух плоских (квадратных) неодимовых магнитов (с примесями платины и кобальта) 1.

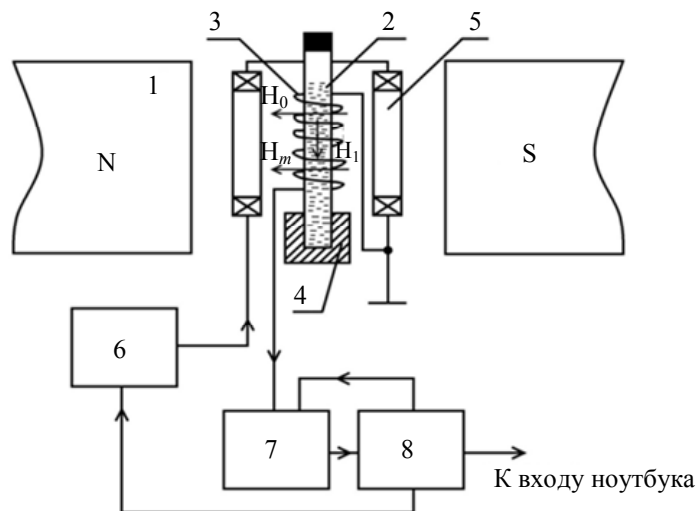


Рис. 1. Структурная схема ЯМР-минирелаксометра: 1 – постоянный магнит с нейтралью; 2 – контейнер с исследуемой средой; 3 – катушка регистрации сигнала ЯМР; 4 – фиксирующее устройство для контейнера; 5 – катушки модуляции; 6 – радиочастотный генератор; 7 – автодинный детектор (генератор слабых колебаний); 8 – устройство обработки и управления

Юстировка взаимного расположения полюсов магнитной системы обеспечивается с помощью изготовленной компактной «нейтрали» с регулировочными винтами на основе ранее разработанной модели [1]. Это позволило получить величину индукции магнитного поля $B_0 = 0,079$ Тл при неоднородности $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ в зазоре между полюсами магнитов. Кроме того, вес конструкции магнитной системы с катушками модуляции 5, фиксирующим устройством для контейнера 4, а также заполненного контейнера исследуемой средой 2 составил не более 1,937 кг, что на 0,45 кг меньше, чем для ранее разработанного малогабаритного ЯМР-спектрометра [1].

В разработанной конструкции для уменьшения влияния неоднородности магнитного поля на результат измерения констант релаксации [1, 5, 7] объем катушки регистрации был минимизирован до 0,1 мл. Для регистрации сигнала ЯМР от такого малого объема в слабом магнитном поле была разработана и собрана новая схема автодинного детектора 7 (генератора слабых колебаний) на основе малошумящих дифференциальных усилителей, что обеспечило стабильную работу автодинного детектора и хорошее подавление синфазных помех [15]. Схема обработки и управления 8 была разработана и реализована на основе микроконтроллера STM32. Эта схема осуществляет подстройку частоты и уровня генерации (величины поля H_1) автодинного детектора для обеспечения оптимальных условий во время регистрации сигнала ЯМР – максимальное SNR при совпадении резонансной частоты контура регистрации с частотой магнитного поля, в котором расположена исследуемая среда. Кроме того, данная схема осуществляет подстройку частоты f_m и амплитуды H_m поля модуляции по максимальному сигналу регистрации. В режиме измерения T_1 данная схема осуществляет управление частотой модуляции f_m и автоподстройку амплитуды поля модуляции H_m для получения максимального сигнала регистрации.

Но, так как число ядер с магнитными моментами N для каждого сред разное, то при таком маленьком объеме регистрации SNR для многих исследуемых жидкостей, даже при использовании систем автоматической подстройки частот и амплитуд с помощью микроконтроллера, будет низким – не позволяющим проводить измерения констант релаксации с необходимой точностью. А при измерении T_1 значение SNR еще уменьшится. По этой причине на основе микроконтроллера была разработана схема накопления сигнала ЯМР. Разработанная программа позволяет микроконтроллеру, вычисляя отношение SNR, определять – включать ему схему накопления сигнала ЯМР во время измерения или нет.

В результате многолетней эксплуатации ЯМР-измерителей (расходомеров, магнитометров, спектрометров и релаксометров) установлено, что для проведения измерений этими приборами с погрешностью не выше $\pm 0,5\%$ необходимо, чтобы выполнялось соотношение $SNR > 3$ [9, 10, 13, 16]. В связи с этим в нашем минирелаксометре выбор числа накоплений происходит на основе анализа значения SNR. Если $SNR \leq 1,5$, то для обеспечения погрешности измерений менее $\pm 0,5\%$ реализуется 1000 накоплений, если $1,5 < SNR \leq 3,5$ – 100 накоплений. Очевидно, что при предложенном подходе возможна ситуация, когда SNR достигнет высоких значений (например, более 30), что превышает необходимые требования. Но построение системы измерений с использованием схемы накопления для таких случаев незначительно затягивает процесс измерения T_1 и T_2 , особенно в случае 100 накоплений (например, для частоты модуляции $f_m = 11,7141$ Гц магнитного поля B_0 время однократного измерения двух констант релаксации будет составлять менее 4 с). Всегда лучше сделать качественное измерение, чем его потом повторять. Делать 10000 накоплений в таком случае нецелесообразно, так как за 400 с (согласно примеру) при работе с прибором на открытом воздухе могут произойти колебания температуры среды, которые недопустимы при измерениях T_1 и T_2 .

Разработанная нами конструкция ЯМР-минирелаксометра позволяет измерять времена релаксации в диапазонах $T_1 - 0,01-20$ с, $T_2 - 0,00005-4$ с при температурах окружающего воздуха 3– 40 °С. В данный диапазон значений T_1 и T_2 попадают почти все жидкие и вязкие среды и их смеси. Следует отметить, что по сравнению с предыдущей конструкцией релаксометра диапазон измерений констант релаксации увеличился более чем на порядок.

На рис. 2 представлены сигналы ЯМР (зависимости амплитуды U регистрируемого сигнала от времени t) без накопления и на выходе схемы накопления от синтетического моторного масла ZIC XQ 5W-40 при температуре $T = 18,6$ °С.

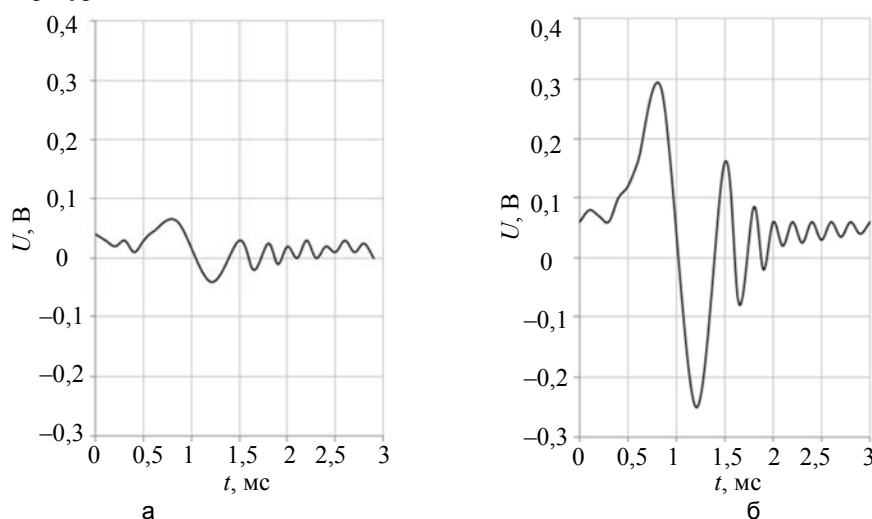


Рис. 2. Регистрируемый сигнал ЯМР от моторного масла: без накопления (а); на выходе схемы накопления (б)

На рис. 2, а, хорошо видно, что SNR регистрируемого сигнала мало, и измерение T_1 и T_2 проводить невозможно, после 100 накоплений сигнал приобретает параметры, позволяющие проводить измерения констант релаксации с необходимой точностью (рис. 2, б). При данной температуре для данного моторного масла были определены $T_1 = 1,021 \pm 0,005$ с и $T_2 = 720,36 \pm 3,59$ мкс. Цикл измерения времен релаксаций повторялся 20 раз для усреднения данных и оценки погрешности измерения в соответствии с методиками, используемыми для таких измерений в [1, 5, 8, 16]. Проба этого масла при $T = 18,6$ °С была исследована на стационарном ЯМР-релаксометре Minispec mq 20 (фирма BRUKER), измеренные – $T_1 = 1,0207 \pm 0,0021$ с и $T_2 = 718,94 \pm 1,44$ мкс.

Так как для измерений констант релаксации используется малый объем жидкой среды 0,5–0,8 мл, то его температура через несколько секунд становится равной температуре окружающей среды, которую можно измерить стандартным прибором с высокой точностью. Это еще одно достоинство разработанного ЯМР-мини-релаксометра. Зная температуру исследуемой среды, можно, сравнив измеренные значения констант релаксации T_1 и T_2 с эталонными, установить отклонение среды от естественного состояния.

Разработанные новые схемы автодинного детектора 7 (рис. 1), устройства обработки и управления 8 с использованием микроконтроллера позволили уменьшить вес этой части конструкции ЯМР-мини-релаксометра, включающей схему радиочастотного генератора 6, энергоемкий аккумулятор и схему стабилизации питания на +12 В, – до 2 кг. При этом общий вес разработанного ЯМР-мини-релаксометра не превышает 4 кг, обеспечивая непрерывный режим работы около 32 ч без подзарядки. В ранее разработанной конструкции общий вес составлял 4,3 кг, а непрерывный режим работы без подзарядки – менее 20 ч.

По измеренным значениям констант релаксации моторного масла можно сделать следующий вывод: T_1 ниже допустимой нормы, T_2 в пределах нормы. Это означает, что масло долго хранилось (может быть, с несоблюдением условий хранения), и использовать его не рекомендуется. Даты на упаковке показывают, что срок годности масла истек более 4 лет назад до момента проведения исследований.

Результаты измерений

В качестве одного из актуальных примеров работы разработанного ЯМР-мини-релаксометра по экспресс-контролю жидких и вязких сред можно привести результаты измерений сигналов ЯМР на выходе схемы накопления от бензина А-76, бензина «Галоша» и его смесей с бензином А-76 и очищенным керосином в определенных пропорциях при температуре $T = 17,9$ °С, представленные на рис. 3.

На туристических слетах и в местах массового скопления туристов (например, п. Лосево в Ленинградской области) почти все пользуются горелками, и многие туристы жалуются на неэффективную работу горелки от бензина «Галоша», приобретенного в пос. Лосево. Для проведения контроля качества бензина студенты-туристы доставили несколько емкостей с бензином «Галоша», купленных как в Санкт-Петербурге, так и пос. Лосево, в нашу лабораторию. По внешним признакам (цвет, запах, вязкость на солнечный свет) бензины из этих емкостей друг от друга не отличались.

На основании полученных экспериментальных данных (рис. 3, а) можно сделать вывод о том, что срок годности бензина А-76 истек (могли быть нарушены условия хранения, так как T_1 стало ниже нормы), а бензин «Галоша» (рис. 3, б), приобретенный в Санкт-Петербурге, имеет высокое качество. Нам удалось подобрать две смеси бензина «Галоша» с бензином А-76 и керосином, сигналы ЯМР от которых полностью совпали с привезенными смесями из п. Лосево. По измеренным константам релаксации T_1 и T_2 видно, что бензин «Галоша» (рис. 3, в, г) содержит примеси, и применять его в горелках не рекомендуется.

Для описываемых сред разработанным ЯМР-мини-релаксометром и ЯМР-релаксометром Minispec mq 20 (компания BRUKER) были измерены константы релаксации, сравнительные данные измерений приведены в таблице.

Среда	ЯМР-мини-релаксометр		Minispec mq 20	
	T_1 , с	T_2 , мкс	T_1 , с	T_2 , мкс
Бензин А-76	$1,432 \pm 0,007$	$146,05 \pm 0,73$	$1,4266 \pm 0,0029$	$145,35 \pm 0,29$
Бензин «Галоша»	$1,333 \pm 0,006$	$207,51 \pm 1,04$	$1,3403 \pm 0,0027$	$206,38 \pm 0,42$
Смесь бензина «Галоша» и бензина А-76 в пропорции 70% к 30%	$1,396 \pm 0,007$	$229,12 \pm 1,49$	$1,3897 \pm 0,0028$	$228,24 \pm 0,46$
Смесь бензина «Галоша» и очищенного керосина в пропорции 75% и 25%	$1,352 \pm 0,006$	$238,11 \pm 1,18$	$1,3486 \pm 0,0027$	$236,92 \pm 0,47$

Таблица. Времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации жидких сред

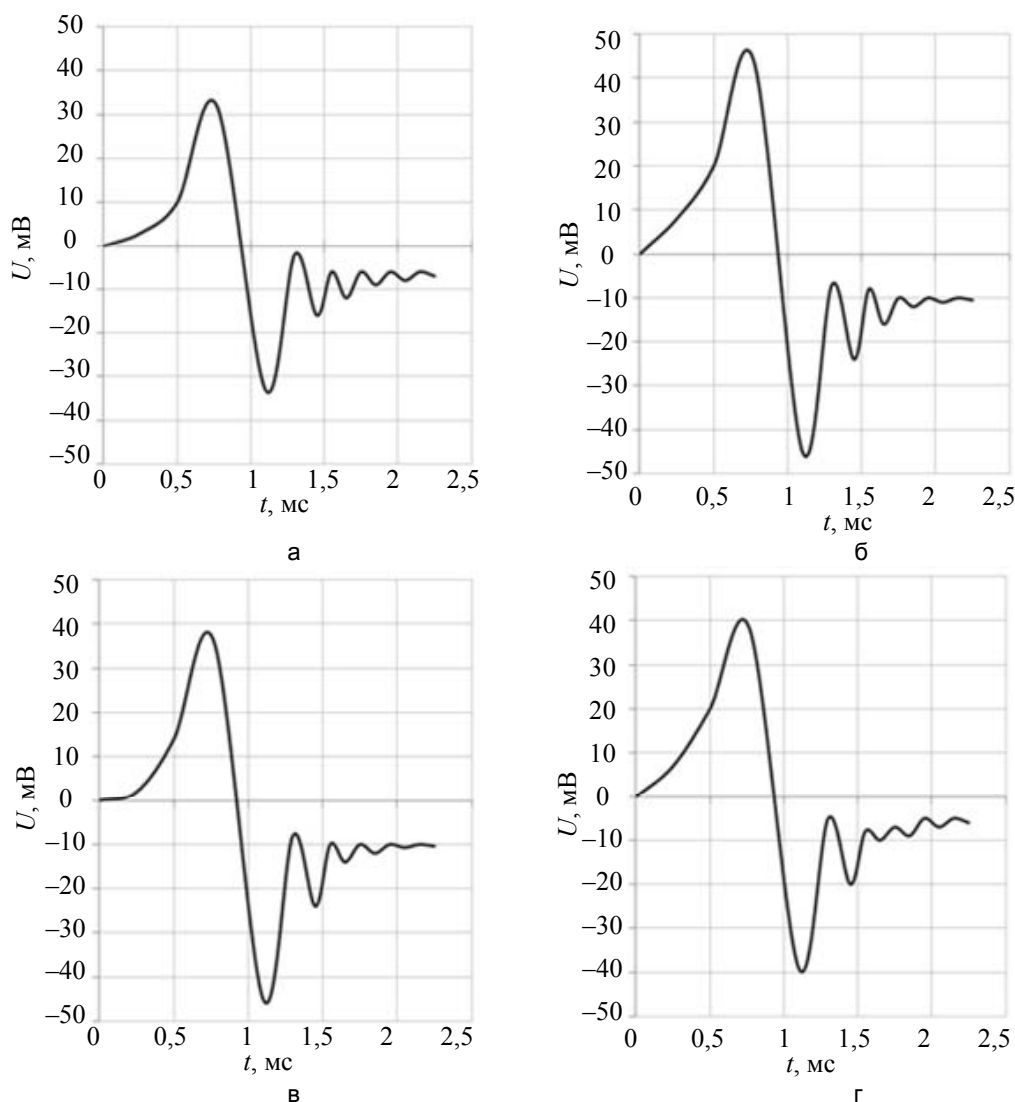


Рис. 3. Регистрируемый сигнал ЯМР на выходе схемы накопления, соответствующий: бензину А-76 (а); бензину «Галоша» (б); смеси, состоящей на 70% из бензина «Галоша» и на 30% из А-76 (в); смеси, состоящей на 75% из бензина «Галоша» и на 25% из керосина (г)

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что разработанный ядерно-магнитный минирелаксометр позволяет проводить измерения констант релаксации (времен релаксации) жидких и вязких сред с погрешностью не выше 0,5 % и определять текущее состояние среды в экспресс-режиме на месте измерения. В определенных случаях разработанная схема регистрации сигнала позволяет по наблюдаемому сигналу ядерного магнитного резонанса (на экране осциллографа или ноутбука) установить наличие примесей в чистых жидкостях (например, бензол или ацетон), без измерения T_1 и T_2 .

Следует отметить, что представленная модель прибора является лабораторным образцом ядерно-магнитного минирелаксометра. В дальнейшем планируется использование новых разработанных моделей неодимовых магнитов небольших размеров с примесями благородных металлов и кобальта, позволяющих получить магнитное поле между полюсами с индукцией $B_0 = 0,12$ Тл и выше, с неоднородностью не хуже $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Это позволит уменьшить размер и вес «нейтралы» магнитной системы релаксометра, а также увеличить SNR в схеме регистрации сигнала ядерного магнитного резонанса, тем самым увеличивая динамический диапазон измерения T_1 с сохранением точностных характеристик прибора.

References

1. Davydov V.V., Karseev A.Yu. Malogabaritnyi yaderno-magnitnyi spektrometr dlya ekspress-analiza zhidkikh sred [Compact nuclear-magnetic spectrometer for express-control of liquid medium]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 4 (86), pp. 87–92.

2. Davydov V.V., Karseev A.Yu. The liquid medium conditions express-control by portable nuclear-magnetic spectrometer. *Proc. 10th International Forum «ECOBALTICA'2013»*. St. Petersburg, 2013, p. 73.
3. Davydov V.V., Ermak S.V. A quantum spectrum analyzer based on radiooptical resonance. *Instruments and Experimental Techniques*, 2001, vol. 44, no. 2, pp. 215–218.
4. Davydov V.V., Karseev A.Yu. The environmental monitoring of access Baltic Sea coast areas. *Proc. XV International Environmental Forum Baltic Sea Day «BSD'14»*. St. Petersburg, 2014, pp. 54–56.
5. Davydov V.V. The research of the relaxation times T_1 and T_2 in flow liquid. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 1997, vol. 30, no. 17, pp. 3993–3994.
6. Chen B., Ivanov I., Klein M.L., Parrinello M. Hydrogen bonding in water. *Physical Review Letters*, 2003, vol. 91, no. 21, pp. 2155–2158.
7. Lösche A. *Kerninduktion*. Berlin, Deutscher Verl. der Wissenschaften, 1957.
8. Marusina M.Y., Neronov Yu.I. Metod opredeleniya vremeni relaksatsii protonov motornogo masla i vozmozhnosti ego prakticheskogo ispol'zovaniya [Method for the definition of motor oil proton time relaxation and possibilities of its practical use]. *Nauchnoe Priborostroenie*, 2010, vol. 20, no. 2, pp. 37–41.
9. Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.Yu. Povyshenie tochnosti izmereniya konstant relaksatsii tekushchei zhidkosti v yaderno-magnitnom spektrometre [Improvement of measuring accuracy for relaxation constants of flowing liquid in nuclear-magnetic spectrometer]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 10, pp. 64–68.
10. 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 and Neural Networks (Information Optics)*, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 112–117. doi: 10.3103/S1060992X13020021
11. Davydov V.V. Malogabaritnyi polarizator dlya yaderno-magnitnykh raskhodomerov i magnetometrov [Small-sized polarizer for nuclear magnetic flow meters and magnetometers]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2001, vol. 44, no. 8, pp. 49–52.
12. Davydov V.V. Control of the longitudinal relaxation time T_1 of a flowing liquid in NMR flowmeters. *Russian Physics Journal*, 1999, vol. 42, no. 9, pp. 822–825.
13. Pryakhin A.E., Shushkevich S.S., Orobei I.O. Nutation flowmeter for a proton-bearing liquid. *Instruments and experimental techniques New York*, 1983, vol. 26, no. 6, pp. 1456–1458.
14. Davydov V.V., Semenov V.V. A modulation operating mode for nutation NMR flowmeters and magnetometers. *Instruments and Experimental Techniques*, 1999, vol. 42, no. 3, pp. 427–429.
15. Davydov V.V., Karseev A.Yu. Generator slabykh kolebaniy dlya registratsii signala yadernogo magnitnogo rezonansa [Generator of weak vibrations to detect the signal of nuclear magnetic resonance]. *Peterburgskii Zhurnal Elektroniki*, 2014, no. 1 (78), pp. 89–91.
16. Kabardina S.I., Sheffer N.I. *Izmereniya Fizicheskikh Velichin* [Measurement of Physical Quantities]. Moscow, Binom Publ., 2009, 152 p.

- Давыдов Вадим Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, Davydov_vadim66@mail.ru
- Величко Елена Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, velichko-spbstu@yandex.ru
- Карсеев Антон Юрьевич** – студент, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, antonkarseev@gmail.com
- Vadim V. Davydov** – PhD, Associate professor, Associate professor, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Davydov_vadim66@mail.ru
- Elena N. Velichko** – PhD, Associate professor, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, velichko-spbstu@yandex.ru
- Anton Yu. Karseev** – student, Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, antonkarseev@gmail.com