ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 72–79

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 007.51

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ЯМР-ДАТЧИКОВ РЕЗОНАТЬЕ 2.2

© 2025 г. А. В. Гунбин[a,*], А. В. Ткачев[a], Н. Е. Гервиц[a]

[a] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

e-mail: anthony.gun@inbox.ru

Поступила в редакцию 22.11.2024 г.
После доработки 06.12.2024 г.
Принята к публикации 29.12.2024 г.

Система автоматической настройки частоты была разработана и реализована для датчиков, используемых в спектроскопии ядерного магнитного (ЯМР) и квадрупольного (ЯКР) резонансов. В ее основе лежат доступные технологии, позволяющие собрать и подготовить такую систему для любого датчика вне зависимости от способа управления. Управляющая электротехническая часть реализована на платформе Arduino и включает совместимые с платформой модули: шаговый двигатель и сервопривод. Оснастка для размещения управляющей системы была изготовлена с помощью аддитивных технологий, что упростило процесс прототипирования и создания готовой системы. Благодаря доступности и низкой стоимости компонентов, система автоматической настройки может быть адаптирована и настроена для любых датчиков ЯМР/ЯКР. При проведении эксперимента система автоматической настройки позволила исключить ручную настройку датчика в процессе эксперимента и уменьшить временные затраты на эксперимент.

DOI: 10.31857/S0032816225030116

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-резонансная спектроскопия твердого тела часто включает эксперименты, где измеряются спектры, растянутые в широком частотном диапазоне, что представляет собой длительный и монотонный процесс. Экспериментатор повторяет рутинную настройку оборудования после каждого изменения частоты, зачастую такие эксперименты занимают большие временны́е интервалы. В датчике для магнитно-резонансной спектроскопии требуется настройка резонансного RLC-контура, в котором частота изменяется в зависимости от изменения емкости конденсатора. Конструкция такого датчика предполагает изменение емкости конденсатора путем изменения положения штока вручную.

Такие широкие спектры часто встречаются в ядерно-резонансной спектроскопии твердого тела: например, в работе [1] для соединения $Ba_3Cu_3In_4O_{12}$ спектр ЯКР ^{115}In обнаруживается в частотном диапазоне от 16 до 34 МГц и в таком же интервале (примерно 20 МГц) – магнитно-возмущенный ЯКР $^{63,65}Cu$. В работе [2], где спектр ^{209}Bi в соединении $BiFeO_3$ получен в диапазоне частот от 40 до 140 МГц, или в работе [3], где спектр $^{63,65}Cu$ в соединении $LiCu_2O_2$ снимался в диапазоне от 60 до 160 МГц, организация эксперимента требовала еще большего количества перенастроек датчиков.

В экспериментальной части магнитно-резонансной спектроскопии используются, как правило, трубчатые датчики, помещаемые в цилиндрическую шахту криостата или магнитной системы. Шток управляет переменным конденсатором или индуктивной катушкой – таким образом осуществляется настройка резонансного контура на необходимую частоту и на уровень согласования в случае двухштокового решения. В основном применяются конструкции датчиков с одним из двух типов управления.

Один из вариантов управления – схема с продольным движением управляющего штока. Второй вариант – схема с вращательным движением (рис. 1) [4].

Необходимость автоматизации подтверждается в работах [5, 6], авторы которых разработали и описали свои системы для автоматического управления датчиками. Особенностью таких систем автоматической настройки является уникальность и специфичность, так как такие устройства не производятся на промышленном уровне и остаются уделом коллективов экспериментаторов. Поэтому каждая система настройки создана в единственном экземпляре и соответствует только определенному датчику. Что касается коммерчески доступных систем автоматической настройки [7–9], то их стоимость достаточно велика (может составлять десятки процентов стоимости магнитной системы), а сами эти системы настроены также строго на конкретные типы датчиков.

Представленная в данной работе система автоматической настройки частоты резонансного контура Резонатье 2.2 создана с целью изменения парадигмы непосредственного присутствия экспериментатора в зоне проведения эксперимента и исключения ручного управления датчиком. Она лишена описанных выше недостатков благодаря своей общедоступности и модульности. Используемые электротехнические модули находятся в общем доступе, а воспроизводимая оснастка позволяет адаптировать систему под любой датчик. Программное обеспечение распространяется на условиях свободного лицензионного договора и легко подстраивается под задачи эксперимента.

Система Резонатье 2.2 разработана для датчика с поступательным движением штока. Благодаря гибкости и открытости система Резонатье 2.2 может быть адаптирована для датчиков с поступательно-вращательной схемой управления с минимальными доработками (второй шаговый двигатель для второго штока и измененная оснастка).

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ РЕЗОНАТЬЕ 2.2

Система автоматической настройки частоты резонансного контура для датчиков с ручной настройкой Резонатье 2.2 представляет собой комплекс устройств: автоматический настройщик и коаксиальный переключатель. Головным устройством системы является автонастройщик Резонатье 2.2, который монтируется на датчик и является несущим каркасом для основных электромеханических устройств. Автонастройщик представляет собой надстройку для датчика и несет полезную нагрузку в виде микропроцессора ATMega328P, который обеспечивает связь всех модулей системы с ПК и прямое управление штоком датчика (рис. 2).

Коаксиальный переключатель RS Coaxial Switch 651-850 соединен с сервоприводом, управляемым Резонатье 2.2; он позволяет соединять коаксиальный кабель от датчика с цифровым анализатором спектра или спектрометром в зависимости от реализуемого режима работы (рис. 2).

Для реализации автоматизированного управления датчиком была выбрана платформа Arduino и вариация Nano. Arduino Nano V3.0 (рис. 3) – платформа, в основе которой лежит микроконтроллер ATMega328P семейства AVR с тактовой частотой 16 МГц [10]. При подключении Arduino к компьютеру используются расположенный на плате чип USB-UART CH340C и интерфейс формата USB Type-C. Связь платформа–компьютер осуществляется посредством USB-кабеля, для обработки полученных данных

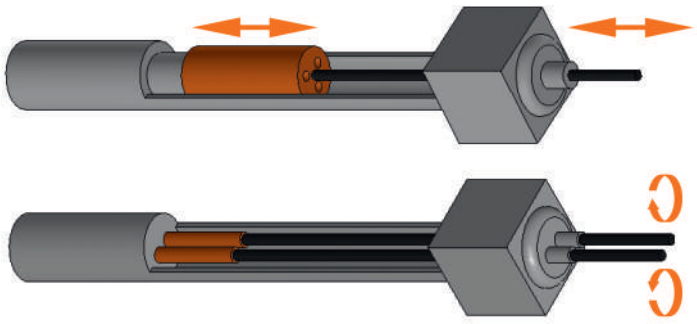

Рис. 1. Схематичное изображение датчика с поступательным движением штока (сверху) и с вращательным (снизу). Черным цветом отмечены штоки, оранжевым – конденсаторы.

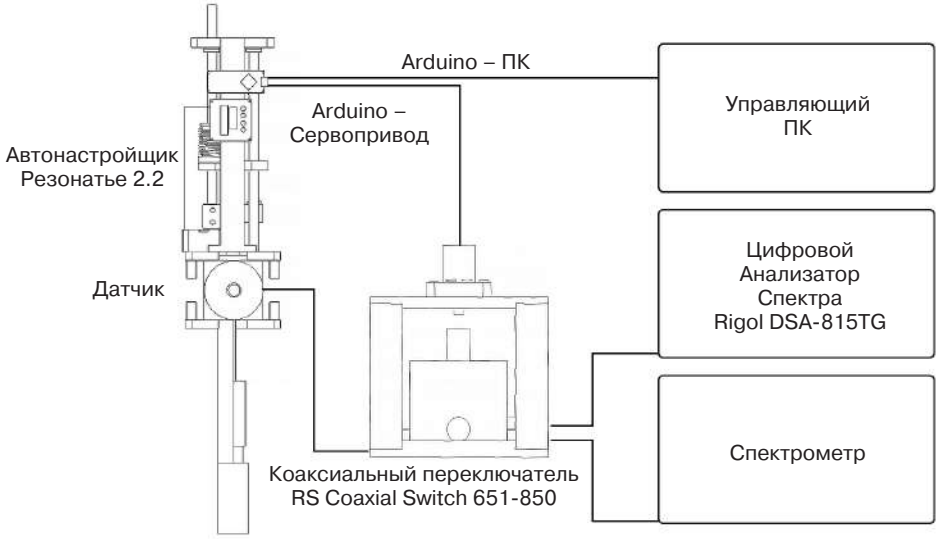

Рис. 2. Общая схема реализации Резонатье 2.2.

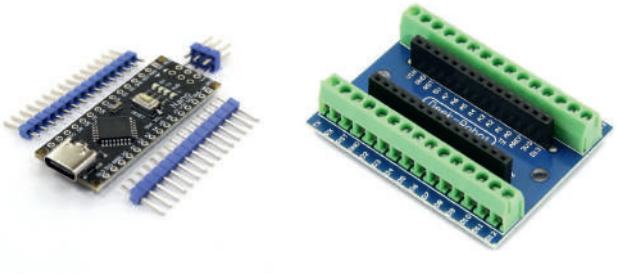

Рис. 3. Платформа Arduino Nano V3.0 с интерфейсом USB Type-C и терминальный адаптер.

и отправки команд на компьютер используется драйвер, работающий в режиме эмуляции последовательного виртуального COM-порта.

Для упрощения монтажа навесного оборудования используется терминальный адаптер для Arduino Nano (рис. 3). Кроме того, терминальный адаптер способствует оперативной замене вышедших из строя компонентов или добавлению новых функций, так как такой способ коммутации не требует пайки.

Платформа Arduino Nano V3.0 полностью удовлетворяет требованиям системы и обладает

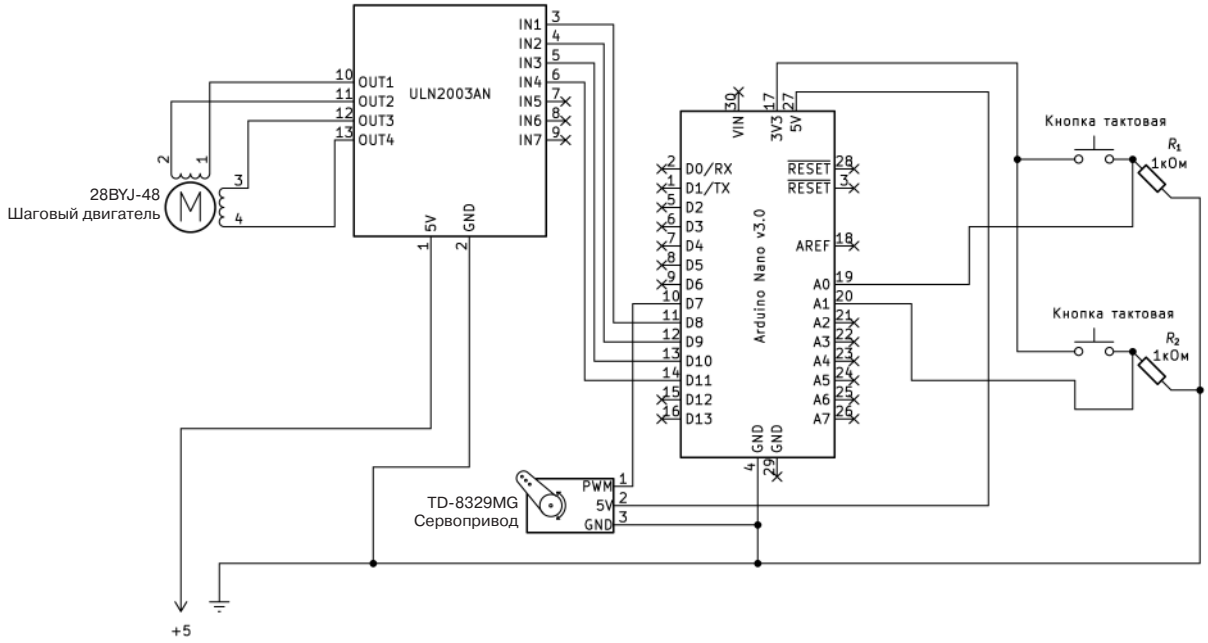

Рис. 4. Принципиальная электрическая схема автоматического настройщика частоты Резонатье 2.2.

компактным формфактором. Плата имеет 14 цифровых входов/выходов, 8 аналоговых входов, выходы 5 В и 3.3 В. Плата необходима для связи управляющей программы на компьютере с электронно-механической частью системы.

Принципиальная схема подключения компонентов и устройств системы приведена на рис. 4. Далее будет приведено подробное описание устройства и работы ее отдельных блоков.

3. СИСТЕМА НАСТРОЙКИ ДАТЧИКА

Система автоматического управления позиционируется на оснастке, изготовленной посредством инженерной печати на FDM-3D-принтере (Fused Deposition Modelling – печать методом послойного наложения материала) из полиэтилентерефталатгликоля (PET-G). Оснастка представляет собой П-образную конструкцию, на которой располагаются все компоненты системы (рис. 5).

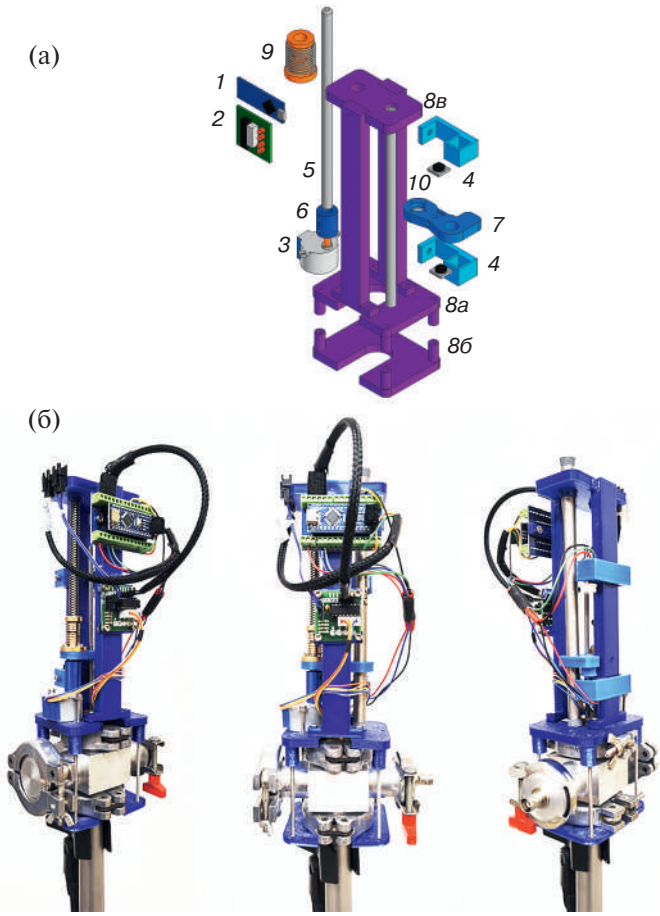

Рис. 5. а – Проект автонастройщика; **б** – готовая система Резонатье 2.2 на датчике: *1* – Arduino Nano, *2* – плата управления ULN2003AN, *3* – шаговый двигатель 28BYJ-48, *4* – кнопки H6 (концевые выключатели) с креплением, *5* – трапециевидный винт TR8×8, *6* – муфта соединительная 5×8, *7* – планка, управляющая штоком датчика, *8* – PET-G-несущая конструкция, состоящая из опорной пластины *8а*, прижимной пластины *8б* и поперечной пластины *8в*, *9* – ходовая гайка T8, *10* – направляющая.

Несущая конструкция автонастройщика крепится к датчику посредством зажатия коммутационной головы датчика между опорной пластиной *8а* и прижимной пластиной с вырезом *8б*. Опорная пластина является основной частью конструкции, на ней закрепляются все детали автоматического настройщика. Опорная пластина *8а* располагается на верхней части датчика, а прижимная пластина *8б*, располагаемая под головой датчика, с помощью винтов надежно фиксирует конструкцию на датчике.

Трапециевидный винт *5* центрируется при помощи подшипника скольжения и поперечной пластины *8в*, которая также необходима для упрочнения конструкции. Во избежание смещения крепежной пластины и блокирования штока датчика в конструкции предусмотрена направляющая *10* с прорезиненной опорой, что сохраняет подвижность системы относительно продольной оси датчика.

Шток, которым настраивается частота резонансного контура датчика, управляется с помощью шагового двигателя 28BYJ-48 и платы управления ULN2003AN [11]. Четырехфазный шаговый двигатель 28BYJ-48 обладает высоким коэффициентом редукции 1/64, что позволяет очень точно позиционировать шток датчика (5.625° поворота винта *5* за шаг).

Для управления шаговым двигателем на платформе Arduino задействуются 4 цифровых выхода D8–D11 (рис. 4). В платформе Nano нет разъема для подключения внешнего питания, поэтому во избежание наводок и перегрузки платформы, питание для шагового двигателя 5 В подведено от внешнего блока питания, а именно, от блока питания компьютера, используемого для управления Резонатье 2.2. Важно отметить, что внешний источник питания и платформа Arduino должны иметь одинаковую землю.

Максимальный ход штока датчика, используемого в проекте, составляет 50 мм. За один полный оборот вала двигателя шток смещается на 1.25 мм. За один шаг двигателя шток смещается приблизительно на 0.02 мм, что составляет смещение на 0.04 %. Такая избыточная точность перемещения штока позволяет соблюдать прецизионность при настройке колебательного

контура датчика и сохранять высокую воспроизводимость положения штока.

Вал шагового двигателя с помощью муфты 5 × 8 (*6* на рис. 5) жестко соединен с трапециевидным винтом TR8 × 8 длиной 150 мм (*5*). Жесткая связь между штоком датчика и гайкой T8 на трапециевидном винте осуществлена с помощью планки *7*, напечатанной на FDM-3D-принтере. Во избежание люфтов в связи “трапециевидный винт – гайка” применяется разрезная подпружиненная ходовая гайка T8 (*9*).

Ограничители крайних положений крепежной пластины и штока (концевые выключатели) реализованы с помощью тактовых кнопок H6 (*4*), при достижении которых крепежная пластина нажимает верхний или нижний концевой выключатель. Концевые выключатели соединены с выходом 3.3 В на платформе Arduino через резистор емкостью 1 кОм и находятся в нормально разомкнутом состоянии (рис. 4). Когда концевой выключатель не нажат, на аналоговый вход платформы подается нулевое напряжение, выход заземлен на пин GND платформы Arduino. При нажатии на концевой выключатель крепежной пластиной на аналоговый вход подается напряжение 3.3 В. При появлении напряжения на аналоговых входах для нижнего A_0 и для верхних A_1 концевых выключателей система останавливается программой – крайнее положение штока датчика достигнуто. Наличие концевых выключателей позволяет избежать саморазрушения системы в случае нештатного поведения управляющей платформы.

4. УПРАВЛЕНИЕ КОАКСИАЛЬНЫМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ

Для настройки частоты колебательного контура необходимо подключить датчик к анализатору спектра и провести настройку, для измерения спектра датчик отключается от анализатора спектра и подключается к спектрометру. Такая схема подключения и настройки датчика требует присутствия оператора и постоянного ручного переключения либо использования дорогостоящего малошумного реле с хорошей изоляцией между выводами, способного при этом пропускать мощные импульсы.

Для автоматизации процесса была реализована схема с механическим коаксиальным переключателем RS Coaxial Switch 651-850 с двумя выходами и одним входом. RS Coaxial Switch 651-850 обладает малым значением прямых потерь, менее 0.1 дБ, коэффициентом стоячей волны (КСВ) в пределах 1.1 и показателем изоляции более 60 дБ при частоте до 500 МГц. На вход подключается датчик, на выходы, между которыми происходит переключение, подключаются спектрометр и измеритель амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для программного управления с помощью платформы Arduino Nano были подготовлены PET-G-оснастка и сервопривод (рис. 6). Цифровой сервопривод TD-8329MG (*1*) подключается к выходу Arduino 5 В и управляется через цифровой выход D_7 (рис. 4).

Сервопривод TD-8329MG развивает крутящий момент 1.7 Н·м (при напряжении питания 4.8 В) и работает в пределах угла поворота 180° [12]. Такого усилия достаточно для плавного и быстрого поворота вала коаксиального переключателя. Сервопривод напрямую управляет валом переключателя и поворачивается на про-

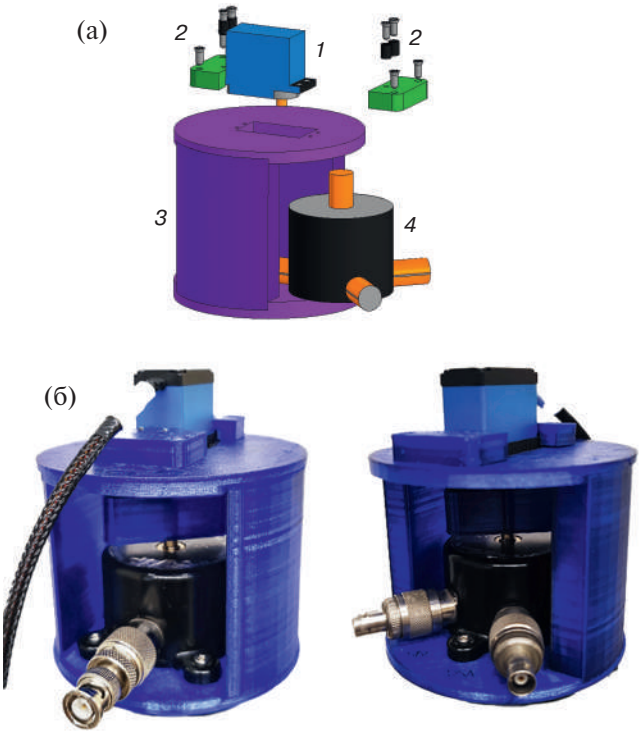

Рис. 6. а – Проект управляющей системы коаксиального переключателя; **б** – реализация в рамках готовой системы Резонатье 2.2: *1* – сервопривод TD-8329MG, *2* – виброподвес на сайлентблоках, *3* – PET-G-оснастка, *4* – коаксиальный переключатель RS Coaxial Switch 651-850.

граммно заданный угол 100° между крайними положениями коаксиального переключателя. Поскольку переключения сервопривода кратковременные и исключительные (других действий не выполняется), сервопривод подключен к выходу Arduino 5 В без риска нанесения ущерба платформе.

Во избежание вибраций и смещений спроектирована и реализована система подвесов с резиновыми сайлентблоками. Сервопривод имеет подвижное крепление к оснастке и может смещаться в горизонтальной плоскости (*2* на рис. 6).

5. ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ

Применение LabVIEW 2020 Community Edition для системы автоматической настройки датчика обусловлено тем, что спектрометр реализован в той же среде разработки [13]. Для управления платформами Arduino в LabVIEW 2020 интегрирована библиотека Maker Hub [14]. При подключении Arduino с помощью LabVIEW в контроллер загружается прошивка и контроллер становится внешним устройством ввода-вывода информации, в котором не содержится исполняющей программы, а основная программа выполняется на компьютере.

Используемый в качестве измерителя АЧХ современный анализатор спектра с опцией трекинг-генератора RIGOL DSA815-TG соединен с компьютером через USB-интерфейс. Производитель предлагает обширный набор программного обеспечения для работы с ним в ОС Windows, в том числе посредством NI LabVIEW. Соответствующие инструменты позволяют не только задавать основные настройки прибора (диапазон частот, амплитудные характеристики и др.), но и получать кривую частотно-зависимого отклика исследуемой электрической цепи в реальном времени, в данном случае резонансного контура ЯМР-датчика. Максимально возможная частота обновления кривой равняется примерно 5 Гц, при этом она заметно ниже таковой в локальном режиме работы прибора, однако ее вполне хватает для плавной настройки датчика.

С использованием этих поставляемых производителями инструментов в среде NI LabVIEW была реализована программа управления Резонатье 2.2. Программа управления (рис. 7) поддерживает три режима работы:

– прямое управление отдельными элементами системы Резонатье 2.2;

– режим автоматической настройки, запускаемый непосредственно из интерфейса программы;

– внешнее управление Резонатье 2.2 посредством TCP (Transmission Control Protocol).

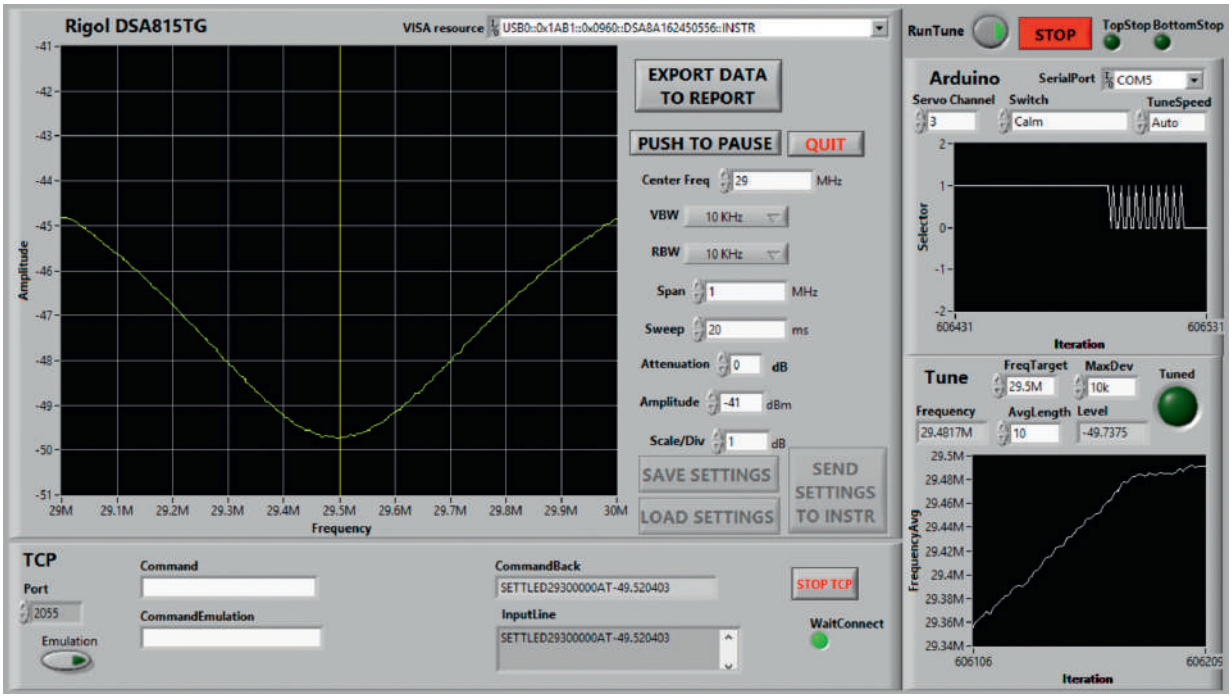

Рис. 7. Интерфейс программы управления системой Резонатье 2.2.

Режим 1 нужен в основном в начале работы для настройки анализатора спектра и относительно быстрой перестройки датчика в широком диапазоне. В этом режиме пользователь может принудительно переключить датчик на анализатор спектра или спектрометр (параметр *Switch*), задать направление и скорость движения штока датчика (параметр *TuneSpeed*), а также менять стандартные параметры отображения анализатора спектра и некоторые служебные параметры. При этом выводятся АЧХ датчика на графике (*Amplitude vs Frequency*), две оценки текущей резонансной частоты: простой минимум кривой АЧХ (*Frequency*) и плавающее среднее этого параметра *FrequencyAvg*, а также уровень согласования датчика в децибелах (*Level*).

В режиме 2 целевая частота задается параметром *FreqTarget* или строковой командой *SET* с указанием целевой частоты в герцах. На коаксиальный переключатель автоматически подается команда подсоединения датчика к анализатору спектра, а параметр *Stepper* переключается на значение *Auto*, так что направление движения штока датчика определяется знаком разницы целевой и текущей резонансных частот. При приближении к целевой частоте реализовано снижение скорости перемещения штока для точного позиционирования. Настройка производится до устойчивого (в течение 10 с) уменьшения модуля этой разницы ниже допустимого интервала *MaxDev*, после этого коаксиальный переключатель соединяет датчик со спектрометром и выдается сообщение о завершении настройки со значением уровня согласования на этой частоте.

Наконец, третий режим отличается от второго тем, что все взаимодействие с программой происходит через команды и сообщения, передаваемые через TCP между различными рабочими станциями или различными программами в пределах одной рабочей станции. Этот режим, с одной стороны, позволяет унифицировать протокол взаимодействия с Резонатье 2.2, избегая привязки к конкретной программной среде, с другой стороны, использовать отдельную рабочую станцию для настройки датчика как независимый прибор.

Использование внешнего управления позволяет как запускать ЯМР-эксперимент с автоматизированной разверткой по частоте, так и периодически проверять и корректировать настройку датчика при иных длительных экспериментах, таких как развертка по полю и по мощности радиочастотных импульсов, измерение скоростей ядерной спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. При запуске программа находится в режиме ожидания подключения к ней клиента (программы проведения автоматизированного эксперимента ЯМР), после установления соединения между ними происходит обмен сообщениями, по окончании эксперимента программа вновь переходит в режим ожидания.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение системы автоматизированной настройки датчика в экспериментальной деятельности позволяет освободить испытателя от рутинных действий по ручной настройке эксперимента и вывести его из зоны проведения эксперимента, так как система поддерживает удаленное управление. Кроме того, результаты не зависят от человеческого фактора (визуальный контроль кривой согласования, неточность в установке штока датчика) и имеют высокий уровень воспроизводимости настройки.

Использование аддитивных технологий в виде FDM-3D-печати позволяет адаптировать систему автоматической настройки для различных датчиков путем подготовки соответствующей оснастки. С точки зрения электрической схемы системы, она обладает доступностью, простотой в обслуживании и высоким уровнем ремонтопригодности.

Система была успешно испытана в длительном эксперименте ЯМР ^{57}Fe в нулевом внешнем магнитном поле на серии образцов $Bi_xNd_{1-x}FeO_3$. Применение автонастройщика в значительной степени сократило временные затраты на постоянную перенастройку датчика и позволило задействовать дополнительное время для проведения эксперимента, так как система может работать в автоматическом режиме круглосуточно.

Система автоматической настройки Резонатье 2.2 обладает компактными размерами, простотой установки и понятной схемой подключения. Реализация системы на платформе Arduino и с помощью FDM-3D-печати позволяет в кратчайшие сроки внести необходимые изменения в схему и актуализировать автоматическую настройку для другого датчика с похожим способом настройки колебательного контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gippius A.A., Gervits N.E., Tkachev A.V., Maslova I.S., Volkova O.S., Vasiliev A.N., Büttgen N., Kraetschmer W., Moskvin A.S.* // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 155114. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.155114
2. *Буш А.А., Гиппиус А.А., Залесский А.В., Морозова Е.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. С. 841.
3. *Sadykov A.F., Piskunov Y.V., Ogloblichev V.V. et al.* // Phys. Met. Metallogr. 2019. V. 120. P. 646. https://doi.org/10.1134/S0031918X19050156
4. *Гиппиус А.А., Журенко С.В., Ткачев А.В.* Экспериментальная низкотемпературная ЯМР-спектроскопия конденсированного состояния. М.: МГУ. 2021. ISBN: 978-5-8279-0191-4
5. *Геращенко А.П.* Спектроскопия ЯМР в исследованиях электронных и магнитных свойств сильно коррелированных систем. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Екатеринбург: Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, 2019. 256 с.
6. *Jouda M., Torres Delgado S.M., Jouzdani M.A., Mager D., Korvink J.G.* // Magnetic Resonance. 2020. V. 1. № 1. P. 105. https://doi.org/10.5194/mr-1-105-2020
7. https://www.bruker.com/de/products-and-solutions/mr/nmr/mr-microscopy-diffusion/probes/diffbb-old.html
8. http://www.teho.com/nmr-autotuning-system/
9. https://eprobe.tech/products/controller
10. https://store.arduino.cc/products/arduino-nano
11. https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132391/ETC1/28BYJ-48.html
12. https://qqtrading.com.my/td-8320mg-digital-high-torqe-servo-motor-waterproof
13. *Журенко С.В., Ткачёв А.В., Гунбин А.В., Гиппиус А.А.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 88. https://doi.org/10.31857/S0032816221020257
14. https://www.ni.com/