

Рис. 3. Вычисление сигнала нечеткого процессора

мосферного аэрозоля, показан вариант реализации нечеткой калибровки солнечного фотометра.

Литература

1. Гущин Г. П., Новоселова Н. Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983.

2. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New method for calibration of Sun Photometers // Chinese Opt. Lett. 2009. V. 7. N. 9. P. 760—763.

3. Backman J., Rizzo L. V., Hakala J., Nieminen T., Manninen H. E., Morais F., Aalto P. P., Siivola E., Carbone S., Hillamo R., Artaxo P., Virkkula A., Petaja T., Kulmala M. On the diurnal cycle of urban aerosols, black carbon and the occurrence of new particle formation events in springtime Sao Paulo, Brazil // Atmos. Chem. Phys. 2012. N. 12. P. 11733—11751.

4. Panchenko M. V., Sakerin S. M., Kabanov D. M., Terpugova S. A. Diurnal behavior of aerosol and water vapor in summer // Ninth ARM Sci. Team Meeting Proc. San Antonio, Texas, March 22—26, 1999.

5. Baxla S. P., Roy A. A., Gupta T., Tripathi S. N., Bandyopadhyaya R. Analysis of diurnal and seasonal variation of submicron outdoor aerosol mass and size distribution in Northern Indian City and its correlation to black carbon // Aerosol Air Quality Res. 2009. N. 9 (4). P. 458—469.

Дата принятия 02.10.2014 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.082.2

Малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер для измерения быстроменяющихся расходов жидкости

В. В. ДАВЫДОВ, В. И. ДУДКИН, А. Ю. КАРСЕЕВ

С.-Петербургский государственный политехнический университет,
С.-Петербург, Россия, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Описан малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер. Модернизированы основные элементы конструкции расходомера и схема регистрации сигнала ядерно-магнитного резонанса. Достигнута высокая точность измерения расхода жидкости при использовании эффекта параметрического резонанса и новой конструкции сосуда-анализатора. Разработана компактная схема для обработки полученной информации на базе микроконтроллера.

Ключевые слова: ядерно-магнитный резонанс, меточный ядерно-магнитный расходомер, линия нутации, отношение сигнал—шум.

The compact nuclear-magnetic label flowmeter is described. The basis elements of flowmeter construction and the NMR signal registration scheme have been modernized. Due to the new construction of vessel-analyzer and the use of parametric resonance effect a high accuracy of measurements of liquid flow in changing range is assured. A compact scheme of liquid flow information processing based on microcontroller has been developed.

Key words: nuclear magnetic resonance, nuclear-magnetic label flowmeter, nutation line, signal—noise ratio.

В настоящее время расходомеры широко применяют в различных областях науки, промышленности, энергетики и сфере услуг [1, 2]. В ряде случаев измерение расхода жидкости возможно только бесконтактными методами [3—6]. Среди бесконтактных измерителей расходомеры, принцип действия которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР), — наиболее перспективные приборы [5—7], особенно при измерениях небольших расходов жидкостей, —

обладают незначительным гидравлическим сопротивлением, вносимым в тракт движения жидкости [6, 8, 9]. Полное отсутствие контакта с исследуемой средой делает их незаменимыми при длительном измерении расхода агрессивных жидкостей, например кислоты и щелочи, а также биологических растворов, где требуется соблюдение условий стерильности [5—11].

Из пяти типов ЯМР-расходомеров, известных авторам, меточные расходомеры применяют чаще, чем остальные, так как они просты в эксплуатации, работают в реальном масштабе времени, не нуждаются в предварительной градуировке и имеют погрешность измерений 0,3—0,5 % [5—11]. Перечисленные достоинства позволяют использовать эти приборы в устройствах для регулировки по топливной экономичности различных двигателей [6, 7], а также в схемах для поверки других расходомеров [9, 10].

Указанная выше точность измерений расхода в меточном ЯМР-расходомере достигается вследствие высокой крутизны склона линии нутации [5, 9, 11], однако при быстром изменении расхода жидкой среды амплитуда и фаза регистрируемого ЯМР-сигнала могут измениться, что приведет к значительному увеличению погрешности измерений (до 5 %). При измерении малых расходов жидкости нужно учитывать данный эффект. С этой целью разработана новая конструкция меточного ЯМР-расходомера.

Малогабаритный меточный ЯМР-расходомер. В статье рассмотрена новая конструкция малогабаритного меточного ЯМР-расходомера, разработанная на основе результатов предварительных исследований, которые позволили модернизировать его основные элементы: поляризатор, нутатор, анализатор, схему регистрации ЯМР-сигнала. При этом размер и масса прибора уменьшены, а диапазон измеряемых им расходов увеличен с сохранением точностных характеристик по сравнению с ранее изготовленными приборами данного типа.

Структурная схема малогабаритного меточного ЯМР-расходомера представлена на рис. 1. Текущая жидкость по трубопроводу поступает в сосуд-поляризатор 1, расположенный в магнитной системе 2, создающей сильное неоднородное магнитное поле в зазоре между полюсными наконечниками. На выходе из сосуда-поляризатора жидкость имеет намагниченность $M_n = \chi_0 H_n$, вектор которой параллелен направлению напряженности поля магнита-поляризатора H_n (индукция $B_n = 0,732$ Тл). Далее текущая жидкость по соединительному участку трубопровода поступает в катушку нутации 4, где под действием резонансного переменного радиополя H_1 происходит изменение ориентации вектора намагниченности ядерных моментов M_n относительно направления напряженности постоянного магнитного поля H_n , т. е. жидкость получает «метку» [8, 9]. Изменение ориентации вектора M_n фиксируется катушкой регистрации ЯМР-сигнала 5, расположенной в поле напряженностью H_a магнита-анализатора 6 (с индукцией $B_a = 0,352$ Тл и неоднородностью магнитного поля 10^{-3}) и подключенной к высокочастотному генератору слабых колебаний (автодину), входящему в состав схемы регистрации 9 [1, 6, 9, 11, 12].

Использование полюсов специальной формы в магните-поляризаторе 2 и магните-анализаторе 6 из неодима, а также разработанной авторами конструкции сосуда-поля-

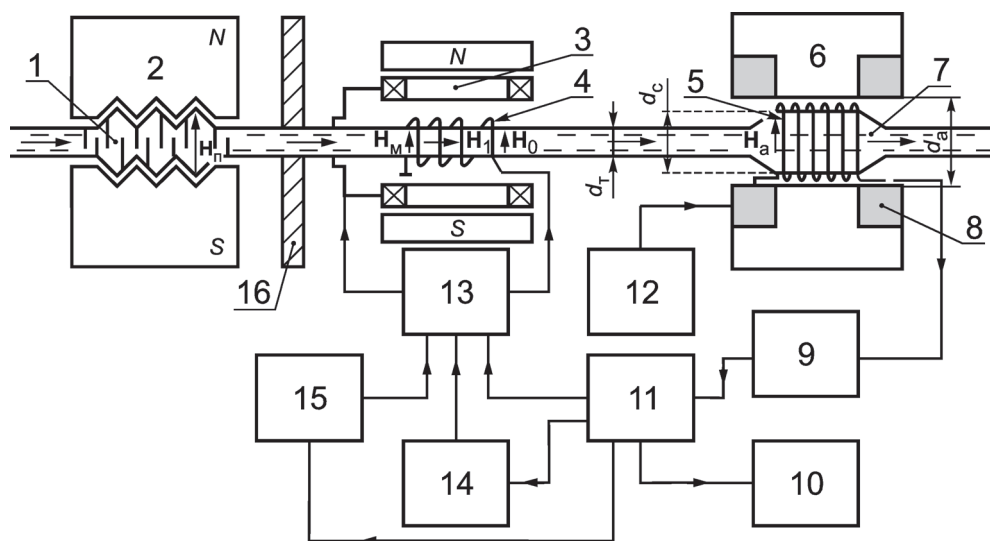


Рис. 1. Структурная схема макета меточного ЯМР-расходомера:

1 — сосуд-поляризатор; 2 — магнит-поляризатор; 3, 4 — катушки модуляции и нутации, соответственно; 5 — катушка регистрации ЯМР-сигнала; 6 — магнит-анализатор; 7 — сосуд-анализатор; 8 — катушки модуляции поля магнита-анализатора; 9 — схема регистрации ЯМР-сигнала; 10 — схема индикации; 11 — схема обработки и преобразования ЯМР-сигнала; 12 — радиочастотный генератор; 13 — схема управления; 14, 15 — генераторы катушек модуляции и нутации, соответственно; 16 — магнитный экран

ризатора 1 (см. рис. 1), помещенного в неоднородное поле магнита-поляризатора, позволило уменьшить размер магнитных систем поляризатора и анализатора более чем на порядок, а индукции магнитных полей, создаваемых ими, увеличить в 2,5 и 1,2 раза, соответственно, по сравнению с магнитными системами, описанными в [6, 7, 10].

Для проведения измерений в меточных ЯМР-расходомерах используют зависимость амплитуды ЯМР-сигнала, регистрируемого в анализаторе, от частоты радиополя в катушке нутации (линия нутации) [5—11]. В разработанной конструкции катушку нутации 4 помещают в однородное магнитное поле напряженностью H_0 с индукцией $B_0 = 0,038$ Тл и однородностью $0,5 \cdot 10^{-2}$, что позволяет полностью исключить влияние рассеянных магнитных полей поляризатора и анализатора на форму линии нутации, а также, как минимум на порядок, увеличить ее крутизну [13]. Кроме того, такое расположение катушки нутации позволяет в 2 раза уменьшить длину прямолинейного участка трубопровода между поляризатором и анализатором по сравнению с ранее разработанной конструкцией, что существенно уменьшает размер прибора.

Катушка нутации располагается на трубопроводе таким образом, чтобы создаваемое в ней поле напряженностью H_1 было перпендикулярно напряженности H_0 и направлено по течению жидкости. Такое взаимное расположение напряженностей H_0, H_1 позволяет использовать явление параметрического резонанса для увеличения точности измерений расхода жидкости [5, 9, 11]. Для этого поле напряженностью H_0 модулируется переменным магнитным полем напряженностью H_m , создаваемым катушкой модуляции 3 [9, 11]. В этом случае форма линии нутации напоминает линию магнитного резонанса, детектируемую в технике атомно-молекулярных пучков, где для уменьшения градиента магнитного поля используют метод пространственного разделения зон взаимодействия атомного пучка с высокочастотным полем [11, 14].

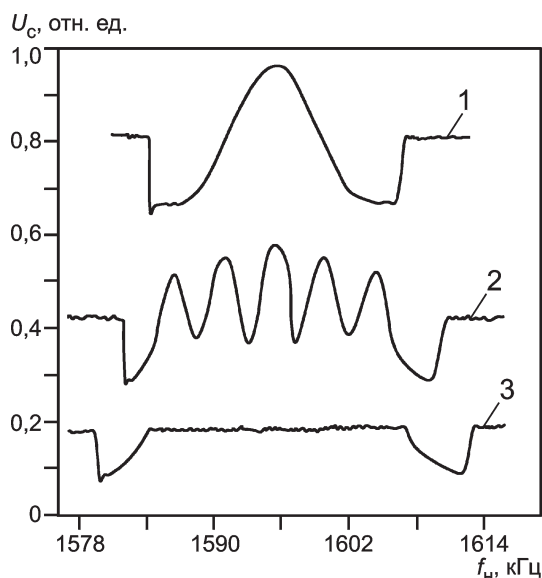


Рис. 2. Экспериментальные записи линий нутации при $q = 10,5$ мл/с, $H_1 = 15,11$ А/м:

1 — при $H_m = 0$, $f_m = 0$; 2 — при $H_m = 20,15$ А/м, $f_m = 7,0$ кГц; 3 — при $H_m = 25,54$ А/м, $f_m = 2,8$ кГц

На рис. 2 представлены экспериментальные записи линий нутации, полученные в условиях изменения частоты генератора 15 (см. рис. 1) при различных амплитудах и частотах поля модуляции. В качестве рабочей жидкости использовали водопроводную воду при температуре $9,5$ °С. На основе методики, предложенной в [5, 8], и с учетом результатов [11, 13] удалось, подобрав параметры поля модуляции, уменьшить амплитуды линий-сателлитов до уровня шумов. Полученный результат позволил использовать в меточном ЯМР-расходомере новый диапазон измерений от U_c до 0, где U_c — амплитуда ЯМР-сигнала при $H_1 = 0$, а значение 0 соответствует жидкости с инверсией намагниченности в сечении регистрации.

Ранее в меточных ЯМР-расходомерах для измерений расхода использовали инвертированный на 180° ЯМР-сигнал. При описании процесса измерений расхода жидкости q в ЯМР-расходомерах принято считать, что этот сигнал, в отличие от сигнала без инверсии намагниченности, обладает меткой (mark), а часть жидкости, от которой регистрируется этот сигнал, называют отмеченной. Амплитуда инвертированного на 180° сигнала пропорциональна $k_n U_c$, где k_n — коэффициент нутации, зависящий от частоты и амплитуды поля напряженности H_1 , а также от его неоднородности в зоне размещения катушки нутации [5]. Указанные особенности при измерениях создавали дополнительные сложности, связанные с минимизацией влияния погрешностей на результат, обусловленных сдвигом сечения метки (появление неопределенности по времени начала и окончания прихода в катушку регистрации отмеченной жидкости, когда q не меняется, а интервал времени изменяется — сдвигается), и определением порога срабатывания электронных ключей [7, 9].

Из представленных экспериментальных зависимостей (см. рис. 2) следует, что предлагаемый режим работы ЯМР-расходомера дает возможность полностью исключить влияние на результат измерений погрешностей, связанных с изменениями амплитуды и фазы ЯМР-сигнала при быст-

рых изменениях расхода жидкости. Реализованное конструктивное решение (пространственное разделение поляризатора, катушки нутации и анализатора, см. рис. 1) позволяет исключить влияние погрешностей, обусловленных отсутствием сдвига сечения метки. Кроме того, в полученном режиме можно установить уровень срабатывания компараторов U_k в новой схеме 11 (см. рис. 1), равный половине амплитуды U_c ($U_k = U_c/2$). В этом случае ЯМР-сигнал регистрируется в цифровом коде (1, 0). Такая регистрация позволила отказаться от применяемой ранее, очень надежной, но обладающей невысоким быстродействием и требующей дополнительного устройства для вывода информации на компьютер, схемы преобразователя ЯМР-сигнала, рассмотренной в [10]. Под новый ЯМР-сигнал, регистрируемый автодином (генератором слабых колебаний), разработана схема его обработки и преобразования на базе восьмизрядного микроконтроллера PIC 18C442/JW с тактовой частотой 40 МГц, входящего в состав электронного компонента DC—SP—01—JT со встроенными 12-разрядными ЦАП, АЦП и также компараторами. Полученная схема обеспечивает автоподстройку частоты генераторов нутации и модуляции, а также амплитуды напряженности поля модуляции. Кроме того, она дает возможность обрабатывать сигналы с минимальной длительностью 0,2 мкс и с необходимой частотой выдавать информацию о расходе на экран в реальном времени, а также в устройство накопления информации. Использование новой схемы с более компактным размещением на платах новейших радиоэлектронных элементов дало возможность уменьшить размер и массу конструкции по сравнению с ранее разработанными [5—11, 13, 15].

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на точность измерений расхода жидкости в ЯМР-расходомере, является отношение сигнал—шум в схеме регистрации ЯМР-сигнала. Для получения измерений расхода с погрешностью 0,5 % необходимо, чтобы отношение сигнал—шум на выходе схемы регистрации было не ниже 3,0. Отношение сигнал—шум определяется намагниченностью жидкости в поляризаторе, релаксационными процессами за время протекания жидкости от поляризатора до анализатора, однородностью магнитного поля магнита-анализатора в зоне расположения катушки регистрации и временем взаимодействия жидкости с полем этой катушки [5—11, 15].

В предлагаемом малогабаритном меточном ЯМР-расходомере для улучшения отношения сигнал—шум в схеме регистрации ЯМР использована новая конструкция сосуда-анализатора 7. Для этого в зоне расположения катушки регистрации был увеличен диаметр трубопровода d_t без изменения структуры потока, что позволило увеличить время взаимодействия жидкости с полем этой катушки, а также понизить неоднородность магнитного поля, в котором регистрируется ЯМР-сигнал [15]. Однако увеличение диаметра трубопровода d_t в зоне расположения катушки регистрации приводит к увеличению расстояния d_a между полюсами магнита-анализатора, а следовательно, — к уменьшению H_a и ухудшению однородности магнитного поля в этой зоне. В конструкции расходомера расстояние между полюсными наконечниками магнита-анализатора $d_a = 12$ мм, при необходимости его можно увеличить до 16 мм.

Все это предполагает существование оптимального соотношения между параметрами катушки регистрации (длинной, числом витков, способами намотки), значением H_a , неоднородностью магнитного поля в зоне ее размещения и диаметром трубопровода, при котором отношение сигнал—

шум регистрируемого ЯМР-сигнала будет максимально. Для ранее разработанных конструкций ЯМР-расходомеров оптимизацию проводили без учета увеличения диаметра трубопровода.

Результаты исследований. На рис. 3 представлено несколько экспериментальных зависимостей отношения сигнал—шум от расхода q водопроводной воды при температуре $T = 9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для различных диаметров трубопровода при оптимизации указанных выше параметров катушки регистрации, а также напряженности магнитного поля H_a и степени его однородности.

При миниатюризации конструкции ЯМР-расходомера происходит уменьшение размеров магнитной системы, которое приводит к падению значения отношения сигнал—шум, что автоматически снижает динамический диапазон измерений расхода жидкости с заданной погрешностью.

Из зависимостей на рис. 3 следует, что предложенное изменение конструкции трубопровода в анализаторе позволяет увеличить динамический диапазон измерений расхода на 30 % при оптимальном выборе параметров катушки регистрации для данной изготовленной магнитной системы. При заводском изготовлении данного прибора, благодаря совершенству технологического процесса, динамический диапазон измерений может быть увеличен более чем на 30 %.

Закключение. Полученные результаты в разработанной малогабаритной конструкции меточного ЯМР-расходомера позволяют использовать предложенные методы увеличения динамического диапазона измерений и регистрации ЯМР-сигнала в новых моделях измерителей физических величин на основе ЯМР в текущей жидкости для решения различных задач (в том числе и для поверки и калибровки средств измерений расхода). Макет расходомера имеет следующие характеристики: диапазон измерения расходов 2,5—198 л/ч; основная погрешность измерений $\pm 0,5\text{ }\%$; цифровая индикация; диаметр входного отверстия 6 мм; дополнительное вносимое гидравлическое сопротивление, возникающее из-за сужения и расширения трубопровода, измеренное по величине потерянного напора, составляет 40 Па на 1 л/ч; температура жидкости, при которой погрешность измерений не превышает $\pm 0,5\text{ }\%$, может достигать $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Л и т е р а т у р а

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. Книга 2. СПб: Политехника, Машиностроение, 2004.
2. Пушнов А. В. Измерение расхода двухфазного потока кориолисовым расходомером // Измерительная техника. 2013. № 4. С. 45—48; Pushnov A. V. Measurement of the Flow Rate of a Two-Phase Flow by a Coriolis Flowmeter // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 4. P. 421—425.
3. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Магнитный расходомер жидких металлов // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 24—28; Velt I. D., Mikhailova Yu. V. Magnetic flowmeter of molten metals // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 3. P. 283—288.
4. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Электромагнитный метод измерения расхода и уровня жидкости в безнапорных трубопроводах // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 45—50; Velt I. D., Mikhailova Yu. V. An electromagnetic method of measurement of the flow rate and level of a liquid in free-flow pipelines // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 7. P. 797—804.

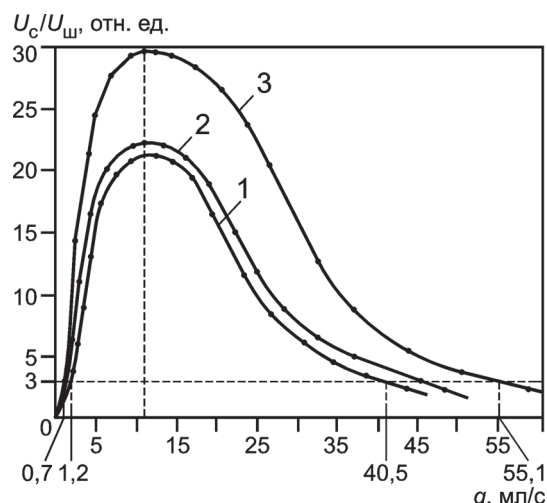


Рис. 3. Зависимости отношения сигнал—шум от расхода жидкости q для различных диаметров d_c сосуда-анализатора при оптимизации параметров катушки регистрации и схемы регистрации ЯМР-сигнала по максимуму отношения сигнал—шум и $d_t = 4\text{ мм}$:

1 — $d_c = 4\text{ мм}$, $d_a = 12\text{ мм}$, $H_a = 280111\text{ А/м}$; 2 — $d_c = 4\text{ мм}$, $d_a = 12\text{ мм}$, $H_a = 280111\text{ А/м}$; 3 — $d_c = 8\text{ мм}$, $d_a = 16\text{ мм}$, $H_a = 216391\text{ А/м}$

5. Давыдов В. В., Семенов В. В. Нестационарный режим работы нутационных ЯМР-расходомеров и магнитометров // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 3. С. 151—153.

6. Пряхин А. Е., Шушкевич С. С., Оробей И. О. и др. Ядерно-магнитный расходомер жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 6. С. 216.

7. Пряхин А. Е., Шушкевич С. С., Оробей И. О. и др. Методика расчета релаксационных погрешностей меточных ядерно-магнитных расходомеров нутационно-фазового типа при ламинарном течении // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 51. № 6. С. 1011—1015.

8. Давыдов В. В. Малогабаритный поляризатор для ядерно-магнитных расходомеров и магнитометров // Известия вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44. № 8. С. 49—52.

9. Давыдов В. В., Дудкин В. И. Режим работы меточного ЯМР-расходомера на основе эффекта параметрического резонанса // Известия вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45. № 5. С. 49—51.

10. Пряхин А. Е., Файбышев А. Е. Преобразователь сигнала ядерно-магнитного расходомера // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 3. С. 200—201.

11. Давыдов В. В., Семенов В. В. Линия нутации ядерно-магнитного спектрометра с текущим образцом // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 12. С. 1528—1531.

12. Леше А. Ядерная индукция. М.: ИИЛ, 1963.

13. Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. U. Nuclear Magnetic Flowmeter-Spectrometer with Fiber-Optical Communication Line in Cooling Systems of Atomic Energy Plants // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2013. V. 22. N. 2. P. 112—117.

14. Рамзей М. Молекулярные пучки. М.: ИИЛ, 1960.

15. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Повышение точности измерения констант релаксации текущей жидкости в ядерно-магнитном спектрометре // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 10. С. 64—68.

Дата принятия 4.06.2014 г.