

АНАЛИЗ РАБОТЫ МЕТОЧНОГО ОДНОКАТУШЕЧНОГО ЯМР-ИЗМЕРИТЕЛЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ

In article the way of measurement of the expense a proton of containing liquids by a method of a NMR is considered. The attention is paid to features of a method, possibility of definition of the expense of liquid organic substances, in particular oil refining products. The block diagramme one-bobbin an expense NMR-measuring instrument is presented. Time diagrammes of work of a flowmeter with time division of process of a mark and registration are resulted. The electric basic scheme the spin detector as most comprehensible of possible devices of registration of a signal of a NMR is given.

Введение. Меточный ядерно-магнитный расходомер (marker nuclear-magnetic flowmeter) – ядерно-магнитный расходомер, в котором на каком-либо участке пути от поляризатора до приемной катушки резонатора производится создание метки в потоке путем изменения вектора намагниченности ядер. Расход определяется по времени прохождения жидкостью пути от отметчика, создающего метку, до приемной катушки. Эффект ЯМР наблюдается на образцах, содержащих достаточное количество ядер с большими значениями магнитных моментов [1]. Использование ЯМР в движущихся средах для технологических процессов ограничивается жидкостями или сжатыми газами, содержащими водород, фтор, литий, хлор и фосфор. Наибольшее распространение получили методы ЯМР для проточных водородосодержащих жидкостей.

Основная часть. Для регистрации сигнала ЯМР движущейся жидкости используются катушки Блоха, мостовые детекторы, схема Роллина, автодинные спиновые детекторы. Применение катушек Блоха и мостовых схем в промышленных приборах ограничивается их сложностью и низкой помехоустойчивостью. К недостаткам автодинов следует отнести инерционность и большую амплитуду генерации, что может приводить к искажению сигнала ЯМР. Однако простота и надежность, а также возможность перестройки частоты при высокой чувствительности обуславливают широкое использование автодинов в спектрометрах, магнитометрах, расходомерах.

Меточный однокатушечный ЯМР-расходомер относится к измерителям с временным разделением процессов отметки и регистрации. Принцип устройства состоит в пространственном совмещении датчика меток и анализатора. При этом анализатор периодически превращается в датчик меток, а спиновый детектор – в генератор нутации, в то же время измерительным участком является участок, проходящий через катушку регистрации. Для получения сигнала поле в месте расположения образца должно быть не менее 0,13 Тл [2]. Поэтому наиболее критичным узлом является первичный преобразователь. Для использова-

ния в жестких условиях технологического процесса преобразователь должен обладать высокой помехоустойчивостью к электромагнитным и механическим воздействиям и малым энергопотреблением. Этим требованиям удовлетворяет первичный преобразователь на основе постоянных магнитов с ярмом броневого типа.

Первичный преобразователь выполнен на основе постоянных магнитов. В магнитной системе броневого типа использованы постоянные магниты из 27СА220. Необходимая индукция в рабочем зазоре достигается включением боковых магнитов, состыкованных одноименными полюсами с боковыми гранями центральных магнитов и полюсных наконечников.

Структурная схема ЯМР-измерителя расхода с временным разделением процесса отметки и регистрации представлена на рис. 1, а временные диаграммы, характеризующие его работу, – на рис. 2.

Измеритель работает следующим образом. Поляризация жидкости производится в поле, создаваемом магнитами поляризатора. Сигнал ЯМР наблюдается периодически, для чего используется модулирующее синусоидальное поле звуковой частоты, создаваемое катушками модуляции, от генератора модуляции. Анализ вектора намагниченности движущейся жидкости производится при помощи катушки регистрации, соединенной со спиновым детектором [3], во время отсутствия импульса на выходе генератора импульсов; при этом обеспечивается оптимальная для регистрации сигнала ЯМР амплитуда радиочастотного резонансного поля, создаваемого катушкой регистрации.

Отметка жидкости выполняется инверсией вектора ядерной намагниченности радиочастотным полем катушки регистрации с приходом на вход управления амплитудой импульса генерации спинового детектора, вырабатываемого генератором импульсов (рис. 2). Отметка инверсией осуществляется при выполнении условия

$$\pi = \gamma B_{1\pi} \tau_{\pi}, \quad (1)$$

где τ_{π} – длительность импульса на выходе генератора импульсов;

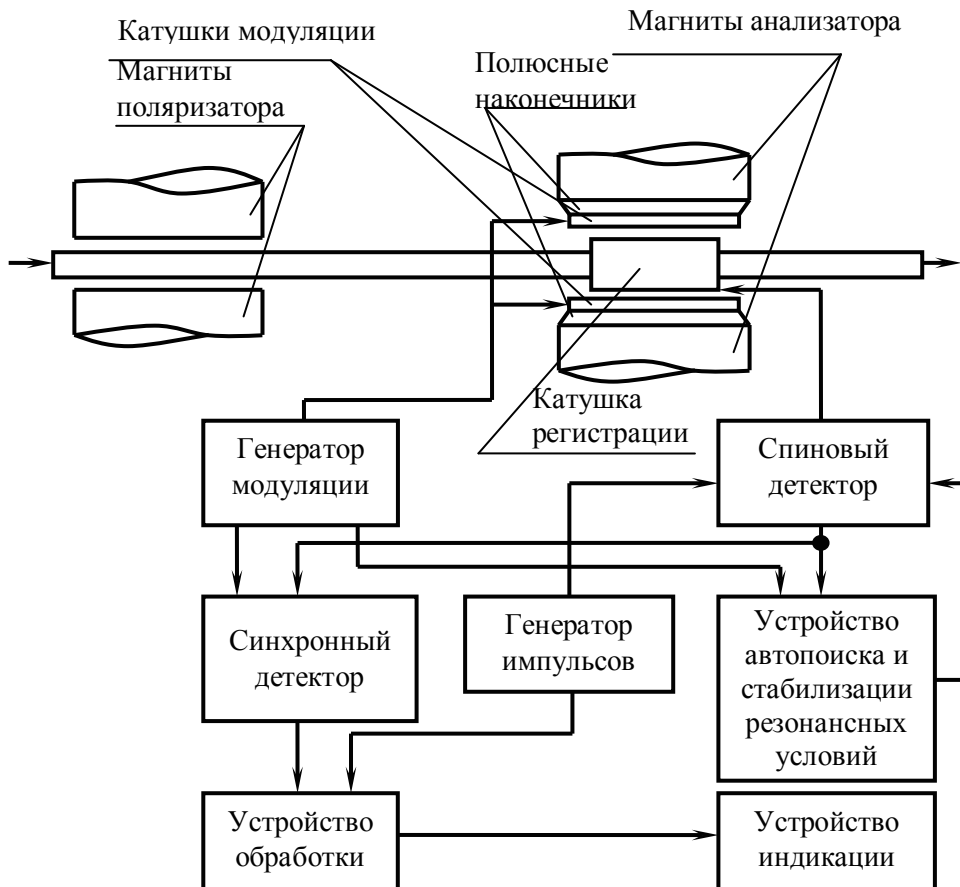


Рис. 1. Структурная схема меточного однокатушечного ЯМР-расходомера

$$B_1 \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \mu_0 I \frac{N}{l}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; $I_{к.р}$ – ток в катушке регистрации.

В свою очередь ток в соленоиде выражается через его индуктивность $L_{к.р}$:

$$I_{к.р} = \frac{U_{ген}}{\omega_p L_{к.р}} = \frac{U_{ген} l}{\omega_p \mu_0 N^2 S_{к.р}}, \quad (3)$$

где $U_{ген}$ – амплитуда резонансного напряжения на катушке регистрации.

Снижение случайных погрешностей измерения расхода, обусловленных шумами в тракте регистрации, для меточных ЯМР-расходомеров временного типа достигается применением адаптивной частоты отметки и полосы пропускания канала регистрации к скорости жидкости [3].

Погрешность определения информативного параметра смежна с напряжением шумов в тракте регистрации:

$$\delta t_n = \frac{A_{ш}}{dA/dt}, \quad (4)$$

где $A_{ш}$ – амплитуда шумовых флуктуаций сигнала ЯМР; dA/dt – скорость изменения интенсивности в момент регистрации отметки.

Случайная погрешность измерения расхода определяется погрешностью информативного параметра регистрации. Тогда из (1)–(3) получаем зависимость длительности π -импульса от параметров катушки регистрации – амплитуды переменного напряжения и резонансной частоты:

$$\tau_n = \frac{2\pi\omega_p NS_{к.р}}{\gamma U_{ген}}. \quad (5)$$

Независимость угла нутации от скорости движения жидкости обеспечивается выполнением условия

$$\tau_n \ll \frac{l}{W}. \quad (6)$$

Регистрация намагниченности жидкости производится на второй гармонике частоты модуляции синхронным детектором. При движении жидкости отмеченная инверсная намагниченность в объеме катушки регистрации сменяется неотмеченной вследствие притока в соленоид ядер из поляризатора. Формирование импульса, длительность которого обратно пропорциональна расходу, и преобразование длительности в расход осуществляются устройством обработки. На устройство индикации выводится информация о расходе измеряемой жидкости.

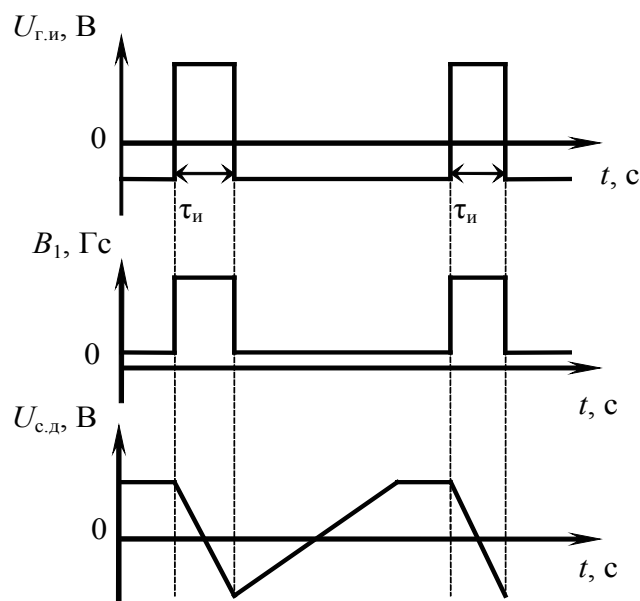


Рис. 2. Временные диаграммы меточного однокатушечного расходомера:
 $U_{г.и}$, $U_{с.д}$ – напряжения на выходе генератора импульсов и синхронного детектора соответственно

Скорость изменения намагниченности в катушке регистрации после π -импульса с учетом формулы для однокатушечного меточного расходомера выражается в виде

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\chi_0 B}{T_1} - \gamma^2 B_1^2 T_2 M + \frac{l}{W} (|M_{вх}| + \chi_0 B_a). \quad (7)$$

Первое слагаемое в формуле (7) описывает процесс намагничивания жидкости в поле анализатора, второе – разрушение намагниченности резонансным радиочастотным полем при ее анализе, третье – смену инверсной намагниченности в катушке регистрации неинверсной из-за течения жидкости. Для некоторых спиновых детекторов (например, автодинов) второе слагаемое может превалировать над первым и третьим, что приводит к быстрому разрушению инверсной намагниченности и не позволяет зарегистрировать сигналы эмиссии. Перспективными для однокатушечного меточного ЯМР-расходомера могут быть спиновые детекторы, которые обеспечивают большой сигнал при малой амплитуде генерации. Примером такого детектора может служить спиновый детектор на основе генератора с параметрическим возбуждением колебаний. Остальные блоки однокатушечного измерителя решены известными схемотехническими методами.

Аналоговая схема регистрации включает в себя генератор модуляции, синхронные детекторы, систему автопоиска и стабилизации тракта регистрации расхода.

Принципиальная схема автодинного спинового детектора, обеспечивающего регистрацию движения ядерных спинов, приведена на рис. 3.

Автодинный спиновый детектор включает дифференциальный усилитель, выполненный на VT2, VT3, истоковый повторитель на VT1, детектор на VD2, VD3, колебательный контур на СД, L1 и варикапной матрице VD1, с помощью которой обеспечивается перестройка резонансной частоты колебательного контура, и усилитель низкой частоты на DA1. Частота генерируемых колебаний в первом приближении определяется резонансной частотой колебательного контура, катушкой которого является катушка регистрации L1, охватывающая трубопровод с резонирующими ядрами движущейся жидкости. Поглощение энергии высокочастотного магнитного поля катушкой образцом эквивалентно внесению в контур дополнительного сопротивления потерь. Поскольку сигналы ЯМР наблюдаются периодически, то наступление условий резонанса приводит к соответствующей амплитудной модуляции генерируемых высокочастотных колебаний. Это поглощение выделяется детектором, выполненным на VD2, VD3, и усиливается каскадом DA1. Цифровой блок по запрограммированному алгоритму анализирует сигнал поглощения и вырабатывает управляющее воздействие на варикап VD1 для изменения частоты генерации автодина, чем обеспечивается тонкая подстройка резонансных условий. Подстройка резонансных условий осуществляется при помощи частотной модуляции генерируемых автодином колебаний с использованием поискового градиентного алгоритма определения экстремума, реализующего программным образом метод синхронного детектирования.

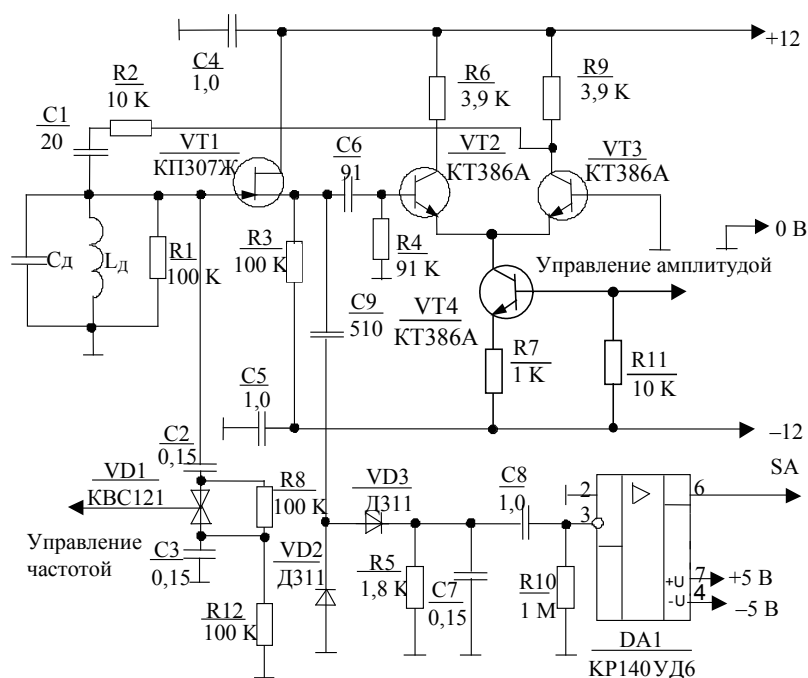


Рис. 3. Принципиальная схема автодинного спинового детектора

При помещении в катушке резонирующих ядер исследуемого образца, т. е. ядер движущейся жидкости, изменяется величина эффективного сопротивления потерь R_1 и, следовательно, амплитуда колебаний генератора. Далее сигнал поглощения направляется на синхронный детектор в блок аналоговой обработки.

Сигнал ЯМР спинового детектора через ограничитель и повторитель поступает на синхронный детектор и устройство автопоиска и стабилизации резонансных условий. Опорный сигнал синхронного детектора формируется компаратором и имеет удвоенную частоту модуляции (500 Гц). Напряжение U_s синхронного детектора определяется кривой поглощения и служит индикатором захвата резонансных условий при поиске или мерой намагниченности жидкости при измерении расхода. Сигнал синхронного детектора поступает на детектор резонансных условий. При расстройке резонансных условий в анализаторе (например, после включения прибора) сигнал ЯМР на выходе спинового детектора отсутствует и устройство переключается в режим поиска. Поиск осуществляется сканированием частоты генерации спинового детектора пилообразным напряжением устройства автопоиска и стабилизации

резонансных условий. В момент прохождения резонансных условий на выходе детектора появляется низкое напряжение, устройство переключается в режим стабилизации. Начинается процесс измерения расхода [3].

Измеренная величина расхода поступает на вход цифрового устройства с последующей индикацией на дисплее или передачей на ЭВМ.

Заключение. Предложенный однокатушечный меточный ЯМР-расходомер временного типа с временным разделением процессов отметки и регистрации за счет сокращения участка размагничивания метки обеспечивает повышение точности измерения малых расходов быстро релаксирующих жидкостей.

Литература

1. Леше, А. Ядерная индукция / А. Леше; пер. с нем. – М.: Изд-во иностран. лит-ры, 1963. – 684 с.
2. Оробей, И. О. Первичный преобразователь импульсного ЯМР-спектрометра для систем управления / И. О. Ор обей, В. В. Сарска // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2002. – Вып. X. – С. 136–138.
3. Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах: материалы II Международ. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 нояб. 2007 г. / Бел. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2007. – 563 с.