

И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук;
 В.В. Сарока, доц., канд. техн. наук;
 М.А. Анкуда, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

АНАЛИЗ НАМАГНИЧЕННОСТЕЙ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД ДЛЯ ЯМР-АНАЛИЗАТОРОВ ПРОТОЧНОГО ТИПА

В состав большинства веществ входят атомы водорода, вещества, дающего сигнал ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Это позволяет использовать метод ЯМР для получения информации о некоторых технологических параметрах, таких как расход, влажность, концентрация. Расходомеры на эффекте ЯМР можно использовать для измерения расходов протоносодержащих жидкостей.

Структурная схема ЯМР-измерителя расхода с временным разделением процесса отметки и регистрации представлена на рис. 1 [1]

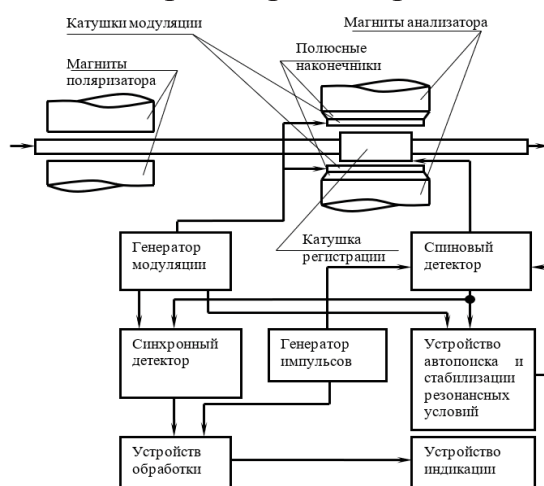


Рисунок 1 – Структурная схема меточного однокатушечного ЯМР-расходомера

В меточных ЯМР-расходомерах требуется устройство, которое будет создавать в потоке метки ЯМР. При этом расход определяется по времени прохождения меткой измерительного участка анализатора. Метка в жидкости выставляется путем изменения знака намагниченности за короткий промежуток времени. Под действием течения намагниченность изменяется и после полного выхода метки принимает начальное значение.

При анализе подобного типа устройств необходимо учитывать некоторые особенности эффекта ЯМР в движущихся средах. Первой особенностью ЯМР в движущихся образцах является зависимость интенсивности сигнала от скорости. А также необходимо учитывать, что

в неподвижном образце скорость изменения намагниченности определяется противоположным влиянием намагничивания ядер в постоянном поле B_0 и размагничивания радиочастотным полем B_1 [2]:

$$dM/dt = (\chi_0 B_0 - M)/T_1 - \gamma^2 B_1^2 T_2 M$$

где M – намагниченность в направлении B_0 ; B_1 – амплитуда резонансного вращающегося поля; χ_0 – ядерная магнитная восприимчивость, (Ам/(Вс)).

Для создания B_1 используют линейно поляризованное поле катушки, которое можно разложить на два вращающихся в противоположных направлениях поля. Поле, вращающееся в направлении вращения вектора намагниченности, обуславливает резонансные эффекты. Для установившегося процесса ($dM/dt = 0$) стационарная намагниченность, пропорциональная интенсивности сигнала [2]:

$$M_s = \chi_0 B_0 / (1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2) = \chi_0 B_0 Z,$$

где $Z = (1 + \gamma^2 B_1^2 T_1 T_2)^{-1}$.

Для движущейся жидкости намагниченность зависит от намагниченности $M_{вх}$ на входе в катушку регистрации и сменяемости в катушке регистрации:

$$M(x) = (M_{вх} - \chi_0 B_0 Z) \exp(-x/(WT_1 Z)) + \chi_0 B_0 Z,$$

где x – линейная координата по оси катушки регистрации, м; W – скорость жидкости, м/с.

Амплитуда сигнала ЯМР определяется средней по длине катушки регистрации l намагниченностью. Приращение интенсивности сигнала

$$(A - A_0)/A_0 = WT_1 (M_{вх} - \chi_0 B_0 Z) / (\chi_0 B_0 l) (1 - \exp(-l/WT_1 Z)),$$

где A – амплитуда сигнала ЯМР движущейся жидкости, В; A_0 – амплитуда сигнала ЯМР от неподвижной жидкости, В.

С ростом скорости интенсивность сигнала растет, пока вся насыщенная жидкость в объеме регистрации не будет сменяться ненасыщенной за время между двумя актами резонанса, что описывают введением эффективного времени $T_{1э}$

$$T_{1э}^{-1} = T_1^{-1} + T_{1с}^{-1},$$

где $T_{1с}$ – время, за которое часть неполяризованных ядер в катушке регистрации сменяется поляризованными из-за течения жидкости.

Особенностью ЯМР в движущихся средах является возможность предварительной поляризации. Для наблюдения сигнала необходимо, чтобы намагнитился образец. На практике для проточных жидкостей используют поляризацию сильным магнитным полем [2]. Намагниченность поляризованной жидкости после транспортного участка на входе в катушку регистрации имеет вид:

$$M_p = (M_n + (\chi_0 B_n - M_n))(1 - \exp(-t_{пл}/T_1))\exp(-t_{тр}/T_1),$$

Где M_n – намагниченность на входе поляризатора; B_n – индукция поля поляризатора; $t_{пл}$ – время нахождения жидкости в поле поляризатора; $t_{тр}$ – время прохождения транспортного участка.

Максимальная намагниченность на входе в катушку регистрации обеспечивается при выполнении условий [2]:

$$\begin{aligned} t_{пл}/T_1 = V_n/(QT_1) &>> 1; \\ t_{тр}/T_1 = V_{тр}/(QT_1) &<< 1, \end{aligned}$$

где Q – расход жидкости; V_n – объем поляризатора; $V_{тр}$ – объем транспортного участка.

Ряд особенностей эффекта ЯМР в движущихся образцах появляется при регистрации. Существует зависимость амплитуды сигнала от скорости без учета поляризации и насыщения из-за связи между амплитудой и углом нутации:

$$A \sim (1 - \cos\theta)/\theta = (1 - \cos(\gamma B_1 l/W))/(\gamma B_1 l/W).$$

При регистрации сигнала в поле с продольным градиентом поле, действующее на элемент объема движущейся жидкости, изменяется по закону:

$$dB/dt = W \text{grad}_{пр} B + 2\pi B_m f_m \cos(2\pi f_m t) + dB_p/dt,$$

где B_m – амплитуда модуляции; f_m – частота модуляции; dB_p/dt – скорость линейной развертки.

Для регистрации сигнала ЯМР движущейся жидкости используются катушки Блоха, мостовые детекторы, схема Роллина, автодинные спиновые детекторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. Анализ работы меточного однокатушечного ЯМР-измерителя расхода жидкостей / М. А. Анкуда // Труды БГТУ. Серия VI, Физико-математические науки и информатика. – Минск : БГТУ, 2008. – Вып. XVI. – С. 99–102.
2. Анкуда, М. А. Адаптивный меточный однокатушечный ЯМР-расходомер / М. А. Анкуда // Труды Белорусского государственного технологического университета. Физико-математические науки и информатика. – Минск : БГТУ, 2011. – № 6 (144). – С. 117–121.