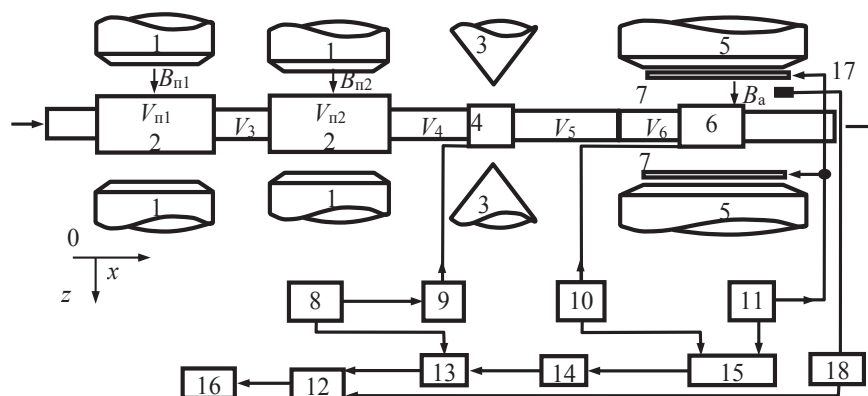


В.В. Сарока, доц., канд. тех. наук;
И.О. Оробей, доц., канд. тех. наук;
Н.М. Олиферович, ст. преп.;
М.А. Анкуда, ст. преп.
(БГТУ, г.Минск)

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЯМР-РАСХОДОМЕРОВ

Повышение точности измерения расходомеров на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР) требует анализа процессов, протекающих в первичном преобразователе, математическое описание которых позволяет определить амплитуду сигнала, диапазон измеряемых расходов, оценить релаксационные погрешности, а также погрешности, возникающие при смене режима течения.

В меточном ЯМР-расходомере временного типа (рис. 1) жидкость намагничивается в поляризаторах и по транспортному участку поступает в катушку 4.



1, 2 – магниты и кюветы поляризаторов; 3 – магниты отметки; 4 – катушка отметки; 5 – магниты анализатора; 6 – катушка регистрации (анализатора); 7 – катушки модуляции; 8 – генератор синхронизации; 9 – генератор нутации; 10 – спиновый детектор; 11 – генератор модуляции; 12 – АЦП; 13 – фазовый детектор; 14 – блок фильтрации импульсов отметки; 15 – синхронный детектор; 16 – контроллер; 17, 18 – преобразователь и электронный блок ДХ; ось ox направлена по движению жидкости; ось oz направлена по направлению полей B_{n1} , B_{n2} , B_a ;

Рисунок 1 – Структурная схема ЯМР-расходомера временного типа

Отметка инверсией осуществляется импульсами радиочастотного поля [1]. Регистрация намагниченности для определения времени распространения метки по измерительному участку ($V_5 + V_6$) прово-

дится в катушке 6. Интенсивность сигнала пропорциональна намагниченности, на зависимость которой от расхода влияют поляризация, размагничивание на V_4 и V_5 и домагничивание в анализаторе.

Расчет намагниченностей позволяет оценить диапазон по амплитуде метки, но не дает погрешностей и параметров передаточной функции. Увеличение амплитуды метки осуществляется снижением времени релаксации T_1 при введении не растворяющихся в жидкости ионов [2]. Информативным параметром является время перемещения метки по измерительному участку $t_{\text{пер}}$, которое определяется спектральным анализом ее движения. Зависимость от времени переменной части намагниченности в катушке 6:

$$M_k(t) = \frac{16M_{C-C}}{\omega_n} e^{\frac{-V_4 R}{QT_1}} \int_0^R e^{\frac{-(V_5+V_6)}{S_n W(r) T_1}} W(r) \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\omega_n V_{\text{кр}}}{2S_n W(r)}\right) \sin\left(n\omega_n \left(t - \frac{V_5 + V_6}{S_n W(r)}\right)\right) r dr ; \quad (1)$$

где T_1 – время продольной релаксации; Q – расход жидкости; R – радиус трубопровода на измерительном участке; $W(r)$ – распределение скоростей; S_n – площадь сечения на $V_5 + V_6$; $V_{\text{кр}}$ – объем катушки регистрации; M_{C-C} – намагниченность на входе сечения отметки [2].

Зависимости $M_k(t)$ при разных расходах Q ($W(r)$) дают форму метки. Момент пересечения $M_k(t)$ с осью времени $t_{\text{пер}}$ является информативным параметром. $t_{\text{пер}}$ при ламинарном и турбулентном потоках не совпадают, что обуславливает погрешности смены режима течения. Изменение T_1 изменяет $t_{\text{пер}}$, вызывая релаксационные погрешности. При течении по $V_5 + V_6$ из-за $W(r)$ каждый элемент перемагничивается с временем релаксации T_1 . Сильнее перемагничиваются элементы, движущиеся с меньшей скоростью. Возрастает относительный вклад в M_k от быстрых объемов, что повышает скорость метки. Релаксационные эффекты проявляются при ламинарном течении и временах прохождения $V_5 + V_6$, сравнимых с T_1 . Наложение соседних меток в $V_{\text{кр}}$ повышает вклад в M_k от медленных элементов, уменьшая скорость метки относительно средней скорости. Наложение меток проявляется при ламинарном течении и временах прохождения $V_5 + V_6$, меньших T_1 .

Снижение относительных погрешностей смены режима течения и релаксационных погрешностей достигается смещением диапазона с изменением режима течения в область малых Q при искусственной турбулизации потока или плоским распределением скоростей на выходе поляризатора и малой длиной транспортного и измерительного участков. $W(r)$ по сечению на измерительном участке приближается к равномерному, уменьшая погрешности. Снижение погрешностей и повышение стабильности статической характеристики требует специального

тракта с совмещенными поляризатором и анализатором, у которого поляризация, отметка и анализ проводятся в поле одной магнитной системы, что сокращает длину, формирующую $W(r)$, и снижает погрешности. Поле создается магнитной системой броневое типа. Выбор тракта совмещается с расчетами определения диапазона и $t_{\text{пер}}$.

Рассмотренные погрешности сводятся к изменению длины измерительной базы, для компенсации которого нужно учитывать факторы, влияющие на вязкость или T_1 . Снижение нестабильности статической характеристики и погрешностей, обусловленных изменением температуры, обеспечивает коррекция характеристики преобразования по индукции поля анализатора, которая одновременно компенсирует изменение базы из-за изменения индукции постоянного поля в катушке нутации и нестабильности генератора нутации. Измерять температуру можно по полю анализатора, магниты которого находятся в тепловом контакте с жидкостью (индукция поля зависит от ее температуры) при помощи измерителя индукции на эффекте Холла [3].

Снижение случайных погрешностей измерения расхода, обусловленных шумами в тракте регистрации, достигается применением адаптивной частоты отметки, и полосы пропускания канала регистрации к скорости жидкости. Концепция адаптивного расходомера состоит в повышении частоты отметки пропорционально Q и в соответствующем изменении полосы пропускания, что повышает точность [4].

Анализ по (1) перечисленных факторов позволяет получить:

1. Диапазон измеряемых расходов меточных ЯМР-расходомеров определяется зависимостями относительной намагниченности в центре анализатора для отмеченных и неотмеченных элементов объема, сложный характер которых объясняется влиянием особенностей эффекта ЯМР в проточных образцах. Увеличение амплитуды метки и увеличение диапазона измеряемых расходов осуществляется повышением магнитного поля поляризаторов или снижением T_1 при введении в объем поляризаторов не растворяющихся в жидкости парамагнитных ионов.

2. Эффективным методом расчета информативного параметра временного расходомера является спектральный анализ движения метки по измерительному участку для разных распределений скоростей. Ускоренная оценка параметра проводится по нормированной намагниченности, характеризующей метку.

3. Анализ зависимостей информативного параметра от расхода для разных режимов течения и времен релаксации дает релаксационные погрешности и погрешности смены режима течения. Максимальный вклад в основную приведенную погрешность вносят погрешности смены режима течения.

4. Снижение погрешностей, связанных с изменением режима течения потока, достигается в расходомерах с плоским распределением скоростей на выходе поляризатора и с малой длиной транспортного и измерительного участков. Основные методы минимизации данных погрешностей: искусственная турбулизация потока; совмещение переходного режима с точкой пересечения информативных параметров ламинарного и турбулентного потоков; уменьшение измерительного участка по сравнению с начальным, формирующим распределение скоростей не обеспечивающим возможности изменения режимов течения потока.

5. Расходомер с коррекцией показаний по индукции поля анализатора обеспечивает эффективную компенсацию погрешностей, обусловленных изменением температуры жидкости.

6. Повышение производительности измерений и снижение случайных погрешностей обеспечивает временной расходомер с адаптацией к расходу параметров отметки и канала регистрации.

Использование представленных рекомендаций позволит повысить точность меточных ЯМР – расходомеров временного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сарока, В. В. ЯМР - измеритель расхода / В. В. Сарока, И. О. Оробей, А. Л. Пархимович // Компьютеризация в химической и смежных отраслях промышленности: материалы Междунар. науч.-технич. семинара, Новополоцк, 15 декабря 2005 г. / Полоцкий гос. ун-т; – Новополоцк, 2006. – 108 с. – С. 68-71.

2. Методика определения информативного параметра меточного ЯМР – расходомера по спектральному разложению намагниченности при движении метки по измерительному участку / В. В. Сарока, О. И. Оробей, Д. А. Гринюк, М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2009. – Вып. XVII. – С. 77–81.

3. Магнитометр на датчике Холла / И. О. Оробей, И. Ф. Кузьмицкий, Д. А. Гринюк, С. Е. Жарский, В. В. Сарока, М. В. Максимова // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 2. – С. 141–144.

4. Меточный ЯМР – расходомер временного типа с совмещением адаптации системы регистрации к измеряемому расходу и коррекцией измерительной базы по индукции поля анализатора / В. В. Сарока, О. И. Оробей, Д. А. Гринюк, М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. – 2009. – Вып. XVII. – С. 73–76.