

В. В. Сарока, ассистент; О. И. Оробей, учащийся; Д. А. Гринюк, доцент;  
М. А. Анкуда, ассистент; И. О. Оробей, доцент

## МЕТОЧНЫЙ ЯМР-РАСХОДОМЕР ВРЕМЕННОГО ТИПА С СОВМЕЩЕНИЕМ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ К ИЗМЕРЯЕМОМУ РАСХОДУ И КОРРЕКЦИЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ БАЗЫ ПО ИНДУКЦИИ ПОЛЯ АНАЛИЗАТОРА

Questions of the building of marker NMR-flowmeter of the temporary type are considered in article. Within the framework of article are stated main theoretical and technical decisions, which can be marketed when making markers meters of the consumption on effect NMR. On the grounds of designed theoretical premiseses possible creation NMR-flowmeter, combining in itself adapting the system to registrations to measured consumption and correcting the measuring base on inductions of the field of the analyzer. Use the adaptive system to registrations allows greatly to raise accuracy of the measurement of the consumption and raise the speed of the meter of the consumption. Correction to inductions of the field of the analyzer takes into account possible change the temperature, composition and time to relaxations measured to liquids.

**Введение.** Измерительной базой меточных расходомеров является участок между сечением отметки и катушкой регистрации. К сдвигу сечения отметки приводит изменение индукции постоянного поля в зоне катушки нутации из-за колебаний температуры окружающей среды или жидкости и нестабильность генератора нутации [1]. Способы борьбы с этим эффектом заключаются в размещении катушки отметки в поле с большим градиентом или в согласованном сдвиге сечения отметки и частоты генератора отметки [2, 3]. Погрешности смены режима течения и релаксационные погрешности можно свести к изменению эффективной длины измерительной базы, для компенсации которого следует учитывать факторы, влияющие на вязкость или время релаксации  $T_1$ .

Вязкостные и релаксационные характеристики чистых жидкостей сильно зависят от температуры и обладают незначительным разбросом в пределах допустимых концентраций присадок, процентного состава компонентов и т. д. Тогда основное воздействие на погрешности смены режима течения и релаксационные погрешности оказывают температурные зависимости вязкости и времени релаксации, а компенсацию нужно проводить с учетом температуры среды.

Уменьшение случайных погрешностей измерения расхода, обусловленных шумами в тракте регистрации, для меточных ЯМР-расходомеров временного типа обеспечивается применением адаптивной частоты отметки и полосы пропускания канала регистрации к расходу.

**Основная часть.** Для измерения температуры можно использовать постоянные магниты анализатора, находящиеся в тепловом контакте с жидкостью (индукция поля анализатора зависит от температуры жидкости). Магнитометр выполнен на датчике Холла (ДХ) [4]. Выход магнитометра является базовым сигналом корректора характеристики преобразования и применяется для автопоиска и стабилизации резонансных условий в анализаторе.

Структурная схема адаптивного временного ЯМР-расходомера с коррекцией характеристики преобразования по индукции поля анализатора приведена на рис. 1.

Особенностью устройства является наличие теплового контакта жидкости с постоянными магнитами через теплопроводящие полюсные наконечники, температура магнитов определяется температурой жидкости. Тепловая изоляция магнитов от внешних воздействий обеспечивается в магнитных системах бронированного типа с помощью теплоизолирующих прокладок между ярмом и магнитами.

Постоянным магнитам присуща зависимость параметров от температуры [5]. Температурный коэффициент остаточной индукции ферритов бария и стронция составляет  $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$  для температур от  $-70$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Аналогично зависит от температуры индукция в зазоре магнитной системы. Разработка термостабильных систем на постоянных магнитах достаточно сложна, а измерение сдвига индукции не представляет трудностей.

Магнитометр выполнен на основе преобразователя Холла [4]. Спиновый детектор, синхронный детектор, детектор резонансных условий (ДРУ), генератор модуляции, удвоитель частоты и устройство автопоиска и стабилизации образуют контур точного поиска и стабилизации резонансных условий в области поля, определенной по преобразователю Холла.

Измеритель работает следующим образом. При расстройке резонансных условий в центре анализатора напряжение на выходе синхронного детектора не превышает порога срабатывания ДРУ, высокое напряжение на выходе которого переключает устройство автопоиска и стабилизации в режим поиска (рис. 2). Поиск осуществляется сканированием частоты генерации спинового детектора пилообразным напряжением устройства автопоиска и стабилизации.

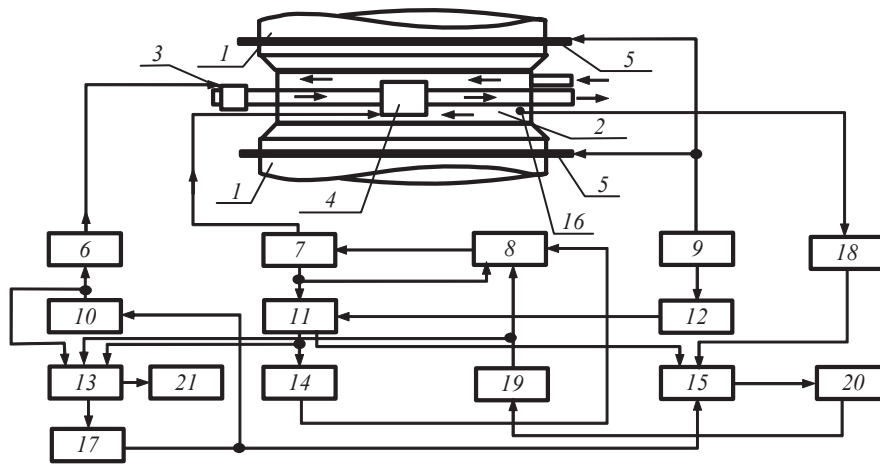


Рис. 1. Структурная схема адаптивного временного ЯМР-расходомера с коррекцией характеристики по индукции поля анализатора:

- 1 – магниты анализатора и поляризатора; 2 – кювета поляризатора; 3, 4, 5 – катушки отметки, регистрации и модуляции соответственно; 6 – генератор нутации; 7 – спиновый детектор; 8 – устройство автопоиска и стабилизации резонансных условий; 9, 10 – генераторы модуляции и синхронизации соответственно; 11 – синхронный детектор; 12 – удвоитель частоты; 13 – фазовый детектор; 14 – ДРУ; 15 – АЦП; 16 – преобразователь Холла; 17 – преобразователь 1/X; 18 – электронный блок ДХ; 19 – ЦАП; 20 – микроконтроллер; 21 – схема адаптивного усреднения

Напряжение, от которого начинается сканирование, определяется по выходу магнитометра Холла через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) контроллером. В момент прохождения резонансных условий  $t_{пр}$  срабатывает ДРУ и система переходит в режим автоподстройки, т. е. напряжение, управляющее частотой генерации спинового

детектора, начинает характеризоваться индукцией поля анализатора. Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) преобразовывает в цифровую форму напряжение с выхода электронного блока ДХ и подает данные на микроконтроллер.

Процесс измерения расхода стандартен для меточных ЯМР-расходомеров временного типа.

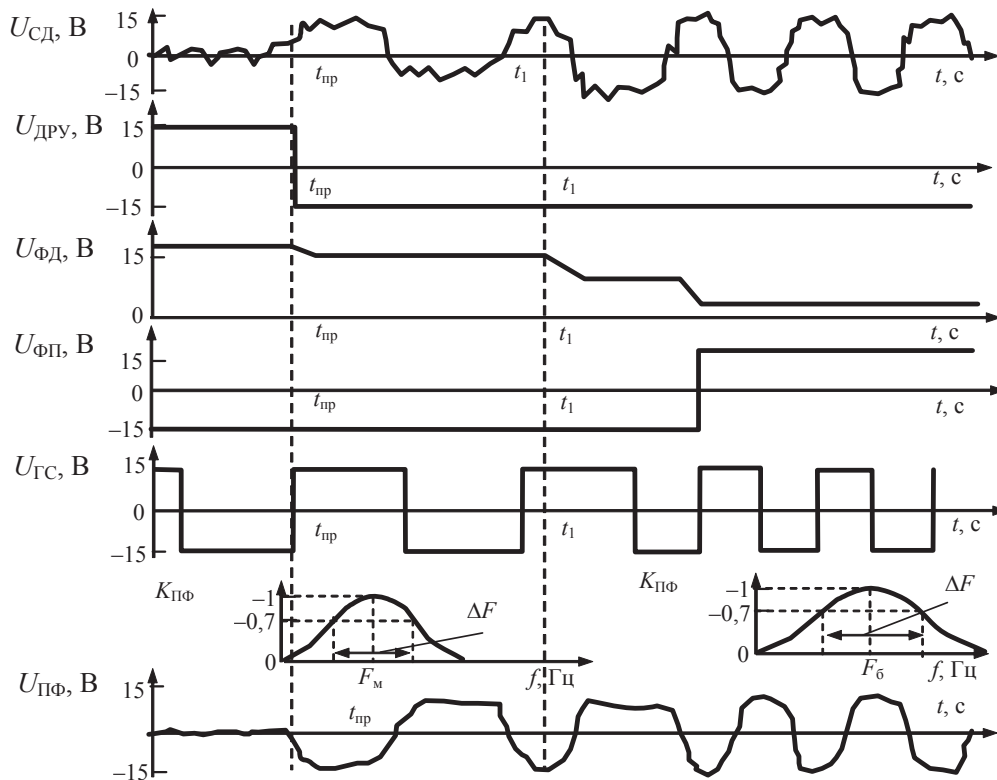


Рис. 2. Диаграммы адаптивного временного ЯМР-расходомера:

$U_{сд}$ ,  $U_{дру}$ ,  $U_{фд}$ ,  $U_{фп}$ ,  $U_{гс}$ ,  $U_{пф}$  – напряжения на выходах синхронного детектора, детектора резонансных условий, фазового детектора, функционального преобразователя, генератора синхронизации и полосового фильтра соответственно;  $K_{пф}$  – амплитудно-частотные характеристики

Импульсы напряжения генератора синхронизации периодически включают генератор нутации, что изменяет направление намагниченности под воздействием резонансного поля нутации и создает в потоке метки ЯМР. Фазовый сдвиг  $\varphi$  между сигналами генератора нутации и синхронного детектора, характеризующий движение метки, связан с расходом следующим соотношением:

$$Q = a_0 + \frac{2\pi R^2 L_n}{T_n \varphi} + f(\varphi^{-2}; \varphi^{-3}; \dots), \quad (1)$$

где  $L_n$  – длина измерительного участка;  $T_n$  – период следования импульсов отметки. Третье слагаемое в (1) описывает нелинейность, возникающую из-за неравенства скорости метки и средней скорости потока.

Фазовый детектор преобразует сдвиг фаз в напряжение, управляющее аналоговым преобразователем  $1/X$ , выходное напряжение которого примерно пропорционально расходу. Это напряжение поступает на АЦП и в микроконтроллер. Температурная коррекция характеристики преобразователя осуществляется микроконтроллером по сигналу с датчика Холла.

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. Погрешность определения информативного параметра связана с напряжением шумов в тракте регистрации:

$$\delta t_{\text{пер}} = \frac{A_{\text{ш}}}{dA/dt}, \quad (2)$$

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

Случайная погрешность, возникающая при измерении расхода, характеризуется погрешностью информативного параметра:

$$\frac{\delta Q}{Q} \approx \frac{\delta t_{\text{пер}}}{t_{\text{пер}}} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_n \tau_y}} = \frac{A_{\text{ш}}}{t_{\text{пер}} (dA/dt)} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}}, \quad (3)$$

где  $\omega_n$  – частота импульсов;  $\tau_y$  – время усреднения расхода.

Скорость изменения интенсивности сигнала ЯМР зависит от длины катушки регистрации и функции распределения частиц по скоростям. Для идеального случая, когда скорость по сечению трубопровода является постоянной

$$\frac{dA}{dt} = \frac{A_a W}{l} = \frac{A_{\text{ш}} CW}{l}, \quad (4)$$

где  $A_a$  – амплитуда сигнала метки;  $W$  – скорость метки;  $l$  – длина измерительного участка;  $C = A_a / A_{\text{ш}}$  – отношение сигнала к шуму.

Распределение скоростей по сечению трубопровода уменьшает  $dA/dt$  по сравнению с величиной, задаваемой (4). Значение  $dA/dt$  можно получить из напряжения, характеризующего движение метки:

$$\begin{aligned} \frac{\delta Q}{Q} &\geq \frac{l}{t_{\text{пер}} CW} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_n \tau_y}} = \frac{l}{t_{\text{пер}} CW} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}} = \\ &= \frac{l S_n}{C(V_5 + V_6)} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}} = \frac{l}{L_n C} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}}. \end{aligned} \quad (5)$$

При постоянной частоте отметки случайные погрешности временного расходомера растут с увеличением расхода, а нижний предел задается условием  $Q_{\text{min}} = (V_5 + V_6) / T_n$ , которое вытекает из требования однозначности показаний  $T_n \geq t_{\text{пер}}$ , справедливого для меточных расходомеров. Идея адаптивного расходомера состоит в повышении частоты отметки пропорционально расходу жидкости и в соответствующем изменении полосы пропускания канала регистрации при соблюдении условия однозначности, что, согласно (5), повышает точность измерений. Сигнал каждого одиночного акта измерения может быть использован для оптимальной настройки системы регистрации при следующих измерениях. Такой учет предыстории в реальных системах возможен в связи с ограниченной скоростью изменения расхода.

Структурная схема адаптивного меточного ЯМР-расходомера временного типа с адаптацией частоты отметки и полосы пропускания канала регистрации к расходу приведена на рис. 1, а временные диаграммы его работы – на рис. 2.

Устройство работает следующим образом. Измеряемая жидкость поступает в магнитное поле поляризатора, затем проходит катушку нутации и попадает в анализатор. В момент включения прибора из-за расстройки резонансных условий в анализаторе сигнал ЯМР на выходе спинового детектора отсутствует, на выходе синхронного детектора (СД) напряжение близко к нулю, при этом не превышает порог срабатывания ДРУ, а на его выходе устанавливается высокий потенциал, соответствующий расстройке резонансных условий в анализаторе. ДРУ сканирует частоту генерации спинового детектора пилообразным напряжением и одновременно принудительно устанавливает высокое напряжение, соответствующее минимальным расходам, на выходе фазового детектора. Функциональный преобразователь переключается в состояние с низким потенциалом и устанавливает частоту  $F_m$  генератора синхронизации и полосу пропускания регулируемого полосового фильтра, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого согласуется с частотой отметки.

В момент прохождения резонансных условий  $t_{\text{пр}}$  на выходе ДРУ появляется низкий потенциал,

устройство автопоиска переключается в режим стабилизации, а управляющий вход фазового детектора не оказывает воздействия на его выход, т. е. напряжение фазового детектора определяется разностью фаз между сигналами с генератора синхронизации и регулируемого полосового фильтра. Начинается измерение расхода. Генератор синхронизации включает и выключает генератор нутации, обеспечивая периодическое изменение намагниченности жидкости под воздействием резонансного поля катушки нутации.

Таким образом, в потоке создаются метки ЯМР, регистрация которых осуществляется в анализаторе модуляционным методом.

При малом расходе из-за большого времени распространения метки по измерительному участку наблюдается значительный сдвиг фаз между сигналами с генератора синхронизации и регулируемого полосового фильтра, сохраняются состояние функционального преобразователя, частота отметки  $F_m$ , задаваемая генератором синхронизации и полосовым фильтром, реализованном на микроконтроллере. Увеличение расхода снижает информативный фазовый сдвиг. При этом уменьшается напряжение на выходе фазового детектора и переключается функциональный преобразователь, одновременно изменяя на  $F_0$  частоту отметки и АЧХ полосового фильтра, оставляя неизменной ширину полосы его пропускания  $\Delta F$ . Время адаптации системы регистрации не превышает периода отметки после изменения расхода. Схема измерения преобразует напряжение фазового детектора в расход и производит индикацию значения расхода. Это взаимодействие между блоками сохраняется при любых изменениях расхода.

Функциональный преобразователь представляет собой последовательно соединенные преобразователь напряжения  $1/X$ , который выполнен на основе аналоговых перемножителей, параллельный АЦП и схему смещения уровня или дешифратор, обеспечивающие управление генератором синхронизации и регулируемым полосовым фильтром. Для расходомера с двумя частотами отметки в качестве функционального преобразователя можно использовать инвертирующий триггер Шмитта.

Детектор резонансных условий представляет собой пиковый детектор с постоянной времени, превышающей период отметки, и компаратор. В качестве фильтров с регулируемой полосой пропускания оптимальными являются адаптивные фильтры, которые обладают стабильными фазовыми характеристиками и не вносят дополнительных погрешностей измерения расхода, обусловленных дрейфом фазовых сдвигов в тракте.

Устойчивость адаптивного расходомера определяется максимально возможной скоростью изменения расхода. Условием однозначности показаний является необходимость того, чтобы информативный фазовый сдвиг не превышал  $360^\circ$ .

Граничный расход, соответствующий переключению частоты отметки, отличается от нижнего предела измерений, задаваемого условием однозначности, на величину изменения расхода за период отметки. Для двух частот отметки:

$$Q_{\text{пер}} = \pi R^2 L_n F_0 + F_0^{-1} \frac{dQ}{dt}. \quad (6)$$

Реальная скорость изменения расхода в гидравлических трактах технологических процессов, например процессов подготовки аминов, требует превышения второго слагаемого в (6) над первым в 3–4 раза.

**Заключение.** По сравнению с меточными расходомерами частотного типа разработанный адаптивный измеритель обеспечивает повышенную точность измерений за счет сужения полосы пропускания канала регистрации; в сравнении с временными к увеличению точности на больших расходах приводит рост частоты отметки. Применение адаптивной системы регистрации в измерителе расхода без увеличения времени усреднения в 4 раза уменьшило случайные погрешности и обеспечило повышение точности до 1% при времени измерения 3 с для двух частот отметки (1 и 4 Гц).

Разработка термостабильных систем измерительных преобразователей на постоянных магнитах, реализующих компенсацию влияния температуры на индукцию поля анализатора в зазоре магнитной системы, достаточно сложна, ввиду этого целесообразно использовать схемы на основе измерителей сдвига индукции.

Введение контура стабилизации с коррекцией характеристики по индукции поля анализатора позволяет сократить погрешности, возникающие при смене режимов течения, и погрешности, связанные с изменением релаксационных показателей технологических сред.

## Литература

1. Жерновой, А. И. Ядерно-магнитный расходомер с отметкой в приемной катушке / А. И. Жерновой // Известия вузов. – 2007. – № 1. – С. 39–43.
2. Жерновой, А. И. Ядерно-магнитные расходомеры / А. И. Жерновой. – Л.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
3. Пряхин, А. Е. Нутационный измеритель расхода протононосодержащих жидкостей / А. Е. Пряхин, С. С. Шушкевич, И. О. Оробей // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 6. – С. 186–188.
4. A Magnetometer Based on a Hall-Effect Transducer / I. O. Orobei [et al.] // Instrument and Experimental Techniques. – 2003. – Vol. 46, № 2. – P. 271–274.
5. Сарака, В. В. ЯМР-расходомер жидкостей на эффекте Джексона-Вангснесса / В. В. Сарака, И. О. Оробей // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2005. – Вып. XIII. – С. 127–129.