

Учреждение образования
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 539.14.43:681.121.2/.7(043)

САРОКА
Виктор Викторович

**УСТРОЙСТВА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Минск 2008

Работа выполнена в учреждении образования "Белорусский государственный технологический университет"

Научный руководитель Оробей Игорь Олегович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования "Белорусский государственный технологический университет"

Официальные оппоненты: Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Белорусского национального технического университета

Лобановский Леонид Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия»

Защита состоится 10 декабря 2009 г. в 17 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. (8-017) 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности технологических процессов и рационального использования материальных и топливно-энергетических ресурсов занимают важное место среди задач, возникающих в химической промышленности, предприятия которой занимают особое место в народном хозяйстве. Важное значение приобретает разработка систем контроля и управления процессами химической технологии, обеспечивающих экономное использование сырья, материалов, производственных мощностей и минимум воздействия на окружающую среду. Одним из путей решения данных проблем является совершенствование методов получения и обработки информации о параметрах технологических процессов, что заставляет искать пути модернизации технологий на основе известных методов и внедрять результаты разработок инновационных технологий. Перспективным направлением повышения эффективности в химической промышленности является применение элементов систем управления, основанных на радиоспектроскопических эффектах, которые в принципе позволяют определять характеристики потоков жидкостей, физико-химические свойства сред и т.д.

В настоящее время метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) широко используется в медицине (томографы ЯМР), в лабораторных исследованиях (спектрометры узких линий) и является одним из самых информативных методов неразрушающего исследования. Однако возможности ЯМР этим не ограничиваются и могут быть адаптированы для получения информации о таких параметрах технологических процессов как расход, концентрация, влажность, время релаксации.

Особенности измерения расхода методом ЯМР требуют анализа процессов, протекающих в первичных преобразователях, математическое описание которых позволит провести оценку возможных погрешностей и разработать комплекс мер для их сокращения и тем самым повысит точность измерения расхода. Математическое моделирование процессов, протекающих в электронных компонентах анализаторов на эффекте ЯМР, позволит произвести оценку вклада возмущающих факторов на работу устройств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема работы соответствует научному направлению кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет». Работа проводилась в рамках программы фундаментальных исследований ГБ 26–141 «Разработка методов анализа и синтеза, алгоритмов, программного обеспечения и создания высокоэффективных систем автоматизации на основе современных информационных технологий и программно-аппаратных комплексов» и ХД 24–079 «Разработка цифровых датчиков протечек».

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка, исследование и создание методов, алгоритмов и средств контроля и управления процессами химической технологии на основе эффекта ЯМР.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ технологических процессов химической технологии для определения возможности внедрения устройств ЯМР в систему управления, сформулировать требования, предъявляемые к радиоспектроскопическому устройству.
2. Разработать метод определения информативного параметра меточного ЯМР-расходомера с учетом факторов, влияющих на точность измерения, определить последовательность действий при проектировании анализаторов ЯМР.
3. Разработать структурные схемы и элементы конструкции приборов, использующих эффект ЯМР для измерения расхода растворов реагентов и удовлетворяющих требованиям технологического процесса.
4. Разработать датчик Холла для первичного преобразователя ЯМР.
5. Провести анализ процессов, протекающих в электрических схемах радиоспектроскопических анализаторов.
6. Рассчитать параметры сигналов ЯМР водных растворов при движении в поле с продольным градиентом для разных режимов течения.
7. Разработать методы и структуры адаптивной фильтрации сигналов для повышения быстродействия и точности системы управления.
8. Разработать приборы для контроля качества параметров технологических процессов.

Объектом исследования являются процессы приготовления реагентов для флотации. Предметом исследования являются метод ЯМР, способы синтеза, а также алгоритмы и приборы, использующие данный метод для управления технологическими процессами подготовки реагентов.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод определения информативного параметра меточного ЯМР-расходомера по спектральному разложению намагниченности при движении метки по измерительному участку, позволяющий получить передаточную функцию и оценить погрешности при смене режимов течения и релаксационных характеристик среды.
2. Способы минимизации погрешностей меточного ЯМР-расходомера при помощи коррекции измерительной базы по индукции поля анализатора для компенсации возмущений, вносимых изменениями режима течения потока и релаксационных характеристик среды, и адаптации частоты постановки меток к расходу с изменением полосы пропускания канала регистрации для снижения случайных погрешностей.

3. Структура и элементы конструкции магнитометра на датчике Холла для измерения низкочастотных магнитных полей на переменном токе с контурами термостабилизации и подавления синфазного сигнала.

4. Способ определения сигналов в первичных преобразователях ЯМР на основе совместного решения уравнений Блоха для образца в изменяющемся магнитном поле и модели спинового детектора.

5. Структура и алгоритм адаптивной цифровой фильтрации сигналов измерителей ЯМР и устройства измерения концентрации газовых смесей NH_3 и CO .

Личный вклад соискателя

Все результаты разработаны и реализованы автором. Научный руководитель принимал участие в постановке задачи и определении возможных путей решения. В публикациях с соавторами вклад определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: "Современные технологии, материалы, машины и оборудование" (Могилев, 2002), "Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов" (Минск, 2003), (Минск, 2006), "Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании" (Гомель, 2002), (Гомель, 2003), "Наука – образованию, производству, экономике" (Минск, 2003), "Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах" (Минск, 2004), (Минск, 2007), "Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления" (Минск, 2004), (Минск, 2008), "Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития" (Минск, 2005), (Минск, 2009), "Ресурс- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии" (Минск, 2005), на научно-технических конференциях студентов и аспирантов БГТУ в 2003 году и ГТУ в 2004 году.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам диссертационной работы опубликовано 36 печатных работ, включая 13 статей в научных журналах, 20 в материалах международных и республиканских конференций, 1 тезисы научных конференций, 2 патента Республики Беларусь.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 8 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и девятнадцати приложений.

В первой главе проведено исследование технологических процессов химической промышленности на предмет совершенствования элементов систем управления введением датчиков на основе ЯМР. Во второй главе рассматриваются особенности измерения расхода методом ЯМР. Проведен анализ и предложены способы сокращения погрешностей измерения. В третьей главе рассматриваются конструкции и схемы радиоспектроскопических устройств для систем управления. Составлены математические модели электронных блоков преобразователя расхода. В четвертой главе рассмотрены вопросы обработки сигналов измерительных преобразователей ЯМР, разработан алгоритм и способ адаптивной цифровой фильтрации сигналов. В приложениях приведены графики, таблицы, схемы и математические выкладки, уточняющие и поясняющие некоторые вопросы диссертационной работы, а также акты внедрения.

Общий объем диссертации 180 страниц, из которых 89 страниц основного текста. Диссертация содержит 51 рисунок на 45 страницах, 7 таблиц на 7 страницах, библиография из 200 источников на 16 страницах, включая 36 собственных публикаций автора, 19 приложений на 48 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

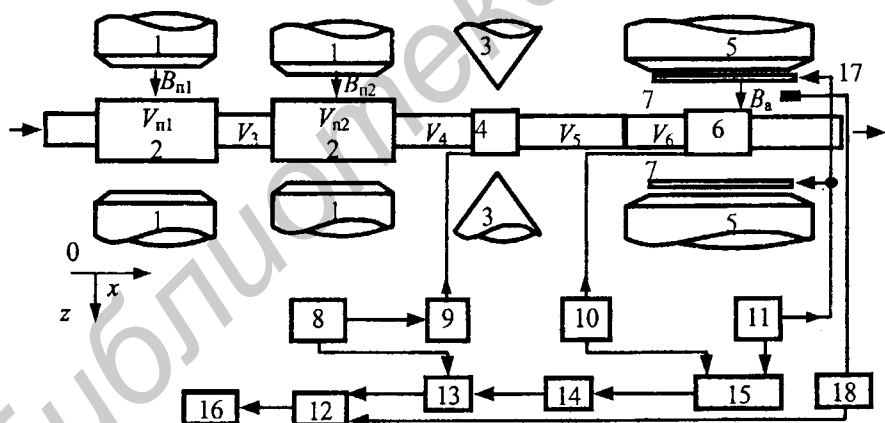
В общей характеристике показана актуальность работы, определена цель исследований, представлены положения, выносимые на защиту, рассмотрены основные результаты, научная и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору характеристик технологических параметров, методов анализа на эффекте ЯМР, особенностям эффекта. Рассмотрены процессы приготовления реагентов и способы контроля технологических параметров. Обоснована возможность применения ЯМР при подготовке реагентов для флотации на ПО «Беларуськалий». Доказана целесообразность создания комплекса элементов систем управления, состоящего из устройств на эффекте ЯМР (расходомер, измеритель влажности, анализатор состава). Ядром комплекса является ЯМР-расходомер.

Рассмотрены особенности резонансных эффектов, проведен обзор методов наблюдения сигнала ЯМР. Для устройств регистрации расхода на ЯМР необходимо учитывать особенности эффекта в движущихся средах: зависимость амплитуды сигнала от скорости; аппаратурные эффекты; возможности поляризации, управления намагниченностью и постановки меток ЯМР; особенности, связанные с режимом течения и релаксационными свойствами веществ. Предложена классификация устройств регистрации расхода на эффекте ЯМР, анализ которых позволил сделать вывод о перспективности меточного расходомера временного типа для технологических процессов химической промышленности.

Сопоставление интенсивностей сигнала и релаксационных характеристик водных растворов реагентов, воды и топлива доказывает их взаимозаменяемость. Характеристики растворов реагентов сопоставимы с водой с растворенным кислородом. Неустойчивость характеристик реагентов может привести к появлению релаксационных погрешностей. Широкие пределы изменения вязкости растворов аминов обуславливают наличие области расходов с возможной сменой режима течения, что может вызвать появление погрешностей смены режима течения. Сделаны выводы о целесообразности проводимых исследований и намечены пути их реализации.

Во второй главе рассмотрены принципы построения меточных ЯМР-расходомеров, метод определения информативного параметра, факторы, влияющие на погрешности, меры, позволяющие снизить погрешности. В меточном ЯМР-расходомере временного типа (рисунок 1) жидкость намагничивается в поляризаторах и по транспортному участку поступает в катушку 4. Отметка инверсией осуществляется импульсами радиочастотного поля. Регистрация намагничённости для определения времени распространения метки по измерительному участку ($V_5 + V_6$) проводится в катушке 6. Интенсивность сигнала пропорциональна намагничённости, на зависимость которой от расхода влияют поляризация, размагничивание на V_4 и V_5 и домагничивание в анализаторе. Расчет намагничённости позволяет оценить диапазон по амплитуде метки, но не



1, 2 – магниты и катушки 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

дает погрешностей и параметров передаточной функции. Увеличение амплитуды метки осуществляется снижением времени релаксации T_1 при введении не растворяющихся в жидкости ионов. 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:

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

где $W(r)$ – 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.

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 .

Получены $t_{\text{пер}}$ при разных Q для разных режимов, откуда методом наименьших квадратов (МНК) найдены статическая характеристика как $Q = f(1/t_{\text{пер}})$ и запаздывание $\tau_{\text{пер}} = t_{\text{пер}} = f(Q)$ для разных степеней аппроксимирующего многочлена. Проведена линеаризация нелинейной статической характеристики. Оценка погрешности показала достаточность аппроксимации полиномом четвертого порядка

$$Q = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{пер}}^{-1} + a_2 \cdot t_{\text{пер}}^{-2} + a_3 \cdot t_{\text{пер}}^{-3} + a_4 \cdot t_{\text{пер}}^{-4}; \quad (2)$$

$$dQ/dt_{\text{пер}}^{-1} = a_1 + 2a_2 t_{\text{пер}}^{-1} + 3a_3 t_{\text{пер}}^{-2} + 4a_4 t_{\text{пер}}^{-3}; \quad (3)$$

$$\tau_{\text{пер}} = (b_0 + b_1 \cdot Q + b_2 \cdot Q^2 + b_3 \cdot Q^3 + b_4 \cdot Q^4)^{-1}; \quad (4)$$

где $a_0 - a_4$, $b_0 - b_4$ – коэффициенты аппроксимирующих полиномов, зависящие от расхода и режима течения.

Передаточная функция по каналу $t_{\text{пер}} - Q$ имеет вид:

$$W_a(p) = dQ/dt_{\text{пер}}^{-1} \cdot \exp(-\tau_{\text{пер}} \cdot p). \quad (5)$$

Рассмотренные процессы имеют место для меточных расходомеров с затухающей меткой, поэтому метод расчета информативного параметра и передаточной функции можно распространить на все меточные расходомеры с такой меткой.

По разнице полиномов (2) оценивались относительные погрешности смены режима течения (до 30%) и релаксационные погрешности (до 3% для турбулентного, до 12% для ламинарного режима). Снижение этих погрешностей достигается смещением диапазона с изменением режима течения в область малых Q при искусственной турбуликации 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 бронированного типа. Выбор тракта совмещается с расчетами определения диапазона и $t_{\text{тер}}$.

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).

Магнитометр выполнен на датчике Холла (ДХ). Он вырабатывает базовый сигнал для коррекции, осуществляемой выбором коэффициентов полиномов (2)-(4). Магнитометр на ДХ позволяет получить сигнал для коррекции характеристики преобразования и исследовать топографию полей от $5 \cdot 10^{-5}$ – 1 Тл с ошибкой до 1%. В обозначении ДХ приведена его схема замещения (3 и 4 - токовые выводы, 1 и 2 – выводы ЭДС). Генератор формирует симметричные импульсы 10^3 Гц, $\pm 2,5$ В, управляющие источником тока. Через ДХ проходят импульсы тока $\pm I_y$ с частотой 10^3 Гц и нестабильностью амплитуды $< 10^{-3}\%$ /°C. Вывод 4 можно присоединить к общей точке, и погрешность от синфазного сигнала

$$\delta_C = R_x \cdot I_y \cdot (B \cdot S \cdot 10^{0,05 \cdot K_C})^{-1}; \quad (6)$$

где B , Тл – индукция поля;

K_C , дБ – коэффициент подавления синфазного сигнала усилителем ЭДС Холла.

Подавление синфазного сигнала на 40 дБ осуществляет сумматор, снижая $\delta_C < 0,6\%$ даже для $5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Измерительный усилитель с $K \approx 44$ усиливает переменную составляющую ЭДС Холла. Огибающую выделяет синхрон-

ный детектор (СД) с постоянной времени 1 мс. Нелинейность (<0,2 %) можно уменьшить в 10 раз при калибровке. Схема на переменном токе с СД снижает температурные дрейфы (приведенный к выводам Холла дрейф <2·10⁻⁹ Тл/°С).

Снижение случайных погрешностей измерения расхода, обусловленных шумами в тракте регистрации, достигается применением адаптивной частоты отметки и полосы пропускания канала регистрации к скорости жидкости. Погрешность определения $t_{\text{пер}}$, связанная с шумами:

$$\frac{\delta Q}{Q} \approx \frac{\delta t_{\text{пер}}}{t_{\text{пер}}} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_n \tau_y}} = \frac{\delta t_{\text{пер}}}{t_{\text{пер}}} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}} = \frac{A_{\text{ш}}}{t_{\text{пер}} (dA/dt)} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}}, \quad (7)$$

где $A_{\text{ш}}$ – амплитуда шумовых флуктуаций сигнала;

dA/dt – скорость изменения интенсивности в момент регистрации отметки;

τ_y – время усреднения.

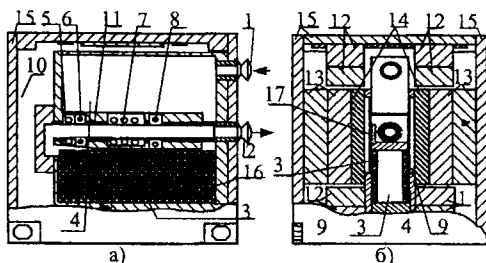
dA/dt зависит от длины катушки регистрации l и $W(r)$. Для идеального случая $W(r) = \text{const}$ $dA/dt = A_s W/l = A_{\text{ш}} C W/l$; где A_s – амплитуда сигнала метки; $C = A_s/A_{\text{ш}}$ – отношение сигнала к шуму. $W(r)$ уменьшает dA/dt . dA/dt можно получить из (1):

$$\frac{\delta Q}{Q} \geq \frac{l}{t_{\text{пер}} C W} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_n \tau_y}} = \frac{l}{t_{\text{пер}} C W} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}} = \frac{l S_n}{C (V_5 + V_6)} \sqrt{\frac{T_n}{\tau_y}}. \quad (8)$$

При постоянной частоте отметки случайные погрешности растут с увеличением расхода, а нижний предел задается условием $Q_{\text{min}} = (V_5 + V_6)/T_n$. Идея адаптивного расходомера состоит в повышении частоты отметки пропорционально Q и в соответствующем изменении полосы пропускания, что повышает точность.

В третьей главе рассматриваются конструкции разработанных радиоспектроскопических устройств. Спектрометр ЯМР для изучения особенностей эффекта позволяет наблюдать и регистрировать сигналы ЯМР, зависимости сигнала от скорости; исследовать явление нутации, искажения спектра при движении среды в поле с продольным градиентом – эффект Джексона–Вангнесса (ДВ); релаксационные характеристики и погрешности смены режима течения. Разработан импульсный спектрометр и измеритель влажности на эффекте ЯМР.

Далее рассматривается устройство регистрации расхода. Оно состоит из преобразователя на постоянных магнитах (рисунок 2) и электронного блока. Преобразователь для устройств регистрации расхода аминов и топлива содержит гидравлический тракт с совмещенными поляризатором и анализатором, двухкамерный поляризатор с перетеканием жидкости над измерительным участком, в объем одной камеры введены парамагнитные ионы. В магнитной системе броневого типа использованы постоянные магниты из 28СА250. Полосные наконечники представляют собой квадрат 75x75 мм, длина рабочего зазора 13 мм. Индукция в центре зазора 0,3 Тл. Градиент поля в месте катушки нутации 0,1 Тл/см.

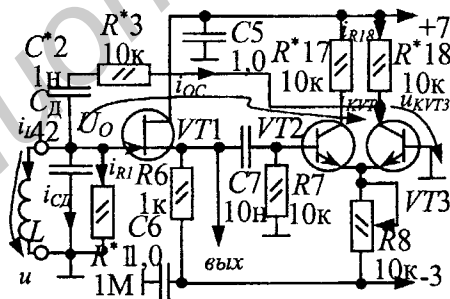


1, 2 – штуцеры; 3, 4 – камеры поляризации; 5–9 – катушки нутации, регистрации, компенсации, модуляции, градиента; 10 – электронные блоки; 11 – измерительный тракт; 12, 13 – магниты; 14 – полюсные наконечники; 15 – ярмо; 16 – парамагнитные ионы; 17 – ДХ
Рисунок 2 – Первичный преобразователь

Состав электронных блоков преобразователя: автодин (рисунок 3), генератор нутации, усилитель мощности для катушек модуляции, блоки градиентов и компенсации нутационной наводки. Автодин используется для преобразования движения спинов в электрические сигналы в разработанных устройствах, получена его модель и проанализировано поведение при малых возмущениях, обусловленных периодическим наступлением резонанса. Дифференциальное уравнение для напряжения u :

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{1}{C_a} \left(\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{18}} \right) + \frac{R_{18}}{(R_3 + R_{18})} (5.5 \cdot 10^5 u^2 - 273.1u - 0.075) \right) \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0, \quad (9)$$

где $\omega_0 = 1/(L_1 C_D)^{0.5}$ – собственная частота контура.



L_a – катушка автодина;

Рисунок 3 - Схема автодина

Решение (9) получено методом медленно меняющихся амплитуд:

$$u(t) = 2 \sin(\omega_0 t) \sqrt{me^m / C_0 - 5.5 \cdot 10^5 k_2 e^m}; \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{4m + a^2 \cdot 5.5 \cdot 10^5 k_2}{a^2}; \quad a = 5.6 \cdot 10^{-6}; \quad m = 0.075 k_2 - k_1; \quad k_1 = \left(\frac{C_a^{-1}}{R_1} + \frac{C_a^{-1}}{R_3 + R_{18}} \right); \quad k_2 = \frac{C_a^{-1}}{(R_3 + R_{18})}.$$

Для получения временной зависимости сигналов ЯМР на выходе автодина нужно выявить влияние движения вектора намагниченности в катушке регистрации. При помещении образца в постоянное магнитное поле B_0 , направленное по оси Oz , и наложении на него переменного вращающегося с частотой ω в плоскости Oxy поля B_1 , уравнениями движения вектора намагниченности являются уравнения Блоха:

$$\frac{dM_x}{dt} - \gamma(M_y B_z - M_z B_y) = -\frac{M_x}{T_2}; \quad \frac{dM_y}{dt} - \gamma(M_z B_x - M_x B_z) = -\frac{M_y}{T_2}; \quad \frac{dM_z}{dt} - \gamma(M_x B_y - M_y B_x) + \frac{M_z}{T_1} = \frac{M_0}{T_1}; \quad (11)$$

где M_x, M_y, M_z – проекции векторов намагниченности на оси Ox, Oy, Oz ,

B_x, B_y, B_z – проекции векторов индукции поля на оси Ox, Oy, Oz ,

$M_0 = \chi_0 B_0$ – равновесная намагниченность.

Изменения B_0 малы, поэтому $M_0 \approx const$. Линейно поляризованное поле катушки автодина при оси, направленной по x , представляется суммой двух вращающихся в противоположном направлении полей. Общее решение (11) затруднено из-за необходимости прохождения резонанса, что требует изменения во времени $B_z = B_0$ или ω . Во вращающейся с ω вокруг Oz системе: $M_x = u \cos \omega t - v \sin \omega t$, $M_y = \mp (v \cos \omega t + u \sin \omega t)$, где u – намагниченность, вращающаяся синфазно с B_1 ; v – намагниченность, опережающая B_1 на $\pi/2$; знак M_y зависит от знака B_y . Обозначив расстройку частоты поля от резонанса $\Delta\omega = |\gamma| B_0 - \omega = \omega_0 - \omega$, где $\omega_0 = |\gamma| B_0$ – резонансная частота, переходим от (11) к уравнениям для u и v , переписывая которые через $F = v + ju$ получаем уравнение $dF/dt + (1/T_2 + j\Delta\omega)F = -|\gamma| B_1 M_z$ с решением при малом B_1 ($M_z \approx M_0$)

$$v + ju = -|\gamma| B_1 M_0 \int_{-\infty}^t \exp\left(\frac{t'}{T_2} - t - j \int_{t'}^t \Delta\omega(t'') dt''\right) dt'. \quad (12)$$

Спектр ЯМР снимают прохождением резонанса изменением B_0 или ω . Для выполнения $M_z \approx M_0 = \chi_0 B_0$ лучше изменять ω , но при этом изменяются и параметры схем. Поэтому применяют развертку и полем, и частотой. При линейной развертке полем $\Delta\omega = |\gamma| B_0(t) - \omega = |\gamma| B_{00} - \omega \pm t|\gamma| dB_0/dt = \Delta\omega_{00} + at$, где B_{00} – среднее значение поля B_0 ; dB_0/dt – скорость изменения поля B_0 ; $\Delta\omega_{00}$ – среднее значение расстройки частоты от резонансной; $a = \pm |\gamma| dB_0/dt$ – скорость изменения расстройки. Приняв $a > 0$ (для $a < 0$ изменяется знак u) и $\Delta\omega_{00} = 0$, вводя $A = 1/(a^{1/2} T_2)$, $x = a^{1/2} t$ и выражая моменты в единицах M_0 , получаем v , отвечающую за поглощение:

$$v = -|\gamma| B_1 A T_2 e^{-x^2} \int_{-\infty}^x \left[\cos\left(\frac{A\Delta\omega T_2}{2}\right)^2 \int_{-\infty}^{x'} e^{Ax'} \cos\frac{x'^2}{2} dx' + \sin\left(\frac{A\Delta\omega T_2}{2}\right)^2 \int_{-\infty}^{x'} e^{Ax'} \sin\frac{x'^2}{2} dx' \right]. \quad (13)$$

По (13) можно рассчитать поглощение при регистрации спектра от движущейся среды в поле с продольным градиентом $grad_{\text{пр}} B$ ($grad_{\text{пр}} B$ и скорость направлены по Ox). Пусть эффектами модуляции и развертки можно пренебречь. Тогда каждый элемент объема находится в изменяющемся поле $dB/dt = W grad_{\text{пр}} B$. Из-за $W(r)$ dB/dt зависит от r . Расстройка частоты переменного поля от резонанса для каждого элемента

$\Delta\omega_{00}(l) = \Delta\omega_{i0} + \gamma(l_x + dl/2)grad_{np}B$, где $\Delta\omega_{00}$ – расстройка частоты переменного поля от резонансной для элементов объема у начала катушки при $l_x = 0$; l_x – расстояние от выделенного объема длиной dl до начала катушки. $grad_{np}B$ обуславливает неоднородность поля $\Delta B = dl grad_{np}B$ в выделенном элементе, изменяя эффективное время поперечной релаксации этого элемента: $T_2 = 1/(1/(2T_2) + 1/(T_2' + dl\gamma grad_{np}B/\pi))$. С учетом вклада отдельных элементов $\rho_v(r) = (2rdr + dr^2)dl/(R^2l)$, где R – радиус катушки, получаем сигнал поглощения катушки

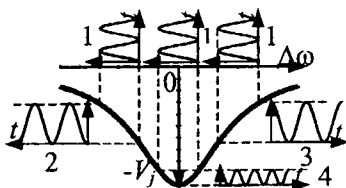
$$V_j(\Delta\omega_{i0}) = \sum_r \sum_{l_x} \rho_v(r) v_n(r, l_x, \Delta\omega_{i0}). \quad (14)$$

Кривая поглощения получается перебором по $\Delta\omega_{i0}$ с шагом $\Delta\omega$, значительно меньшим, чем изменение частоты на dl . Для больших dl проявляются отдельные линии. Изменение поля на dl должно быть значительно меньше ширины линии от этого элемента, задаваемой T_2 , т.е. $S_{IB} = (2/T_2)/(\gamma \cdot dl \cdot grad_{np}B/\pi) \gg 2$. Колебательность исчезает при $S_{IB} \approx 10 \div 12$, и соответствующее dl можно принять для расчетов поглощения в катушке и искажений ДВ. Компоненты намагнитичности создают в катушке ЭДС, которую можно ввести в (10) как внешнюю периодическую силу. v уменьшает амплитуду колебаний, а u изменяет их частоту. Ввиду малости ЭДС, создаваемой намагнитичностью ($< 10^{-6}$ В), по сравнению напряжением на катушке ($\sim 10^2$ В), а также из-за того, что частота автодина намного выше частоты модуляции, действие v можно заменить изменением потерь контура. Большему поглощению V_j соответствует меньшее $R1$ на рисунке 3:

$$R1_{ЯМР} \approx R1 - K_{NMR}V_j, \quad (15)$$

где K_{NMR} – коэффициент, получаемый из (12) при разных $R1$.

При малой синусоидальной модуляции частоты или амплитуды B_0 сигнал ЯМР с автодина проявляется как синусоида, совпадающая по фазе с сигналом модуляции, если $\Delta\omega < 0$; как синусоида, противофазная сигналу модуляции при $\Delta\omega > 0$ или как синусоида с удвоенной частотой модуляции при $\Delta\omega = 0$ (рисунок 4).



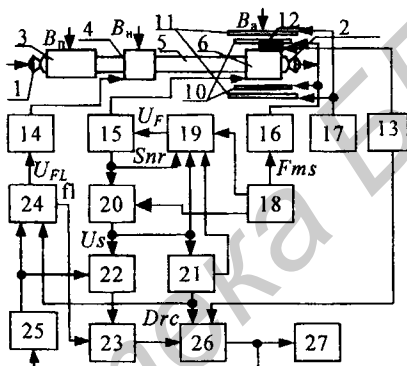
1, 2, 3, 4 – диаграммы сигналов модуляции и сигналов на выходе автодина при $\Delta\omega < 0$, $\Delta\omega > 0$ и $\Delta\omega = 0$.

Рисунок 4 – Сигналы ЯМР на выходе автодина

При синхронном детектировании с опорным сигналом, совпадающим по фазе и частоте с сигналом модуляции, зависимость напряжения на выходе синхронного детек-

тора (СД) от частоты имеет форму производной кривой поглощения, совпадающую по виду с кривой дисперсии. Для опорного сигнала с удвоенной частотой модуляции зависимость выходного сигнала СД от частоты имеет форму кривой поглощения. Инверсия намагниченности меняет знаки кривых (поглощение сменяется излучением) и знаки сигналов на выходе СД. Синхронное детектирование на частоту модуляции используется для автоподстройки резонанса. Синхронное детектирование на удвоенной частоте модуляции – для поиска резонансных условий и регистрации намагниченности.

Особенностью расходомера (рисунок 5) является адаптивная система регистрации с переменной частотой отметки и полосой пропускания, необходимость которых обусловлена увеличением скорости нарастания намагниченности при турбулентном потоке и требованием сохранения сдвигов сигнала метки для разных частот импульсов



1, 2 – штуцеры; 3 – поляризатор; 4, 6 – катушки нутации и регистрации; 5 – измерительный участок; 7, 8, 9 – полносные наконечники, магниты; 10, 11 – катушки модуляции и градиента; 12 – ДХ; 13 – блок ДХ; 14, 18 – генераторы нутации и модуляции; 15 – автодин; 16 – усилитель модуляции; 17 – блок градиентов; 19 – блок автопоиска и стабилизации; 20 – СД; 21 – ДПУ; 22 – полосовой фильтр; 23 – фазовый детектор; 24 – генератор синхронизации; 25 – преобразователь 1/Х; 26 – вычислитель расхода; 27 – индикатор.

Рисунок 5 – Структура устройства регистрации расхода аминов

отметки, а также коррекция характеристики по индукции поля анализатора.

После включения генератор 18 вырабатывает синусоидальное напряжение 2,5 кГц F_{ms} для усилителя 16, и синхронные опорные импульсные сигналы 2,5 кГц и 5 кГц для устройства автопоиска и стабилизации резонансных условий 19 и СД 20. F_{ms} вырабатывает ЦАП контроллера M_1 в подпрограмме прерывания таймера за 12 прерываний длительностью 33,34 мкс каждое. В этой подпрограмме формируются и синхронные с F_{ms} сигналы меандров F_{m1} (2,5 кГц) и F_{m2} (5 кГц). Сигнал ЯМР Snr с автодина через усилитель $M_{3,3}$ поступает на блок 19 и СД 20. СД состоит из усилителя с переменным коэффициентом усиления на, фильтра низких частот и повторителя. Выходное напряжение U_s блока 20 определяется кривой поглощения и служит индикатором захвата резонансных условий при поиске или мерой намагниченности жидкости при измерении расхода. Сигнал U_s поступает на детектор резонансных условий 21, выполненный на пиковом детекторе и компараторе. При

расстройке резонансных условий в анализаторе сигнал ЯМР на выходе 15 отсутствует, и $U_S \approx 0$. Тогда не превышает порог срабатывания детектора 21, и на выходе устанавливается +5 В, переключающее в режим поиска устройство 19, опорный сигнал 2,5 кГц которого формирует усилитель с изменяемым знаком коэффициента (± 1) и генератора поиска. В режиме поиска сигнал Drc детектора 21 вне зависимости от 23 устанавливает минимальное значение расхода на выходе 26 и выключает генератор 24. При $U_{FL} = -15$ В генератор нутации выключен, и намагниченность не изменяется; при $U_{FL} = 15$ В амплитуда напряжения на катушке 4 составляет 100 В, и вектор намагниченности инвертируется резонансным полем катушки нутации. Периодическое изменение намагниченности создает в потоке метки ЯМР. В режиме поиска $Drc \approx 5$ В, напряжение f_l близко к нулю, $U_{FL} = -15$ В, метки не ставятся. При прохождении резонанса $Drc \approx 0$ В, что снимает блокировку с устройств 24 и 26 и переключает блок 19 в режим стабилизации. В этом режиме U_F определяется контуром регулирования, включающим автодин 15, усилитель, СД блока 19, усилитель с изменяемым знаком коэффициента и интегратор. Использование интегратора в режиме поиска и стабилизации обеспечивает безударный режим переключения, а наличие интегрального регулятора обеспечивает нечувствительность к импульсным возмущениям. Выходное напряжение СД блока 19 в режиме стабилизации пропорционально производной кривой поглощения. Инверсия намагниченности в анализаторе изменяет знак напряжения СД, т.е. знак коэффициента усиления в контуре, что компенсируется включением усилителя с управляемым от U_S знаком коэффициента усиления. U_S в режиме стабилизации пропорционально намагниченности в анализаторе. При переходе 19 в режим стабилизации резонансных условий начинается измерение расхода, т.е. Q рассчитывается по информативному сдвигу фаз между сигналами с генератора 24 и фильтра 22. Генератор 24 включает и выключает генератор нутации, создавая в потоке метки ЯМР, регистрация которых осуществляется в анализаторе модуляционным методом. После цифровой обработки отфильтрованный сигнал через ЦАП контроллера преобразовывается в аналоговую форму и поступает на фазовый детектор, далее через преобразователь $1/X$, поступает на вход АЦП контроллера.

В четвертой главе рассмотрены эффекты, протекающие в преобразователях ЯМР и методы для обработки информации в элементах систем управления. Зависимости асимметрии спектров ЯМР при движении жидкости в поле с продольным градиентом от градиента и расхода (эффект ДВ) обосновывают методы юстировки магнитного поля первичных преобразователей и способы измерения расхода жидкости. Был разработан метод адаптивной фильтрации, задачей которого является снижение требуемой вычислительной мощности и объема памяти, повышение точности при фильтрации данных, имеющих стационарные вероятностные характеристики, и обеспечение устойчивости работы фильтра для нестационарных процессов (рисунок 6). Для решения этой задачи вводят дополнительную целочисленную переменную состояния

фильтра, которая увеличивает значение на целую постоянную величину при изменении цифрового отсчета на входе фильтра.

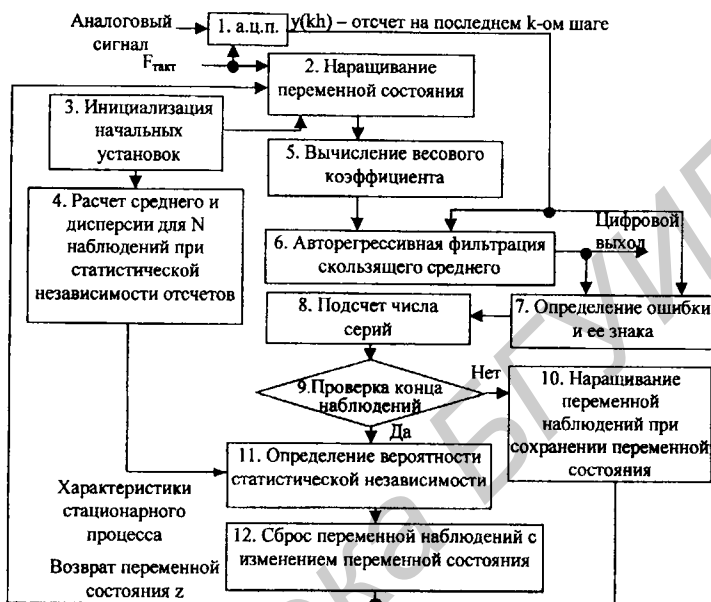


Рисунок 6 – Структура алгоритма способа адаптивной фильтрации

Далее задают число наблюдений в одном цикле генерации весовых коэффициентов; рассчитывают среднее значение и дисперсию для числа серий, соответствующих заданному числу наблюдений в предположении статистической независимости последовательных отсчетов на входе фильтра; принимают в качестве медианы или среднего значения последовательности наблюдений выходное значение фильтра; определяют знак ошибки цифрового отсчета на входе фильтра относительно медианы или среднего значения последовательности наблюдений и подсчитывают количество серий знаков ошибок за заданное число наблюдений; с использованием критерия серий определяют вероятность статистической независимости отсчетов на входе фильтра за период, соответствующий числу наблюдений; умножают переменную состояния фильтра на вероятность статистической независимости, округляют до ближайшего большего целого значения, которое присваивают переменной состояния фильтра; производят перерасчет весовых коэффициентов фильтра, в качестве которого используют авторегрессивный фильтр скользящего среднего с нулевым значением коэффициентов перед всеми отдельными цифровыми отсчетами. Кроме расходомера и измерителя влажности, адаптивный фильтр использовался в измерителе времени капиллярного впитывания и измерителе концентрации многокомпонентных газовых смесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Анализ технологических процессов в условиях ПО «Беларуськалий» показал целесообразность создания измерительного комплекса элементов систем управления, в состав которого входят устройства на основе ЯМР (расходомер, измеритель влажности, анализатор состава). Ядром этого комплекса является ЯМР-расходомер [4-А, 10-А, 11-А, 12-А, 24-А, 26-А, 27-А, 28-А, 31-А, 34-А].

2. Получен метод определения информативного параметра меточных ЯМР-расходомеров по расчету зависимостей относительной намагниченности в анализаторе для отмеченных и неотмеченных объемов. Эффективным методом расчета информативного параметра является спектральный анализ движения метки по измерительному участку. Анализ зависимостей информативного параметра от расхода для разных потоков и времен релаксации дает релаксационные погрешности и погрешности смены режима течения [9-А, 13-А].

3. Для получения информации о топографии магнитного поля ЯМР-расходомера разработан магнитометр на датчике Холла, который позволяет вырабатывать сигнал коррекции характеристики по полю анализатора. Разработан метод построения и структура магнитометра для измерения низкочастотных магнитных полей на переменном токе с контуром термостабилизации и подавления синфазного сигнала [2-А, 3-А, 15-А, 18-А, 19-А].

4. Синтезирована структура меточного ЯМР-расходомера с коррекцией измерительной базы по индукции поля анализатора для компенсации погрешностей, вносимых изменением температуры измеряемой жидкости [12-А, 20-А, 30-А].

5. Разработан метод построения меточного ЯМР-расходомера временного типа с совмещением адаптации системы регистрации к измеряемому расходу и коррекции измерительной базы по индукции поля анализатора для работы в широком диапазоне расходов с минимизацией погрешностей [13-А, 30-А].

6. Разработаны структурные схемы и элементы конструкции спектроскопического анализатора и влагомера для определения свойств веществ. Разработан модуляционный ЯМР-спектрометр проточных жидкостей, который позволяет получить зависимость интенсивности сигнала ЯМР от скорости жидкости; явление нутации, исследовать искажения спектра при движении жидкости в поле с продольным градиентом, исследовать релаксационные характеристики жидкостей, релаксационные погрешности и погрешности смены режима течения при разной длине измерительного участка. Импульсный спектрометр дает информацию о содержании влаги в образце. [1-А, 7-А, 8-А, 11-А, 14-А, 16-А, 17-А, 21-А, 22-А, 25-А, 26-А, 27-А, 28-А, 29-А, 32-А].

7. Разработаны ЯМР-расходомеры на постоянных магнитах. Использование адаптивной системы регистрации позволяет повысить точность измерения расхода на различных участках диапазона. Сформулированы требования и выбрана конструкция первичного преобразователя сигналов ЯМР для проточных жидкостей. Описаны электронные блоки ЯМР-расходомера [20-А, 23-А, 30-А].

8. Разработана математическая модель автодинного спинового детектора. Выявлено влияние движения вектора намагниченности в катушке регистрации на работу автодина. На основании этого выведены формулы для расчета искажений формы линии поглощения при регистрации спектра от движущейся жидкости в поле с продольным градиентом [9-А, 33-А].

9. Рассчитаны спектры ЯМР с учетом эффекта Джексона Вангснесса – зависимости асимметрии спектров ЯМР при движении жидкости в поле с продольным градиентом от градиента и расхода, на основании которых обосновываются методы юстировки магнитного поля первичных преобразователей и способы измерения малых расходов жидкости [10-А, 20-А, 23-А].

10. Разработан новый метод адаптивной цифровой фильтрации, задачей которого является снижение величины вычислительной мощности и объема памяти, повышение точности при фильтрации последовательностей данных, имеющих стационарные вероятностные характеристики, и обеспечение устойчивости работы фильтра для нестационарных процессов [36-А].

11. Разработан измеритель концентрации газовых смесей NH_3 и CO [5-А, 6-А, 25-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. На основе разработок, проведенных во время диссертационного исследования, были получены патенты Республики Беларусь 1) «Способ определения распространения границы смачивания и краевого угла внутри капилляров пористого материала, устройство и автоматизированная система измерения его реализующие» № 8807; 2) «Способ адаптивной фильтрации и устройство для его осуществления» № 9322 [35-А, 36-А].

2. Эффективность результатов исследований подтверждена практическим применением при решении реальных производственных задач. Результаты диссертационной работы были внедрены в технологический процесс РУП №1 ПО «Беларуськалий» в виде приборов ДВ-1 для контроля влажности удобрения KCl и прибора РД-1 для системы управления расходом раствора аминов. В технологический процесс ЗАО «Керамин Санкт-Петербург» результаты работы внедрены в виде системы регулирования эффективности сгорания газа в печи политого обжиг линии №1 посредством измерения CO в трубопроводе отвода дымовых газов с последующей коррекцией соотношения расходов «газ-воздух» на основе измерителя концентрации многокомпонентных газовых смесей, и системы контроля и дозирования подачи красителей на линии по производству облицовочной плитки (участок №2) посредством измерения расхода краски методом ЯМР.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научных журналах

- 1—А. Оробей, И. О. Первичный преобразователь импульсного ЯМР-спектрометра для систем управления / И. О. Оробей, В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2002. — Вып. X. — С. 136–138.
- 2—А. 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.
- 3—A. Magnetometer Based on a Hall-Effect Transducer / I. O. Orobei, I. F. Kuz'mitskii, D. A. Grinyuk, S. E. Zharskii, V. V. Saroka, M. V. Maksimova // Instrument and Experimental Techniques. — 2003. — Vol. 46, No. 2. — P. 271–274.
- 4—А. Измеритель параметров смачивания / С. Е. Жарский, И. О. Оробей, Д. А. Гринюк, В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2003. — Вып. XI. — С. 89–92.
- 5—А. Оробей, И. О. Измеритель концентрации составляющих газовых смесей / И. О. Оробей, Н. Я. Шишкин, В. В. Сарока // Приборы и техника эксперимента. — 2004. — №3. — С. 154–155.
- 6—A. Orobei, I. O. A Gas-Mixture Concentration Meter / I. O. Orobei, N. J. Shishkin, V. V. Saroka // Instruments and Experimental Techniques. — 2004. — Vol. 47, No. 3. — P. 415–416.
- 7—А. Оробей, И. О. Первичный преобразователь ЯМР — спектрометра И. О. Оробей, В. В. Сарока // Вестник БНТУ. — 2004. — № 4. — С. 28–31.
- 8—А. Сарока, В. В. Устройство дезинтеграции кластеров водных растворов / В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2004. — Вып. XII. — С. 95–97.
- 9—А. Анкуда, М. А. Разработка и расчет параметров спинового генератора / М. А. Анкуда, В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2005. — Вып. XIII. — С. 121–123.
- 10—А. Сарока, В. В. ЯМР - расходомер жидкостей на эффекте Джекобсона-Вангснесса / В. В. Сарока, И. О. Оробей // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2005. — Вып. XIII. — С. 127–129.
- 11—А. Сарока, В. В. ЯМР — анализатор влажности / В. В. Сарока // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2006. — Вып. XIV. — С. 109–111.
- 12—А. 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.
- 13—А. 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;

14–А. Сарока, В. В. Первичный преобразователь ЯМР - спектрометра / В. В. Сарока // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы V Республиканской науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 18–20 марта 2002 г. / Мн.: Изд. Центр БГУ. – Минск, 2002. – С. 133.

15–А. Широкодиапазонный магнитометр на датчике Холла / И. О. Оробей, Д. А. Гринюк, В. В. Сарока, С. Е. Жарский // Современные технологии, материалы, машины и оборудование: материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 16–17 мая 2002 г. / УО МГУП; – Могилев, 2002. – С. 393.

16–А. Первичный преобразователь ЯМР - спектрометра для систем управления / И. О. Оробей, Д. А. Гринюк, С. Е. Жарский В. В. Сарока // Современные технологии, материалы, машины и оборудование: материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 16–17 мая 2002 г. / УО МГУП; – Могилев, 2002. – С. 392.

17–А. Оробей, И. О. Первичный преобразователь ЯМР-спектрометра / И. О. Оробей, В. В. Сарока // Наука – образованию, производству, экономике: рефераты докладов 56-й Междунар. науч.-технич. конф., профессоров, преподавателей научных работников и аспирантов БНТУ, Минск, 4–7 февраля 2003 г. / Белорус. национал. технич. ун-т; – Минск, 2003. – С. 54.

18–А. Сарока, В. В. Модернизация магнитометра на датчике Холла / В. В. Сарока // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VI Республ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 17–19 марта 2003 г. / Мн.: Изд. Центр БГУ. – Минск, 2003. – С. 106.

19–А. Сарока, В. В. Первичный преобразователь системы стабилизации магнитного поля на датчике Холла / В. В. Сарока, С. Е. Жарский, М. В. Максимова // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 22-24 октября 2003 г. / Белорус. гос. технол. ун-т, редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2003. – С. 7.

20–А. Сарока, В. В. Метод исследования массопереноса жидких сред на эффекте ЯМР / В. В. Сарока, И. О. Оробей, А. Е. Пряхин // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 22-24 октября 2003 г. / Белорус. гос. технол. ун-т, редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2003. – С. 35.

21–А. Система стабилизации и развертки магнитного поля для радиоспектрометров / В. В. Сарока, И. О. Оробей, Е. И. Дедкова, Т. В. Леонова, А. Л. Пархимович // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 22-24 октября 2003 г. / Белорус. гос. технол. ун-т, редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2003. – С. 78.

22–А. Система стабилизации и развертки магнитного поля для радиоспектрометров / В. В. Сарока, Е. И. Дедкова, Т. В. Леонова, А. Л. Пархимович // НИРС –

2003: VIII Республ. науч. конф. студентов и аспирантов, – Минск, 9–10 декабря 2003 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; – Минск, 2003. – С. 198.

23–А. Сарока, В. В. Использование эффекта Джексона-Вангнесса для исследования массопереноса жидкостей / В. В. Сарока, С. Е. Жарский // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VII Республ. науч. конф. студентов и аспирантов, – Гомель, 22–24 марта 2004 г. / Гомельск. гос. ун-т. им. Скорины; – Гомель, 2004. – С. 105.

24–А. Сарока, В. В. Применение приборов ЯМР для повышения экономических показателей в условиях ПО "Беларуськалий" / В. В. Сарока // Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 28–29 октября 2004 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2004. – С. 340–343.

25–А. Сарока, В. В. Прибор контроля концентрации NH_3 и CO / В. В. Сарока, И. О. Оробей, Н. Я. Шишкин // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 24–26 ноября 2004 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2004. – С. 129–131.

26–А. Сарока, В. В. ЯМР-дезинтегратор кластеров водных растворов с экстремальным управлением углом нутации / В. В. Сарока // Сборник трудов молодых ученых Национальной Академии Наук Беларуси. т. IV. – Минск, 2004. – С. 272–275.

27–А. Сарока, В. В. Применение ЯМР-дезинтегратора для магнитной обработки воды при производстве керамических изделий / В. В. Сарока, И. О. Оробей // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 25–26 мая 2005 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – С. 102–104.

28–А. Сарока, В. В. ЯМР - измеритель влажности / В. В. Сарока, И. О. Оробей, А. Л. Пархимович // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 16–18 ноября 2005 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2005. – Ч.2. – С. 204–206.

29–А. Сарока, В. В. Анализ влажности способом ядерного магнитного резонанса / В. В. Сарока // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 6–8 июня 2006 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2006. – С. 19–21.

30–А. 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. – 108с. –С. 68–71.

31–А. Сарока, В. В. Использование метода ЯМР для контроля концентрации KCL в процессе флотации / В. В. Сарока // Организационно-техническое управление в межотраслевых комплексах: материалы докладов II Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 20–21 ноября 2007 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2007. – 563с.

32–А. Сарока, В. В. Влияние электромагнитного поля на структуру воды при эффекте ЯМР для процесса очистки / В. В. Сарока // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 28–29 мая 2008 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2008. – 8. – С. 192-195.

33–А. Анкуда М. А. Анализ математической модели автодинного спинного детектора ЯМР - влагомера / М. А. Анкуда, И. О. Оробей, В. В. Сарока // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы докладов Междунар. науч.-технич. конф., – Минск, 27–28 мая 2009 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2009. – С. 191–193.

Тезисы докладов

34–А. Сарока, В. В. Синтез автоматической системы управления активации реагентов процесса флотации в условиях по «Беларуськалий» / В. В. Сарока // тезисы 52-й Науч.-технич. конф. студентов, – Минск, 21-26 мая 2001 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2001. – С. 20.

Патенты и заявки на изобретения

35–А. Способ определения распространения границы смачивания и краевого угла внутри капилляров пористого материала, устройство и автоматизированная система измерения его реализующие : пат. 8807 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 N 13/02, 13/00 / С. Е. Жарский, И. О. Оробей, Д. А. Гринюк, И. Ф. Кузьмицкий, В. Н. Марцупль, В. В. Сарока ; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20030871 ; заявл. 17.09.03 ; опубл. 30.03.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1. – С. 74.

36–А. Способ адаптивной фильтрации и устройство для его осуществления: пат. 9322 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 F 17/10, H 04 B /10 / И. О. Оробей, И. Ф. Кузьмицкий, Д. А. Гринюк, С. Е. Жарский, Д. М. Медяк, В. В. Сарока, М. Ф. Лукашевич ; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20031030 ; заявл. 12.11.03 ; опубл. 30.06.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 51.



Сарока Віктар Віктаравіч

**Прылады ядзернага магнітнага рэзананса для кіравання
працэсамі хімічнай тэхналогіі**

Ключавыя словы: ядзерны магнітны рэзананс, расход, генератар нугацыі, адаптыўны лічбавы фільтр, датчык Хола.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка, даследаванне і стварэнне метадаў, алгарытмаў і сродкаў кантролю і кіравання працэсамі хімічнай тэхналогіі на аснове ефекту ЯМР.

Пры аналізе працэсаў ВА "Беларуськалій" абгрунтавана неабходнасць стварэння вымяральнага комплексу элементаў сістэм кіравання, у склад якога ўваходзяць прылады на аснове ЯМР, у выніку атрыманы метады азначэння інфарматыўнага параметру метачных ЯМР-расходамераў па разліку залежнасцяў адноснай намагнічанасці ў аналізатары для адзначаных і неадзначаных аб'ёмаў спектральным аналізам руху меткі па вымяральных участку, які дае релаксацыйныя хібнасці і хібнасці змены рэжыму плыні. Для атрымання інфармацыі аб тапаграфіі магнітнага поля ЯМР-аналізатараў распрацаваны магнітометр для вымярэння нізкачастотных магнітных палёў на пераменным току з контурам тэрмастабілізацыі і прыгнечанні сінфазнага сігналу. Прыведзены метады пабудовы метачнага ЯМР-расходамера часавага тыпу з сумяшчэннем адаптацыі сістэмы рэгістрацыі да вымяранага расходу і карэкцыі вымяральнай базы па індукцыі поля аналізатара. Распрацаваныя структурныя схемы, элементы канструкцыі і электронныя блокі радыеспектраскапічных аналізатараў і ЯМР-расходамераў. Распрацаваная матэматычная мадэль аўтадыннага спінавага дэтэктара. Выяўлены ўплыў руху вектару намагнічанасці ў шпульцы рэгістрацыі на працу аўтадына, выведзеныя формулы для разліку і разлічвання скажэнні формы лініі паглынання пры рэгістрацыі спектру ад вадкасці якая рухаецца ў поле з надоўжным градыентам. Распрацаваны метады адаптыўнага лічбавага фільтравання, а таксама вымяральнік канцэнтрацыі газавых сумесяў NH_3 і CO .

Вынікі даследаванняў ўведзены ў вытворчыя працэсы ВА "Беларуськалій" і ЗАТ "Керамін Санкт-Пецярбург".

Сарока Виктор Викторович

Устройства ядерного магнитного резонанса для управления процессами химической технологии

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, расход, генератор нутации, адаптивный цифровой фильтр, датчик Холла.

Целью работы является разработка, исследование и создание методов, алгоритмов и средств контроля и управления процессами химической технологии на основе эффекта ЯМР.

При анализе процессов ПО «Беларуськалий» обоснована необходимость создания измерительного комплекса элементов систем управления, в состав которого входят устройства на основе ЯМР, в результате получен метод определения информативного параметра меточных ЯМР-расходомеров по расчету зависимостей относительной намагниченности в анализаторе для отмеченных и неотмеченных объемов спектральным анализом движения метки по измерительному участку, определяющий релаксационные погрешности и погрешности смены режима течения. Для получения информации о топографии магнитного поля ЯМР-анализаторов разработан магнитометр для измерения низкочастотных магнитных полей на переменном токе с контуром термостабилизации и подавления синфазного сигнала. Приведен метод построения меточного ЯМР-расходомера временного типа с совмещением адаптации системы регистрации к измеряемому расходу и коррекции измерительной базы по индукции поля анализатора. Разработаны структурные схемы, элементы конструкции и электронные блоки радиоспектроскопических анализаторов и ЯМР-расходомеров. Разработана математическая модель автодинного спинового детектора. Выявлено влияние движения вектора намагниченности в катушке регистрации на работу автодина и выведены формулы для расчета и рассчитаны искажения формы линии поглощения при регистрации спектра от движущейся жидкости в поле с продольным градиентом. Разработан метод адаптивной цифровой фильтрации, а так же измеритель концентрации газовых смесей NH_3 и CO .

Результаты исследований внедрены в технологические процессы ПО «Беларуськалий» и ЗАО «Керамин Санкт-Петербург»

SUMMARY

Viktor V. Saroka

Nuclear Magnetic Resonance Devices for Governing Process to Chemical Technology

The Keywords: nuclear magnetic resonance, flow, generator nutation, adaptive digital filter, a Hall-Effect Transducer.

The Purpose of the work is a development, study and making the methods, algorithm and facilities of the checking and management process to chemical technology on base of the effect NMR.

At the analysis of processes ON «Belarusikaliy» necessity of creation of a measuring complex of elements of control systems which structure includes devices on the basis of a NMR is proved, the technique of definition of informative parameter marks NMR-flowmeters by calculation of dependence's of relative magnetization in the analyzer for noted and unmarked volumes by the spectral analysis of movement of a label on the measuring site, defining relaxation's errors and errors of change of a mode of a current is as a result received. For reception of the information on topography of a magnetic field of NMR-analyzers it is developed magnetometer for measurement of low-frequency magnetic fields on an alternating current with a contour of thermostabilization and suppression of an inphase signal. marks a NMR-flowmeter of time type with combination of adaptation of system of registration the construction technique is resulted in the measured expense and correction of measuring base on an induction of a field of the analyzer. Block diagrams, elements of a design and electronic blocks of radio spectroscopic analyzers and NMR-flowmeters are developed. The mathematical model the spin detector is developed. Influence of movement of a vector of magnetization in the registration coil for work an autodyne is revealed and formulas for calculation are deduced and distortions of the form of a line of absorption are calculated at registration of a spectrum from a moving liquid in the field with a longitudinal gradient. The method of an adaptive digital filtration, and as a measuring instrument of concentration of gas mixes NH_3 and CO is developed.

Results of researches are introduced in technological processes ON «Belarusikaliy» and Joint-Stock Company «Keramin St.-Petersburg»

Научное издание

САРОКА ВИКТОР ВИКТОРОВИЧ

**УСТРОЙСТВА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Подписано в печать 25.10.2009.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.	Заказ 667.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6.