

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

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АВТОДИННЫЙ ДЕТЕКТОР В СИСТЕМЕ КАЧЕСТВЕННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВА

Первоначальная информация о качественном составе сырья позволяет своевременно скорректировать параметры технологического процесса и своевременно адаптировать систему управления. Существующие стандартные методы определения состава вещества являются чаще всего разрушающими и требуют значительного времени для проведения анализа. Метод ЯМР позволяет устранить подобные недостатки.

В работе описан ЯМР-анализатор качественного состава веществ, принцип работы которого состоит в следующем. Ампула с образцом помещается между полюсами постоянного магнита внутри катушки регистрации, которая одновременно является и источником радиочастотного воздействия [1]. Под воздействием радиочастотного поля начинает наблюдаться сигнал ЯМР. Полученный сигнал поступает на спиновый детектор. В качестве спинового детектора использована параметрическая автодинная схема. Структурная схема анализатора представлена на рисунке 1.

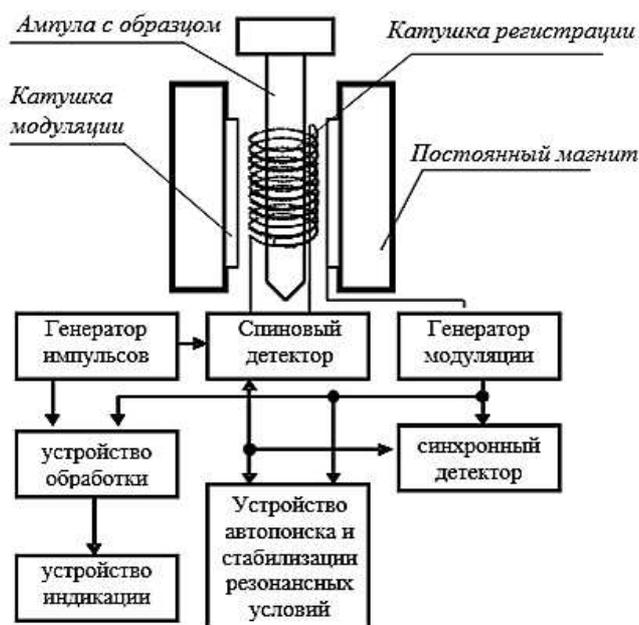


Рисунок 1 – Структурная схема ЯМР-анализатора состава вещества

Ампула с образцом помещается между полюсами постоянного магнита внутри катушки регистрации, которая одновременно является составной частью системы катушек Блоха.

Радиочастотная часть спектрометра выполнена на основе скрещенных катушек Блоха, оси которых расположены под углом  $90^\circ$ . Рабочий объем кюветы с образцом находится в центре скрещенных катушек Блоха в пределах пятна однородности поля.

Под действием статического магнитного поля постоянных магнитов образец получает некоторую макроскопическую намагниченность. При этом на катушку подается радиочастотный сигнал, который воздействует на магнитные моменты ядер по средствам своего магнитного поля, что приводит к нутации векторов ядерной намагниченности вещества в ампуле. В результате под действием вектора ядерной намагниченности в регистрирующей обмотке будет наводиться некоторый электрический сигнал, зависящий от свойств и концентрации ядер вещества в образце.

В качестве спинового детектора в установке предложен автодин с параметрическим возбуждением. Схема автодина с параметрическим возбуждением может быть условно разделена на несколько функциональных узлов: колебательный контур, генератор накачки и цепь обратной связи [2].

Схема параметрического автодина приведена на рисунке 2. В рассматриваемом генераторе в качестве переменного реактивного элемента колебательного контура используется емкость р-п перехода полупроводникового варикапа VD1; в качестве генератора накачки используется схема возведения в квадрат, которая построена на DA1.

Поскольку в качестве опорного сигнала для параметрического изменения емкости используется непосредственно сигнал колебательного контура на удвоенной частоте, которая получается с выхода схемы умножения, то тем самым обеспечивается совпадение фаз. Обратная связь реализуется через подачу сигнала после усиления на схеме DA2 на управляющий электрод варикапы VD1.

Зависимость емкости варикапа VD1 от приложенного обратного напряжения является обратно пропорциональной величиной  $C = 1 / (1 + U_{обр})$ . Поскольку обратное напряжение представлено гармоникой на частоте накачки и изменение емкости будет однозначно пропорционально сопоставляться изменению напряжения, то значение емкости варикапа можно записать в виде [2]:

$$C = \frac{C_0}{1 + m \cdot \cos 2 \omega t'}$$

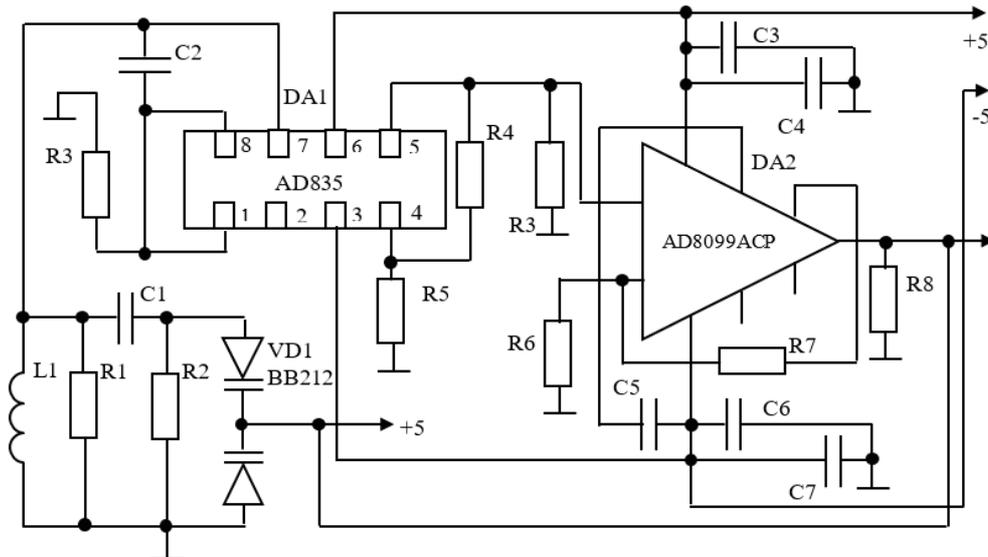


Рисунок 2 – Электрическая принципиальная схема параметрического автодина

где  $m = \frac{\Delta C}{2C} = \frac{C_{VD1max} - C_{VD1min}}{C_{VD1max} + C_{VD1min}}$  – коэффициент модуляции емкости,  $C_{VD1max}$  – значение емкости варикапа при максимальном отклонении от фиксированного обратного напряжения;  $C_{VD1min}$  – значение емкости варикапа при минимальном отклонении от фиксированного обратного напряжения.

Тогда для колебательного контура можно будет получить:

$$\frac{1}{L1} u + \frac{1}{R1} \frac{du}{dt} + \frac{C_0 C1}{C1(1 + m \cos 2 \omega t) + C_0} \frac{d^2 u}{dt^2} = 0.$$

При малой нелинейности емкости и малой глубине модуляции параметра можно ограничиться рассмотрением гармонического приближения и искать решение  $u(t)$  как:

$$u = a(t) \sin \omega t + b(t) \cos \omega t,$$

где  $a(t)$  и  $b(t)$  – медленно меняющиеся во времени амплитуды искомого колебания.

Поскольку на систему не действует внешняя периодическая сила и частота автоколебаний равна  $\omega_0$  а не  $\omega$ , то (4) можно будет записать в виде:

$$\omega_0^2 (2 + m \cdot \cos 2 \omega_0 t) a \sin \omega_0 t - \omega_0^2 a \sin \omega_0 t + 2 \omega_0 \frac{da}{dt} \cos \omega_0 t = 0,$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L1C_0}}$ .

Введем безразмерный параметр  $\tau = \omega_0 t$ , а производную будем брать по времени. Тогда решение уравнение (6) можно представить:

$$a(t) = a \cdot e^{-\frac{K_1 t}{K_2}},$$

где  $K1 = \omega_0^2(1 + m \cdot \cos 2\tau) \sin \tau$ ,  $K2 = 2\omega_0 \cos \tau$ .

В момент времени  $t = 0$  амплитуда определяется шумом Найквиста:

$$a(0) = \sqrt{4kTR\Delta f},$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания сигнала,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура,  $R$  – общее сопротивление контура.

Разработанный автодинный генератор обеспечивает повышенную точность измерений в сравнении с классическими схемами автодинов, которые работают на усилителях с положительной обратной связью, за счет повышения помехоустойчивости.

Предложенная модель генератора имеет параметрическую обратную связь с частотой накачки равной удвоенной частоте сигнала, которая необратимо приводит к повышению соотношения полезного сигнала к шумовой составляющей.

Применение подобных анализаторов ЯМР с параметрическим автодинным детектором позволяет определять качественные характеристики различных веществ с высокой точностью, быстродействием получения результата, отсутствием необходимости предварительной подготовки анализируемого образца.

Всё это дает возможность использования подобных систем неразрушающего анализа состава вещества для построения непрерывных систем автоматического контроля и регулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. ЯМР-спектрометр неразрушающего анализа состава вещества / М. А. Анкуда // Труды БГТУ. Сер. В.И., Физико-математические науки и информатика. – Минск : БГТУ, 2010. – Вып. XVIII. – С. 121-124.

2. Анкуда, М. А. Модель автодина с параметрическим возбуждением / М. А. Анкуда, И. О. Оробей // Труды БГТУ. – Минск: БГТУ, 2016. – № 6 (188) 2016 год. – С. 127-131.

УДК 62-52621.923

А.А. Лялько, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

#### ПОНИЖЕНИЕ ПОРЯДКА ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Моделирование сложных, содержащих сотни тысяч уравнений моделей даже на супер-ЭВМ – непростая задача. Один из основных способов сокращения размерностей системы и времени моделирования сложных систем – «упрощение», т. е. пренебрежение какими-то