

*А.Г. ДЬЯКОВ*, канд. техн. наук, доц. ХГАТП (г. Харьков),  
*А.Ф. ДАНИЛЕНКО*, канд. техн. наук, доц. НТУ “ХПИ” (г. Харьков)

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЯМР СПЕКТРОМЕТРЕ

Розглянуто питання що до підвищення точності вимірювання сигналів у спектрометрі ЯМР. Найбільшу увагу приділено вимірюванню часу спін-спінової релаксації, як одного з основних показників, що використовуються при дослідженнях харчових продуктів. На основі аналізу вимог до точності вимірювання параметрів обґрунтована і запропонована структура управління спектрометром ЯМР.

The approaches to construction of control system to NMR – spectrometer are considered. The most attention is given to the measurement of spin-spin relaxation as one of principal indices which are used by the research of food products. On the base of the analysis of demands to the precision of parameters` measurement the structural scheme of control system to NMR – spectrometer is grounded and proposed.

При исследовании пищевых продуктов методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) необходимо производить измерения амплитуды сигнала для определения значения  $T_2$  (спин-спиновая релаксация) с целью оценки подвижности воды в исследуемых образцах [1].

**Постановка проблемы.** Для точного определения амплитуды сигнала необходимо зафиксировать его форму и амплитуду изменения и преобразовать с помощью АЦП в цифровой код. Обычно измерение сигнала производится на фоне сигналов помех, возникающих в канале передачи сигнала от измерительной катушки до фиксатора сигнала с полным сохранением всего спектрального состава, что значительно усложняет задачу измерения.

Кроме того, желательно знать и шумовые характеристики измерительного канала для последующей оценки результатов их влияния на показатели в исследуемом сигнале. Применяемый АЦП типа К1113ПВ1 [2] позволяет фиксировать поступающий сигнал с частотами, лежащими в диапазоне от нуля до 30 кГц, чего для исследования шумовых характеристик сквозного канала передачи сигнала может оказаться недостаточно.

Преобразователь сигналов, построенный на основе микросхемы К107ПВ2, существенно расширяет частотный диапазон проведения измерений, однако имеет малый динамический диапазон.

Рассмотрим точностные характеристики каналов передачи данных, построенных на основе вышеуказанных преобразователей. Канал передачи данных, построенный на основе микросхемы К1113ПВ1, может фиксировать измеряемый сигнал в диапазоне 0 – 10 В, с дискретностью 0,01 В, а на основе микросхемы К11107ПВ2 – в диапазоне 0 – 2 В, с дискретностью 0,07 В. Однако, если учесть, что максимальный уровень сигнала с предварительного

усилителя доходит до 8 В, то применение микросхемы К11107ПВ2 без снижения точности измерения невозможно. В тоже время применение микросхемы К1113ПВ1 не позволяет уверенно фиксировать высокочастотную составляющую, как полезного сигнала, так и шума. Поэтому вопросы повышения точности измерительного канала [3, 4], расширения его частотного диапазона и построение на основе существующих современных элементов являются весьма актуальными.

**Целью работы** является рассмотрение возможных подходов к повышению точности канала передачи данных с одновременным расширением динамического и частотного диапазона измеряемого сигнала.

**Решение задачи.** Связь между величиной измеряемого сигнала и параметрами измерителя имеет вид:

$$A_i = A_0 \cdot \exp((-2/T_2) \cdot \tau_i), \quad (1)$$

где  $A_i$  – величина измеряемого сигнала,  $A_0$  – величина, определяемая свойствами исследуемого образца,  $T_2$  – время спин-спиновой релаксации,  $\tau_i$  – интервал между зондирующими импульсами.

Для нахождения  $T_2$  используется метод наименьших квадратов с предварительным преобразованием (1) к линейному выражению.

Преобразуем (1) к виду:

$$\log A_i = \log A_0 + 0,434 \cdot (-2/T_2) \cdot \tau_i. \quad (2)$$

Проведя соответствующие замены, запишем (2) в виде:

$$y_i = y_0 + k \cdot \tau_i. \quad (3)$$

Выражение (3) является линейным относительно  $\tau_i$ , и после проведения необходимых измерений значения  $k$  и  $T_2$  находятся методом наименьших квадратов по стандартным алгоритмам.

Однако, если аппаратными средствами предварительно получить значение  $\log A_i$ , то диапазон измеряемых значений для АЦП существенно сократится. Для рассматриваемого случая от  $-0,3$  до  $0,9$  В.

Структурная схема преобразователя при подобном подходе примет вид, указанный на рис.1. Работа схемы происходит следующим образом. После детектирования сигнала с выхода измерительной системы спектрометра ЯМР, сигнал  $U_{вх}$  подается на логарифмический блок, с выхода которого сигнал  $U_1$  масштабируется одноименным блоком и в виде сигнала  $U_2$  поступает на АЦП. После преобразования в нем получается код  $N$ , который через устройство сопряжения поступает в ЭВМ и записывается в память компьютера.

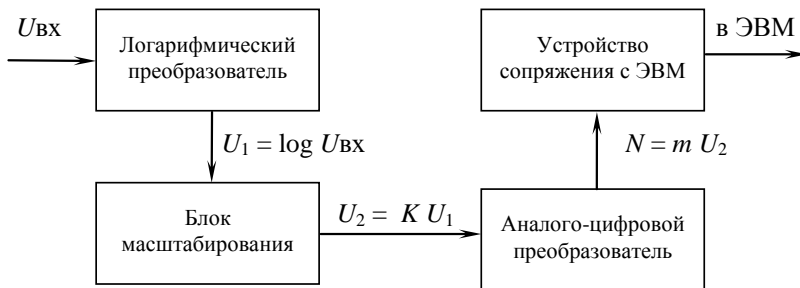


Рис.1. Структурная схема преобразователя сигнала ЯМР

Реализация логарифмического блока возможна на основе двух подходов. Первый заключается в построении блока на основе операционного усилителя. В этом случае к контуру обратной связи усилителя подключается транзистор для получения логарифмической зависимости выходного сигнала от входного [5]. Известно, что при определенных допущениях напряжение база-эмиттер транзистора может быть представлено в виде:

$$U_{бэ} = (k \cdot T / e) \cdot \ln(I / I_0),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – заряд электрона;  $I$  – ток коллектора;  $I_0$  – обратный ток утечки. Если подключение элементов – транзистора и усилителя выполнено по схеме, приведенной на рис. 2, то выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  можно будет представить в виде:

$$U_{\text{вых}} = a \cdot \ln U_{\text{вх}} + b, \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, определяемые типом транзистора и параметрами операционного усилителя.

По результатам моделирования на EWB 5.0 для усилителя К140УД14 и транзистора КТ315 выражение (6) имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = 0.02607 \cdot \ln U_{\text{вх}} + 0.579. \quad (7)$$

Из (7) можно определить  $y_i = 38.35 \cdot (U_{\text{вых}_i} - 0.579)$ . Подставляя значение  $y_i$  в выражение (3) посредством вычислений определяем искомые значения необходимых параметров.

Второй подход заключается в использовании специализированных высокочастотных логарифмических усилителей (например, AD 8307 AR), которые подключаются к измерительной схеме до детектора, поскольку имеют высокочувствительный внутренний детектор [6]. Выходной сигнал данного усилителя (рис. 2) представляется в виде:

$$U_{\text{вых}} = k \cdot \log U_{\text{вх}},$$

где  $k$  – масштабный коэффициент.

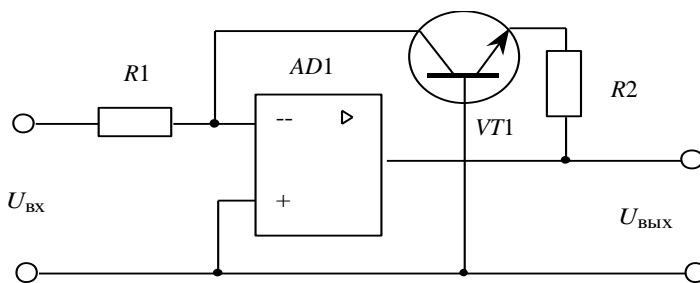


Рис. 2. Логарифмический блок

Учитывая, что в рассматриваемом случае в усилителе реализована функциональная зависимость десятичного логарифма, в программе для определения значения  $T_2$  необходимо внести соответствующую коррекцию. Второй подход является более предпочтительным, так как точность воспроизведения функциональной зависимости гарантируется фирмой-изготовителем и не требует выполнения дополнительных регулировочных операций. Кроме того, использование внутреннего высокочастотного детектора позволяет обрабатывать слабые сигналы, которые невозможно преобразовать обычным диодным детектором из-за особенности его характеристики.

**Выводы.** 1. На основе анализа выражений для определения времени спин-спиновой релаксации  $T_2$  пищевого продукта при анализе в спектрометре ЯМР и характеристик АЦП с целью расширения динамических диапазонов измеряемых сигналов, предложено применение логарифмических усилителей. 2. Показано возможность построения логарифмического усилителя с использованием в цепи обратной связи операционного усилителя транзистора. 3. Проведено моделирование данной схемы и определены соотношения между входными и выходными сигналами усилителя. 4. Рассмотрена возможность применения специализированных логарифмических усилителей и проведен анализ их преимуществ и недостатков при использовании в системе измерения спектрометра ЯМР.

**Список литературы:** 1. Феррар Т., Беккер Э. Импульсная Фурье-спектроскопия. – М.: Мир, 1973. – 164 с. 2. Федорков Б. Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с. 3. Олсон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации процесса управления. – СПб.: Невский диалект, 2002. – 254 с. 4. Дьяков А. Г., Даниленко А. Ф. Информационно-измерительная система установки ЯМР // Вестник НТУ "ХПИ". – Вып. 19. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2003. – С. 127–131. 5. Джонс М.Х. Электроника – практический курс. – М.: Постмаркет, 1999. – 528 с. 6. User Manuals фирма Analog Device. AD8307, 2001. – P. 25– 44.

Поступила в редакцию 05.04.2005