

# ПИТАННЯ УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.314.7

А.Ф. Даниленко<sup>1</sup>, А.Г. Дьяков<sup>2</sup>, С.Н. Нечаусов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*

<sup>2</sup> *Харьковский государственный университет питания и торговли, Харьков*

<sup>3</sup> *Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## АЛГОРИТМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБРАЗЦА В ЯМР-СПЕКТРОМЕТРЕ

*Проведен анализ влияния параметров измерительной установки ЯМР-спектрометра на интенсивность принимаемого эхо-сигнала. Предложен алгоритм оптимизации позиционирования ампулы с образцом в магнитном поле катушки. Применен поиск экстремума сигнала в установке ЯМР-спектрометра на основе чисел Фибоначчи с целью получения максимальной амплитуды принимаемого эхо-сигнала. Рассмотрена возможность реализации данного алгоритма на микроконтроллере и введения устройства позиционирования в систему управления ЯМР-спектрометром.*

**Ключевые слова:** измерительная установка, ЯМР-спектрометр, эхо-сигнал, алгоритм оптимизации, позиционирование ампулы, магнитное поле, поиск экстремума, числа Фибоначчи, микроконтроллер, устройство позиционирования.

### Введение

**Постановка проблемы.** Одним из параметров, который необходимо анализировать при исследовании образцов на установке ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является его расположение в магнитном поле. Определение наилучшей точки положения образца позволяет значительно повысить амплитуду эхо-сигнала, повысить точность измерения его параметров и сократить время на получение информации о структуре исследуемого вещества.

**Анализ литературы.** Образец с исследуемым веществом при проведении исследований пищевых продуктов на установке ЯМР-спектрометра находится одновременно под действием постоянного и переменного магнитного поля [1]. Величина постоянного магнитного поля определяет частоту и интенсивность переменного магнитного поля, которое должно создаваться измерительной катушкой ЯМР-спектрометра. Основными параметрами исследования являются времена спин-спиновой ( $T_2$ ) и спин-решеточной релаксации ( $T_1$ ) определяемых из следующих соотношений:

$$T_1 = -\frac{\Delta T_i}{\ln(1 - A_i/A_0)}; \quad T_2 = -\frac{2(\Delta \tau_i)}{\ln(A_i/A_0)}, \quad (1)$$

где  $\Delta T_i$  – интервал между сериями зондирующих импульсов;  $\Delta \tau_i$  – интервал времени между зондирующими импульсами;  $A_0$  – начальная амплитуда импульса;  $A_i$  – амплитуда импульса при  $i$ -м интервале между зондирующими импульсами.

Из соотношений (1) видно, что ошибка в определении амплитуды импульсов сказывается на точ-

ности определения времен релаксации. Поэтому образец должен быть установлен так в магнитном поле катушки, чтобы амплитуда принимаемого сигнала была максимальной. В этом случае будет обеспечено наилучшее соотношение сигнал-шум и точность определения времен релаксации будет наилучшей. В большинстве случаев позиционирование образца обеспечивается путем визуального наблюдения за амплитудой сигнала и последующей корректировкой положения образца в измерительной катушке [2].

**Целью работы** является определение, выбор и обоснование алгоритма работы устройства позиционирования образца в магнитном поле катушки для получения максимальной амплитуды принимаемого сигнала с возможностью реализации его на микроконтроллере и дальнейшем введением его в систему управления ЯМР-спектрометром.

### Результаты исследований

В [3] приведено соотношение которое позволяет оценить амплитуду принимаемого сигнала ЯМР в зависимости от параметров спектрометра:

$$U = Q\gamma B^2 \chi n V_e / L_k, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение, определяющее резонансную частоту изотопа в магнитном поле;  $Q$  – добротность измерительного контура спектрометра;  $B^2$  – суммарная магнитная индукция, образующая магнитными моментами протонов после возбуждения образца;  $\chi$  – магнитная спиновая восприимчивость;  $n$  – число витков приемной катушки;  $V_e$  – объем исследуемого образца, на который

воздействует высокочастотное поле;  $L_k$  – длина приемной катушки.

Из выражения (2) следует, что при неизменных параметрах измерительной системы спектрометра точка позиционирования образца влияет на величину принимаемого сигнала. Поэтому систему управления спектрометром целесообразно дополнить блоком позиционирования с реализованным в нем алгоритмом определения наилучшей точки установки образца в магнитном поле катушки.

Для оценки влияния высоты расположения образца в катушке предварительно были проведены опыты с разным объемом заполнения ампулы. Они заполнялись водой на высоту 6,5; 10; и 12,5 мм. Дальше путем постепенного перемещения ампулы с образцом в катушке определялось положение, при котором выходной эхо-сигнал был максимальным. Результаты обработки экспериментальных данных, в относительных единицах, приведены на рис. 1. По оси ординат откладывались значения амплитуды сигнала, а по оси абсцисс отложено число оборотов механизма перемещения ампулы с образцом. Один оборот механизма перемещения соответствует смещению образца на 1,5 мм.

Приведенная на рис. 1, кривая 1 показывает график изменения амплитуды сигнала в зависимости от положения образца в поле катушки при заполнении ампулы на 6,5 мм. Графики 2, 3 – соответственно заполнению ампулы на 10 и 12,5 мм соответственно.

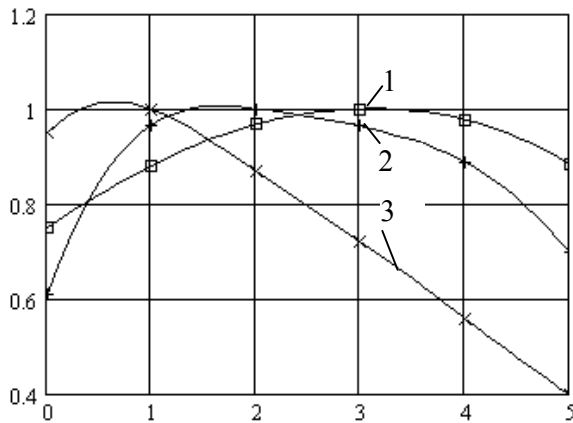


Рис. 1. Зависимость амплитуды образца от положения ампулы при различной степени её заполнения

Из приведенных графиков видно, что при заполнении ампулы на 10 мм максимальная относительная амплитуда сигнала достигает максимума при установлении ампулы на высоте приблизительно 3 мм от начального значения. При этом максимальное значение амплитуды достигается примерно в средней части интервала перемещения. Это значение и является наиболее целесообразным при проведении измерений свойств вещества. В свою оче-

редь наибольшее абсолютное значение сигнала было получено при заполнении ампулы на 12,5 мм. Однако, погрешности позиционирования, в этом случае значительно больше, из-за большей остроконачности изменения зависимости сигнала от положения ампулы с исследуемым образцом в поле катушки ЯМР-спектрометра.

Исследования показали, что при анализе твердых образцов, которые не могут полностью заполнить ампулу также целесообразно не превышать уровень 10 мм, потому что возможен выход образца за границы однородности магнитного поля создаваемого постоянным магнитом.

В качестве алгоритма для определения наилучшего положения образца была исследована возможность использовать алгоритм поиска экстремума на основе использования чисел Фибоначчи. Числа Фибоначчи определяются следующей последовательностью [4]:

$$F_0 = F_1 = 1 ; F_N = F_{N-1} + F_{N-2} ; N > 1 .$$

Использование чисел Фибоначчи в технических устройствах позволяет реализовать алгоритм для организации оптимального поиска экстремума функции одной переменной. Доказано, что если требуется найти положение экстремума функции  $H(x)$  определенной на интервале  $(a - b)$  с абсолютной ошибкой не превышающей:

$$\Delta = \frac{b - a}{F_N} ,$$

где  $F_N$  –  $N$ -ое число Фибоначчи, то для отыскания положения экстремума достаточно вычислить не более  $N$  значений функции  $H(x)$ .

Алгоритм определения положения наилучшей точки для проведения измерения состоит из следующих этапов:

1. Вводится начальная  $a$  и конечная  $b$  точки позиционирования образца. задается интервал  $\Delta$ , в пределах которого необходимо найти наилучшую точку позиционирования образца. Для реальных графиков, представленных на рис. 1, величину  $\Delta$  можно принять равной 0,1 от общего интервала  $(a - b)$  измерения.

2. Определяется число Фибоначчи, которое будет использоваться при поиске точки максимума из выражения:

$$F_N = \frac{b - a}{\Delta} .$$

3. Определяется шаг поиска по формуле:

$$\Delta = \frac{b - a}{F_N} .$$

4. Определяем значение амплитуды  $A(a)$  в начальной точке интервала.

5. Определяем координату первой точки проведения измерения  $a$ :

$$X^1 = a + \Delta_N * F_{N-1} \dots$$

6. Сравниваем значение полученной амплитуд в точке  $X^1$  и  $a$ . Если  $A(X^1) > A(X_n)$  то шаг считается удачным и следующая точка  $\Delta$  определяется из выражения:

$$X^2 = X^1 + \Delta_N * F_{N-3} \dots$$

Если  $A(X^1) < A(X_n)$  то шаг неудачный - следующая точка  $\Delta$  определяется из выражения:

$$X^2 = X^1 - \Delta_N * F_{N-3} \dots$$

7. Последующие шаги выполняются с уменьшающейся величиной шага

$$\Delta X^i = \pm \Delta_N * F_{N-2-i}$$

по такому правилу: если предыдущий шаг удачный, то следующий  $(i + 1)$  выполняется из точки

$$X^{i+2} = X^{i+1} + \Delta X^i ;$$

если шаг неудачный то из точки -

$$X^{i+2} = X^{i+1} - \Delta X^i ;$$

Указанный процесс продолжается до тех пор пока не будут исчерпаны все числа Фибоначчи в убывающей последовательности.

Проведенные исследования и измерения дают возможность поставить вопрос о разработке автоматической системы построенной на основе микроконтроллера для установки образца в зону максимального сигнала.

В качестве первого варианта подобной системы можно так же рассмотреть вариант системы, которая будет давать рекомендации исследователю для установки образца при проведении ее в ручном режиме.

## Выводы

Проведен анализ влияния степени заполнения ампулы веществом для исследования величины сигнала ЯМР.

Установлено, что для данной конфигурации измерительной системы наиболее целесообразно проводить заполнение ампулы на высоту 10 мм.

Определена степень влияния положения образца на амплитуду выходного сигнала ЯМР-спектрометра.

Предложены способ и алгоритм минимизации времени и усталости образца при подготовке эксперимента. Отмечено, что применение данного алгоритма позволяет на 40 % снизить затраты времени на позиционирование образца и повысить стабильность условий его проведения.

## Список литературы

1. Вашман А.А. Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике / А.А. Вашман, И.С. Прохин. – М.: Наука, 1979. – 223 с.
2. Дьяков А.Г. Автоматизированный выбор параметров измерительной установки ЯМР / А.Г. Дьяков, А.Ф. Даниленко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 40. – С. 65-69.
3. Неронов Ю.И. Ядерный магнитный резонанс в томографии и в спектральных исследованиях. Учебное пособие / Ю.И. Неронов, З. Гарайбех. – С-Пб.: Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптика (Технический университет), 2003. – 84 с.
4. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. Изд. 2-е. – М.: Химия, 1975. – 576 с. (серия «Химической кибернетики»).
5. Олсон Г. Цифровые системы автоматизации процесса управления / Г. Олсон, Д. Пиани. – СПб.: Невский диалект, 2002. – 254 с.
6. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 600 с.
7. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. Пер. с англ. – М.: Мир. 1979. – 302 с.

Надійшла до редколегії 25.07.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

## АЛГОРИТМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗРАЗКА В ЯМР-СПЕКТРОМЕТРІ

О.Ф. Даниленко, О.Г. Дьяков, С.М. Нечаусов

Проведено аналіз впливу параметрів вимірювальної установки ЯМР-спектрометра на інтенсивність сигналу луни, що приймається. Запропоновано алгоритм оптимізації позиціонування ампули із зразком в магнітному полі котушки. Застосовано пошук екстремуму сигналу в установці ЯМР-спектрометра на основі чисел Фібоначчі з метою отримання максимальної амплітуди сигналу луни. Розглянута можливість реалізації даного алгоритму на мікроконтролері і введення пристрою позиціонування в систему управління ЯМР-спектрометром.

**Ключові слова:** вимірювальна установка, ЯМР-спектрометр, луна-сигнал, алгоритм оптимізації, позиціонування ампули, магнітне поле, пошук екстремуму, числа Фібоначчі, мікроконтролер, пристрій позиціонування..

## ALGORITHM OF POSITIONING OF STANDARD IN NMR-SPECTROMETER

A.F. Danilenko, A.G. Dyakov, S.N. Nechausov

The analysis of influencing of parameters of the measuring setting is conducted NMR-spectrometer on intensity of the adopted echo-signal. The algorithm of optimization of positioning of ampoule is offered with a standard in the magnetic field of spool. The search of extremum of signal is applied in setting NMR-spectrometer on the basis of numbers Fibonacci with the purpose of receipt of maximal amplitude of the adopted echo-signal. Marketability this algorithm is considered on microcontroller and introductions of device of positioning to the control system of NMR-spectrometer.

**Keywords:** the measuring setting, NMR-spectrometer, echo-signal, algorithm of optimization, positioning of ampoule, magnetic field, search of extremum, Fibonacci numbers, microcontroller, device of positioning.