

Електронні системи

УДК 621.316.72

А.В. Заграничний, В.В. Рогаль, канд. техн. наукНаціональний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Способи формування зондувальної напруги в пристроях ядерного магнітного резонансу

Розглянуто основні види зондувальної напруги для пристроїв ядерного магнітного резонансу. Проаналізовано способи отримання цієї напруги, вказані їх недоліки та переваги. На основі математичних розрахунків зроблено висновок, що отримати промодульовану зондувальну напругу можливо застосовуючи ефект биття. Показано, що найбільш ефективно використовувати широтно-імпульсну модуляцію та ключовий режим роботи перетворювачів для вирішення поставленої задачі. Бібл. 5, рис. 7.

Ключові слова: зондувальна напруга, ядерний магнітний резонанс, амплітудно-імпульсна модуляція, широтно-імпульсна модуляція, інвертор, биття.

Вступ

В даний час одним з найбільш інформативних методів вивчення структури і властивостей речовин є метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР) [2]. Суть методу полягає в явищі резонансного поглинання ядрами з спіном 1/2, що перебувають в магнітному полі H_0 (спіновою системою), енергії радіочастотного поля H_1 , з подальшим вивільненням цієї енергії після припинення дії поля H_1 .

Для отримання найбільш повної картини про структуру і властивості молекул найефективніше використовувати сигнал Хана, який повинен відповідати певним вимогам [5]. Вибір способу формування зондувальної напруги є досить актуальним завданням.

Види радіочастотних зондувальних імпульсів

Для проведення ЯМР експерименту парамагнітна ядерна спінова система поміщається в постійне магнітне поле (МП) індукцією B . Величина цього поля визначає частоту магнітного резонансу ω_0 :

$$\omega_0 = \gamma \cdot B \quad (1)$$

де γ - гіромагнітне співвідношення ядра. В умовах рівноваги ядерна намагніченість спрямована уздовж поля. За допомогою змінного МП, частота якого дорівнює або близька до частоти магнітного резонансу (1), можна відхилити намагніченість від напрямку поля, перевівши тим самим ядерну спінову систему в контрольований нерівноважний стан.

Для вимірювання швидкості поперечної релаксації в спінових системах з неоднорідним розширенням спектральної лінії використовуються різні імпульсні радіочастотні послідовності [2]:

- послідовність Карра-Парселла;
- послідовність Хана;
- модифікована послідовність Карра-Парселла-Мейбума-Гіла;
- послідовність Карра-Парселла з випадковою фазою змінного МП і т.д.

Найбільш поширена і ефективна - послідовність Карра-Парселла, яка є модифікацією послідовності Хана. Для вимірювання спин-спінової (поперечної) релаксації Хан запропонував на спінову систему впливати імпульсною послідовністю $90-t-180$ (послідовність Хана). $90(180)$ градусний імпульс значить, що вектор намагніченості відхиляється на $90(180)$ градусів від напрямку постійного поля.

В момент часу $2t$ після початку 90 градусного імпульсу формується, так зване, спінове відлуння (рис.1).

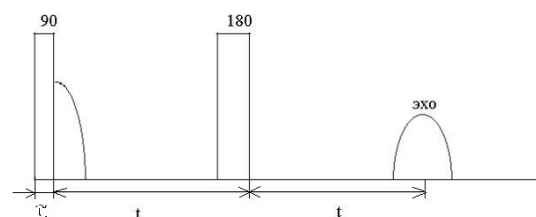


Рис. 1. Послідовність Хана

Для збільшення співвідношення сигнал/шум і покращення динаміки спінової системи застосовується модуляція магнітного поля - замість прямокутного імпульсу використовується сигнал $s(t)$ (рис.2, б), який є амплітудно-модульованим гармонічним сигналом, промодульованим за законом $1 + \cos(t)$.

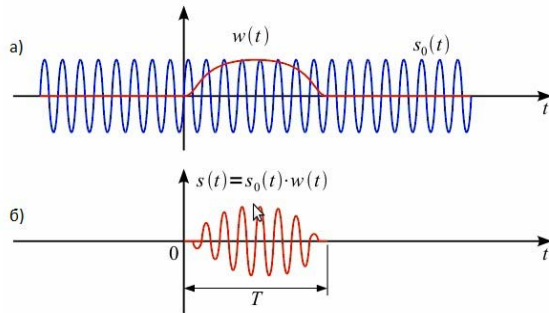


Рис. 2. Форма зондувального сигналу: а) модулююча і модульована функції; б) амплітудно-модульований гармонічний сигнал

Способи формування зондувального сигналу

Сформувати сигнал $s(t)$ можна за допомогою амплітудно-імпульсної модуляції (АІМ), биття або широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). При використанні АІМ сигнал $s(t)$ можна представити у вигляді [3]:

$$s(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t,$$

$$s(t) = A_0 \left[\cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right]. \quad (2)$$

де ω_0 – частота несучої, рівна частоті магнітного резонансу, Ω - частота модуляції, m - коефіцієнт модуляції (для модульованої послідовності Хана $m=1$), A_0 - амплітуда сигналу. Для формування такого сигналу необхідно використовувати три генератора синусоїдальних напруг з частотою ω_0 , $\omega_0 + \Omega$, $\omega_0 - \Omega$.

Недоліками цього способу є низький коефіцієнт корисної дії пристрою, несинусоїдальність вихідної напруги генераторів, що негативно позначається на результуючому сигналі $s(t)$.

При використанні биття (рис.3, а) [1] зондувальний сигнал $s(t)$ можна представити в вигляді:

$$s_6(t) = A_0 \sin(\omega_1 t) + A_0 \sin(\omega_2 t) \quad (3)$$

Частота сигналу $s_6(t)$ в цьому випадку рівна $\omega_0 = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$, а його амплітуда змінюється по гармонічному закону з частотою $\Omega_1 = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$.

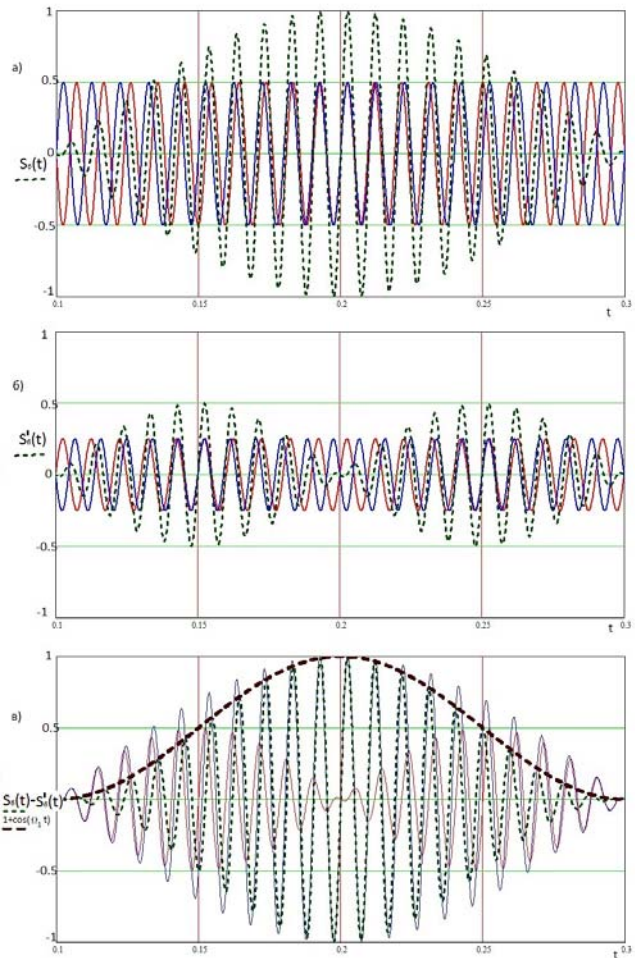


Рис. 3. Отримання зондувальної напруги за допомогою биття: а) биття амплітудою 1 та періодом T ; б) биття амплітудою 0,5 та періодом $0,5T$; в) зондувальна напруга

Найдемо різницю сигналів $s(t)$ і $s_6(t)$, прийнявши, що $\Omega = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$ і $\omega_0 = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$:

$$\begin{aligned} s_6(t) &= A_0 \left\{ \cos \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) + \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \right]t + \right. \\ &+ \frac{1}{2} \cos \left[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) - \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2) \right]t - A_0 \sin \omega_1 t - A_0 \sin \omega_2 t \left. \right\} = \\ &= A_0 \left[\cos \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{1}{2} \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} \cos \omega_2 t - \sin \omega_1 t - \sin \omega_2 t \right] = \\ &= A_0 \left[\cos \frac{1}{2} \omega_1 t \times \cos \frac{1}{2} \omega_2 t - \sin \frac{1}{2} \omega_1 t \times \sin \frac{1}{2} \omega_2 t + \frac{1}{2} \sin(\omega_1 t + 90^\circ) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \sin(\omega_2 t + 90^\circ) - \sin \omega_1 t - \sin \omega_2 t \right] \end{aligned}$$

Після тригонометричних перетворень:

$$\begin{aligned} s_6(t) &= \frac{1}{2} A_0 \sin(\omega_2 t) + \frac{1}{2} A_0 \cos((2\omega_1 - \omega_2)t) \\ &= \frac{1}{2} A_0 \sin(\omega_2 t) + \frac{1}{2} A_0 \cos((2\omega_1 - \omega_2)t + \pi) = \\ &= s_3(t) + s_4(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Сигнал $s_6(t)$ являє собою биття з частотою $\Omega_2 = \frac{1}{2}(2\omega_1 - \omega_2 - \omega_2) = \omega_1 - \omega_2$, яка в два рази перевищує Ω_1 . При виконанні умови $\Omega_1 = 2\Omega_2$ частоти сигналів $s_3(t)$ і $s_4(t)$ можуть бути вибрані довільно.

Таким чином, для отримання обвідної за законом $1 + \cos(t)$ необхідно використовувати чотири генератора синусоїдальних коливань. Два генератора, формуючих сигнали $s_1(t) = A_0 \sin(\omega_1 t)$ і $s_2(t) = A_0 \sin(\omega_2 t)$, повинні працювати на близьких частотах ω_1, ω_2 без зсуву фаз. Два інших генератора, формуючих сигнали $s_3(t) = \frac{1}{2} A_0 \sin(\omega_3 t)$ і $s_4(t) = \frac{1}{2} A_0 \sin(\omega_4 t - \pi)$ також повинні працювати на близьких частотах ω_3, ω_4 (рис.3, б). Зондувальний сигнал $s(t)$

формується як різниця сигналів $s_6(t)$ і $s_5(t)$ (рис.3, в). В цьому випадку, окрім недоліків AIM, система є ще більш громіздкою, оскільки вимагає використання додаткового 4-го генератора.

Для проведення геолого-геофізичних досліджень нафтових і газових свердловин потрібні зондувальні сигнали з піковою потужністю близько 300 Вт [4], що робить доцільним використання ключового режиму роботи перетворювача. При цьому зондувальний сигнал може бути сформований на основі широтно-імпульсної модуляції з подальшою фільтрацією. Досить просто такий спосіб можна реалізувати за допомогою мостового інвертора. На рис.4 наведена розроблена за допомогою Matlab Simulink модель мостового інвертора з ШІМ.

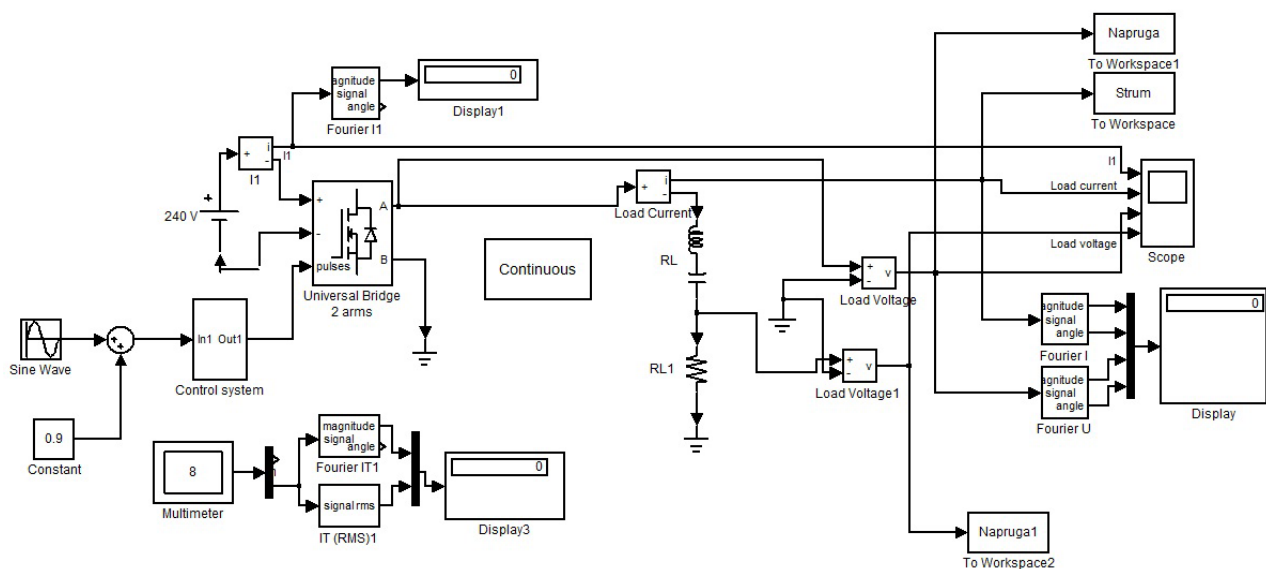


Рис. 4. Matlab Simulink-модель мостового інвертора з ШІМ

Модель містить: джерело постійної напруги (240В), вимірювачі миттєвих струмів в джерелі живлення (I1) і навантаженні (Load current), вимірювач миттєвої напруги на навантаженні до фільтра (Load voltage) і після фільтра (Load voltage1), блоки для вимірювання середнього значення струму живлення, струму і напруги навантаження (Fourier I1, Fourier I, Fourier U), блоки для вимірювання середнього і діючого значення струму силового напівпровідникового модуля (Fourier IT1, IT(RMS)1), блоки для спостереження (вимірювання) миттєвих значень струму в колі живлення, струму навантаження і

напруги на навантаженні (Scope), блоки для вимірювання величини середнього значення струму і напруги (Display, Display1, Display3), однофазний мостовий транзисторний перетворювач (Universal Bridge 2 arms), блок керування ШІП (Control system), блок Continuous для проведення спектрального аналізу, блоки To Workspace для експорту сигналів в робочу область Matlab для проведення подальшого аналізу даних.

Модель системи керування (СК) зображена на рис. 5.

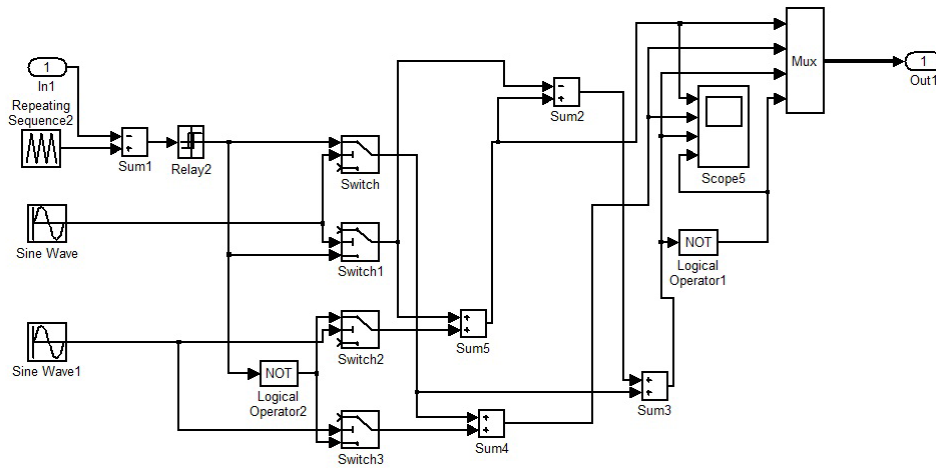


Рис. 5. Система керування мостовим інвертором

При різних способах керування (симетричне, несиметричне, почергове керування і т.д.) виходить однополярна, двополярна або двополярна з нульовими паузами напруга. З урахуванням

необхідності подальшої фільтрації доцільно формувати двополярну напругу з нульовими паузами [3]. Часові діаграми роботи СК для отримання такої напруги показані на рис.6.

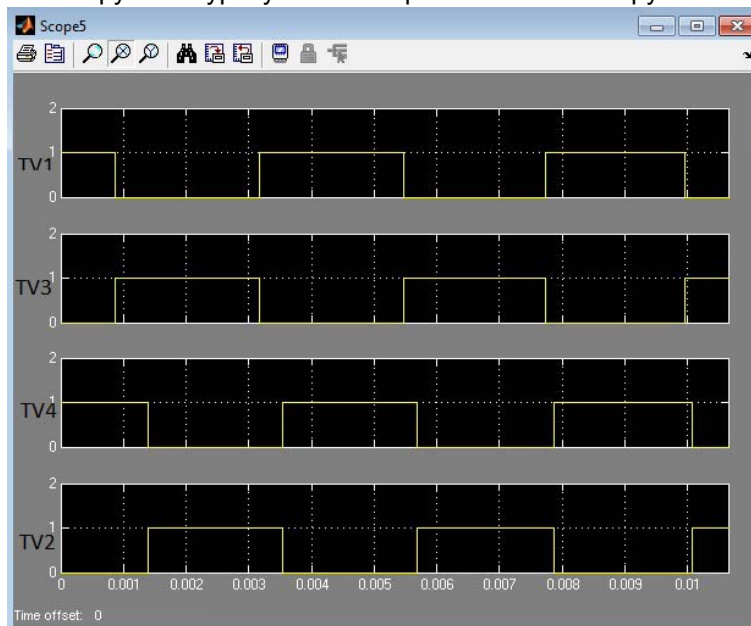


Рис. 6. Імпульси керування транзисторами мостового інвертора

Для виділення зондувального сигналу $s(t)$ (рис.7) послідовний LC-фільтр налаштовується на резонансну частоту ω_0 .

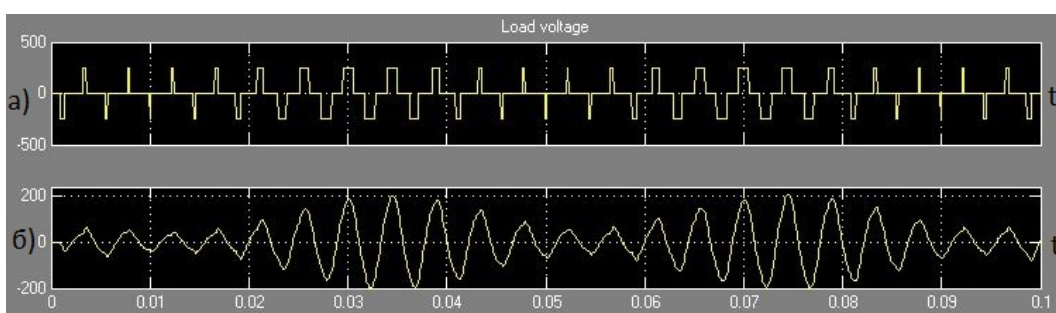


Рис. 7. Діаграми струмів і напруг інвертора: а) напруга на вході фільтра; б) напруга на виході фільтра

Розроблена модель дозволяє варіювати основні параметри імпульсної зондувальної послідовності Хана (частоту заповнення, тривалість зондувального модульованого імпульсу).

Висновки

1. Формування зондувальної напруги для пристроїв ядерного магнітного резонансу можливе на основі: амплітудно-імпульсної модуляції, биття або широтно-імпульсної модуляції з подальшою фільтрацією.

2. При формуванні зондувального сигналу за допомогою АІМ або биття система містить 3-4 генератора синусоїдальних напруг, що обмежує застосування цих методів.

3. Доцільно формувати зондувальну напругу для пристроїв ЯМР за допомогою мостового інвертора напруги з ШІМ.

Список використаних джерел

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2000.
2. *Вашман А.А., Пронин И.С.* Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике. – М.: Наука, 1979.
3. *Гончаров Ю.П., Буденный О.В., Морозов В.Г.* Преобразовательная техника. Учебник Ч2. – Харьков: Фолио, 2000г.
4. *Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф.* Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002.
5. *Фаррар Т., Беккер Э.* Импульсная и Фурье спектроскопия ЯМР.- М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 16 октября 2013 г.

УДК 621.316.72

А.В. Заграничный, В.В. Рогаль, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Способы формирования зондирующего напряжения в устройствах ядерного магнитного резонанса

Рассмотрены основные виды зондирующего напряжения для устройств ядерного магнитного резонанса. Проанализированы способы получения этого напряжения, указаны их недостатки и преимущества. На основе математических расчетов сделан вывод, что получить промодулированное зондирующее напряжение возможно применяя эффект биения. Показано, что наиболее эффективно использовать широтно-импульсную модуляцию и ключевой режим работы преобразователей для решения поставленной задачи. Приведена модель преобразователя, разработанная в среде Matlab Simulink, и результаты моделирования. Библ. 5, рис. 7.

Ключевые слова: зондирующее напряжение, ядерный магнитный резонанс, амплитудно-импульсная модуляция, широтно-импульсная модуляция, инвертор, биения.

UDC 621.316.72

A.V. Zagranichnyi, V.V. Rogal, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

Methods of forming voltage probing for devices nuclear magnetic resonance

The main types of probing voltage for devices nuclear magnetic resonance are considered. The ways of getting this voltage are analyzed, indicated their advantages and disadvantages. Based on mathematical calculations concluded that modulated probing voltage can be obtained of using beats effect. Shown that to solve this problem the most effective to use pulse-width modulation and key mode

converters. Present model of the converter, developed in the environment of Matlab Simulink, and the simulation results. References. 5, Fig. 7.

Keywords: *probing voltage, nuclear magnetic resonance, pulse-amplitude modulation, pulse-width modulation, inverter, beats.*

References

1. *Vashman A.A., Pronin I.S.* (1979), "Nuclear magnetic relaxation and its application in chemical physics". Moscow, Nauka. (Rus)
2. *Farrar T., Becker E.* (1973), "Pulse and Fourier spectroscopy NMR". Moscow, Mir. (Rus)
3. *Bessonov L.A.* (2000), "Theory of Electrical Engineering. Electrical circuit". Moscow, Gardariki. (Rus)
4. *Jafarov I.S., Syngaevsky P.E., Hafizov S.F.* (2002), "The application of nuclear magnetic resonance to characterize the composition and distribution of reservoir fluids". Moscow, Khimiya. (Rus)
5. *Goncharov Y.P., Budennyi O.V., Morozov V.G.* (2000), "Conversion equipment. Textbook B2". Kharkov, Folio. (Rus)