

УДК 621.316.72

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

Покращення спектрального складу ШІМ-напруги в пристроях для ядерного магнітного резонансу

Розглянуто особливості формування 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 модулювання по трьом гармонікам. Показано, що найбільш ефективно використовувати широтно-імпульсну модуляцію та ключовий режим роботи перетворювачів для вирішення поставленої задачі. Бібл. 6, рис. 4.

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

Вступ

При зондуванні методом ядерного магнітного резонансу (ЯМР) для отримання найбільш повної картини про структуру і властивості молекул доцільно використовувати амплітудно-модульований за законом $1 + \cos(\Omega t)$ гармонічний сигнал $s(t)$ (сигнал Хана) [2]. В роботі [4] показано, що для отримання такого сигналу найбільш раціонально використовувати ключовий режим роботи перетворювачів з широтно-імпульсною модуляцією з наступною фільтрацією. Після фільтрації спектр зондувальної напруги має містити три гармоніки з частотами ω_0 , $\omega_0 + \Omega$, $\omega_0 - \Omega$ з амплітудами A_0 , $A_0/2$, $A_0/2$ відповідно, де ω_0 частота ядерного магнітного резонансу. При цьому для отримання необхідної інформації в результаті зондування до сигналу Хана $s(t)$ висуваються жорсткі вимоги (гармонічний склад, стабільність частоти та ін.). При цьому важливо мати можливість регулювати амплітуди гармонік спектру. Тому вибір способу формування зондувальної напруги з можливістю регулювання амплітуд є досить актуальним завданням.

Способи формування ШІМ-напруги

Для проведення досліджень потрібні зондувальні сигнали з високою вихідною імпульсною потужністю – десятки кВА. Тому для

її формування використовують широтно-імпульсну модуляцію. Для покращення спектрального складу вихідної напруги та для регулювання по амплітуді використовують АШІМ [1]. Функціональна схема перетворювача для ядерного магнітного резонансу наведена на рис. 1. Силова частина представляє собою багаторівневий інвертор (кількість рівнів – 3 або 5), на виході якого формується АШІМ напруга, що фільтрується за допомогою резонансного фільтру.

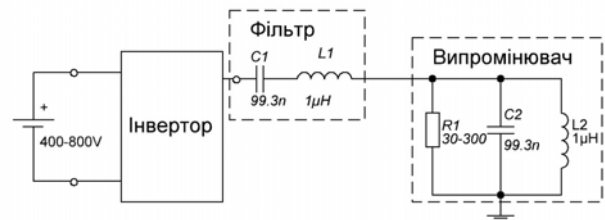


Рис. 1. Функціональна схема перетворювача для ЯМР

При формуванні зондувальної напруги частота модулюючої функції $1 + \cos(\Omega t)$ $f_{Mod} = \Omega/2\pi = 7,143\text{кГц}$, а частота модульованої функції $f_M = \omega_0/2\pi = 500\text{кГц}$ [6]. На рис. 2, а) зображено модулюючу напругу та напругу розгортки, частота якої рівна частоті модульованої напруги. На рис. 2, б), в) показано ШІМ напругу, що формується на виході інвертора та напруга, що отримується після фільтрації.

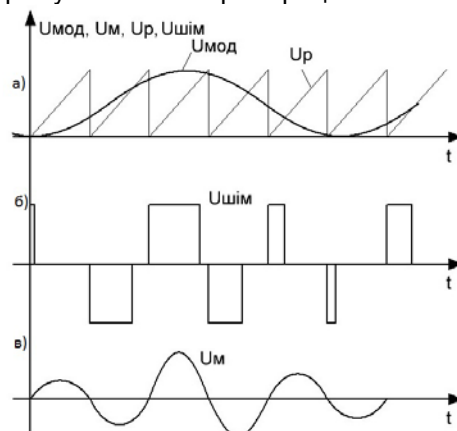


Рис. 2. Отримання зондувальної напруги методом ШІМ

Спектр вихідної напруги містить три гармоніки з частотами $\omega_0, \omega_0 + \Omega, \omega_0 - \Omega$ з амплітудами відповідно $A_0, A_0/2, A_0/2$, а також гармоніки з кратними та комбінаційними частотами. Резонансний фільтр перетворювача (рис. 1.) налаштовується на частоту модульованої напруги, тобто частоту розгортки. Під час ядерно-магнітних досліджень, внаслідок зміни температури, тиску в свердловині параметри елементів фільтра та випромінювача можуть змінюватися, що призводить до спотворення резонансної характеристики випромінювача. Отже, при незмінній частоті перетворення буде спотворюватися спектр вихідної напруги. Для уникнення цього явища використовується підлаштування частоти перетворення. Однак кожен матеріал, що зондується, має ларморівську частоту f_L , що визначає частоту ядерного магнітного резонансу, тому існують обмеження щодо регулювання цієї частоти[3]. Більш доцільно змінювати амплітуди основних гармонік в ШІМ сигналі, щоб після фільтрації зберігалася потрібне співвідношення основних гармонік - $A_0, A_0/2, A_0/2$.

Застосування модулюючої функції $1 + \cos(\Omega t)$ не дає можливості змінювати амплітуди окремих гармонік. Тому запропоновано в якості огинаючої використовувати не $1 + \cos(\Omega t)$, а суму трьох гармонік (рис. 3.):

$$F(x, y) = \frac{1}{2} A_{00} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{0n} \cos ny + B_{0n} \sin ny + \sum_{m=1}^{\infty} A_{m0} \cos mx + B_{m0} \sin mx + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} A_{mn} \cos(mx + ny) + B_{mn} \sin(mx + ny),$$

де
$$A_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x, y) \cos(mx + ny) dx dy, \quad B_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x, y) \sin(mx + ny) dx dy,$$

$$A_{mn} + jB_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x, y) e^{j(mx+ny)} dx dy = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} H e^{j(mx+ny)} dx dy, \quad x = A + B \sin y$$

H - амплітуда імпульсів. Після тригонометричних спрощень частотний спектр описується виразом:

$$F_1(t) = \frac{AH}{2\pi} + \frac{BH}{2\pi} \sin \Omega t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{H}{\pi m} \sin m\omega t + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{H}{\pi m} (-1)^{n+1} \sin[(m\omega + n\Omega)t - mA]$$

В спектрі присутні коефіцієнти A, B модулюючої функції. Якщо в виразі $A_{mn} + jB_{mn}$ замінити $A + B \sin \Omega t$ в межах інтегрування на сиг-

$$w(t) = A_0 \cdot [\cos \omega_0 t + m/2 \cos(\omega_0 + \Omega)t + m/2 \cos(\omega_0 - \Omega)t] = a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos(\omega_0 + \Omega)t + a_3 \cos(\omega_0 - \Omega)t,$$

де ω_0 - частота несучої, рівна частоті ядерного магнітного резонансу, Ω - частота модуляції, m - коефіцієнт модуляції (для модульованої послідовності Хана $m = 1$), A_0 - амплітуда сигналу.

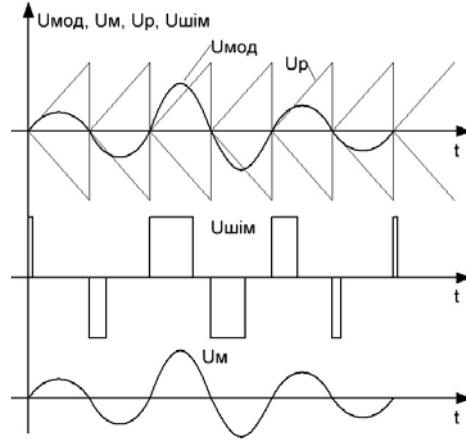


Рис. 3. Отримання зондувальної напруги методом ШІМ з огинаючою $w(t)$

В роботі [6] показано, що для розрахунку частотних спектрів послідовності промодульованих імпульсів сигналом $A + B \sin \Omega t$ можливо застосувати подвійні ряди Фур'є:

нал $w(t)$, то отримаємо вираз, що описує частотний спектр промодульованої послідовності імпульсів, що містить коефіцієнти a_1, a_2, a_3 . Таким чином, за допомогою зміни вагових коефіцієнтів a_1, a_2, a_3 отримано можливість змінювати амплітуди окремих гармонік в спектрі вихідного ШІМ сигналу.

Результати моделювання в середовищі Matlab\Simulink показують, що при коригуванні амплітуд бокових гармонік в модулюючій функції, можна досягти правильного співвідношення амплітуд основної та бокових гармонік (рис. 4, а, б).

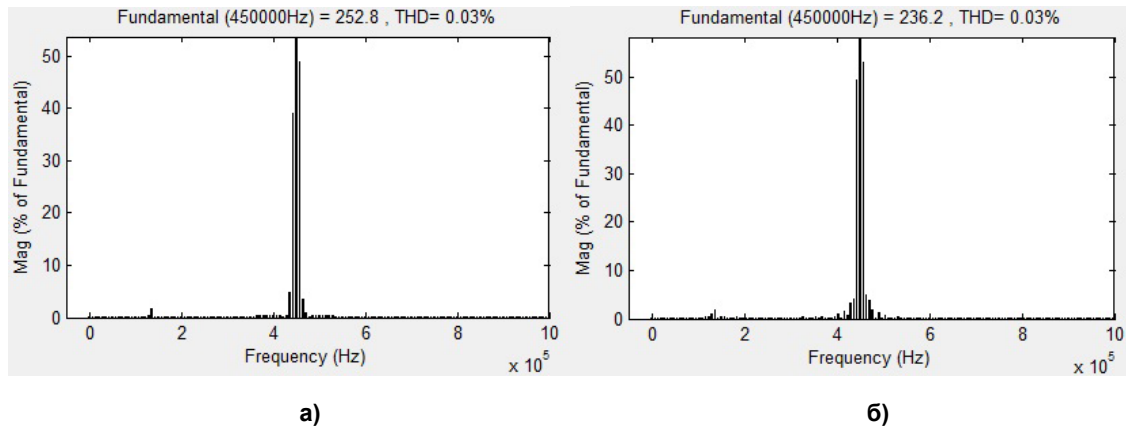


Рис. 4. Спектральний склад зондувальної напруги: а) при зміщенні частоти перетворення нижче резонансної частоти контуру; б) при коригуванні амплітуди бокової гармоніки

Як видно з рис. 4,а амплітуда гармоніки з частотою $(\omega_0 - \Omega)$ складає 0,4 від амплітуди основної гармоніки. При збільшенні амплітуди цієї гармоніки в модулюючій функції $s(t)$ спектр наближається до необхідного, а амплітуда цієї гармоніки становитиме 0,48 від основної.

Висновки

1. Для зменшення спотворення зондувальної напруги при зміні параметрів випромінювача та фільтра потрібно регулювати амплітуди бокових гармонік.
2. Для регулювання амплітуд бокових гармонік доцільно використовувати модулювання по трьом гармонікам.

Список використаних джерел

1. Гончаров Ю.П., Буденный О.В., Морозов В.Г. Преобразовательная техника. Учебник Ч2. - Харьков: Фолио, 2000г.
2. George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer. *NMR Logging, Principles and Applications*. - Halliburton Energy Services, USA 1999.

3. Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. - М.: Химия, 2002.
4. Заграничный А.В., Рогаль В.В. Способы формирования зондувальной напруги в приборах ядерного магнитного резонанса. *Электроника и связь*. - 2013. - № 5(76).- С. 19-24.
5. Сетюков Л.И. Применение двойных рядов Фурье для определения частотных спектров различных видов импульсной модуляции. *Труда МЭИ*, 1961, с.24-35.
6. Тышко А., В.А. Попов. Высоочастотные преобразователи для приборов на основе ЯМР, работающие при повышенных температурах. *Технічна Електродинаміка, Силова Електроніка та Енергоефективність, Частина 2*, Харків 2012 .

Поступила в редакцию 20 декабря 2014 г.

УДК 621.316.72

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

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,

ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Улучшение спектрального состава ШИМ-напряжения в устройствах для ядерного магнитного резонанса

Рассмотрены особенности формирования 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 модулирование по трем гармоникам. Показано, что наиболее эффективно использовать широтно-импульсную модуляцию и ключевой режим работы преобразователей для решения поставленной задачи. Библ. 5, рис. 4.

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

UDC 621.316.72

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

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

Improving the spectral composition of PWM voltage in devices for nuclear magnetic resonance

The features of the formation of the probe voltage for nuclear magnetic resonance are considered. Ways to obtain this voltage are analyzed, shown their advantages and disadvantages. On the basis of mathematical calculations concluded that modulated probe voltage can be receive by modulation in three harmonics. It is shown that the most effective to use pulse width modulation and key changes in the inverter to solve the problem. References. 5, Fig. 4.

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

References

1. Goncharov Y.P., Budennyi O.V., Morozov V.G. (2000), "Conversion equipment. Textbook B2". Kharkov, Folio. (Rus)
2. George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer. (1999), "NMR Logging, Principles and Applications". Halliburton Energy Services, USA.
3. 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". Moscov, Khimiya. (Rus)
4. Zagranichnyi A.V. (2013), "Methods of forming voltage probing for devices nuclear magnetic resonance". Electronics and Communications. No 5(76). Pp. 19-24. (Ukr)
5. Setukov L.I. (1961), "Application of double Fourier series for the determination of the frequency spectra of different types of pulse modulation". Labour MEI, Pp. 24-35. (Rus)
6. Tyshko A., Popov V.A. (2012), "High-frequency converters for devices based on NMR operating at elevated temperatures". Tehnichna Elektrodinamika, Power Electronics and Energy Efficiency, Part 2, Kharkiv. (Rus)