

# Покращення спектрального складу зондувального сигналу пристрою ядерного магнітного каротажу

Манжелій<sup>f</sup> А. Ю., ORCID [0000-0002-3885-6336](https://orcid.org/0000-0002-3885-6336)  
Заграничний<sup>g</sup> А. В., ORCID [0000-0003-2373-1896](https://orcid.org/0000-0003-2373-1896)

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Київ, Україна

**Анотація**—У статті описано метод покращення спектрального складу зондувальної напруги. Розглянуто багаторівневий інвертор, який формує височастотні імпульси. Побудовано віртуальну модель перетворювача разом зі згладжуючим та резонансним фільтрами, котрі утворюють зондувальну напругу у пристроях ядерного магнітного резонансу. Проведено аналіз гармонічного складу цієї напруги. Наведені розрахунки коефіцієнтів інтермодуляційних спотворень для основної та двох бічних гармонік, що дає уявлення про ефективність методу покращення гармонічного складу напруги шляхом введенням додаткових генераторів бокових гармонік, котрі працюють з фазовим зсувом.

**Ключові слова** — ключовий режим перетворювача, каротаж, послідовність Карра-Парселла-Мейбум-Гілла, зондувальна напруга, інвертор, частотна характеристика, ядерний магнітний резонанс.

## I. ВСТУП

Каротаж, заснований на методі ядерного магнітного резонансу, або ядерний магнітний каротаж (ЯМК) пробудив великий інтерес у геофізиків. Метод ЯМК дозволяє достатньо легко виділити інтервали, в яких присутні вуглеводні, і спрогнозувати їх видобування [10]. До того ж принципи вимірювання даним методом достатньо прості для розуміння, не дивлячись на всю складність процесів [3].

Як відомо, в пристроях ядерного магнітного резонансу (ЯМР) використовується зондувальний сигнал Хана [1]. В роботі [6] показано, що при великих потужностях зондувальних струмів та напруг доцільно використовувати ключовий режим роботи перетворювача з подальшою фільтрацією вихідного сигналу для покращення спектрального складу.

Недоліком методу ЯМК є те, що область резонансу охоплює усі пластові флюїди [3]. Тому пошук способу для зменшення частотного спектру та розширення діапазону підлаштування пристрою ядерного магнітного резонансу є досить актуальною задачею.

## II. ФОРМУВАННЯ ЗОНДУВАЛЬНОГО СИГНАЛУ

При зондуванні використовується послідовність Карра-Парселла-Мейбум-Гіла (КПМГ). Окрім того, в ідеальному випадку сам зондувальний сигнал складається з трьох гармонік [6]:

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

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

де  $\omega_0$  – частота несучої, рівна частоті магнітного резонансу,  $\Omega$  – частота модуляції,  $m$  – коефіцієнт модуляції (для модульованої послідовності Хана  $m = 1$ ),  $A_0$  – амплітуда сигналу.

У роботі [5] описано, що при проведенні досліджень необхідні зондувальні сигнали великої потужності. У такому випадку доцільніше використовувати ключовий режим роботи силових перетворювачів [4]. На базі цих перетворювачів можливо побудувати систему – трирівневий інвертор, який дозволяє досить просто отримати сигнал  $s(t)$ .

На практиці ж у спектрі присутні вищі гармоніки, що, звичайно, спотворюють форму зондувальної напруги.

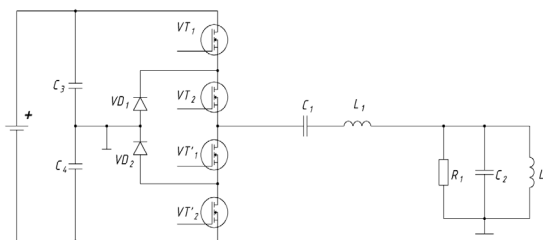


Рис. 1. Трирівневий інвертор для системи живлення пристрою ЯМК



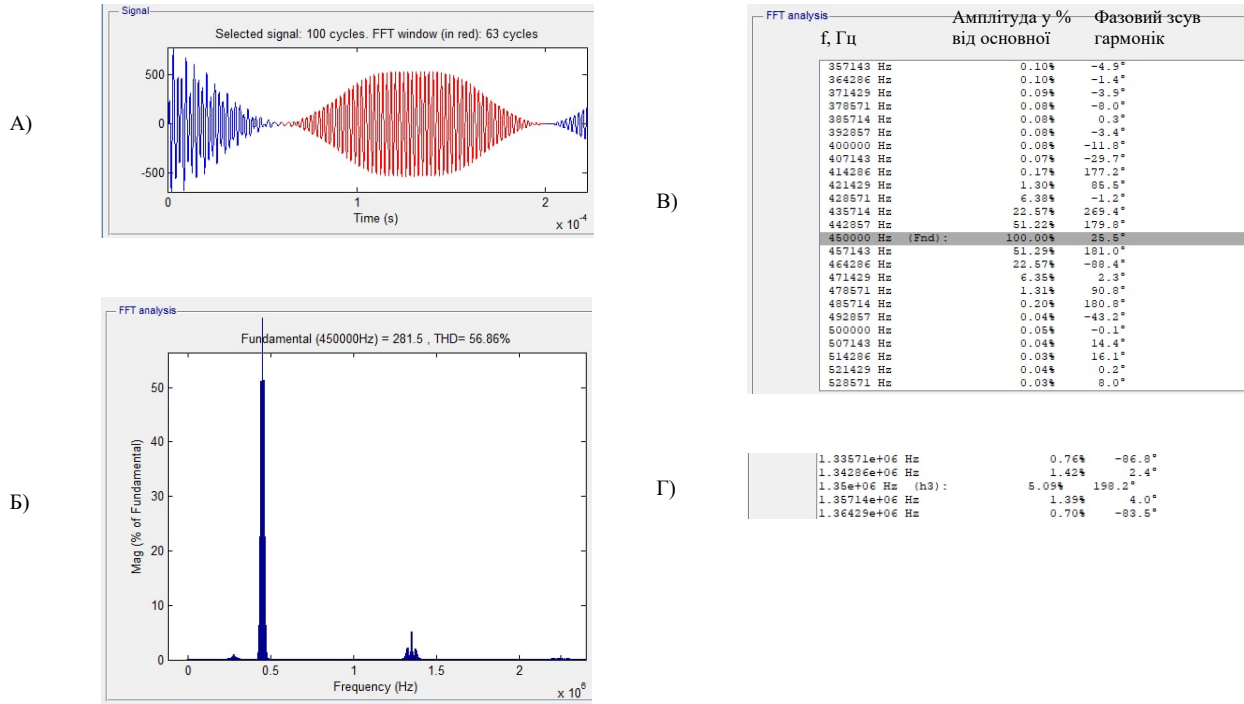


Рис. 2. Результати моделювання системи живлення пристрою ЯМК без модифікації: А) Вихідний сигнал пристрою ЯМК; Б) Спектральний склад вихідного сигналу пристрою ЯМК у вигляді гістограми; В) Відсотковий склад бокових комбінаційних гармонік відносно базової частоти; Г) Відсотковий склад третьої основної гармоніки відносно базової частоти.

Таким чином, використавши модифіковану послідовність Карра-Парселла-Мейбум-Гілла при моделюванні перетворювача (рис. 1) [8, 9] отримуємо широкий спектр (рис. 2) з боковими комбінаційними гармоніками, котрі мають досить вагомий вплив у вихідному сигналі відносно базової частоти (рис. 2, в), на яку налаштовано пристрій ЯМР [7].

Як видно з рис. 2. В) другі бічні комбінаційні гармоніки складають по 22,57% відсотки від амплітуди основної гармоніки, котра дорівнює 450 кГц, в той час як спектр ідеального зондувального сигналу повинен містити три гармоніки з частотами  $\omega_0 = 450 \text{ кГц}$ ,  $\omega_0 + \Omega = 457,2 \text{ кГц}$ ,  $\omega_0 - \Omega = 442,8 \text{ кГц}$ . При цьому, амплітуди бокових гармонік  $\omega_0 + \Omega$ ,  $\omega_0 - \Omega$  складають 50% від амплітуди основної гармоніки [2]. Окрім того в сигналі присутня третя гармоніка по основній частоті, амплітуда якої складає близько 5% від амплітуди гармоніки основної

частоти (рис. 3, Г). Враховуючи, що вихідна напруга несинусоїдальної форми та містить три несучі гармоніки, то для повної оцінки такої напруги використаємо коефіцієнт інтермодуляційних спотворень для основної та двох бічних гармонік:

$$K_{Г3} = \frac{\sqrt{\sum_i U_i^2}}{\sqrt{U_{\omega_0}^2 + U_{(\omega_0 + \Omega)}^2 + U_{(\omega_0 - \Omega)}^2}},$$

де  $U_i$  – всі гармоніки спектру, окрім першої та бокових,  $U_{\omega_0}$ ,  $U_{(\omega_0 + \Omega)}$ ,  $U_{(\omega_0 - \Omega)}$  – значення амплітуд першої та бокових гармонік відповідно.

Для розрахунку суми усіх гармонік виберемо лише ті, відсоткове співвідношення більше за 1% від основної гармоніки та третю основну гармоніку (рис. 2. В, рис. 2. Г):

$$K_{Г31} = \frac{\sqrt{1,3^2 + 6,38^2 + 2 \cdot 22,57^2 + 6,35^2 + 1,31^2 + 5,09^2} (\%)}{\sqrt{51,22^2 + 1^2 + 51,29^2} (\%)} \approx \frac{33,603}{123,508} \approx 0,2721 = 27,21\%.$$

Отриманий результат складає 27,21%, що свідчить про наявність достатньо великих спотворень у вихідній напрузі, що негативно впливає на роботу пристрою ЯМК, а саме на точність визначення необхідних флюїдів у ймовірному родовищі.

### III. ПОКРАЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ЗА РАХУНОК ВВЕДЕННЯ ГЕНЕРАТОРА В ПРОТИФАЗІ

Для зменшення впливу бокових гармонік у вихідному сигналі на якість вимірювання пристроями ЯМР

введемо додатково генератори, різниця фаз яких між боковою гармонікою та початковою фазою буде  $180^\circ$  (рис. 3). Також, частота цих генераторів повинна точно відповідати частоті бокових гармонік, які необхідно заглушити. В якості індуктивностей використаємо трансформатори, котрі мають співвідношення первинної та вторинної обмоток 1:1 та вторинна обмотка має ту ж саму величину індуктивності, що й замінена котушка.



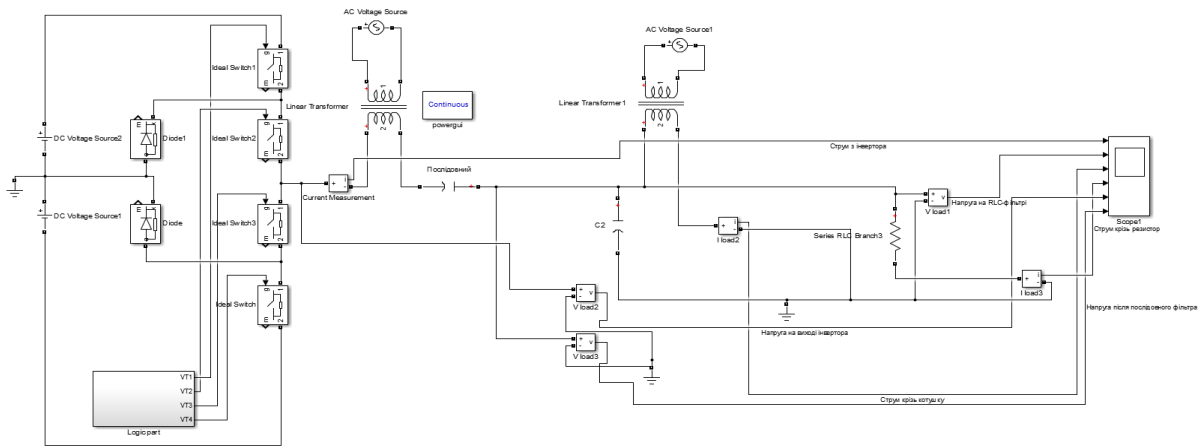


Рис. 3. Схема пристрою ЯМР з заміненями індуктивностями на трансформатори разом із генераторами у протифазі

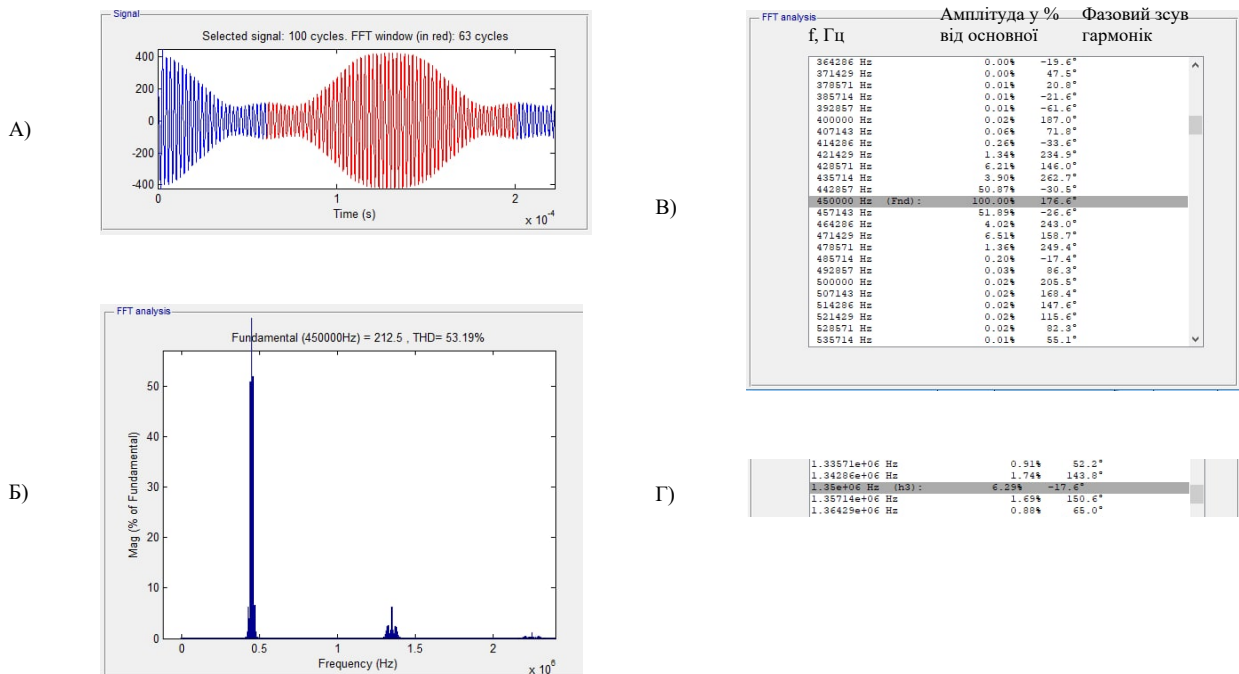


Рис. 4. Результати моделювання системи живлення пристрою ЯМР з введеними генераторами: А) Вихідний сигнал пристрою ЯМР; Б) Спектральний склад вихідного сигналу пристрою ЯМР у вигляді гістограми; В) Відсотковий склад бокових комбінаційних гармонік відносно базової частоти; Г) Відсотковий склад третьої основної гармоніки відносно базової частоти.

До первинних обмоток під'єднаємо генератори бокових гармонік у протифазі. Таким чином додатково отримуємо гальванічну розв'язку між генератором та основним сигналом. В результаті моделювання такого перетворювача маємо інакший спектральний склад вихідного сигналу (рис. 4. Б).

Таке введення генератора зумовлює те, що амплітуда зонduючого сигналу, протягом роботи пристрою ЯМР, ніколи не спадає до нуля і навіть в умовних

«перервах» між імпульсами амплітуда складає приблизно 50 В (рис. 5. А), що не перевищує допустимий поріг 80 В, але зрозуміло, що вносить похибки в роботу системи. Тобто можна одразу помітити недолук такого способу покращення спектрального складу сигналу.

Як і в попередньому пункті, проведемо оцінку вихідного сигналу, використавши коефіцієнт інтермодуляційних спотворень:

$$K_{Г32} = \frac{\sqrt{1,34^2 + 6,21^2 + 3,9^2 + 4,02^2 + 6,51^2 + 1,36^2 + 6,29^2} (\%)}{\sqrt{50,87^2 + 1^2 + 51,89^2} (\%)} \approx \frac{12,4709}{123,6136} \approx 0,1009 = 10,09\%.$$



Після проведення розрахунків та порівняння отриманих коефіцієнтів, можна сказати, що запропонований метод дійсно покращує спектральний склад вихідного сигналу. Розрахуємо відносне покращення напруги у випадку з навантаженням у 30 Ом:

$$\delta = \frac{K_{\Gamma 31}}{K_{\Gamma 32}} = \frac{27,01\%}{10,09\%} \approx 2,68.$$

Таким чином досягнуто покращення спектрального складу зондувальної напруги у  $\sim 2,68$  рази. Завдяки даному способу можна гасити небажані бокові гармоніки, налаштовуючи відповідні частоти та початкові фази так, щоб генератор завжди працював у протифазі.

#### ВИСНОВКИ

Система електроживлення пристрою ЯМК, котра базується лише на багаторівневому перетворювачі зі згладжувачем та резонансним фільтрами має досить широкий спектр сигналу, котрий вносить похибку у вимірювання та потребує додаткових операцій, для виключення її з кінцевих результатів вимірювання.

Використовуючи систему живлення пристрою ЯМК без модифікацій отримаємо широкий частотний спектр, зокрема бокові гармоніки  $\omega_0 + 2\Omega$ ,  $\omega_0 - 2\Omega$  складають  $\sim 20\%$  від амплітуди основної гармоніки. Такі результати при проведенні досліджень пластових флюїдів вносять небажану похибку у визначенні наявності вуглеводнів. При модифікації системи живлення вдалося майже цілком позбутися гармонік з частотою  $\omega_0 + 2\Omega$ ,  $\omega_0 - 2\Omega$ . Результати моделювання запропонованого способу покращення спектру зондувального сигналу показали, що амплітуда других бокових комбінаційних гармонік була зменшена на 82,46%. Втім недоліком системи є її складність та необхідність точної синхронізації роботи генераторів.

Надійшла до редакції 16 липня 2021 р.

Прийнята до друку 07 серпня 2021 р.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer, "NMR Logging, Principles and Applications," Halliburton Energy Services, USA, 1999.
- [2] Y. P. Goncharov, O. V. Budennyi, V. G. Morozov, "Conversion equipment. Textbook B2". Kharkov, Folio, 2000.
- [3] G. Gubelin, B. Kenon, R. Klaynberg, K. Morris, K. Strelyi, "Nuclear-magnetic logging – technology of 21 century," *Nefte-gazovoe Obozrenie* 6, no. 1, pp. 30-44, 2001.
- [4] I. S. Dzhafarov, P. E. Syngaevskij, S. F. Hafizov, "Primenenie metoda jadernogo magnitnogo rezonansa dlja harakteristiki sostava i raspredelenija plastovyh fljuidov", Moscow, Khimiia, pp. 439, 2002.
- [5] A. V. Zagranichnyi, V. V. Rogal, "Application of inverters in the nuclear magnetic resonance devices," *Tehnichna elektrodynamika*, no. 5, pp.139-141, 2014, URL: [http://previous.tech-ned.org.ua/2014\\_5/st46.pdf](http://previous.tech-ned.org.ua/2014_5/st46.pdf)
- [6] A. V. Zagranichnyi, V. V. Rogal "Methods of forming voltage probing for devices nuclear magnetic resonance," *Electronics and Communications*, 2013, vol. 18, no. 5(76), pp. 19-24 DOI: [10.20535/2312-1807.2013.18.5.142741](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.5.142741)
- [7] B. P. McGrath, D. G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 858-867, 2002, DOI: [10.1109/TIE.2002.801073](https://doi.org/10.1109/TIE.2002.801073)
- [8] D. G. Holmes, A. Lipo. Thomas, "Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice," Wiley-IEEE Press, 2003, ISBN: 9780471208143. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5264450>
- [9] Salam Waley Shneen, Fatin Nabeel Abdullah, Dina Harith Shaker, "Simulation model of single phase PWM inverter by using Matlab/Simulink," *International Journal of Power Electronics and Drive System*, vol. 11, no. 4, pp. 1712-1716, 2020, DOI: [10.11591/ijpeds.v12.i1.pp212-216](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i1.pp212-216)
- [10] Xie Ranhong, Xiao Lizhi, "Advanced fluid-typing methods for NMR logging" *Pet. Sci.*, pp. 163-169, 2011, DOI: [10.1007/s12182-011-0130-4](https://doi.org/10.1007/s12182-011-0130-4)



# Improving of the Probing Signal's Spectral Content for Devices Nuclear Magnetic Logging

A. Yu. Manzhelii<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-3885-6336](https://orcid.org/0000-0002-3885-6336)

A. V. Zahranychnyi<sup>s</sup>, ORCID [0000-0003-2373-1896](https://orcid.org/0000-0003-2373-1896)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—The method of nuclear magnetic logging (NML) allows to distinguish easily enough the intervals in which there are hydrocarbons and to forecast their extraction. Moreover, the principles of measuring using this method are simple enough, despite the difficulties of processes. There were described method of improving spectral composition of probing voltage NML device in this article. The disadvantage of the method is that the resonance area covers all reservoir fluids. Therefore, search for a way to reduce the frequency spectrum and extend the range of the device of nuclear magnetic resonance is a rather urgent task. In the article is stated that within conducting researches is necessary probing signals of large capacity. In this case, it is more appropriate to use switch mode of the power converters. The system of multilevel inverter is created on the base of these converters that allows to get probing signal simply enough. A three-level inverter that generates high-frequency pulses is considered. A virtual model of the converter is constructed together with smoothing and resonant filters, which generate the probing voltage in nuclear magnetic resonance (NMR) devices, using a modified Carr-Purcell-Meiboom-Gill sequence. The result is a wide range of voltages with side harmonics, which have the significant influence on the output signal relative to the base frequency which the NMR device is tuned. The analysis of the harmonic composition of this voltage is conducted. Calculations of intermodulation distortion coefficients for the first and two side harmonics are given. To reduce the influence of side harmonics in the output signal on the quality of measurement by NMR devices, it is proposed to implement additional generators with the phase difference between the side harmonic and the initial phase will be a half of period. The inductors used are transformers that have a ratio of primary and secondary windings of 1: 1 and the secondary winding has the same value of inductance as the replaced coil that was in the model without modifications. Anti-phase side harmonic generators are connected to the primary windings. In this way additionally implemented a galvanic isolation between the generator and the main signal. As a result of simulation of such a converter is obtained an alternative spectral composition of the output signal. After calculations and comparison of the obtained coefficients, it is shown that the proposed method really improves the spectral composition of the output signal. The disadvantages of using this method of spectrum improvement are considered as well. The relative voltage improvement in the case of a 30 ohms load is calculated. The simulation results of the proposed method show an improvement in the spectral composition of the probing voltage by ~ 2.68 times. With this method, it is possible to dampen unwanted side harmonics by adjusting the appropriate frequencies and initial phases so that the generator is always running in antiphase.

**Keywords** — *switch mode of the converter, logging, Carr-Purcell-Meiboom-Gill sequence, probing voltage, inverter, frequency characteristic, nuclear magnetic resonance.*

