

А.В. Заграничний, В.В. Рогаль

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

e-mail: [art-kpi@i.ua](mailto:art-kpi@i.ua)

Розглянуто основні топології перетворювачів для формування зондувальної напруги в пристроях ядерного магнітного резонансу. Вказані їхні недоліки та переваги. Показано, що використання звичайних коефіцієнтів оцінки несинусоїдальних сигналів не дає повної інформації про отриману напругу. Запропоновано нові коефіцієнти для аналізу сигналу Хана. Використавши результати моделювання та розрахунків, зроблено висновок, що найдоцільніше використовувати багаторівневі перетворювачі для отримання зондувальної напруги в пристроях ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Бібл. 4, табл. 1, рис. 4.

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

Для проведення геолого-геофізичних досліджень нафтових і газових свердловин в даний час досить широко використовується ядерний магнітний резонанс [1]. Для отримання найбільш повної картини про структуру і властивості молекул найефективніше використовувати зондувальний сигнал Хана  $s(t)$ , який повинен відповідати певним вимогам (точність огинаючої, стабільність частоти та ін.). Вибір способу формування зондувальної напруги є досить актуальним завданням.

**Формування радіочастотних зондувальних імпульсів.** Як показано в [2] сигнал Хана  $s(t)$  (рис. 1) можна представити у вигляді

$$s(t) = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad \text{або} \quad s(t) = A_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right], \quad (1)$$

де  $\omega_0 = 450$  кГц – частота несучої, що дорівнює частоті магнітного резонансу,  $\Omega = 7.2$  кГц – частота модуляції,  $m$  – коефіцієнт модуляції (для модульованої послідовності Хана  $m = 1$ ),  $A_0$  – амплітуда сигналу.

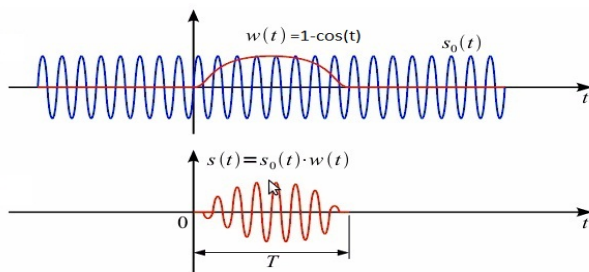


Рис. 1

жала від параметрів навантаження необхідно використовувати такі алгоритми керування, які дозволяють шунтувати навантаження у моменти формування нульової паузи напруги. Таким вимогам відповідає керування транзисторами із зсувом моментів перемикання у мостовому та двомостовому інверторах.

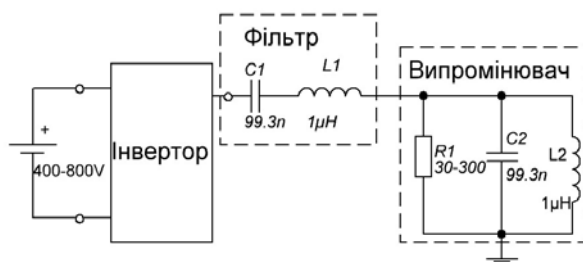


Рис. 2

Для проведення досліджень потрібні зондувальні сигнали з високою вихідною імпульсною потужністю – десятки кВА [3], що робить доцільним використання ключового режиму роботи перетворювача. При цьому зондувальний сигнал може бути сформований на основі широтно-імпульсної модуляції з подальшою фільтрацією. Такий спосіб можна реалізувати за допомогою мостового, двомостового та багаторівневого інвертора.

При використанні різних алгоритмів керування змінюється форма огинаючої зондувального струму. Для того, щоб форма вихідної напруги інвертора визначалася тільки шпаруватістю імпульсів і не залежала від параметрів навантаження необхідно використовувати такі алгоритми керування, які дозволяють шунтувати навантаження у моменти формування нульової паузи напруги. Таким вимогам відповідає керування транзисторами із зсувом моментів перемикання у мостовому та двомостовому інверторах.

Досить просто отримати сигнал  $s(t)$  можна за допомогою використання мостового інвертора (рис. 2), однак для зменшення робочих струмів та напруг доцільно застосовувати двомостовий інвертор з підсумовуванням напруги на вторинній обмотці. Як відомо, використання таких схем дозволяє забезпечити рівномірне навантаження силових транзисторів за струмом або напругою [4].

Однак двомостовий інвертор містить трансформатори, що обмежує його використання (температурний режим роботи пристрою, масогабаритні показники та ін.). Найбільш прийнятним рішенням є

отримання необхідної напруги за допомогою трирівневого та п'ятирівневого інверторів з обмежувальними діодами.

Топології з більшою кількістю рівнів вихідної напруги дозволяють підвищити точність генерованого сигналу. Однак із зростанням кількості рівнів, зростає кількість елементів схеми, ускладнюється система керування.

**Порівняння якісних показників зондувальних сигналів.** Для порівняння несинусоїдальних сигналів використовуються коефіцієнти нелінійних спотворень та коефіцієнт гармонік  $K_G$  [4]

$$K_G = 100 \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2} / U_1. \quad (2)$$

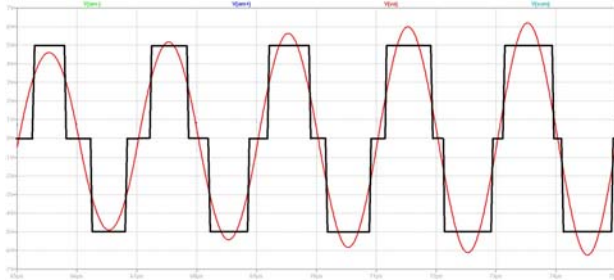


Рис. 3

Оскільки на виході інвертора ШІМ-послідовність імпульсів (рис. 3), яка після фільтрації має містити три гармоніки з частотами  $\omega_0$ ,  $(\omega_0 + \Omega)$ ,  $(\omega_0 - \Omega)$  та амплітудами  $A_0$ ,  $A_0/2$ ,  $A_0/2$  відповідно, то використання стандартних коефіцієнтів не дає нам повної оцінки цього сигналу, оскільки вони виведені для розрахунку по першій гармоніці. Тому запропоновано ввести коефіцієнт по вищим гармонікам та коефіцієнти трьох гармонік (основної та двох бокових):

$$K_{G3} = \sqrt{\sum_i U_i^2} / \sqrt{U_{\omega_0}^2 + U_{(\omega_0+\Omega)}^2 + U_{(\omega_0-\Omega)}^2}, \quad K_{\omega_0} = \frac{U_{\omega_0}}{U'_{\omega_0}}, \quad K_{\omega_0+\Omega} = \frac{U_{\omega_0+\Omega}}{U'_{\omega_0+\Omega}}, \quad K_{\omega_0-\Omega} = \frac{U_{\omega_0-\Omega}}{U'_{\omega_0-\Omega}}, \quad (3)$$

де  $U'_{\omega_0}$ ,  $U'_{(\omega_0+\Omega)}$ ,  $U'_{(\omega_0-\Omega)}$ ,  $U_{\omega_0}$ ,  $U_{(\omega_0+\Omega)}$ ,  $U_{(\omega_0-\Omega)}$  – задані та виміряні значення амплітуд першої та бокових гармонік відповідно;  $U_i$  – всі гармоніки спектру, окрім першої та бокових. Перший коефіцієнт  $K_{G3}$  враховує вклад вищих гармонік в отриманий сигнал,  $K_{\omega_0}$ ,  $K_{\omega_0+\Omega}$ ,  $K_{\omega_0-\Omega}$  – показують, наскільки три основні гармоніки наближаються до ідеального зондувального сигналу. В ідеальному випадку коефіцієнт  $K_{G3}$  має прямувати до нуля, а коефіцієнти  $K_{\omega_0}$ ,  $K_{\omega_0+\Omega}$ ,  $K_{\omega_0-\Omega}$  – до одиниці.

Для проведення спектрального аналізу було розроблено моделі перетворювачів вказаних топологій у середовищі Matlab/Simulink. Відповідно до технічних вимог до пристрою для ядерного магнітного резонансу зондувальна напруга має бути в межах 400–800 В та піковий струм випромінювача може сягати 300 А. При цьому було задано  $U'_{\omega_0} = 380$ ,  $U'_{(\omega_0+\Omega)} = 190$ ,  $U'_{(\omega_0-\Omega)} = 190$  [1]. При моделюванні отримано результати:  $U_{\omega_0} = 361$ ,  $U_{(\omega_0+\Omega)} = 171$ ,  $U_{(\omega_0-\Omega)} = 171$  – для мостового, двомостового та 3-рівневого інверторів та  $U_{\omega_0} = 372$ ,  $U_{(\omega_0+\Omega)} = 183$ ,  $U_{(\omega_0-\Omega)} = 183$  – для 5-рівневого інвертора. Використовуючи дані, отримані при моделюванні, розрахуємо коефіцієнти для сигналу, отриманого за допомогою різних топологій. Результати розрахунків зведено в таблицю.

Назва коефіцієнту	$K_{G3}$	$K_{\omega_0}$	$K_{\omega_0+\Omega}$	$K_{\omega_0-\Omega}$
Назва топології інвертора				
Мостовий	0.069	0.95	0.895	0.895
Двомостовий	0.069	0.95	0.895	0.895
3-рівневий	0.069	0.95	0.895	0.895
5-рівневий	0.018	0.978	0.963	0.963

Аналізуючи результати таблиці, можемо зробити висновок, що мостовий, двомостовий та 3-рівневий інвертори мають однакові значення розрахованих коефіцієнтів. Це можна пояснити тим, що вихідна напруга інверторів, що визначає зондувальний сигнал, однакова, тобто спектральний склад цієї напруги однаковий. 5-рівневий інвертор має кращі показники коефіцієнтів, що пояснюється кращим спектральним складом, оскільки сформована напруга краще апроксимує синус.

Окрім цього при використанні 5-рівневого інвертора значно полегшується фільтрація, оскільки зменшуються амплітуди (рис. 4) кратних основній гармонік. Завдяки цьому зменшуються втрати в пристрої для ЯМР, таким чином зростає тривалість його роботи, оскільки система є автономною та живиться від акумуляторної батареї.

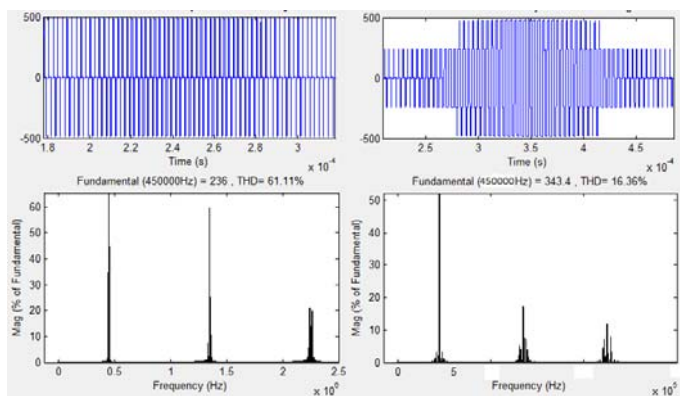


Рис. 4

бокovi.

1. George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer. NMR Logging, Principles and Applications, Halliburton Energy Services, USA, 1999. – 3 p.
2. Гончаров Ю.П., Буденный О.В., Морозов В.Г. Преобразовательная техника. Ч.2. – Харьков: Фолио, 2000. – 272 с.
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. – 167 с.
4. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 39, 229.

УДК 621.313

#### ПРИМЕНЕНИЕ ИНВЕРТОРОВ В УСТРОЙСТВАХ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

А.В. Заграничный, В.В. Роголь

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Рассмотрены основные топологии преобразователей для формирования зондирующего напряжения в устройствах ядерного магнитного резонанса. Указаны их недостатки и преимущества. Показано, что использование обычных коэффициентов оценки несинусоидальных сигналов не дает полной информации о полученном напряжении. Предложены новые коэффициенты для анализа сигнала Хана. Используя результаты моделирования и расчетов, сделан вывод, что наиболее целесообразно использовать многоуровневые преобразователи для получения зондирующего напряжения в устройствах ЯМР. Библ. 4, табл. 1, рис. 4.

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

#### APPLICATION THE INVERTERS IN DEVICES OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE

A.V. Zagranichnyi, V.V. Rogal

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,  
pr. Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Expediency of generating the PWM pulses and further filtering to obtain probing Khan current in emitter NMR device is shown. The basic topology converters for generating a probing voltage in nuclear magnetic resonance devices are discussed. Shown their advantages and disadvantages. It is illustrated that the use of a single coefficient estimates non-sinusoidal waveforms does not provide complete information about the resulting voltage. Proposed new coefficients for analysis Khan signal. Using the simulation results and calculation, it is concluded that the most appropriate use of multilevel converters for voltage probing devices NMR. Concluded that further increase the number of levels the multilevel inverter will increase the accuracy of the formation the probing current, but will complicate the NMR device. References 4, table 1, figures 4.

**Keywords:** probing voltage, nuclear magnetic resonance, pulse width modulation, bridge inverter multilevel inverter.

1. George Coates, Lizhi Xiao, Manfred Prammer. NMR Logging, Principles and Applications, Halliburton Energy Services, USA, 1999. – 3 p. (Eng)
2. Goncharov Yu.P., Budennyi O.V., Morozov V.G. Conversion equipment. Tutorial B2. – Kharkiv: Folio, 2000. – 272 p. (Rus)
3. Dzhafarov I.S., Syngaevskii P.E., Khafizov S.F. Application of nuclear magnetic resonance to characterize the composition and distribution of reservoir fluids. – Moskva: Khimiia, 2002. – 167 p. (Rus)
4. Moyn V.S. Stabilized transistor converters. – Moskva: Energoatomizdat, 1986. – P. 39, 229. (Rus)

Надійшла 17.02.2014