

УДК 621.341.572

С.Ю. Божко, Т.В. Крижановський, В.А. Попов, канд. техн. наук, **О.О. Олефір**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Електромагнітні процеси у перетворювачах електричної енергії для пристроїв на основі ямр

Робота є актуальною з точки зору застосування високочастотних перетворювачів для пристроїв на основі явища ядерно-магнітного резонансу, що останнім часом є досить поширеним методом для геофізичних досліджень нафтових та газових свердловин. Описано перетворювач, який формує високочастотні імпульси збудження ядерно-магнітного резонансу, та віртуальну модель перетворювача, проведено аналіз електромагнітних процесів. Бібл. 6, рис. 10.

Ключові слова: каротаж; високочастотний перетворювач; інвертор; ШІМ.

Вступ

На сьогоднішній день промислова геофізика є однією з актуальних сфер для досліджень породи. Ефективність свердловинної геофізики дуже велика, особливо в нафтовій і структурній геології, де буріння всіх свердловин супроводжується проведенням геофізичних досліджень. Каротаж, заснований на методі ядерно – магнітного резонансу (ЯМР), на даний момент являється одним з найважливіших інструментів для геофізиків, оскільки успіхи цієї технології розширили можливості отримання відомостей про пластові флюїди, таких як вільна вода, зв'язана вода, а також газ та нафта [2].

Використання явища ЯМР для каротажу

Ядра атомів водню, що мають власний магнітний момент, орієнтуються в сильному магнітному полі постійного магніту уздовж силових ліній і потім піддаються впливу короткого ВЧ імпульсу з магнітним полем, перпендикулярним полю постійного магніту. Після кожного такого імпульсу вимірюються спін-відлуння, спонтанно виникаючі сигнали ЯМР, від тих протонів водню, які перейшли в резонанс з полем постійного магніту. Магнітне поле діє на обертовий атомний диполь, намагаючись повернути його і встановити паралельно силовим лініям магнітного поля. Замість цього, атом прецесує, тобто його ве-

ктор магнітного імпульсу починає рухатися навколо напрямку поля з частотою, що залежить від дипольного моменту і напруженості прикладеного поля. Частота прецесії f (Лармора):

$$f = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \quad (1)$$

пропорційна постійному магнітному полю B_0 і гіромагнітному відношенню γ , для водню, наприклад, $\gamma / 2\pi = 42,58$ МГц/Тл [1].

Антиени зондів, які зазвичай використовуються для ЯМР каротажу, потрібно живити імпульсами струму великої потужності, частота коливань яких лежить в діапазоні 300...1000кГц. Для протонів водню, що входить до складу нафти, частота прецесії складає приблизно 500 кГц.

У проміжку між імпульсами антена демпфується для придушення власних коливань і потім приймається сигнал – спін-відлуння на ту ж саму антену. Аналізуючи сигнал спін-відлуння, можна отримати потрібну інформацію про стан породи. Зважаючи на те, що сигнал відлуння має незначну величину, і приймається тією ж антеною, постає задача виділення його на фоні шуму. Таким чином імпульси живлення, доцільно модулювати за законом Ханна (рис. 1), це забезпечує припинення перехідних процесів в антені перед прийомом сигналу відлуння та мінімальну ширину спектру імпульсів живлення.

Сигнал, що приймається антенною системою, пропорційний кількості протонів, не зв'язаних з твердою речовиною, а які перебувають у рідкому або газоподібному стані в цій зоні, що визначає пористість породи. Зі збільшенням в'язкості вуглеводнів зростає швидкість загасання послідовності прийнятих спін-відлунь.

Найбільш велике значення має стабільність фази імпульсів струму збудження в антені на Ларморівській частоті. Завдяки цьому формується максимально можливий відклик при найменшій енергії збудження [6].

Таким чином, постає задача побудови пристроїв для формування імпульсів із заданою формою та параметрами.

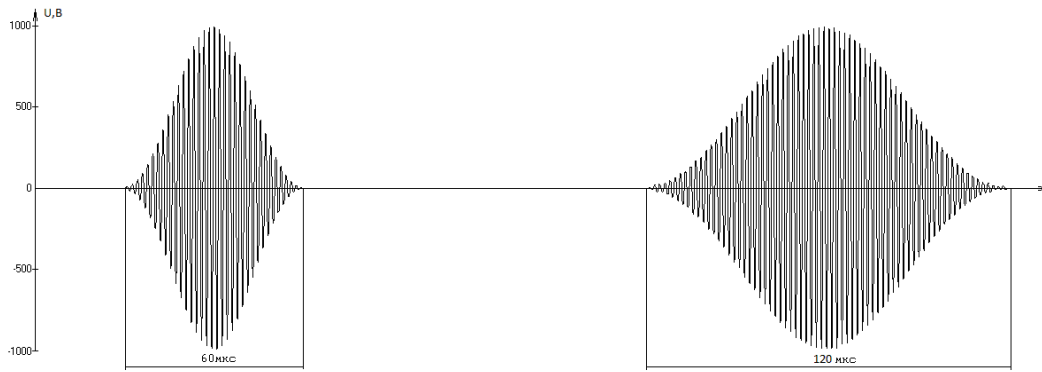


Рис. 1. Графічне зображення імпульсів живлення антенного контуру зонду

Опис перетворювача

Виходячи з принципу ЯМР, зонduючий пристрій повинен мати в своєму складі як потужний постійний магніт, так і джерело змінного магнітного поля, яке випромінюється відповідно орієнтованою антеною, перпендикулярного до поля постійного магніту.

Особливістю перетворювача, що впливає на його структуру є умови використання, а саме: компактність розташування, підвищений рівень температури навколишнього середовища та поверхневе розташування джерела електроживлення.

Структурна схема типового зонduючого пристрою приведена на рис. 2. Вона складається з джерела живлення (ДЖ), кабелів живлення (КЖ), буферного ємнісного накопичувача (БЄН), комутатора (К), трансформатора (Т), вихідного фільтра (Ф_{вих}), навантаження (Н) та системи керування (СК).

Генерацію імпульсів струму, живлення антенного контуру зонду, можна здійснювати за допомогою автономних інверторів, на виході яких за допомогою ШІМ формується напруга, що прикладається до антенного контуру. Основні вимоги, що можуть бути поставлені для таких інверторів такі:

- генерація імпульсів повинна відбуватися з мінімальним вмістом вищих гармонік, які призводять до збільшення пікових значень струмів через транзистори і діоди та зниження ККД перетворювача;
- висока стабільність зсуву фаз струму в антені по відношенню до напруги на контурі антени;
- експлуатація перетворювача всередині товстостінної труби з внутрішнім діаметром від 120 мм до 250 мм, розрахованої на високий зовнішній тиск при температурі до +175 °С [6].

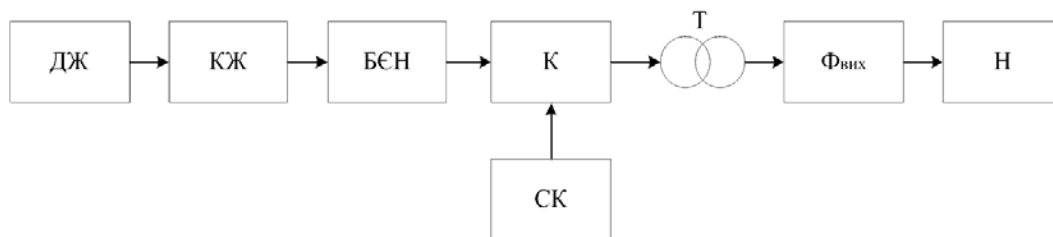


Рис. 2. Структурна схема перетворювача

В даному випадку найбільш доцільним є використання резонансного інвертора, оскільки використання резонансного контуру у вихідному колі інвертора та з попередньо отриманою ШІМ напругою, дозволяє отримати потрібні імпульси (рис. 1). В такому разі, резонансний контур виконує роль вихідного фільтра. Важливо, щоб власні коливання резонансного контуру були налаштовані на частоту Лармо-

ра та співпадали з частотою перемикання комутатора.

На сьогоднішній день запропоновано декілька варіантів схем автономних інверторів, які можна було застосовувати в зондувальних пристроях [3,6]. Проте широкого використання набула схема на основі двох мостових інверторів (рис. 3 а). Схема включає симетричний фазовий модулятор MOD, два потужних ключі

чових перетворювача P1, P2, фільтр L1, C1, R1 та резонансне навантаження L2, C2, R2, R3, R4 [6]. За допомогою фазового модулятора MOD обидва перетворювачі на виході формують прямокутну напругу рис. 4 а) та б), причому вихідні напруги постійно зміщуються

по фазі одна відносно одної. Завдяки роботі двох трансформаторів T1 та T2 вихідні напруги інверторів сумуються і з виходу трансформаторів знімається симетрична ШІМ напруга рис. 4 в). Далі вихідний фільтр та резонансне навантаження формують напругу рис. 4 г).

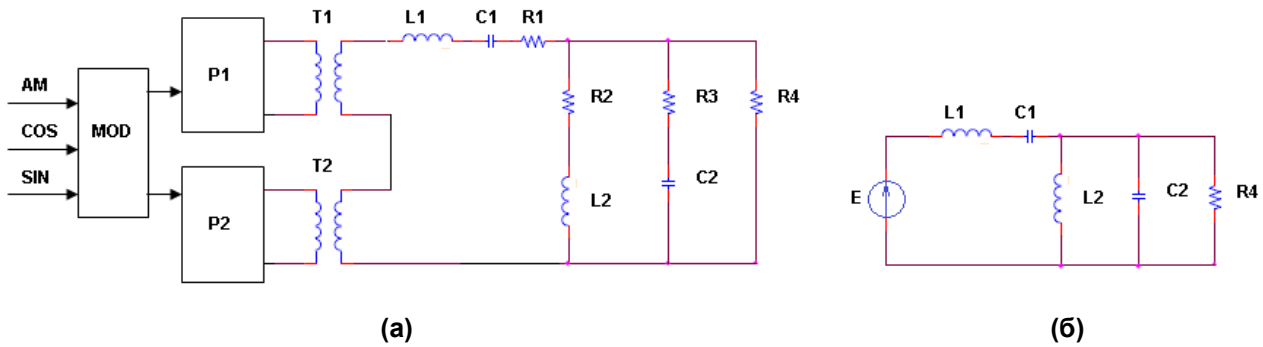


Рис. 3. Принципова схема перетворювача на основі двох мостових інверторів (а); схема заміщення (б)

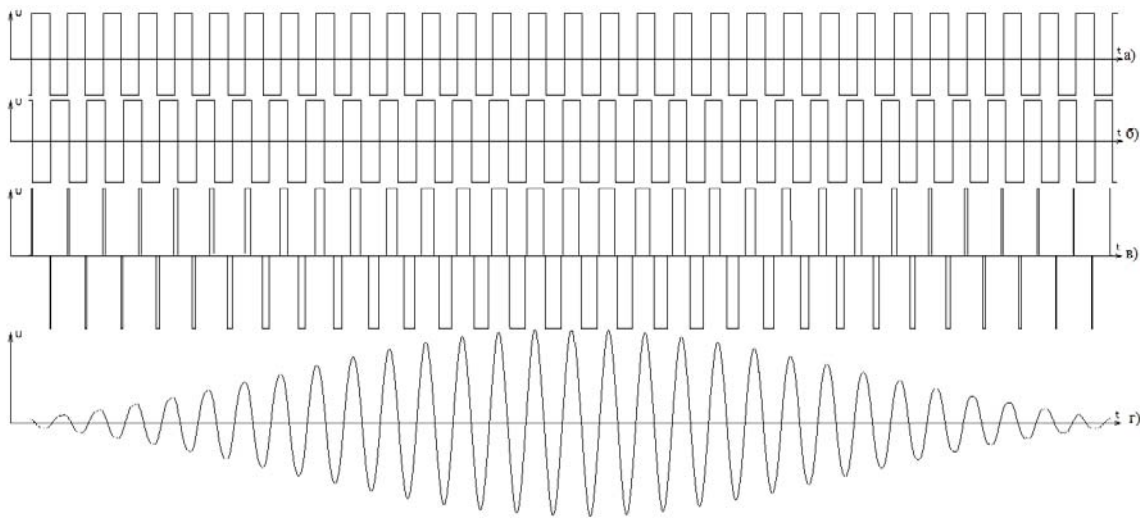


Рис. 4. Зображення часових діаграм роботи схеми

Дослідження електромагнітних процесів для даного типу перетворювача є досить актуальною задачею. Отримані результати можуть бути використані для забезпечення стабільної та коректної роботи перетворювача. На процеси, що відбуваються в схемі, а саме на вихідний струм та напругу, можуть впливати ряд факторів таких як: зміна температури, зміна опору навантаження (навколишнього середовища), зміна вхідної напруги перетворювача і т.д.

Перейшовши до найпростішої схеми заміщення перетворювача (рис. 3 б) на вході

якої діє джерело двополярної ШІМ напруги, без врахування втрат на трансформаторах та силових ключах, за допомогою законів Кірхгофа можна записати систему рівнянь для вихідного струму через фільтр та напруги на навантаженні. Згідно з [5] спектральний склад для напруги з однополярною синусоїдною ШІМ можна визначити за формулою:

$$U_m(n) = \frac{4E}{\pi n} \cdot \sum_{i=1}^p (\cos n \alpha_{iп} - \cos n \alpha_{iк}) \quad (2)$$

де $U_m(n)$ - амплітудне значення n-ної гармоніки; E - напруга живлення перетворювача;

α_{in}, α_{ik} - координати початку та кінців імпульсів; p - кількість імпульсів за чверть періоду частоти основної гармоніки; $n = 1, 3, 5, \dots$

Для двополярної ШІМ (рис. 5) формулу (2) можна переписати:

$$U_m(n) = E \cdot \left(\frac{4}{\pi n} \cdot \sum_{i=1}^p ((\cos(n\alpha_{in}) - \cos(n\alpha_{ik})) - (\cos(n(\alpha_{in} + \tau) - \cos(n(\alpha_{ik} + \tau)))) \right), \quad (3)$$

де $\tau = \alpha_{inmax} - \alpha_{ikmax}$ - тривалість найдовшого імпульсу.

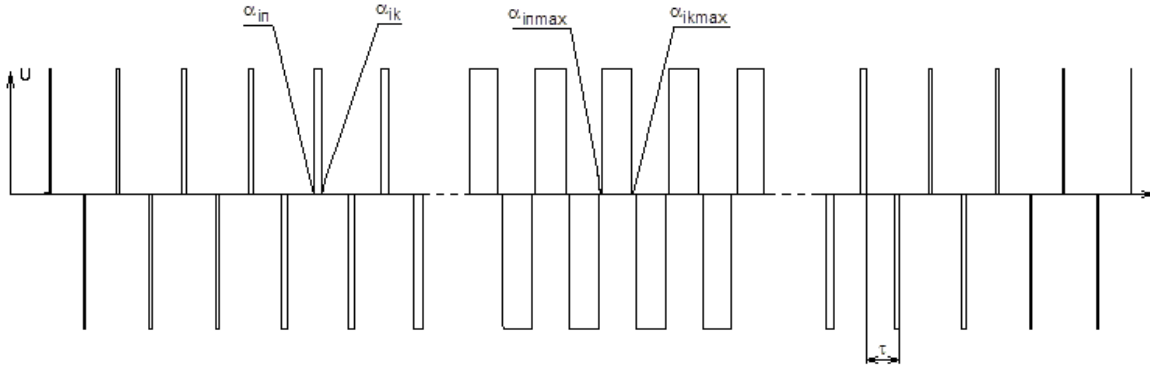


Рис. 5. Зображення епюр двополярної ШІМ напруги

Таким чином, з урахуванням формули (3), система рівнянь для вихідного струму через

фільтр та напруги на навантаженні матиме вигляд:

$$\begin{cases} E \cdot \left(\frac{4}{\pi n} \cdot \sum_{i=1}^p ((\cos(n\alpha_{in}) - \cos(n\alpha_{ik})) - (\cos(n(\alpha_{in} + \tau) - \cos(n(\alpha_{ik} + \tau)))) \right) = U_{C1} + L_1 \frac{di}{dt} + U_{C2}; \\ I_{L1} = I_{L2} + C_2 \frac{du}{dt} + \frac{U_{C2}}{R_4}; \end{cases} \quad (4)$$

де U_{C1} - напруга на конденсаторі C_1 ; $L_1 \frac{di}{dt}$ - напруга на дроселі фільтра L_1 ; U_{C2} - напруга на ємності C_2 , на резонансному навантаженні; I_{L1} - струм через дросель фільтра L_1 ; I_{L2} - струм через індуктивність навантаження L_2 ; $C_2 \frac{du}{dt}$ - струм через ємність навантаження C_2 ; $\frac{U_{C2}}{R_4}$ - струм через опір навантаження R_4 .

Моделювання електромагнітних процесів роботи пристрою за допомогою пакету розширення Matlab – Simulink

Модель пристрою (рис. 6) побудована на основі приведеної вище схеми перетворювача та працює аналогічним чином. Модель включає в себе два мостових інвертори (VT1,

VT2, VT3, VT4 та VT5, VT6, VT7, VT8), що виконують основну функцію з перетворення потужності постійного струму у потужність змінного. Функцію модулятора виконує система керування SK за допомогою якої обидва інвертори на виході формують прямокутну напругу (рис. 4 а) та б). З виходу трансформаторів TV та TV1 знімається симетрична ШІМ напруга (рис. 4 в). Далі вихідний фільтр LC та резонансне навантаження L_1C_1R формують напругу (рис. 4 г).

Провівши моделювання отримано наступні результати: напруга на конденсаторі C_1 (рис. 7 а), струм через котушку L (рис. 7 б). Значення добротності коливального контуру має лежати у межах $Q = 10-50$ на резонансі при значенні індуктивності контуру 1 мкГн [6], тому моделювання проводилось при значенні активного опору навантаження одиниці десятків ом.

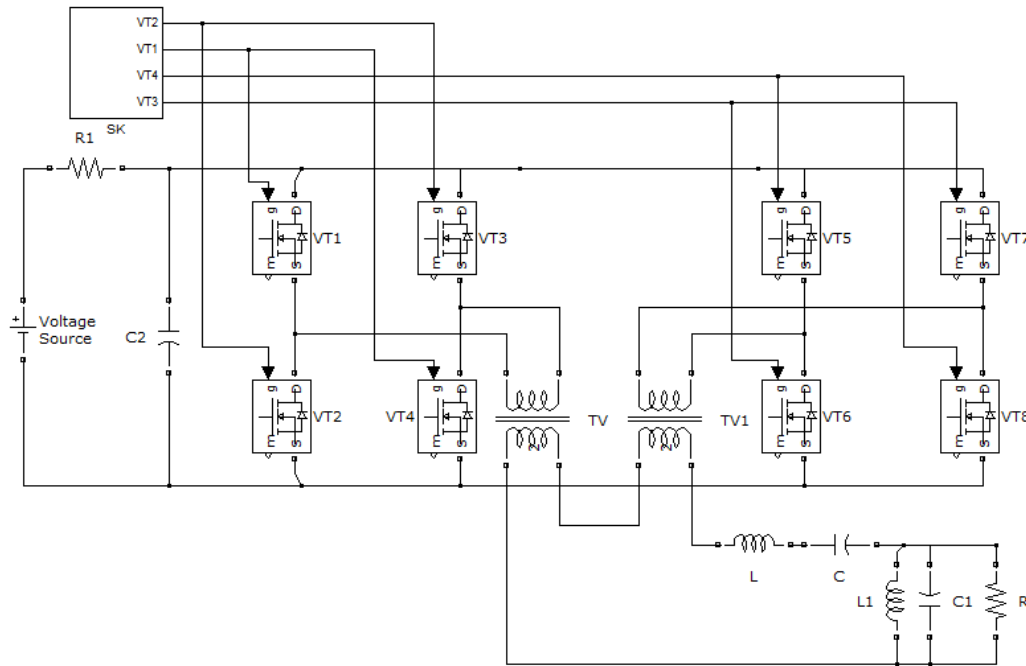


Рис. 6. Зображення моделі перетворювача

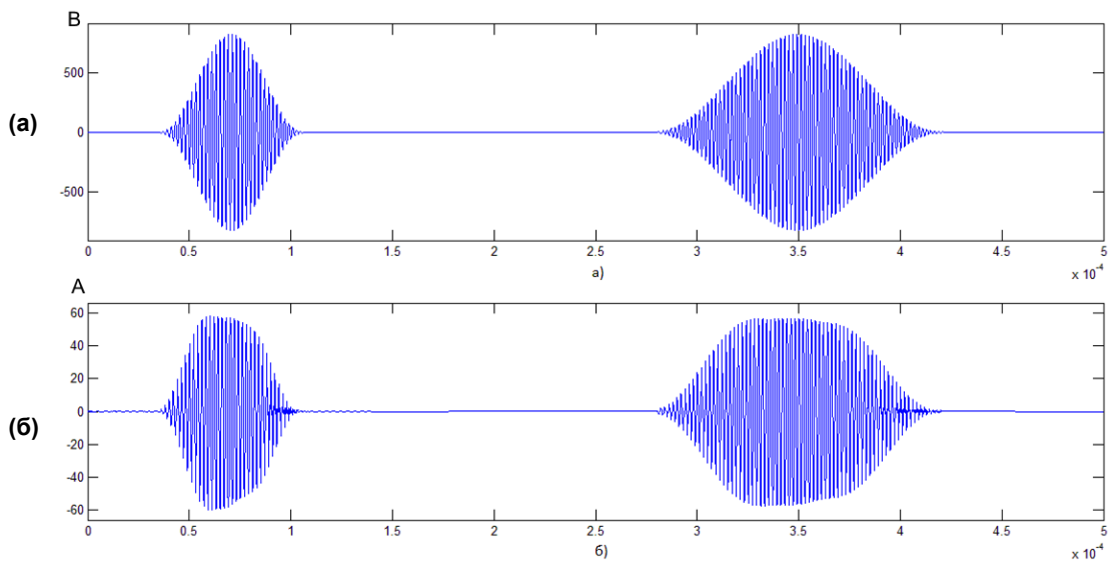


Рис. 7. Графіки напруги на навантаженні (а) та струму через фільтр (б)

Виконавши FFT (Fast Fourier transform) аналіз вихідного струму через фільтр (рис. 8) бачимо, що у сигналі майже відсутні вищі га-

рмоніки, проте присутня третя гармоніка яка складає менше десяти відсотків сигналу.

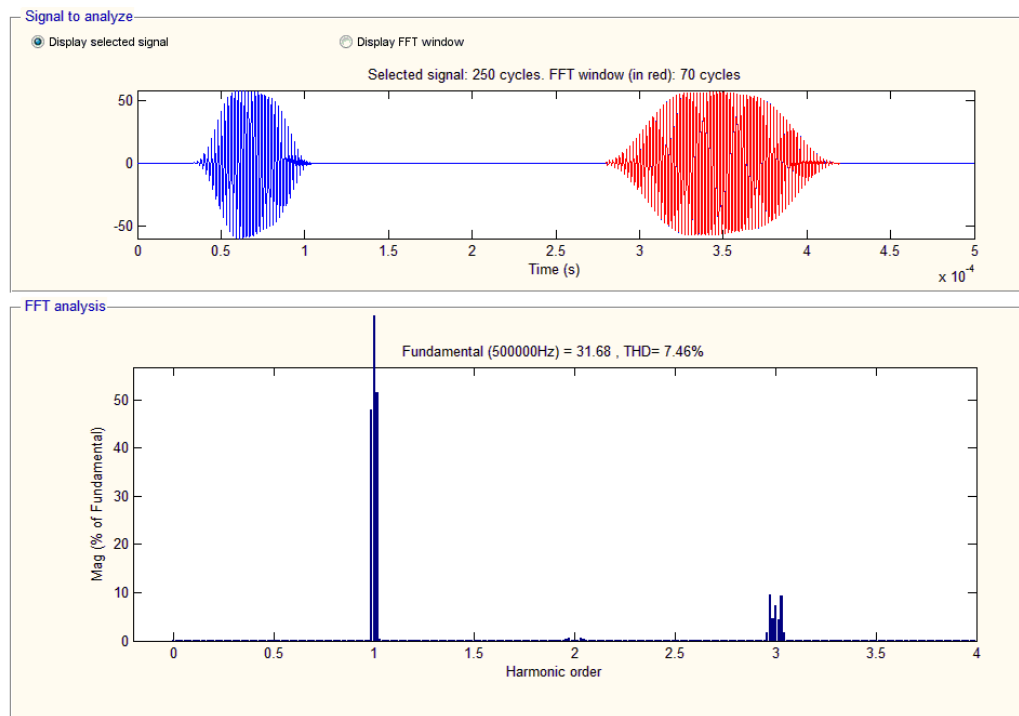


Рис. 8. Графічне зображення гармонічного складу струму через вихідний фільтр

При зміні параметрів нафтогазонасної породи таких як: коефіцієнт нафто газонасиченості, показник ступеню водонасиченості, змінюється коефіцієнт збільшення опору. Цей коефіцієнт показує, у скільки разів збільшиться питомий опір водонасиченої породи при частковому насиченні об'єму пор нафтою або

газом [4]. Таким чином, щоб побачити як будуть змінюватись процеси у схемі перетворювача при зміні опору, збільшимо опір навантаження до сотні ом. Отримано наступні результати: напруга на конденсаторі С1 (рис. 9(а)), струм через котушку L (рис. 9 (б)), FFT аналіз струму через вихідний фільтр (рис. 10).

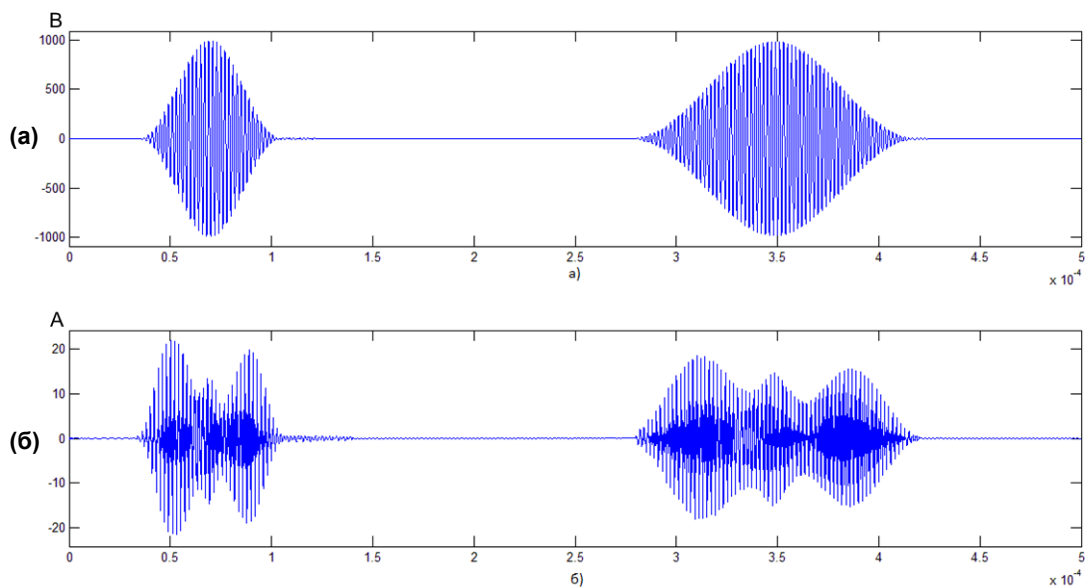


Рис. 9. Графіки напруги на навантаженні (а) та струму через фільтр (б)

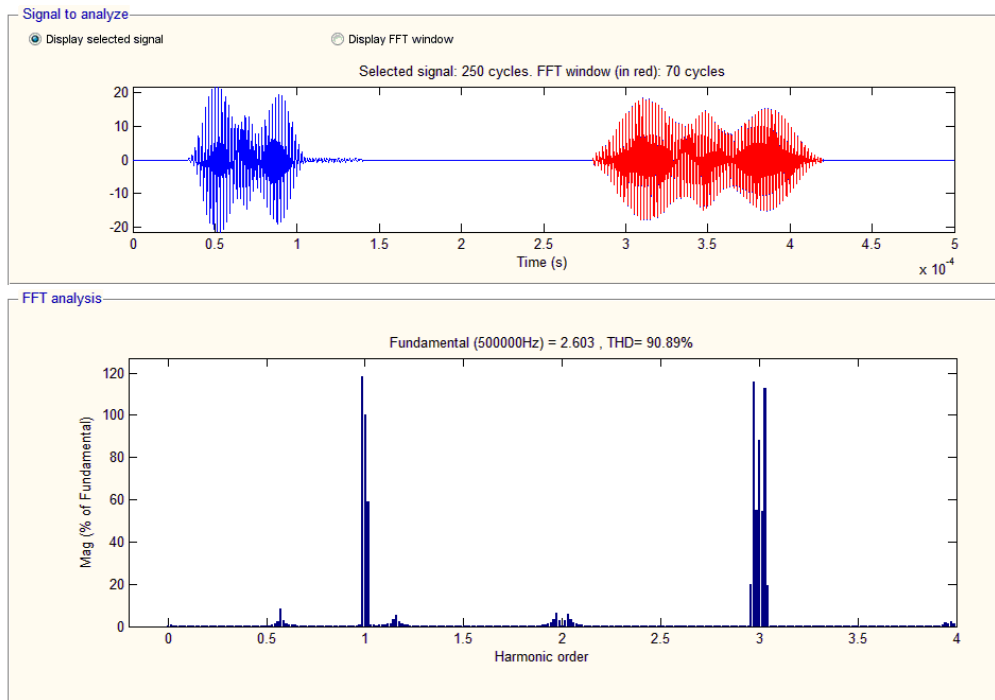


Рис. 10. Графічне зображення гармонічного складу струму через вихідний фільтр

З отриманих результатів моделювання можна побачити, що при збільшенні опору навантаження у гармонічному складі вихідного струму перетворювача з'являються вищі гармоніки, суттєво третя гармоніка. В свою чергу це призводить до збільшення втрат енергії і як наслідок до зменшення ККД перетворювача.

Висновки

Для забезпечення вимог, які висуваються до перетворювачів електричної енергії пристроїв на основі явища ЯМР, виникає необхідність ретельного розгляду як компонентної бази, так і структурного підходу до проектування даного класу перетворювачів. Описуючи процеси, що відбуваються у перетворювачі, наприклад, класичним або операторним методами, виникають ускладнення з трудомісткістю розрахунків отриманої системи рівнянь. Доцільніше використовувати, наприклад, метод змінних стану або метод функцій вільного режиму.

Проведений аналіз електромагнітних процесів у перетворювачі на основі моделі, побудованої з допомогою Matlab/Simulink. Результати моделювання показують появу третьої гармоніки у вихідному струмі перетворювача, при збільшенні опору навантаження. Це явище негативним чином впливає на роботу перетворювача, тому його потрібно усувати.

Спеціалізовані високочастотні і високотемпературні перетворювачі для використання в

пристроях розвідки нафтових і газових родовищ є окремим перспективним напрямом, що привертає увагу інженерів-розробників та дослідників. Тому подальші дослідження процесів роботи перетворювача є актуальними.

Список використаних джерел

1. Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики состава и распределения пластовых флюидов. – М.: Химия, 2002. – 439 с.
2. Дэвид Аллен, Стив Крэри, Боб Фридман. Использование ядерно-магнитного резонанса при исследованиях скважин. Нефтегазовое обозрение. Осень 2001.
3. Заграничний А.В., Рогаль В.В. Застосування інверторів в пристроях ядерного магнітного резонансу. Технічна електродинаміка № 5, 2014 (вересень/жовтень), - С.139-141.
4. Итенберг С.С. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб и доп.- М.: Недра, 1987. 375с., ил.
5. Крючков В.В., Малышков Г.М., Соловьев И.Н. Кодовое широтно-импульсное регулирование для инверторов. Практическая силовая электроника. – 2001. – № 1.

6. *Тышко А.А., Попов В.А.* Высокочастотные преобразователи для приборов на основе магнитядерного резонанса работающие при повышенных температурах. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та Енергоефективність», ч.2.-2012. - С.46-48.

Поступила в редакцію 21 апреля 2015 г.

УДК 621.341.572

С.Ю. Божко, Т.В. Крыжановский, В.А. Попов, канд. техн. наук, **О.О. Олефир**

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

Электромагнитные процессы в преобразователях энергии для устройств на основе ямр

Работа является актуальной с точки зрения применения высокочастотных преобразователей для устройств на основе явления ядерно-магнитного резонанса, что в последнее время является достаточно распространенным методом для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин. Описаны преобразователь, который формирует высокочастотные импульсы возбуждения ядерно-магнитного резонанса, и виртуальная модель преобразователя, проведен анализ электромагнитных процессов. Библ. 6, рис. 10.

Ключевые слова: каротаж; высокочастотный преобразователь; инвертор; ШИМ.

UDC 621.341.572

S. Bozhko, T. Kryzhanovskiy, V. Popov, Ph.D., **O. Olefir**

National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

Electromagnetic processes in the converter of energy for devices based on NMR

The work is relevant from the point of view of the application of high-frequency transducers for devices based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance, that lately is a common method for geophysical surveys of oil and gas wells. Described transducer that generates high-frequency excitation pulses nuclear magnetic resonance, and the virtual model of the converter, the analysis of electromagnetic processes. Reference 6, figures 10.

Keywords: logging; high frequency; inverters; PWM.

References

1. *Dzhafarov, I. S., Syngaevskij, P. E., Hafizov, S. F.* (2002). *Primenenie metoda jadernogo magnitnogo rezonansa dlja harakteristiki sostava i raspredelenija plastovyh fljuidov.* Moscow: Chemistry, Pp.439 (RUS)
2. *Devid Allen, Stiv Krjeri, Bob Fridman.* (2001). *Ispol'zovanie jaderno-magnitnogo rezonansa pri issledovanijah skvazhin. Neftegazovoe obozrenie. Osen'.* (RUS)
3. *Zagranychnyi, A. V., Rogal, V. V.* (2014). *Zastosuvannja inverteriv v prystrojah jadernogo magnitnogo rezonansu. Tehnichna elektrodynamika № 5, Pp.139-141* (UKR)
4. *Itenberg, S. S.* (1987). *Interpretacija rezul'tatov geofizicheskikh issledovanij skvazhin. Uchebnoe posobie dlja vuzov. 2-e izd., pererab i dop.* Moscow: Nedra, P.375 (RUS)
5. *Krjuchkov, V. V., Malyshkov, G. M., Solov'ev, I. N.* (2001). *Kodovoe shirotno-impul'snoe regulirovanie dlja inverterov. Prakticheskaja silovaja jelektronika. No 1* (RUS)
6. *Tyshko, A. A., Popov, V. A.* (2012). *Vysokochastotnye preobrazovateli dlja priborov na osnove magnitjadernogo rezonansa rabotajushhie pri povyshennyh temperaturah. Tehnichna elektrodynamika. Tematichnij vipusk «Silova elektronika ta Energoefektivnist'» ch. 2. Pp. 46-48* (RUS)