

А.П. САМІЛА, О.В. ГРЕСЬ, Т.А. КАЗЕМІРСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНИХ РІШЕНЬ АМПЛІТУДНИХ ДЕМОДУЛЯТОРІВ АВТОДИННИХ СПІН-ДЕТЕКТОРІВ

В роботі описано застосування SPICE-моделювання для дослідження амплітудних демодуляторів автодинних спін-детекторів. Амплітудна демодуляція на нелінійному елементі досить поширена в методиці на основі неперервного спостереження ядерного квадрупольного резонансу. При цьому активний елемент є основою автогенераторного каскаду і часто поєднує в собі функції генерування, підсилення та детектування. Експериментально встановлено, що при амплітудній модуляції 40 % та зміні вхідної напруги в діапазоні 20–1000 мВ, схема симетричного спін-детектора з лінійним активним демодулятором забезпечує кращу лінійність передаточної характеристики ніж схеми асиметричних спін-детекторів з транзисторними чи діодними детекторами.

Ключові слова: ядерний квадрупольний резонанс, спін-детектор, амплітудна демодуляція, SPICE-моделювання.

A. SAMILA, O. HRES, T. KAZEMIRSKIY
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

A STUDY OF SCHEME SOLUTIONS OF THE AMPLITUDE DEMODULATORS OF MARGINAL OSCILLATORS

There are continuous-wave and pulsed methods for monitoring NQR signals in the frequency range from ~ 2 to 1000 MHz. Although modern radio spectrometers use the pulsed method of recording resonant signals, the method of continuous-wave detection of spin resonances is still quite relevant in the technique of continuous spectroscopy, in particular, especially for NQR. In this case, the active element is the basis of the self-oscillating circuit and often combines the functions of generation, amplification, and detection. The paper describes the application of SPICE modelling for the study of amplitude demodulators of the marginal oscillators. Amplitude demodulation on a nonlinear element is quite common in the method based on continuous observation of nuclear quadrupole resonance. To synthesize the optimal version of the amplitude circuit Demodulators on the field-effect transistor and diode and study its characteristics, their SPICE modelling in the computer-aided design system Cadence OrCAD was carried out, the Linear active amplitude demodulator on the operational amplifier was considered. It is experimentally established that at amplitude modulation of 40% and change of input voltage in the range of 20 - 1000 mV, the scheme of the symmetric marginal oscillator with linear active demodulator provides better linearity of transfer characteristic than schemes of asymmetric marginal oscillators with transistor or diode detectors (the total harmonic distortion of the output voltage did not exceed 0.5%).

Keywords: Nuclear quadrupole resonance, marginal oscillator, amplitude demodulation, SPICE modelling.

Постановка проблеми. Автодинні спін-детектори на польових транзисторах впродовж останніх десятиліть широко використовувалися науковцями під час спостереження методами неперервної спектроскопії сигналів ядерного магнітного резонансу (ЯМР), ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) і електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) [1–17]. Порівняно з іншими аналогічними пристроями, такі схеми характеризуються простотою, надійністю та високою чутливістю [3–7]. Не зважаючи на те, що принцип дії сучасних радіоспектрометрів базується на методах імпульсної Фур'є-спектроскопії, автодинні спін-детектори можуть ефективно використовуватись в ході розробки високочутливих та високоточних ЯКР-сенсорів фізичних величин (температура, тиск, магнітне поле та інше), які не потребують калібрування і періодичної повірки. На відміну від імпульсної Фур'є-спектроскопії ЯКР, де зразок піддається впливу потужного радіочастотного випромінювання, в неперервній спектроскопії ЯКР використовується слабе радіочастотне випромінювання, що слабо впливає на параметри кристалічної ґратки досліджуваного зразка, а отже, уможливорює суттєве збільшення точності ЯКР-сенсора [8–13]. Потенційне застосування таких сенсорів можливе в розподілених сенсорних мережах та пристроях фізичної ланки Internet of Things. Актуальним напрямом прикладного застосування автодинних спін-детекторів є також спінтроніка [18].

Аналіз основних публікацій. З аналізу наукових праць випливає, що найбільш відомі методики синтезу схемних рішень автодинних спін-детекторів ґрунтуються або на громіздких аналітичних розрахунках із застосуванням класичної теорії генерування сигналів та нелінійних систем, або на результатах численних експериментальних досліджень [14–16]. При цьому, у більшості випадків, підвищення чутливості досягається, в основному, за рахунок зниження власних шумів схеми і послаблення зовнішніх наведень [17].

Метою роботи є застосування SPICE-моделювання для дослідження амплітудних демодуляторів автодинних спін-детекторів.

Демодулятори на польовому транзисторі та діоді

Серед відомих схемних рішень автодинних спін-детекторів виділяються декілька основних, відмінність між якими полягає, головним чином, у способі введення зворотного зв'язку, необхідного для виникнення автоколивань [3–7, 14–17]. В даних пристроях для амплітудної демодуляції сигналу спаду вільної індукції (СВІ) застосовують перетворення на нелінійному елементі спін-детектора – транзисторі або напівпровідниковому діоді. В кожному конкретному випадку, при вдалій конструкції, ретельному виборі електронних компонент і режимів роботи генератора із самозбудженням, може бути досягнута досить висока

чутливість детектування сигналів СВІ.

У роботах [3–5, 14–17] описано використання нелінійного перетворювача на польовому транзисторі (стоковий детектор) для амплітудної демодуляції. Такий демодулятор крім зазначених переваг має і недоліки. Це, перш за все, високий коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу, а також необхідність постійного коректування положення робочої точки транзистора при зміні режиму роботи спін-детектора. Застосування амплітудного демодулятора на напівпровідниковому діоді для детектування сигналу ЯКР описано в роботі [3]. Завдяки застосуванню каскадного підсилювача високої частоти, даний діодний демодулятор працює в режимі сильного сигналу. Подібне рішення описане також і в роботі [6]. Введення додаткового каскаду підсилення забезпечує покращення лінійності передаточної характеристики демодулятора.

Для синтезу оптимального варіанту схеми амплітудного демодулятора та дослідження її характеристик проведено SPICE моделювання (рис. 1).

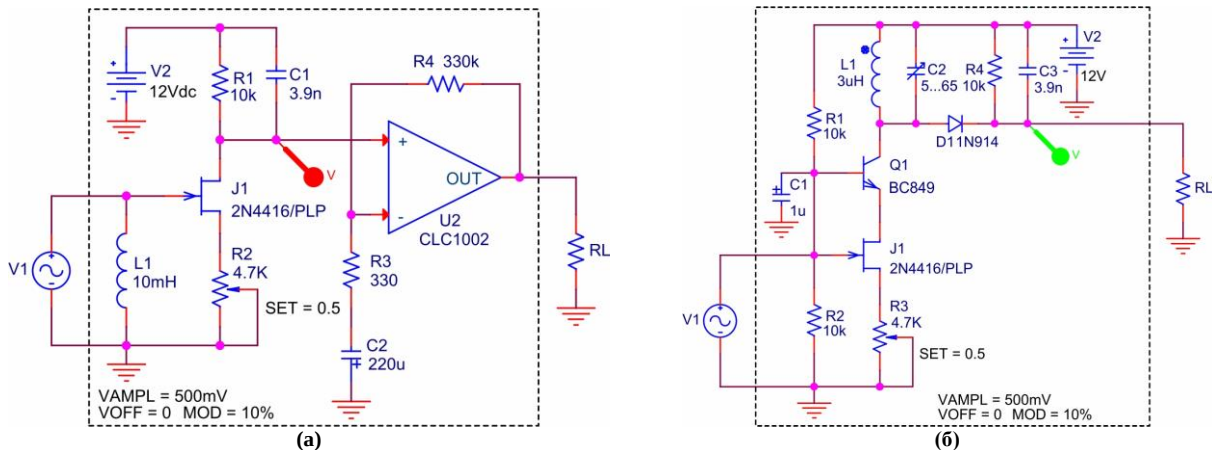


Рис. 1. SPICE моделі амплітудних демодуляторів: А – на польовому транзисторі, Б – на діоді з підсилювачем

У типовому випадку струм стоку польового транзистора J1 визначається виразом [3, 4]:

$$I_D = \left(g_{fs_0} U_{gs_0} / 2 \right) \left(1 - U_{gs} / U_{gs_0} \right)^2, \quad (1)$$

де g_{fs_0} і U_{gs_0} – параметри транзистора, а U_{gs} – напруга між затвором і витоком.

Середнє значення цього струму за один період високочастотного (ВЧ) коливання при напрузі на затворі $E_0 + E \cos(\omega t)$ описується виразом

$$\langle I_D \rangle = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{g_{fs_0} U_{gs_0}}{2} \left(1 - \frac{E_0 + E \cos(\omega t)}{U_{gs_0}} \right)^2 dt. \quad (2)$$

Чутливість демодулятора на польовому транзисторі пропорційна похідній:

$$\frac{d\langle I_D \rangle}{dE} \approx \frac{g_{fs_0} E}{2U_{gs_0}}. \quad (3)$$

SPICE моделювання проводилось в системі автоматизованого проектування Cadence OrCAD. На рис. 2 зображено амплітудні спектри вихідних сигналів досліджуваних демодуляторів на польовому транзисторі та на діоді.

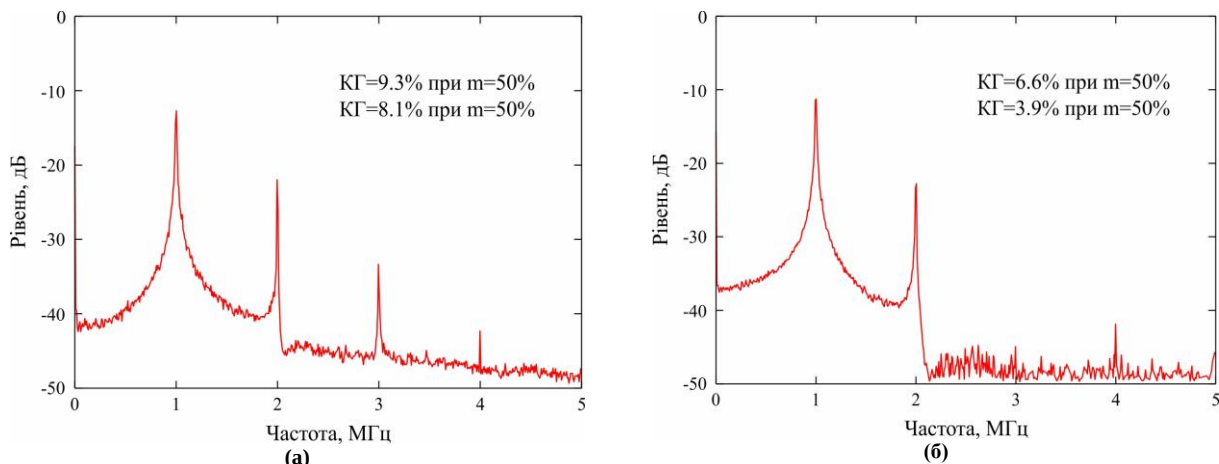


Рис. 2. Амплітудні спектри вихідних сигналів досліджуваних демодуляторів: А – на польовому транзисторі, Б – на діоді

Як видно із одержаних результатів, в діапазоні входних напруг 0.1–2.2 В активний демодулятор на діоді забезпечує кращу лінійність передаточної характеристики ніж транзисторний демодулятор. Значення коефіцієнту гармонік (КГ) для обох схем при різних значеннях коефіцієнту амплітудної модуляції m наведені в таблиці 1. Результати SPICE моделювання показали, що для схеми, зображеної на рис. 1Б КГ менший на 33 % (при $m = 10\%$) порівняно із КГ для схеми, зображеної на рис. 1А.

Таблиця 1

Коефіцієнт гармонік для амплітудних демодуляторів

КГ, %	Коефіцієнт амплітудної модуляції m , %				
	10	20	30	40	50
демодулятор на транзисторі	1,8	3,9	6,6	8,1	9,3
демодулятор на діоді	1,2	2,6	3,3	3,9	6,62

Лінійний активний амплітудний демодулятор на операційному підсилювачі

Відомо, що активні амплітудні демодулятори мають низку переваг порівняно із пасивними, зокрема, володіють кращою лінійністю передаточної характеристики. З метою дослідження характеристик активного амплітудного демодулятора, розроблено його SPICE модель (рис. 3).

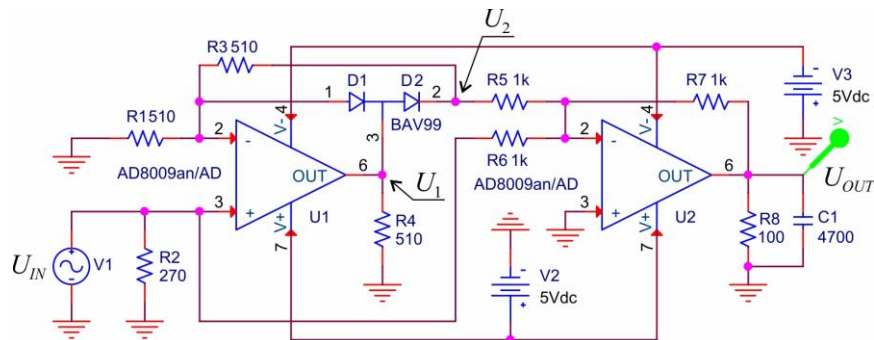


Рис. 3. SPICE модель лінійного активного амплітудного демодулятора

Схема містить однонапівперіодний випрямляч на операційному підсилювачі (ОП) U1 та суматор на ОП U2. При додатній полярності входної напруги U1 працює як інвертуючий підсилювач. В цьому випадку напруга U_1 від'ємна, тобто діод D1 відкритий, а D2 закритий, тому $U_2 = -U_{IN}$. При від'ємній входній напрузі U_2 додатна, тобто діод D1 закритий, а D2 відкритий і замикає коло від'ємного зворотного зв'язку підсилювача U1 та запобігає його насиченню.

Оскільки діод D1 закритий, напруга U_2 також дорівнює нулю. Справедливі співвідношення:

$$U_1 = \begin{cases} -U_{IN} & \text{при } U_{IN} \geq 0, \\ 0 & \text{при } U_{IN} \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Підключення суматора на ОП U2 забезпечує двонапівперіодне випрямлення. Суматор формує напругу:

$$U_{OUT} = -(U_{IN} + 2U_1). \quad (5)$$

Враховуючи формулу (4) одержимо функцію двонапівперіодного випрямлення:

$$U_{OUT} = \begin{cases} U_{IN} & \text{при } U_{IN} \geq 0, \\ -U_{IN} & \text{при } U_{IN} \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Увімкнення діода D2 у схему запобігає насиченню ОП і обмежує перепад його вихідної напруги при зміні полярності входного сигналу.

Результати SPICE моделювання показали, що остання схема забезпечує лінійну демодуляцію амплітудно-модульованих коливань в діапазоні входної напруги 20–1000 мВ, що краще порівняно із попередніми схемами. Амплітудний спектр сигналу на виході лінійного активного амплітудного демодулятора на ОП зображений на рис. 4. Мінімальна величина детектованого сигналу (при несучій 20 МГц та частоті модуляції ~1 кГц), яка спостерігалась без значних спотворень склала 1,8 %. Результати моделювання підтверджені також результатами експериментальних досліджень (рис. 5).

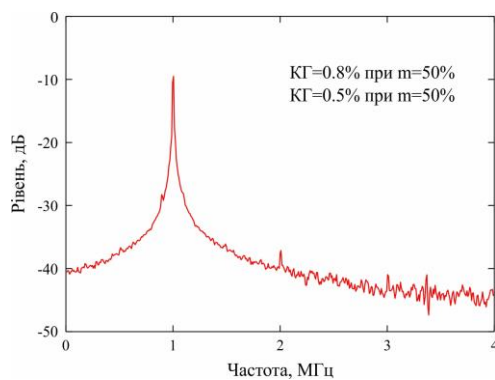


Рис. 4. Амплітудний спектр вихідного сигналу лінійного активного амплітудного демодулятора на ОП

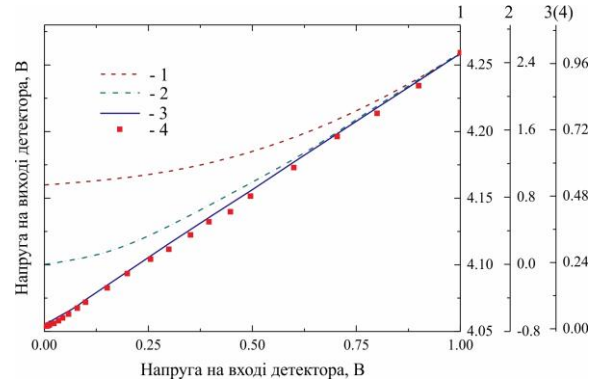


Рис. 5. Передаточні характеристики амплітудних демодуляторів: 1 – на польовому транзисторі, 2 – на діоді з підсилювачем, 3 – на ОП, 4 – експериментальне дослідження схеми (3)

Апаратна реалізація каналу підсилення та детектування

ВЧ коливання з виходу автодинного спін-детектора поступють на вхід пристрою підсилення і детектування, схема якого зображена на рис. 6.

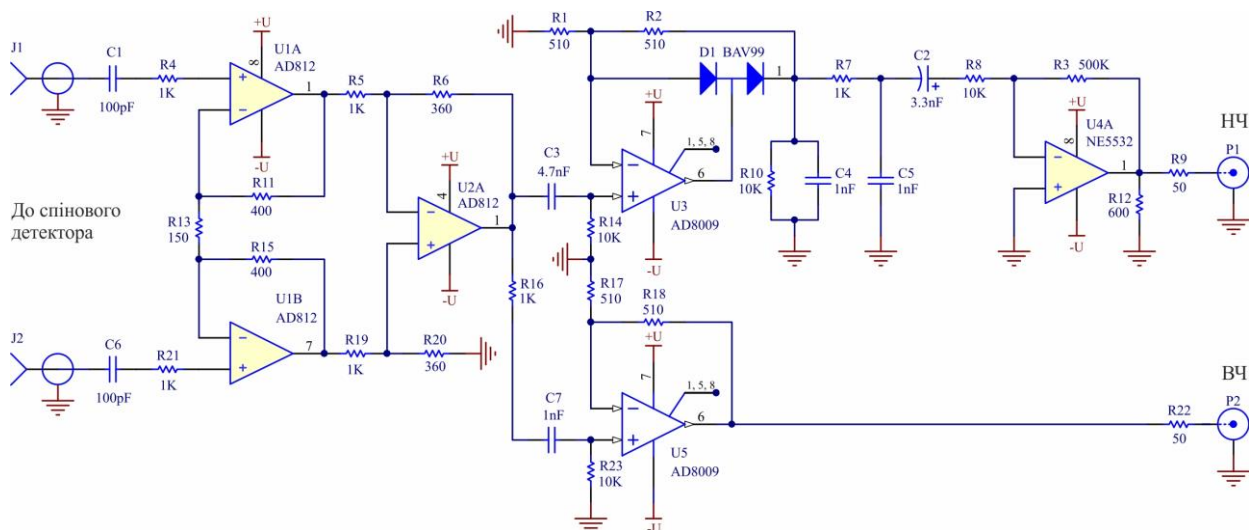


Рис. 6. Схема електрична принципова пристрою підсилення та детектування

Для забезпечення мінімального впливу на спін-детектор, вхідний каскад схеми, який виконує роль узгоджувального підсилювача ВЧ, виконаний на широкосмугових ОП AD812 (DA1 та DA2) з високим вхідним опором та малою паразитною ємністю. ОП включені за схемою вимірювального підсилювача, що забезпечує додаткове збільшення вхідного опору схеми і можливість підсилення диференціальних сигналів.

Розглянемо детальніше вхідне коло пристрою підсилення та детектування, принципова схема якого зображена на рис. 7. Перший каскад являється диференціальним підсилювачем побудованому на двох взаємозв'язаних неінвертуючих підсилювачах DA1.1, DA1.2. Вихідний каскад увімкнений за схемою диференційного інвертуючого підсилювача. Резистором $R_{\text{підс}}$ встановлюється коефіцієнт підсилення за напругою першого каскаду, він загальний для обох неінвертуючих підсилювачів. В розрахунках приймаємо: $R1 = R1^*$, $R2 = R2^*$, $R3 = R3^*$.

Вихідна напруга кожного ОП першого каскаду складає:

$$U_{\text{вих1}} = U_{-\text{вх}} + \left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{підс}}}\right)(U_{+\text{вх}} - U_{-\text{вх}}). \quad (7)$$

Напруга на неінвертуючому вході DA2 вихідного каскаду задається дільником на резисторах R2 і R3 і рівна:

$$U_{d+} = U_{\text{вих1}} \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (8)$$

Напруга на інвертуючому вході DA2, що задається дільником на резисторах R2 і R3:

$$U_{d-} = U_{\text{вих}} - (U_{\text{вих}} - U_{\text{вих1}}) \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (9)$$

Напруги (8) і (9) повинні бути приблизно рівні за рахунок оберненого зв'язку і власного нескінченно великого коефіцієнту підсилення ОП.

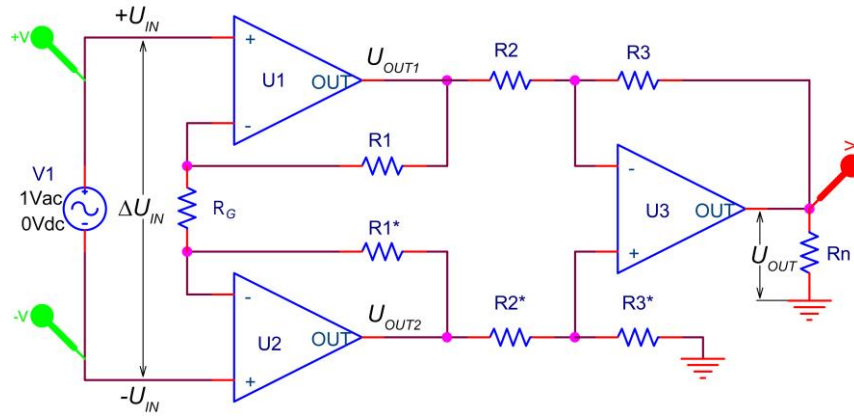


Рис. 7. Принципова схема широкосмугового вимірювального підсилювача на ОП

Звідки:

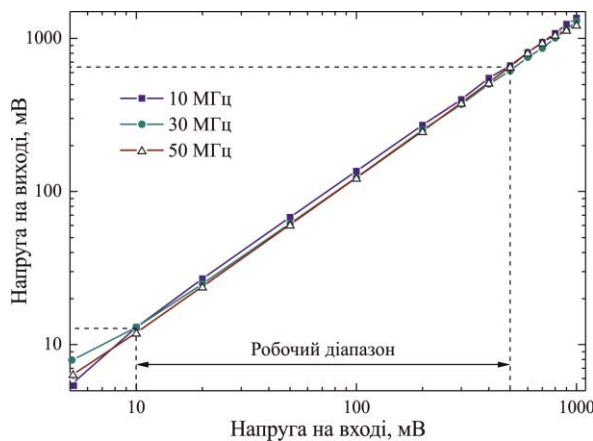
$$U_{\text{вих}} \frac{R_2}{R_3} = U_{\text{вих2}} - U_{\text{вих1}}. \quad (10)$$

Загальний коефіцієнт підсилення за напругою всієї схеми складає:

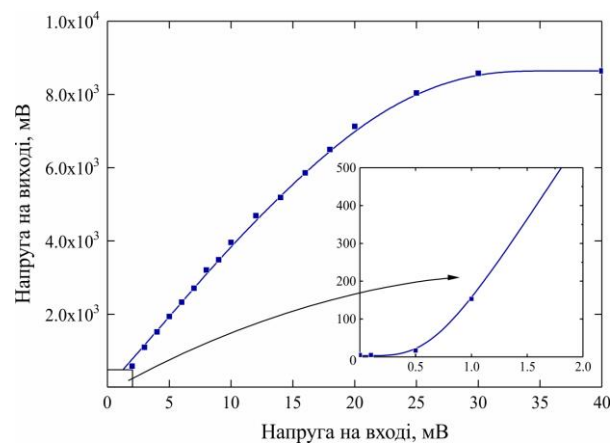
$$K_U = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{\text{підс}}} \right) \frac{R_3}{R_2}. \quad (11)$$

Виходячи із залежності (11), розраховано номінальні значення опорів R_1 , $R_{\text{підс}}$, R_2 та R_3 для забезпечення необхідного підсилення $K_U = 2,5$ дБ при подачі ВЧ сигналу із симетричного спін-детектора.

Сімейство експериментальних амплітудних характеристик ВЧ тракту для частот 10 МГц, 30 МГц та 50 МГц зображено на рис. 8А. Експериментальна передаточна характеристика амплітудного демодулятора на ДАЗ показана на рис. 8Б. Висока лінійність характеристик запропонованого пристрою підсилення та детектування уможливорює зменшення спотворення форми резонансних ліній в робочому діапазоні частот, а рівномірність фазо-частотної характеристики спрощує підстроювання фази синхронного детектора. Загальний коефіцієнт підсилення схеми складає 53.2 дБ.



(а)



(б)

Рис. 8. Результати експериментальних досліджень модуля підсилення та детектування:

А – сімейство амплітудних характеристик ВЧ тракту, Б – передаточна характеристика амплітудного демодулятора

Для зв'язку з пристроями реєстрації ЯКР включено малошумний НЧ підсилювач на ОП NE5532. При смузі пропускання 20 Гц – 50 кГц його коефіцієнт підсилення по напрузі складає 100. Висока лінійність характеристик даного каскаду в робочому діапазоні частот зменшує спотворення форми резонансних ліній. Рівномірність фазо-частотної характеристики спрощує підстроювання фази синхронного детектора. Цифровий частотомір і вольтметр рівня ВЧ коливань підключаються через узгоджувальний широкосмуговий підсилювач на AD8009.

Схема пристрою підсилення та детектування сигналів ЯКР живиться від двополярного автономного джерела напругою ± 12 В. Конструктивно, пристрій реалізований у вигляді екранованого модуля ЯКР спектрометра, лабораторний макет друкованої плати виконаний за технологією SMD монтажу (рис. 9), що забезпечить кращу стабільність та завадостійкість при роботі у ВЧ діапазоні частот.

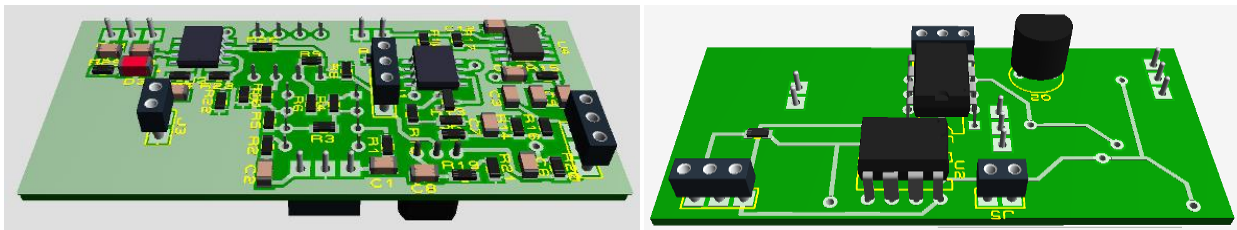


Рис. 9. Зовнішній вигляд розробленого блоку підсилення та детектування неперервного спектрометра ЯКР

Висновки

Існують стаціонарні та імпульсні методи спостереження сигналів ЯКР в області частот від ~ 2 до 1000 МГц. Не зважаючи на те, що в сучасних радіоспектрометрах застосовується імпульсна методика реєстрації резонансних сигналів, метод автодинного детектування спінових резонансів ще досить актуальний у техніці неперервної спектроскопії, зокрема, особливо щодо ЯКР. При цьому, активний елемент є основою автогенераторного каскаду і часто поєднує в собі функції генерування, підсилення та детектування.

В даній роботі представлено результати дослідження SPICE-моделей відомих схемних рішень амплітудних демодуляторів спин-детекторів неперервних спектрометрів ЯКР. Розроблено схему лінійного активного демодулятора для симетричного спин-детектора. Встановлено, що при амплітудній модуляції 40 % та зміні вхідної напруги в діапазоні 20–1000 мВ схема лінійного активного демодулятора на операційному підсилювачі забезпечує кращу лінійність передаточної характеристики (КГ напруги на виході не перевищував 0.5 %) ніж демодулятори на транзисторі та діоді.

Література

1. House L., Hill J. Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry. 2nd edition. Editor-in-Chief John C. Lindon. Academic Press is an imprint of Elsevier. OX2 8DP. OX2 8DP, 2010. 3312 p.
2. Suits B.H. Nuclear quadrupole resonance spectroscopy. In: Vij D. (eds). Handbook of Applied Solid State Spectroscopy. Springer. Boston, MA. P. 65–96.
3. Probst P. A., Collet B., MacInnes W. M. Marginal oscillator optimized for radiofrequency size effect measurements. *Review of Scientific Instruments*. 1976. Vol. 47. P.1522–1526.
4. Cho Sh., Choh S. H. A Nuclear Quadrupole Resonance Spectrometer from 2 to ~ 50 MHz. *Journal of the Korean Physical Society*. 1988. Vol. 21, No 4. P. 399–404.
5. Stoican O. S. NQR detection setup. *Romanian Journal of Physics*. 2006. Vol. 51. No. 1, P. 311–315.
6. Makarov B., Ryzhov V. Advance of marginal oscillator. *RuPAC-2010 : Proceedings of 22nd Russian particle accelerator conference*. Protvino, September 27–october 01 2010. Moscow, 2010. P. 122–124.
7. Ivanchuk M., Brajlovskij V. Automated Nuclear Quadrupole Resonance Spectrometer. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2008. Volume 8. No 2. P. 29–31.
8. Hotra O. Z., Samila A. P., Rozorinov G. M., Hres O.V. Current status and development prospects of nuclear quadrupole resonance pulsed spectroscopy methods: A review. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No 16. P. 1483–1496.
9. Samila A. P., Lastivka G. I., Tanasyuk Yu. V. Actual problems of computer parametric identification of the NMR and NQR spectra: A review. *J. Nano- Electron. Phys.* 2019. Vol. 11, No 5. P. 05036-1–10.
10. Doll A. Pulsed and continuous-wave magnetic resonance spectroscopy using a low-cost software-defined radio. *AIP Advances*. 2019. Vol.9, Issue 11. P. 115110–1–13.
11. Newton M., Breeds E., Morris R. Advances in Electronics Prompt a Fresh Look at Continuous Wave (CW) Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Electronics*. 2017. Vol. 6, No 4. P. 89–121.
12. Gauzzi A., Le Cochec J., Lamura G., Jonsson B. J., Gasparov V. A., Ladan F. R., Placais B., Probst P. A., Pavuna D., Bok J. Very high resolution measurement of the penetration depth of superconductors by a novel single-coil inductance technique. *Review of scientific instruments*. 2000. Vol. 71, No. 5. P. 2147–2153.
13. Hall S. A., Pusateri M.A., Schiano J.L. Labview based frequency counter and voltmeter for a continuous-wave quadrupole resonance spectrometer. *Annual Research Journal*. 2005. Vol. III. P. 187–196.
14. Браїловський В. В. Спин-детектор ЯКР термометра / В. В. Браїловський, А. П. Саміла, О. Г. Хандожко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнародний науково-технічний журнал. – 2009. – № 1. – С. 43–46.
15. Браїловський В. В. Датчик сигналів ядерного квадрупольного резонанса / В. В. Браїловський, А. П. Саміла, О. Г. Хандожко // Прибори та техніка експеримента. – 2010. – № 2. – С. 177.
16. Браїловський В. В. Автодинний давач сигналів ЯКР та ЯМР / В. В. Браїловський, А. П. Саміла, О. Г. Хандожко // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2010. – № 1. – С. 20–24.
17. Политанский Л. Ф. Анализ шумовых характеристик автодинного спин-детектора / Л. Ф. Политанский, А. П. Саміла, В. А. Хандожко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – № 68. – С. 104–110.
18. Furman G. B., Goren S. D. Pure NQR Quantum Computing. *Z. Naturforsch.* 2002. Vol. 57a. P. 315–

References

1. House L., Hill J. Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry. 2nd edition. Editor-in-Chief John C. Lindon. Academic Press is an imprint of Elsevier. OX2 8DP. OX2 8DP, 2010. 3312 p.
2. Suits B.H. Nuclear quadrupole resonance spectroscopy. In: Vij D. (eds). Handbook of Applied Solid State Spectroscopy. Springer. Boston, MA. P. 65–96.
3. Probst P. A., Collet B., MacInnes W. M. Marginal oscillator optimized for radiofrequency size effect measurements. *Review of Scientific Instruments*. 1976. Vol. 47. P.1522–1526.
4. Cho Sh., Choh S. H. A Nuclear Quadrupole Resonance Spectrometer from 2 to ~50 MHz. *Journal of the Korean Physical Society*. 1988. Vol. 21, No 4. P. 399–404.
5. Stoican O. S. NQR detection setup. *Romanian Journal of Physics*. 2006. Vol. 51. No. 1, P. 311–315.
6. Makarov B., Ryzhov V. Advance of marginal oscillator. *RuPAC-2010* : Proceedings of 22nd Russian particle accelerator conference. Protvino, September 27–october 01 2010. Moscow, 2010. P. 122–124.
7. Ivanchuk M., Brailovskyj V. Automated Nuclear Quadruple Resonance Spectrometer. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2008. Volume 8. No 2. P. 29–31.
8. Hotra O. Z., Samila A. P., Rozorinov G. M., Hres O.V. Current status and development prospects of nuclear quadrupole resonance pulsed spectroscopy methods: A review. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No 16. P. 1483–1496.
9. Samila A. P., Lastivka G. I., Tanasyuk Yu. V. Actual problems of computer parametric identification of the NMR and NQR spectra: A review. *J. Nano- Electron. Phys*. 2019. Vol. 11, No 5. P. 05036-1–10.
10. Doll A. Pulsed and continuous-wave magnetic resonance spectroscopy using a low-cost software-defined radio. *AIP Advances*. 2019. Vol.9, Issue 11. P. 115110–1–13.
11. Newton M., Breeds E., Morris R. Advances in Electronics Prompt a Fresh Look at Continuous Wave (CW) Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Electronics*. 2017. Vol. 6, No 4. P. 89–121.
12. Gauzzi A., Le Cohec J., Lamura G., Jonsson B. J., Gasparov V. A., Ladan F. R., Placais B., Probst P. A., Pavuna D., Bok J. Very high resolution measurement of the penetration depth of superconductors by a novel single-coil inductance technique. *Review of scientific instruments*. 2000. Vol. 71, No. 5. P. 2147–2153.
13. Hall S. A., Pusateri M.A., Schiano J.L. Labview based frequency counter and voltmeter for a continuous-wave quadrupole resonance spectrometer. *Annual Research Journal*. 2005. Vol. III. P. 187–196.
14. Brailovskyi V. V. Spin-detektor YaKR termometra / V. V. Brailovskyi, A. P. Samila, O. H. Khandozhko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal. – 2009. – № 1. – S. 43–46.
15. Braylovskiy V. V. Datchyk syhnalov yadernoho kvadropolnoho rezonansa / V. V. Braylovskiy, A. P. Samyla, O. H. Khandozhko // Рубрики у техніки експеримента. – 2010. – № 2. – S. 177.
16. Brailovskyi V. V. Avtodynnyi davach syhnaliv YaKR ta YaMR / V. V. Brailovskyi, A. P. Samila, O. H. Khandozhko // Sensorna elektronika i mikrosistemni tekhnolohii. – 2010. – № 1. – S. 20–24.
17. Politanskij L. F. Analiz shumovykh harakteristik avtodinnogo spin-detektora / L. F. Politanskij, A. P. Samila, V. A. Handozhko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. – 2012. – № 68. – S. 104–110.
18. Furman G. B., Goren S. D. Pure NQR Quantum Computing. *Z. Naturforsch.* 2002. Vol. 57a. P. 315–319.

Рецензія/Peer review : 15.09.2020 р.

Надрукована/Printed : 02.11.2020 р.