УДК 536.531

ПРИРОДА СИГНАЛУ В СУПЕРРЕГЕНЕРАТИВНИХ ДЕТЕКТОРАХ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ

© Володимир Василюк[1], Анатолій Леновенко[2], Петро Столярчук[3], 2005

[1]ВАТ "Укртранснафта", вул. Артема, 60, 04050, Київ, Україна,
[2]Львівський національний університет ім. Ів. Франка, кафедра електроніки,
вул. Університетська, 1, 79000, Львів, Україна,
[3]Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Викладено теоретичні основи суперрегенеративних детекторів ядерного резонансу в когерентному режимі роботи для побудови ядерно-квадрупольних термометрів. Одержано вирази для розрахунку величини і форми сигналів. Наведено приклад розрахунку для реального детектора.

Изложены теоретические основы суперрегенеративиых детекторов ядерного резонанса в когерентном режиме работы для построения ядерно-квадрупольных термометров. Получено выражение для расчета величины и формы сигналов. Приведен пример расчета для реального детектора.

Theoretical basics of the super regenerative nuclear resonance detectors in the coherent mode for the nuclear quadruple thermometers design are considered. Equations for the signal value and shape estimation are obtained. Coherent detector calculation example is described.

У радіоспектроскопії для детектування сигналу ядерного квадрупольного резонансу, залежно від характеристик збуджуючого високочастотного поля застосовуються методи, що використовують стаціонарне і квазістаціонарне високочастотне електромагнітне поле та нестаціонарний (імпульсний) метод.

В термометрії застосовують два перші методи. Стаціонарні методи базуються на основі порогових генераторів (автодинів), які являють собою генератори "слабких" коливань. Основним недоліком автодинних схем є мала чутливість до сигналу ЯКР, що створює значні труднощі при їх реалізації, а часом і обмеження в застосуванні. До квазістаціонарних методів належать всі суперрегенеративні схеми. Суперрегенеративні детектори ЯКР характеризуються високою чутливістю порівняно з автодинними схемами, але внаслідок складності інтерпретації характеристик вихідних сигналів останні широко не застосовують. Основною відмінністю між суперрегенеративним приймачем радіосигналів і детектором ЯКР є те, що в першому випадку він діє як приймач, в другому – як передавач і приймач. В результаті з'являються нові вимоги до режиму роботи останнього.

Суперрегенератор являє собою високочастотний генератор, власні коливання якого періодично гасяться з частотою f_q. Гасіння може здійснюватись від зовнішнього генератора або введенням інерційної ланки між резонансним контуром і підсилювачем, яка приводить до режиму перервної генерації. У першому випадку одержуємо суперрегенератор із зовнішнім гасінням, в другому – з самогасінням. Для детектування сигналів ЯКР використовується тільки когерентний режим роботи, при якому власні коливання за період гасіння не встигають зменшитись нижче від рівня шумів. Спектр такого коливання буде дискретним з інтервалом між спектральними складовими, що дорівнюють частоті гасіння f_q. Суперрегенератор являє собою параметричну систему, в якій приймання сигналу відбувається тільки в момент переходу результуючого затухання контуру через нуль. Збудження ядерної системи, навпаки, відбувається під час великих коливань, тобто моменти збудження і приймання сигналу ядерного квадрупольного резонансу рознесені в часі. Це дає змогу регулювати фазовий зсув між сигналом ЯКР та коливаннями в момент чутливості і тим самим змінювати форму резонансного сигналу. Ця стаття стосується вивчення природи сигналу в суперрегенеративному детекторі, який працює в когерентному режимі, у разі відсутності насичення спінової системи в застосованому зразку термочутливого елемента. Будемо вважати, що ступінь

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

когерентності, який визначається співвідношенням амплітуд напруги шумів і залишкових коливань в момент чутливості, досить великий, тому надалі впливом шумів нехтуємо. Крім цього, аналіз процесів в суперрегенераторі будемо здійснювати, вважаючи сигнал ядерного квадрупольного резонансу достатньо малим порівняно із залишковими коливаннями. За цих умов явищем захоплення частоти можна знехтувати, а підсилення суперрегенератора, що працює в логарифмічному режимі, вважати лінійним. Можна показати, що у разі прикладення до термочутливого елемента квазіперіодичного високочастотного електромагнітного поля, що відзначається в суперрегенеративному детекторі, сигнал ядерного квадрупольного резонансу на клемах резонансного контуру дорівнює:

$$U_к = -4\,\pi\,Q\,q\,\chi\,U(t_1), \qquad (1)$$

де $U(t)$ – спектр коливань суперрегенератора, приведений до моменту чутливості (t_1); Q – добротність контуру; q – коефіцієнт заповнення контуру термочутливою речовиною (коефіцієнт, що характеризує зв'язок контуру з ядерною системою); χ – магнітна сприйнятливість термочутливого зразка.

Підставляючи значення χ і $U(t_1)$ в (1) та врахувавши частотну залежність повного опору суперрегенератора, а також резонансні властивості термочутливого зразка, одержимо:

$$U_к = -\frac{Y\ U_s\ ч_p^{"}\ e^{-j\,J}}{\sqrt{1+o_c^2}} Ч \qquad (2)$$

$$Ч \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \cos\ б_n\ \cos\left[\left(щ_1 + n\ щ_q\right)\ t + j_n - щ_{t_1} - б_n\right]$$

де

$$U(t_1) = U_s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \cos\left[\left(\omega_1 + n\,\omega_q\right)t + \varphi_n - \psi_{t_1}\right]; \qquad (3)$$

$$\chi = \chi^{"} + j\,\chi^{'} = \frac{\chi_p^{"}\,e^{-j\vartheta}}{\sqrt{1+\xi_c^2}};\ Y = 4\,\pi\,Q\,q;\ \vartheta = \operatorname{arctg}\,\xi_c;$$

$$\alpha_n = \operatorname{arctg}\,2\,Q\,n\,\frac{f_q}{f_1};\ \xi_c = T_2^{*}\left(\omega - \omega_p\right);\ \varphi_n = \pi\,n;$$

$$\psi_{t_1} = 1/2\,\beta\,\pi;$$

де ξ_c – узагальнений коефіцієнт розрегулювання щодо резонансної лінії ЯКР; $\chi_p^{"}$ – значення активної частини магнітної сприйнятливості, якщо $\xi_c = 0$; f_q – частота гасіння коливань; n – номер гармоніки спектра суперрегенератора; U_s – максимальна амплітуда коливань суперрегенератора.

Для суперрегенератора із самогасінням

$$B_n = \frac{2\,J_0(\beta_1)}{T_q}\sqrt{\frac{\pi\,C}{|K|\ S_{cep}^{'}(t_2)}}\exp\left[-\frac{n^2\,\omega_q^2\,C}{|K|\ S_{cep}^{'}(t_2)}\right], \qquad (4)$$

а при зовнішньому гасінні

$$B_n = \frac{2\sin\dfrac{(n-\beta)\pi}{m}}{\pi(n-\beta)}, \qquad (5)$$

де $\beta = 2\beta_1$ – індекс частотної модуляції протягом спалаху високочастотних коливань; $|K|$ – модуль коефіцієнта зворотного зв'язку в схемі суперрегенератора; C – еквівалентна ємність резонансного контуру; $J_0(\beta_1)$ – функція Бесселя нульового порядку; T_q – період гасіння; m – шпаруватість імпульсів гасіння; $S_{cep}^{'}(t_2)$ – швидкість (похідна) зміни середньої крутості підсилювача в момент, коли ВЧ-коливання досягають U_s.

У виразі (4) враховано тільки складову функції Бесселя нульового порядку $J_0(\beta_1)$, оскільки в реальних умовах $\beta \le 0{,}3$ і складові вищого порядку дуже малі.

Формула (2) дає змогу обчислити сигнал ЯКР, що виникає в контурі суперрегенератора для будь-якої ширини резонансної лінії.

В радіоспектроскопії часто зустрічається поняття широкої і вузької лінії. Але немає чіткого визначення цього поняття, що призводить до неоднозначності при аналізі процесів. Тому, перш ніж переходити до аналізу процесів у суперрегенеративних детекторах ЯКР, дамо визначення широкої і вузької лінії ЯКР для суперрегенеративного детектора.

Будемо вважати, що сигнал ЯКР в контурі дорівнює нулю, якщо він становить 5% від максимального значення. Тоді, оцінюючи значення сигналу за формулою (2), бачимо, що при $\omega_q \ge 10\,\delta\omega_p$ (де $\delta\omega_p$ – ширина резонансної лінії ЯКР на рівні 0,5), сигнал буде збуджуватись тільки однією складовою спектра, яка в цей момент є резонасноздатною. Сигнал ЯКР від інших складових практично дорівнює нулю.

На основі цього при використанні суперрегенеративних детекторів лінії ЯКР будемо вважати вузькими. Для них виконується умова

$$\omega_q \ge 10\,\delta\omega_p, \text{ тобто } T_q \le 0{,}314\,T_2^{*}, \qquad (6)$$

де T_2^{*} – час поперечної спінової релаксації.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Якщо умова (6) не виконується, то в контурі суперрегенеративного детектора будуть діяти сигнали від інших складових спектра, що вписується в резонансну лінію ЯКР. Оскільки вони додаються з різними фазами, результуючий сигнал зменшується. Цей випадок стосується детектування широких ліній.

Розглянемо величину і форму сигналу ЯКР на виході суперрегенеративного детектора при детектуванні вузьких ліній при відсутності насичення. У такому разі сигнал ЯКР згідно з (2) буде збуджуватись тільки однією складовою спектра суперрегенератора, частота якої збігається з частотою резонансу. Тоді амплітуда сигналу ядерного квадрупольного резонансу, індукованого в контурі для будь-якої n-ї складової спектра згідно з (2) дорівнюватиме

$$U_{кп} = -Y\, U_s\, B_n \cos\alpha_n \frac{(1 - j\xi_c)\chi_p^{''}}{1+\xi_c^2} \exp\left[j\left(n\,\omega_q\, t + \theta_n\right)\right] \quad (7)$$

де $\theta_n = \varphi_n - \psi_{t_1} - \alpha_n$.

Враховуючи, що момент чутливості суперрегенератора повторюється через кожний період гасіння T_q, одержимо

$$U_{кп} = -Y\, U_s\, B_n \cos\alpha_n \frac{\chi_p^{''}}{1+\xi_c^2}\left[\left(\cos\theta_n - \xi_c \sin\theta_n\right) + \right.$$

$$\left. + j\left(\sin\theta_n - \xi_c \cos\theta_n\right)\right]. \quad (8)$$

Вважаючи, що величина сигналу ЯКР мала порівняно із залишковими коливаннями, амплітудна модуляція коливань в момент чутливості буде пропорційна до дійсної частини $U_{кп}$. Тоді, враховуючи підсилення за рахунок регенерації і суперрегенерації, сигнал ЯКР на виході суперрегенеративного детектора можна описати таким виразом:

$$U_{кп} = \mu_p\, \mu_{ср} Y\, U_s\, B_n\, \chi_p^{''} \cos\alpha_n \frac{\cos\theta_n - \xi_c \sin\theta_n}{1+\xi_c^2} \quad (9)$$

де μ_p – коефіцієнт підсилення за рахунок регенерації; $\mu_{ср}$ – коефіцієнт підсилення за рахунок суперрегенерації.

Якщо виразити θ_n через узагальнений коефіцієнт розрегулювання відносно резонансної частоти ЯКР-сигналу і пронормувати (9) по

$$U_{кп} = \mu_p\, \mu_{ср} Y\, U_s\, B_n\, \chi_p^{''} \cos\alpha_n \quad (10)$$

Одержимо зручну для практики формулу, що описує форму лінії ЯКР:

$$U_{кп}^m = \frac{\left(1 + \xi_c\, \xi_{\psi_n}\right)(-1)^p}{1+\xi_c^2\sqrt{1+\xi_{\psi_n}^2}}, \quad (11)$$

де

$$\xi_{\psi_n} = \operatorname{tg}\theta_n;\ p = 1, \text{ якщо } -\frac{\pi}{2} \le \theta_n \le +\frac{\pi}{2};$$

$$\xi_{\psi_n} = \operatorname{tg}\left(\theta_n - \pi\right);\ p = 2, \text{ якщо } \frac{\pi}{2} < \theta_n < \frac{3\pi}{2}.$$

Одержана формула (11) дає змогу з достатньо високою точністю описати форму резонансної лінії на будь-якій із складових спектра суперрегенеративного детектора ЯКР.

Для прикладу розрахуємо форму сигналів ЯКР в $KClO_3$ за (11) для центральної складової спектра і двох бокових по обидва боки від центральної для суперрегенеративного детектора із самогасінням, який має параметри, наведені в табл. 1

Таблиця 1

Термочутливий зразок	F_q, кГц	β	β_1	Q	F_1, МГц	t_1, с	t_2, с
$KClO_3$	20	0,3	0,15	80	28	$\frac{T_q}{2}$	$\frac{T_q}{2}$

На рис.1 зображено нормовані сигнали ЯКР для п'яти компонентів спектра суперрегенеративного детектора, які розраховані і побудовані за домогою ПК з використанням запропонованої теорії. Значення параметрів θ_n, ξ_{ψ_n} та p для кожної спектральної складової наведено в табл.2.

Таблиця 2

Номер спектральної складової сигналу суперрегенеративного детектора в когерентному режимі	θ_n	ξ_{ψ_n}	p
Другий лівий боковий сигнал ЯКР	$-14^0 10'$	–0,252	1
Перший лівий боковий сигнал ЯКР	$-159^0 30'$	–0,374	2
Центральний (основний) сигнал ЯКР	$-27^0 00'$	–0,510	1
Перший правий боковий сигнал ЯКР	$-146^0 30'$	–0,662	2
Другий правий боковий сигнал ЯКР	$-39^0 50'$	–0,834	1

На рис. 2 зображено осцилограми сигналів ЯКР, одержаних експериментально для аналогічного режиму роботи. Порівняння наведених даних підтверджує, що теоретичні і експериментальні результати повністю збігаються.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

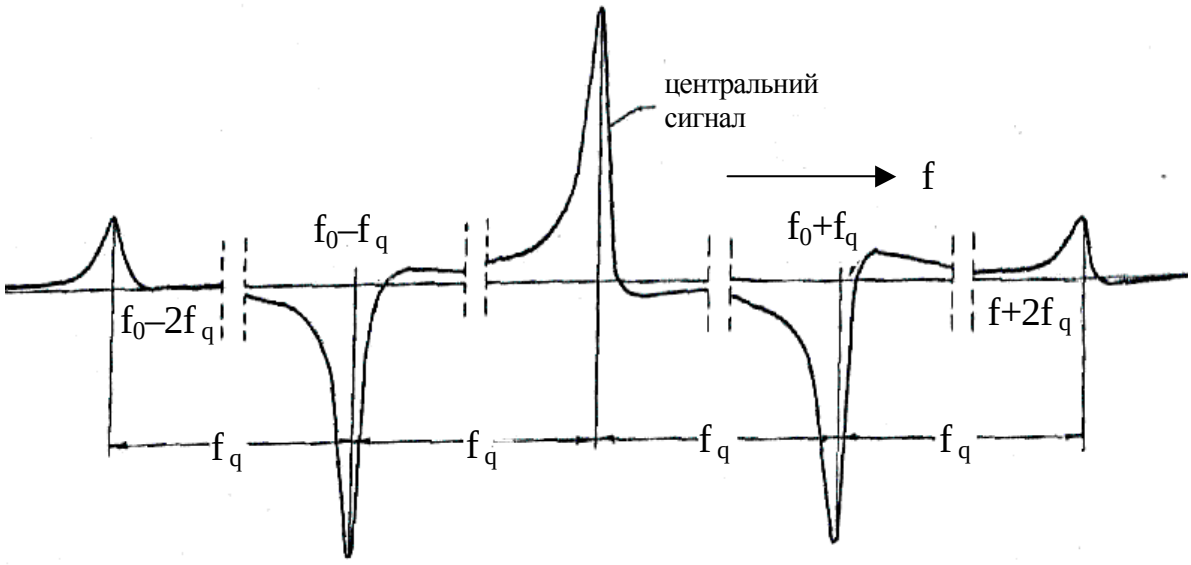

Рис. 1. Спектр теоретично розрахованих сигналів ЯКР суперрегенеративного детектора

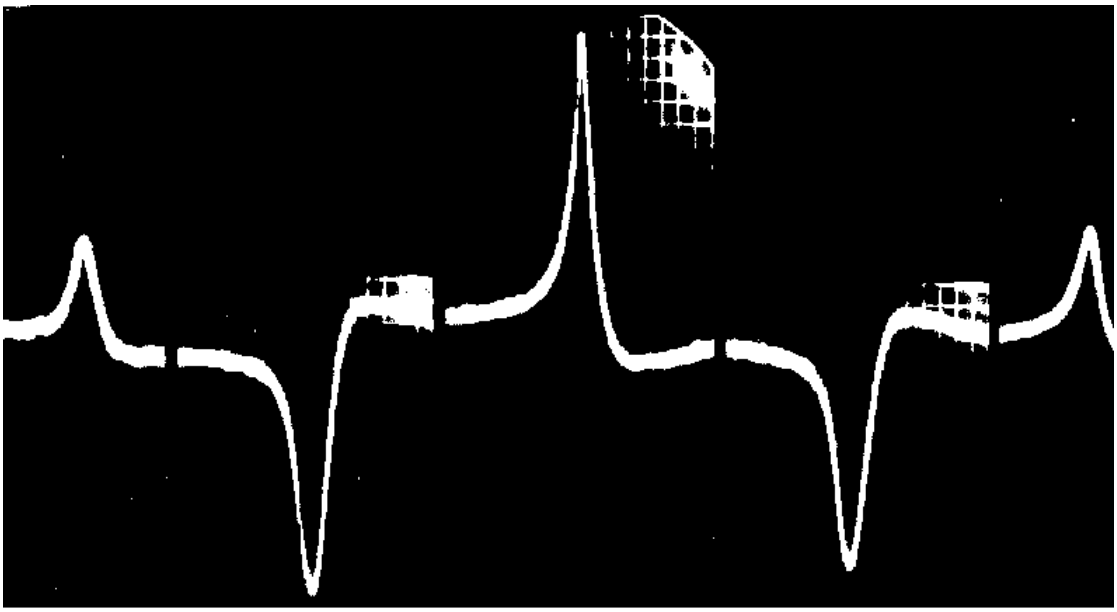

Рис. 2. Осцилограми сигналів ЯКР, одержаних експериментально

Висновки. Запропонована теорія, що з достатньою точністю пояснює природу сигналів в суперрегенеративних детекторах ЯКР. Виведені рівняння дають змогу розраховувати сигнали і реалізувати детектори ядерного квадрупольного резонансу, які б задовольняли технічним вимогам щодо побудови еталонних ядерно-квадрупольних термометрів.

1. Das T.P., Hahn E.L. Nuclear quadrupole resonance spectroscopy. –New York-London, 1958. 2. Whitehead J.R. Super-regenerative receivers. –Cambridge. 1959. 3. Белкин М.К. Сверхрегенеративный радиоприем. –К., 1968.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua