

теплоносителя. утв. Минтопэнерго РФ 12.09.1995 № Вк-4936 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 25.09.1995 № 954). 13. Гришанова І.А. Шляхи вдосконалення витратомірів-лічильників // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – Вип. 38. – К., 2009. – С. 62–70. 14. Грачева Екатерина, Сколько платит за воду и отопление? Поквартирный учет расхода воды и тепла и оплата реально предоставленных услуг. –

<http://www.energobser.74.ru/uchet/uchet02.htm>. [З мережі] 15. Енциклопедія термометрії / Я.Т. Луцук, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудацький, Б.І. Стадник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – С. 428. 16. Врагов А.П. Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: навч. посіб. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – 262 с.

УДК 621.311.13

МЕТОД ПОБУДОВИ ЯДЕРНО-КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ

© Волицький Ростислав, 2013

Національний університет «Львівська політехніка», кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 28а, 79013, Львів, Україна

Розглянуто традиційні методи детектування ядерно-квадрупольного резонансу та запропоновано новий підхід до розроблення його вимірювального каналу. Канал оснований на цифрових синтезаторах та цифрових елементах. Розглянуто недоліки і переваги цих методів.

Рассмотрено традиционные методы детектирования ядерно-квадрупольного резонанса и предложен новый подход к разработке его измерительного канала. Канал базируется на цифровых синтезаторах и цифровых элементах. Также рассмотрены недостатки и преимущества этих методов.

As part of this work were considered traditional methods of detection of nuclear quadrupole resonance, and a new approach to the development of its measuring channel. This channel is based on the digital synthesizers and digital elements. It was also discussed the advantages and disadvantages of these methods.

Вступ. Ядерно-квадрупольний резонанс (ЯКР) – це метод спектроскопії, вперше описаний у роботі Демельта і Крюгера 1946 р. [1]. За допомогою цього методу можна отримати детальну інформацію про фізико-хімічну будову певного кристала речовини, а саме: симетрію кристала, будову хімічних зв'язків, фазових переходів, міжмолекулярних з'єднань, дефектів та внутрішніх процесів кристала [2, 3]. Цей метод становить величезний інтерес для фізиків і хіміків, оскільки він уможливує розуміння суті і природи певної речовини.

Суть явища ЯКР криється у такому понятті, як ядерно-квадрупольний момент. Ядерно-квадрупольний момент – це така величина, яка характеризується неідеальністю сферичної форми ядра. В кристалах під впливом ядерного квадруполя з електричним полем електронних оболонок виникає орієнтація ядерних спінів у деякому напрямку. Якщо перпендикулярно до

цього напрямку накласти радіочастотне поле, частота якого дорівнює частоті переходу між рівнями квадрупольної енергії, то можна спостерігати поглинання потужності радіочастотного поля [4].

ЯКР тісно пов'язаний з ядерно-магнітним резонансом. Міллер і Беррел у вступі до своєї статті прекрасно описують відмінність між цими двома явищами [5]. Весь матеріал цієї статті зводиться до того, що ключовою відмінністю між ЯМР та ЯКР є саме слово «зовнішній». Тобто у ЯМР виникає зовнішнє магнітне поле, тому що дослідник спрямував зусилля на те, щоб прикласти це поле до досліджуваного зразка, можливо, використовуючи надпровідний електромагніт. У ЯКР потрібне електричне поле (якщо точніше, градієнт електричного поля), яке є самодостатнім: воно відображає місця розташування електронів навколо досліджуваного ядра, тобто існує завжди. За цих умов відбувається поглинання енергії

зовнішнього поля, яке можна визначити, а отже, і дізнатись про внутрішню структуру або процеси у кристалі за допомогою першого чи другого методу.

Відповідно до вказаних явищ, автор статті наводить хороший приклад: атомний електрон поглинає фотон певної частоти (тобто отримує порцію потрібної енергії) і переходить від стану спокою у збуджений стан, коли ж навпаки, то електрон випромінює фотон тієї самої частоти, щоб зрівноважити свою енергію.

У 1951 р. Хорст Байер розробив теорію температурної залежності частоти ЯКР у вибраному термометричному матеріалі [6]. Ця теорія ґрунтується на принципі ЯКР. Саме це стало поштовхом для створення ядерно-квадрупольного термометра. Цю ідею вперше запропонували такі вчені, як Крістофер Дін і Роберт Паунд [7].

Ядерно-квадрупольний резонансний термометр. Ядерно-квадрупольний резонансний термометр (далі ЯКР термометр) є складним сучасним електронним приладом, яким можна вимірювати абсолютну температуру з прецизійною точністю у широкому діапазоні. Термометр здатний вимірювати у діапазоні (77–425) К з точністю 0,001 К та у діапазоні (10–77) К з точністю 0,01 К. Нижче 10 К сигнал ЯКР термометра різко спадає і вимірювання стає неможливим.

Чутливим елементом (сенсором) термометра слугує хлорат калію (КСіО₃), оскільки цей елемент має високу хімічну стабільність. Саме ця сіль нині найкраще задовольняє вимоги щодо побудови чутливого елемента ЯКР термометра. Сенсор ЯКР термометра одноразово відградуваний, не потребує періодичних перевірок і калібрування протягом всього періоду експлуатації. Також варто зазначити, що сенсор є чутливим до потужного магнітного поля. Хоч і це магнітне поле не впливає на роботу сенсора, але сигнал різко падає і розширюється, що не сприяє точному вимірюванню. Якщо напруженість магнітного поля перевищує 160 А/М, сигнал ЯКР практично зникає і термометр стає непрацездатним. Цю проблему можна вирішити екрануванням чутливого елемента пермалоевим екраном.

$$\text{Чутливість } S = \left. \frac{dF_{\text{ЯКР}}}{dT} \right|_{T=300 \text{ К}} = 5 \frac{\text{кГц}}{\text{град}}, \text{ на резонансній частоті ЯКР } F_{\text{ЯКР}} = (28 \pm 1) \text{ МГц}$$

Спроекований ЯКР термометр не має аналогів в Україні та СНД і може бути виготовлений лише на замовлення, оскільки серійно не випускається.

Ремонт приладу може виконати лише виробник або спеціаліст у цій галузі, що має спеціальну підготовку [8].

Огляд відомих методів вимірювання. Найпоширенішим методом детектування ЯКР є використання аналогового LC генератора. Він використовується у схемах автодинного детектора резонансу [2]. Схему ЯКР термометра на базі LC генератора наведено на рис. 1.

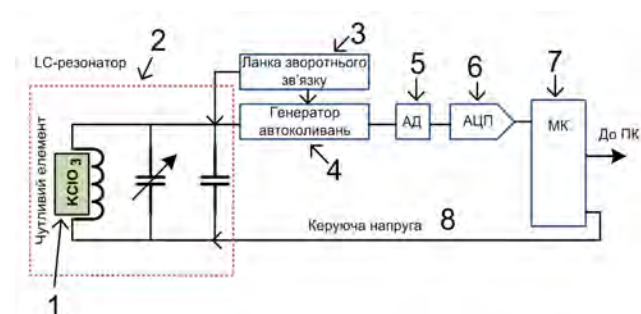


Рис. 1. Схема ЯКР термометра на базі LC генератора (1 – чутливий елемент, 2-LC – резонатор, 3 – ланка зворотного зв’язку, 4 – генератор автоколивань, 5 – амплітудний детектор, 6 – аналого – цифровий перетворювач, 7 – мікропроцесор, 8 – керуюча напруга)

Принцип роботи цієї схеми аналогічний до принципу роботи гетеродинного індикатора резонансу. Чутливий елемент КСіО₃, у вигляді порошку чи монокристала поміщається в індуктивну котушку. LC генератор задає коливання відповідної частоти. Переналаштування частоти забезпечується зміною ємності LC контура. Для цього використовується варикап (варистор), на який подається нова керуюча напруга (головна ланка зворотного зв’язку) з мікропроцесора (МК). Коли система і відповідна котушка LC контура працюють у резонансному режимі з чутливим елементом, відбувається зменшення амплітуди коливань системи, яку фіксує амплітудний детектор (АД). Це явище зумовлене тим, що з переходом ядер ³⁵Cl на вищий енергетичний рівень відбувається поглинання енергії від коливального контура [8]. Результати вимірювання амплітуди і частоти подаються на мікропроцесор. При зміні температури змінюється резонансна

частота чутливого елемента, що призводить до зміни амплітуди коливань коливального контура або системи. Цю зміну фіксує амплітудний детектор і дані передаються на мікропроцесор. Мікропроцесор, обробивши ці дані, змінює керуючу напругу, щоб налаштувати коливальний контур на нову резонансну частоту.

Основні недоліки схеми ЯКР термометра на базі LC генератора:

1. Нестабільність у часі параметрів коливань.
2. Чутливість до впливу довкілля.
3. Конструктивна складність.
4. Високий рівень шумів.
5. Наявність нелінійних спотворень, зумовлених використанням варисторів (варикапів).

Загалом ці недоліки типові для всіх аналогових LC генераторів. Тому в багатьох галузях широкого застосування набули генератори на основі цифрових систем.

Основною метою роботи є аналіз можливості використання цифрового синтезатора для побудови ЯКР термометра.

Прямий цифровий синтез. Прямий цифровий синтез (DDS) – порівняно новий метод синтезу частоти, який з'явився в 70-х роках минулого століття. Всі методи синтезу доступні розробникам вже десятиліття, але тільки останнім часом на DDS звернуто пильну увагу. Поява дешевих мікросхем повних DDS і зручних засобів розроблення робить сьогодні їх привабливими для різних сфер застосування.

DDS унікальні своєю цифровою визначеністю: сигнал, згенерований DDS, синтезується з притаманною цифровим системам точністю. Частота, амплітуда і фаза сигналу в будь-який момент часу відомі та підконтрольні. Єдиним елементом, який володіє властивою аналоговим схемам нестабільністю, є цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Все це є причиною того, що останнім часом DDS витісняють звичайні аналогові синтезатори частот (наприклад, RLC контур).

Основні переваги DDS:

1. Цифрове управління частотою і фазою вихідного сигналу.
2. Дуже висока роздільна здатність за частотою і фазою.
3. Екстремально швидкий перехід на іншу частоту (фазу), переналаштування частоти без розриву фази, без викидів та інших аномалій, зв'язаних з часом встановлення.

4. Архітектура, яка ґрунтується на DDS, через малий крок переналаштування за частотою, виключає необхідність використання точного підлаштування опорної частоти, а також забезпечує можливість параметричної температурної компенсації.

5. Цифровий інтерфейс дає змогу легко реалізувати мікроконтролерне управління.

6. Для квадратурних синтезаторів наявні DDS з I і Q виходами, які працюють узгоджено.

Частотна роздільна здатність DDS становить сотні й навіть тисячні частки герца при вихідній частоті близько десятків мегагерц. Така роздільна здатність недоступна для інших методів синтезу. Іншою характерною особливістю DDS є дуже висока швидкість переходу на іншу частоту.

Як видно з представлених характеристик, DDS являють собою одну з найкращих схем для реалізації ЯКР термометра.

Метод побудови ЯКР термометра на основі прямого цифрового синтезу. Як вказано вище, у наш час найбільшого поширення набули цифрові схеми прямого цифрового синтезу. Схема ЯКР на основі DDS представлена на рис. 2.

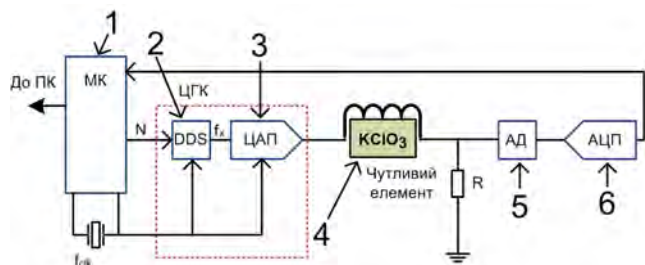


Рис. 2. Схема ЯКР на основі DDS

(1 – мікроконтролер, 2-DDS, 3-цифро-аналоговий перетворювач, 4-чутливий елемент, 5-амплітудний детектор, 6- аналого-цифровий перетворювач)

Управління і взаємодія з персональним комп'ютером (ПК) може здійснюватись за допомогою мікроконтролера (МК). DDS формує синусоїдний сигнал у цифровому вигляді заданої частоти. Цю частоту задає мікроконтролер. Оскільки резонанс хлорату калію відбувається на частоті (28 ± 1) МГц, то потрібно використовувати високошвидкісний ЦАП (частота дискретизації повинна бути в десятки, сотні разів більша, ніж частота резонансу.) Роботу ЦАП, DDS і МК синхронізує зовнішній кварцовий резонатор стабільної частоти ($f_{кв}$), що забезпечує високу

точність роботи системи в часі. Для забезпечення належної чутливості коливання на виході ЦАП підводиться до термочутливої речовини KClO_3 за допомогою RL ланки (як і у випадку гетеродинної схеми, описаної вище). АД визначає амплітуду коливань, яка подається на МК. У разі зміни температури МК на основі одержаних даних переналаштовує частоту синтезатора і забезпечує роботу системи на резонансній частоті. Як і у випадку гетеродинної схеми, функція МК полягає у забезпеченні глобального зворотного зв'язку, тобто МК виконує роль слідкуючої системи.

Висновки. Здійснено огляд і проаналізовано відомі методи ЯКР детекції, запропоновано структуру ЯКР на базі DDS. Цей метод побудови ЯКР термометрів може використовуватись у сучасних метрологічних системах, оскільки він має такі переваги порівняно з аналоговим методом побудови:

1. Очікується суттєве зменшення впливу шумів, що є основним джерелом похибок наявних систем.

2. Стабільна форма сигналу.

3. Вища точність частоти.

4. Спрощується будова ЯКР термометра, що відкриває можливість його виготовлення як частково інтегральної схеми (котушку індуктивності замінити неможливо).

5. Оскільки частота задається з високою точністю, то в схемі не використовується частотомір.

Наведені висновки свідчать про доцільність використання прямого цифрового синтезу для побудови ЯКР термометра та подальші можливості його удосконалення.

1. *Dehmelt H.G. & Kruger H. Kurze Originalmitteilungen. Kernquadrupolfrequenzen in festem Diehloräthylen. Naturwiss. 37, 111-112. 1950.* 2. *Гречишкін В.С., Шнилевой А.А. Косвенные методы изучения ядерных квадрупольных взаимодействий в твердых телах // Успехи физических наук. –1996. – Т. 166, № 7.* 3. *Bryan H. Suits. Nuclear Quadrupole resonance spectroscopy // Physics Department, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA. 2005.* 4. *Гречишкін В.С. Ядерный квадрупольный резонанс // Успехи физических наук. – 1959. – Т. LXIX, вып. 2. – С. 189–216.* 5. *Joel B. Miller and Geoffrey A. Barrall. Explosives Detection with Nuclear Quadrupole Resonance. American Scientist. – 2005. – Vol. 93. –С. 50–57.* 6. *Bayer H. Zur Theorie der Spin-Gitterrelaxation in Molekülkristallen. Z. Physik 130, 227–238. 1951.* 7. *Dean C. and Pound R.V. The Temperature Dependence of the Chlorine Quadrupole Coupling in Solid Benzene Compounds. J. Chern. Phys. 20, 195. 1952.* 8. *Леновенко А.М. Ядерно-квадрупольний резонансний термометр ЯКРТ-5М. – Львів, 2007.*