

УДК 681.396

Високоточний ядерно-квадрупольно-резонансний термометр для аерогідродинамічних досліджень

Т. М. Ткаченко¹, Ю. Г. Пількевич², В. О. Мілейковський³¹ д.т.н., професор. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951² здобувач. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, y.rozorinova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7618-0250³ д.т.н., доцент. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, v_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Анотація. У гідроаеродинаміці є задачі, які вимагають підвищеної точності вимірювання температури. Прикладом є вимірювання надлишкової температури на периферії турбулентних струмин. Необмежене підвищення температури на осі струмини задля підвищення точності вимірювання недоцільне через неавтономність за часом Архімеда. Для цього можливо використати явище ядерного квадрупольного резонансу. Запропоновано прилад для точного вимірювання температури в діапазоні від 0 °С до +200 °С. З використанням пакету графічного програмування LabView побудовано віртуальну модель автоматичного термометра на основі ядерного квадрупольного резонансу. Датчик ядерного квадрупольного резонансу відстежує резонансну частоту поглинання термометричної речовини і передає сигнал на вхід надрегенерації. Показано, що для зменшення похибки вимірювання необхідно або використати ручний спосіб вимірювання частоти або регенеративний режим.

Ключові слова: графічне програмування, температура, ядерний квадрупольний резонанс.

Вступ. Наявні прилади для вимірювання температури забезпечують необхідну точність і надійність для більшості задач наукових, промислових досліджень, налаштування й експлуатації систем теплогазопостачання і вентиляції. Однак, існує клас задач, для яких похибка вимірювання температури $\pm 0,2...0,3$ К є суттєвою. Однією з таких задач теоретичної гідроаеродинаміки є вимірювання розподілу температури на периферії турбулентних неізотермічних струмин. Тому виникає задача підвищення точності засобів вимірювання температури.

Актуальність досліджень. Підвищення точності аерогідродинамічних досліджень є актуальною задачею, пов'язаною з поглибленням теорії турбулентних течій. Поглиблені теорії дозволять підвищити достовірність методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та аналітичні методи розрахунку течій у системах формування мікроклімату і вентиляційних приміщеннях. Крім цього, підвищення точності температурних вимірювань може покращити якість і ефективність високотехнологічного виробництва в інших галузях техніки.

Останні дослідження та публікації. На сьогодні немає єдиної точки зору щодо швидкості повітря на межі струмини. За “старою теорією” [1] Г. Шліхтинга ця швидкість у вільній ізотермічній струмині дорівнює нулю. За “новою теорією” [2] М. Й. Грімтіліна вона приймається лише 5 % від осьової. За теорією А. Я. Ткачука [3] розрахункове значення швидкості на межі струмини дорівнює 1,03 %.

Турбулентні струмини в широкому діапазоні числа Рейнольдса автономні за ним. Тому вимірювання задля підвищення точності на периферії найбільш простих струмин можна виконувати при максимальних значеннях швидкості повітря на виході, м/с, за яких стисливість (число Маха) не має значущого впливу.

У роботі [1] застосовано значення швидкості до 100 м/с. Тоді основною проблемою стає не похибка замірів усередненого модуля швидкості, м/с, а точність вимірювання напрямку руху поблизу межі струмини. Це б дозволило більш точно визначити складову вздовж напрямку струмини.

Більші проблеми виникають при випробуванні зразків повітророзподільників промислового виробництва. У них не завжди можливо створити високу швидкість через необхідність завищеного тиску, Па. Наприклад, повітророзподільник має коефіцієнт місцевого опору лише $\zeta = 3$. При початковій швидкості $v_0 = 50$ м/с та стандартній густині повітря $\rho = 1,2$ кг/м³ необхідний надлишковий (понад атмосферний) тиск [3, 4] перед повітророзподільним пристроєм $\Delta p = \zeta \rho v_0^2 / 2 = 4500$ Па.

Конструкцію пристрою може бути не розраховано на такий тиск. Адже навіть для промислової вентиляції у відгалуженнях рекомендовано приймати швидкість не більше 6 м/с [3, 4]. При цьому тиск становитиме лише $\Delta p = 64,8$ Па. Це в $4500/64,8 = 69,4$ рази менше ніж попереднє значення.

Значно складніша ситуація спостерігається з вимірюванням надлишкової температури ΔT ,

К, (понад температуру навколишнього середовища T_{∞} , К). Відмінність температури в струмині T , К, від T_{∞} , К, призводить до відповідної різниці густини, $\text{кг}/\text{м}^3$. Гравітаційні сили можуть суттєво деформувати таку струмину відповідно до плинного критерію Архімеда [2]:

$$Ar_x = \frac{g x \Delta T_m}{v_m^2 T_{\infty}}, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; x – шлях струмини від випуску до розрахункового перерізу, м ; ΔT_m – надлишкова температура на осі струмини в розрахунковому перерізі, К ; v_m – відповідна швидкість повітря, $\text{м}/\text{с}$.

Турбулентні повітряні струмини автотельні за числом Архімеда в дуже вузькій області [2]:

- для компактних струмин $Ar_x = 0 \dots 0,1$;
- для плоских струмин $Ar_x = 0 \dots 0,15$.

Якщо б можна було підвищити початкову швидкість повітря хоча б до $50 \text{ м}/\text{с}$, то для досягнення потрібного числа Архімеда (1) завжди можна було б підібрати пару значень $(v_m, \Delta T_m)$. Однак, у більшості повітророзподільників промислового виробництва це неможливо. Тому при дослідженнях масштаби швидкості та температури приходить приймати близькими до одиниці. Фактична похибка вимірювань надлишкової температури, К , на периферії струмини може досягати 10% і більше при необхідній похибці наукових досліджень до 5% .

Єдиною можливістю підвищення точності досліджень периферійної зони струминних течій є зменшення похибки вимірювання температури, К . При цьому важливими умовами є мала інерційність та малі розміри датчика. Остання умова забезпечує необхідну роздільну здатність результатів.

Високонадійний і точний метод температурних вимірювань може використати ядерний квадрупольний резонанс (ЯКР). Цей метод базується на взаємодії градієнта електричного поля кристалічної решітки й квадрупольного електричного моменту ядра, викликаного відхиленням розподілу заряду ядра від сферичної симетрії. Ця взаємодія обумовлює прецесію ядер, частота якої залежить від градієнта електричного поля решітки. Для різних речовин вона має значення від сотень кілогерц до гігагерц.

Градієнт електричного поля решітки залежить від температури. З підвищенням температури частота ЯКР знижується. Датчик ЯКР-

термометра є ампулою з речовиною, замкненою всередину котушки індуктивності в контурі генератора. При збігу частоти генератора з частотою ЯКР речовини відбувається поглинання енергії від генератора. Принципи побудови стабільних генераторних схем викладені в [5, 6].

Ефективною термометричною речовиною є гранульований хлорат калію KClO_3 , що є одночасно осердям індуктивності в контурі генератора. Похибка вимірювання температури в межах $273,15 \dots 473,15 \text{ К}$ ($0 \dots +200 \text{ }^\circ\text{C}$) зменшується від $\pm 0,02 \text{ К}$ до $\pm 0,002 \text{ К}$ [7]. Позитивною якістю ЯКР-термометрів є їхня необмежена в часі стабільність, а недоліком – істотна нелінійність функції перетворення.

Останніми роками метод ЯКР знаходить все більше застосування в різній вимірювальній апаратурі. На основі цього методу виготовляються датчики температури, магнітного поля, тиску та ін. Мала абсолютна похибка вимірювання температури порядку 10^{-3} К робить їх незамінними при прецизійних вимірюваннях, а вихід інформації у вигляді частоти дуже зручний для створення автоматичних пристроїв.

Мета статті. Побудова й експериментальна перевірка автоматичного ЯКР-термометра у вказаних вище межах вимірювання з використанням технологій швидкого проектування, зокрема пакету графічного програмування LabView.

Структурна схема. Структурна схема ЯКР-термометра показана на рис. 1. Датчиком температури є надрегенеративний спектрометр з автоматичним стеженням за центром лінії поглинання, що складається з власне надрегенератора, смугового фільтра, компаратора, підсилювача постійного струму і генератора модуляційної напруги.

Схема, що здійснює перехід надрегенератора до режиму безперервної генерації і виведення інформації на індикацію містить:

- одновібратор;
- буферний каскад;
- мікроконтролер;
- індикатор.

Датчик температури автоматично стежить за резонансною частотою поглинання, що залежить від температури робочої речовини.

З виходу надрегенератора сигнал поглинання надходить на смуговий фільтр, а потім – на компаратор. Після компаратора напруга, що дорівнює різниці напруги входів, посилюється підсилювачем постійного струму. Цей сигнал через коло зворотного зв'язку керує системою стеження за резонансною частотою поглинання.

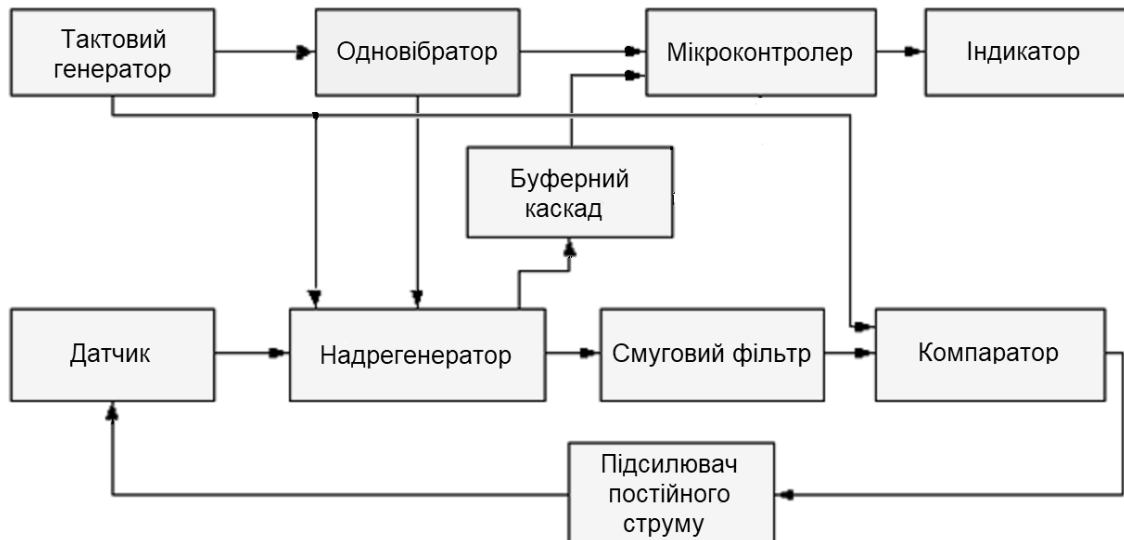


Рис. 1. Структурна схема ядерно-квадрупольно-резонансного термометра

Частота опитування датчика визначається одновібратором, коливання якого синхронізовано з тактовим генератором. Поки не надійде імпульс від одновібратора, працює генератор тактової частоти. При цьому відбувається налаштування надрегенерації на частоту ядерного квадрупольного резонансу.

При появі імпульсу від одновібратора робота тактового генератора зупиняється. Надрегенерація переводиться в режим безперервної генерації.

Сигнал від надрегенерації потрапляє на буферний каскад, що складається з емітерного повторювача й подільника частоти. Після цього сигнал надходить до мікроконтролера, де перераховується на температуру, K , і відображається на індикаторі.

Частота сигналу, що приймається (частота ЯКР) $f_{\text{ЯКР}}$ лежить у діапазоні від 26 МГц до 28 МГц. Температура T , що відповідає максимальній і мінімальній частотам, дорівнює 293,15 К (20 °С) і 456,15 (183 °С).

Рівень сигналу, що приймається $U_{\text{вих}}$ на частоті ЯКР, становить 0,5 мВ. Рівень шуму $U_{\text{ш}}$ не більше 100 мкВ. Спектр термометричної речовини відповідає рис. 2.

Датчик ядерного квадрупольного резонансу відстежує резонансну частоту поглинання термометричної речовини й передає сигнал на вхід надрегенерації. Частота підстроювання датчика регулюється за допомогою варикапа. Ємність останнього змінюється залежно від сигналу, що надходить від підсилювача постійного струму. Датчик приєднується до колекторного кола надрегенерації.

При створенні принципової електричної схеми ЯКР-термометра слід правильно розрахувати ємності і вибрати варикап для підстроювання датчика на резонансну частоту [8, 9].

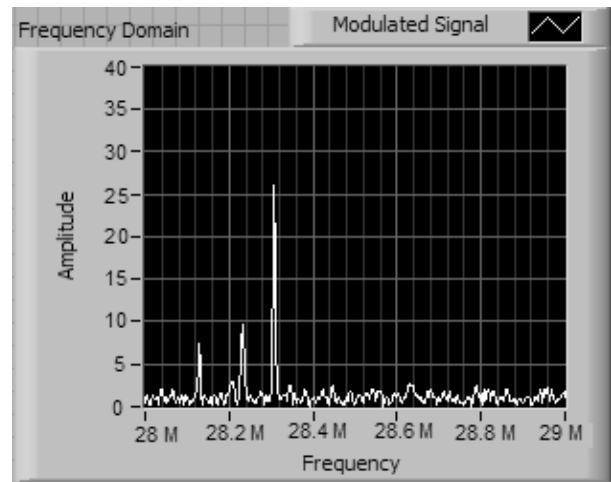


Рис. 2. Спектр $KClO_3$

Варикап повинен мати діапазон зміни ємності не менше 10 пФ. Його зворотна напруга при максимальному значенні ємності не повинна перевищувати напругу живлення (наприклад, 12 В). Цим умовам задовольняє, наприклад, варикап типу ВВ405В.

Коли на вхід надрегенерації надходить імпульс тактового генератора, на його виході формується сплеск амплітудно-модульованих коливань. Частота появи сплесків визначається частотою тактового генератора.

Надрегенерація є регенерацією, у якої еквівалентне загасання контура повільно змінюється порівняно з власними коливаннями. При цьому на деяких інтервалах часу воно стає негативним. Тоді регенерація переходить в режим самозбудження.

Зазвичай еквівалентне загасання змінюється з допоміжною частотою – частотою суперізації. Вона в кілька разів вище за максимальну частоту модуляції і значно менше частоти сигналу і центральної частоти резонансного контура (приблизно у 500...1000 разів).

Надрегенератор може бути зібраний за класичною схемою на біполярному транзисторі. Еквівалентна добротність контура надрегенератора [8]

$$Q_E = \frac{\rho}{R_B + R_{\text{дод}} - K_{\text{ПЗЗ}} S \rho}, \quad (2)$$

де R_B – опір втрат у контурі, Ом; $R_{\text{дод}}$ – додатковий опір контура, Ом, $K_{\text{ПЗЗ}}$ – коефіцієнт передачі позитивного зворотного зв'язку; S – крутість характеристики транзистора в робочій точці, Ом⁻¹; ρ – характеристичний опір контура датчика, Ом; останній член знаменника має розмірний коефіцієнт, рівний 1 Ом, який умовно не наведено.

Коли знаменник формули дорівнює нулю, крутість S набуває деякого критичного значення $S_{\text{кл}}$, Ом⁻¹, і надрегенератор знаходиться на межі самозбудження. Тому знаменник формули еквівалентної добротності має бути більше нуля, щоб надрегенератор не знаходився на цій межі.

З виходу надрегенератора сигнал частоти поглинання поступає на смуговий фільтр, який виділяє його основну гармоніку. Як активний фільтр доцільно застосувати смуговий бікватратний фільтр другого порядку [10]. Далі сигнал проходить ланцюгом компаратор – підсилювач постійного струму – датчик.

Моделювання автоматичного ЯКР-термометра. У середовищі LabView містяться вбудовані шаблони, що називаються віртуальними приладами (ВП). Вони містять віртуа-

льні підприлади (ВПП), функції, структури й об'єкти лицьової панелі. Ці елементи необхідні при створенні базових конфігурацій для виконання різних вимірювань.

У схемі моделювання автоматичного ЯКР-термометра (рис. 3) надрегенератор є генератором частоти зразка, Гц. Ця частота далі буде конвертована в температуру, К.

Моделювання розпочинається з розміщення на блок-діаграму ВП Simulate Signal з привласненням йому назви "Надрегенератор". Далі встановлюються необхідні параметри генератора:

- Timing: Samples per second (Hz) – число точок в секунду, Гц, значення 1E+9;
- Frequency (Hz) – частота, Гц, значення 2,28 МГц;
- Reset Signal: Reset phase, seed, and time stamps – скидання сигналу в початковий стан (поодинокий сигнал).

На лицьову панель встановлюється термінал Vertical Pointer Slide – термінал введення величини. У даному випадку вводиться температура в кельвінах.

Позначимо властивості терміналу Vertical Pointer Slide:

- Appearance (зовнішній вигляд) – вводимо назву "Slide";
- Format and Precision (формат и точність) – встановлюємо формат введення значення floating-point (з точкою, що плаває);
- Scale (Шкала) – встановлюємо максимальне і мінімальне значення величин, що вводяться.

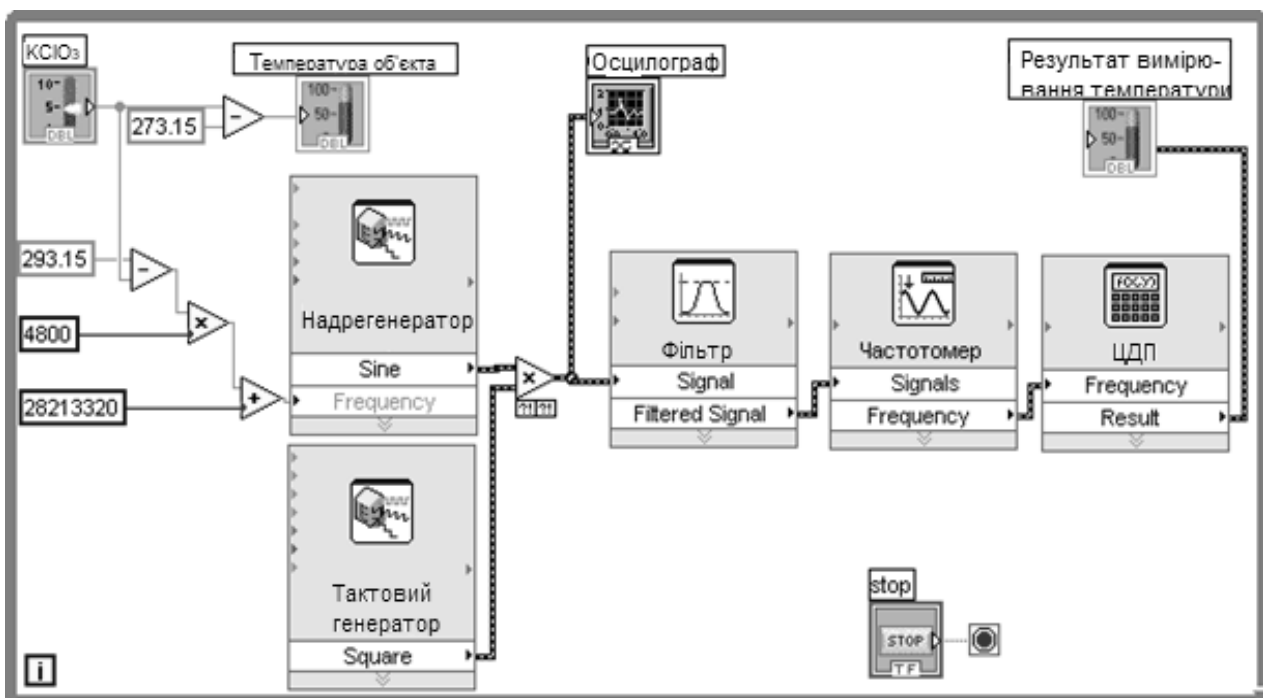


Рис. 3. Схема моделювання автоматичного ядерно-квадрупольно-резонансного термометра в середовищі LabView

Встановлюємо термінал Thermometer (Термометр). Цей термінал показуватиме температуру в градусах Цельсія. Для встановлення відповідності між градусами Цельсія і Кельвіна, використовується термінал Subtract (відняти), на вхід Y якого подається константа "273,15". Вихідний сигнал від терміналу Subtract поступає на термінал Thermometer.

Далі необхідно задати частоту надрегенерації. Відомо, що частота надрегенерації при температурі 293,15 К (20 °С) дорівнює 28213320 Гц. Кожен градус Кельвіна змінює її на 4800 Гц. За допомогою суматора і помножувача формується сигнал частоти надрегенерації. Додамо термінали Subtract, Add (суматор) і Multiply (помножити) на блок-діаграму для формування сигналу частоти.

На вхід X терміналу Subtract подається константа "293,15", а на вхід Y – сигнал від терміналу Vertical Pointer Slide. Вихід терміналу Subtract з'єднується з входом X терміналу Multiply, а на вхід Y подається константа "4800". Вихід терміналу Multiply з'єднується з входом X терміналу Add, а на вхід Y подається константа частоти при температурі 293,15 К, рівна 28213320 Гц. Вихід терміналу Add з'єднується з входом Frequency ВП Simulate Signal "Надрегенерація".

Додамо ще один ВП Simulate Signal з назвою "Генератор тактової частоти". Для того, щоб синхронізувати сигнали від надрегенерації і генератора тактової частоти, сполучаємо вихідний сигнал генератора тактової частоти з входом Reset Signal надрегенерації. При цьому, два сигнали матимуть однакові початкові фази. У пакеті прикладних програм LabView є вбудований ВП Tone Measurements (вимірювач тону), який має функції частотоміра, амплітудоміра і фазоміра. Після установки ВП Tone Measurements на блок-діаграмі з'являється вікно конфігурації. Якщо змінити параметр Amplitude (амплітуда) на параметр Frequency (частота) в області Signal

Tone Measurements, то ВП стає не амплітудоміром, а частотоміром.

Результати випробування. Випробування ЯКР-термометра показали, що метод ЯКР конкурує з іншими способами вимірювання температури. Він перевершує їх за абсолютною похибкою вимірювання. Проте підвищення точності вимірювання навіть на порядок за розробленою методикою нерационально, оскільки час рахунку при цьому збільшується також на порядок. Тому для зменшення похибки вимірювання необхідно або переходити на ручний спосіб вимірювання частоти, або надрегенерація переводити в регенеративний режим. У останньому випадку вдається підвищити точність виміру до $\pm 0,002$ градуса. При цьому доводиться застосовувати спеціальні заходи для усунення паразитної амплітудної модуляції. Тому автоматичний пристрій ускладниться. Основним недоліком цього методу є неможливість вимірювання температури вище 473,15 К (200 °С) із-за поганої чутливості регенерації. Звичайні ж надрегенерації в принципі не дозволяють робити прецизійні вимірювання з причини залежності центральної і бічних компонент спектру ЯКР від частоти гасіння. тому при використанні методу ЯКР для прецизійних вимірювань температури понад 473,15 К (200 °С) необхідно використати захоплений надрегенерації.

Перспективи для подальших досліджень.

Попри те, що КСІО₃ широко використовується в метрологічних цілях, його застосування в діапазоні температури вище 573,15 К (300 °С) ускладнено з огляду на те, що температура розкладання КСІО₃ дорівнює 643,15 К (370 °С). Крім того, при використанні КСІО₃ слід враховувати його токсичність і вибухонебезпечність.

Оскільки температурна залежність частоти ЯКР ³⁵СІ в КСІО₃ нелінійна, має сенс досліджувати інші речовини, наприклад кристали закису міді Сu₂О, які підвищують верхню межу температури аж до 873,15 К (600 °С).

Література

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – Москва: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях / М. И. Гримитлин. – Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2004. 337 с.
3. Довгалюк В. Б. Аеродинаміка вентиляції / В. Б. Довгалюк. – Київ: ІВНВКП «Укреліотех», 2015. – 366 с.
4. Juodis E. S. Vėdinimo aerodinamika / E. S. Juodis, V. Motuzienė. – Vilnius: Technika, 2014. – 296 p.
5. Карпенко В. Д. Современное состояние и перспективы ядерно-квадрупольной резонансной термометрии Украины / В. Д. Карпенко, Н. О. Ковальчук, А. М. Леновенко, С. Д. Солод, А. Г. Суворов // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. – Вып. 2(114) – С. 146–150.
6. Ларин В. Ю. Концепции профессионального проектирования приборов и систем: Книга 1 / В. Ю. Ларин, Г. Н. Розоринов, Н. И. Чичикало и др. – Київ: «Кафедра», 2016. – 468 с. ISBN 978-617-7301-07-2
7. Леновенко А. Вимірювальний комплекс для калібрування, перевірки й атестації засобів вимірювання температури на базі еталонного ядерно-квадрупольного термометра першого розряду ЯКРТ-5М / А. Леновенко,

Б. Стадник, П. Столярчук, В. Паракуда, Н. Ковальчук // Вимірювальна техніка та метрологія. 2013. – №74 – С. 127–132.

8. Харинский А. А. Основы конструирования элементов радиоаппаратуры. – Ленинград: Энергия, 1971. – 464 с.

9. Зааль Р. Справочник по расчету фильтров / Р. Зааль. – Москва: Радио и связь, 1983. – 752 с.

10. Ohte A. Accurate calibration a precision of new NQR thermometer (203 K to 398 K Range Calibration at the NRML) / A. Ohte, H. Iwaoka // Metrologia. – 1979. – Vol. 15. – № 4. – p. 195–199.

References

1. Abramovych H. N. Teoriia turbulentnykh strui. Ekolit, 2011.

2. Grititlin M. I. Raspredeleniie vozduha v pomeshcheniiah. AVOK Severo-Zapad, 2004.

3. Dovhaliuk V. B. Aerodynamika ventyliatsii. IVNVKP «Ukrheliotekh», 2015.

4. E. S. Juodis, V. Motuzienė. Vėdinimo aerodinamika. Technika, 2014.

5. Larin V. Yu., Rozorinov H. N., Chichikalo N. I. Kontseptsii professionalnogo proektirovaniia priborov i sistem. Kniga 1. Kafedra, 2016.

6. Karpenko V. D., Kovalchuk N. O., Lenovenko A. M., Solod S. D., Suvorov A. H. “Sovremennoe sostoianie i perspektivy yaderno-kvadrupolnoi rezonansnoi termometrii Ukrainy”. Kosmicheskaia tekhnika. Raketnoe vooruzhenie. 2017. no. 2(114). P. 146–150.

7. Lenovenko A., Stadnik B., Stolyarchuk P., Parakuda V., Kovalchuk N. “Vymiriuvalni kompleks dlia kalibruvaniia, perevirki i atestatsii zasobiv vymiriuvanniia temperatury na bazi etalonnoho yaderno-kvadrupolnoho termometra pershoho rozriadu YaKRT-5M”. Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. 2013. no.74 . P. 127–132.

8. Kharinskii A. A. Osnovy konstruirovaniia elementov radioaparatury. Enerhiia, 1971.

9. Zaal R. Spravochnik po raschetu filtrov. Radio i sviaz, 1983.

10. Ohte A.Iwaoka H. “Accurate calibration a precision of new NQR thermometer (203 K to 398 K Range Calibration at the NRML)”. Metrologia. 1979. Vol. 15. № 4. P. 195–199.

УДК 681.396

Высокоточный ядерно-квадрупольно-резонансный термометр для гидроаэродинамических исследований

Т. М. Ткаченко¹, Ю. Г. Пилькевич², В. О. Милейковский

¹ д.т.н., профессор. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

² соискатель. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, y.rozorinova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7618-0250

¹ д.т.н., доцент. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, v_mil@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8543-1800

Аннотация. В аэрогидродинамике существуют задачи, которые требуют точности измерения температуры. Примером является измерение избыточной температуры на периферии турбулентных струй. Неограниченное повышение температуры на оси струи для повышения точности измерения нецелесообразно из-за неавтономности по числу Архимеда. Для этого можно использовать явление ядерного квадрупольного резонанса. Предложено устройство для точного измерения температуры в диапазоне от 0 °С до + 200 °С. С использованием пакета графического программирования LabView построена виртуальная модель автоматического термометра на основе ядерного квадрупольного резонанса. Датчик ядерного квадрупольного резонанса отслеживает резонансную частоту поглощения термометрического вещества и передаёт сигнал на вход сверхрегенератора. Показано, что для уменьшения погрешности измерения необходимо либо использовать ручной способ измерения частоты или регенеративный режим.

Ключевые слова: графическое программирование, температура, ядерный квадрупольный резонанс.

UDK 681.396

High-precision nuclear-quadrupole-resonance thermometer for hydroaerodynamic research

T. Tkachenko¹, Yu. Pilkevych²

¹ doctor of technical sciences, prof., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

² competitor, Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, y.rozorinova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7618-0250

³ doctor of technical sciences, assoc. prof., Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine, tkachenkoknuba@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2105-5951

Abstract. In hydroaerodynamics, there are problems that require increased accuracy of temperature measurement. An example is the measurement of excess temperature at the periphery of turbulent jets. Unlimited temperature increase on the axis of the jet to increase the accuracy of measurement is impractical due to non-automodeliness by the Archimedes number. To do this, it is possible to use the phenomenon of nuclear quadrupole resonance. The device for exact measurement of temperature in the range from 0° C to +200 °C is offered. Using the LabView graphic programming package, a virtual model of an automatic thermometer based on nuclear quadrupole resonance in KClO₃ was built. The temperature sensor is a superregenerative spectrometer with automatic monitoring of the center of the absorption line of the thermometric substance, consisting of the actual superregenerator, bandpass filter, comparator, DC amplifier and modulating voltage generator. The circuit that switches the supergenerator to the mode of continuous generation and output of information on the display contains a single vibrator, a buffer stage, a microcontroller and an indicator. From the output of the superregenerator, the absorption signal is fed to the bandpass filter, and then to the comparator. After the comparator, a voltage equal to the input voltage difference is amplified by a DC amplifier. This signal controls the resonant absorption frequency through the feedback circuit. The frequency of the sensor polling is determined by a single vibrator, the oscillations of which are synchronized with the clock generator. Measuring uncertainty in the range above changes from 0.02 K to 0.002 K. It has been shown that either a manual frequency measurement method or a regenerative mode must be used to reduce the measurement uncertainty up to 0.002 K in the range. This improved automatic device is more complex, because of requirements of special measures to eliminate parasitic amplitude modulation. To increase the temperature range and precision, it is possible to find other thermometric substance, such as Cu₂O crystals.

Keywords: graphic programming, temperature, nuclear quadrupole resonance.

Надійшла до редакції / Received 22.11.2020