

М.М. Степаняк, Я.Т. Луцик
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЧАСТОТИ ОБЕРТОВИХ ОБ’ЄКТІВ КРИСТАЛООПТИЧНИМ МЕТОДОМ

© Степаняк М.М., Луцик Я.Т., 2009

Виконано дослідження кристалооптичного методу вимірювання температури для обертових об’єктів.

Researches of crystalloptic method are conducted for the revolved objects.

Вступ. Науково-технічний прогрес нерозривно пов’язаний із удосконаленням методів та засобів вимірювальної техніки. Це твердження повною мірою стосується і термометрії, розвиток якої зумовлений розширенням температурного діапазону вимірювань, розробленням нових підходів до температурного приладобудування та зростанням точності вимірювань традиційних термометрів. У сучасній термометрії застосовують різноманітні методи вимірювання, що пов’язані із відмінностями вимог до термометрів для різних діапазонів температур, розмаїттям об’єктів вимірювань та умов на них, особливостями характеристик робочих речовин, температуру яких вимірюють, тощо [1, 2].

Кристалооптичні методи вимірювання температури з використанням анізотропних кристалів дають змогу зменшити до мінімуму складову похибки за рахунок відведення тепла [3]. Принцип дії таких термометрів ґрунтується на температурних залежностях інтерференційних явищ в анізотропних середовищах.

Мета роботи. Дослідження можливостей, підвищення точності кристалооптичного методу і розширення температурного діапазону кристалооптичних перетворювачів.

Дослідження можливостей вимірювання температури поверхні обертових об’єктів кристалооптичним методом. Кристалооптичний метод вимірювання температури уможливорює вимірювання температури поверхні об’єктів, що обертаються. У пристрої [4] (рис. 1) для цього використано нерухоме джерело монохроматичного світла 7, напівпрозоре дзеркало 6, оптично зв’язане з первинним термоперетворювачем (ТП), що виконаний у вигляді двох оптично прозорих пластинок 3, 4 і металевої прокладки 5, які розташовані в оправі 2 і закріплені співвісно з валом обертання. При цьому необхідно, щоб виконувалось співвідношення

$$l_1 \cdot \alpha_1 - l_2 \cdot \alpha_2 \neq 0,$$

де l_1, l_2 – довжина оправы і прокладки відповідно; α_1, α_2 – температурні коефіцієнти їх лінійного розширення.

Монохроматичний промінь від джерела світла 7 освітлює оптично прозорі пластинки 3 і 4 і відбивається від металевої прокладки 5. Виниклі під час віддзеркалення світла інтерференційні кільця однакової товщини зумовлені наявністю клиноподібного повітряного прошарку між прозорими пластинками 3 і 4, які за допомогою напівпрозорого дзеркала 6 проектуються на приймач випромінювань 8. За зміни температури металева прокладка 5, що перебуває у механічному і термічному контакті з оптичною частиною пристрою, дає змогу отримати інтерференційні кільця

однакової ширини. Це можливо тому, що унаслідок різниці розмірів і температурних коефіцієнтів лінійного розширення прокладки 5 (l_1 і α_1) і оправи 2 (l_2 і α_2) вони тиснуть на пластину 4. При цьому змінюється розмір повітряного прошарку між пластинами 3 і 4, що призводить, своєю чергою, до зміни радіусу кільця. За розміром радіусу кільця визначається температура об'єкта, що обертається. Радіус кільця визначають відліковим пристроєм 9 (монокуляр, зорова труба).

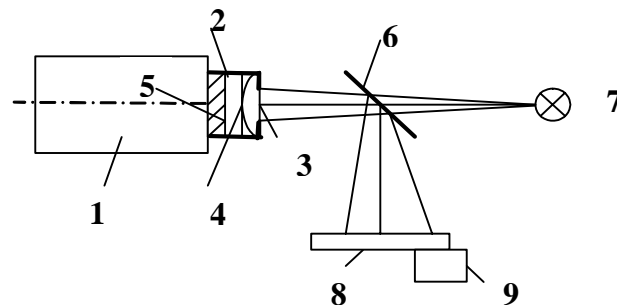


Рис. 1. Пристрій для вимірювання температури обертових об'єктів
 1 – обертовий вал; 2 – оправа; 3 – опукла оптично прозора пластинка;
 4 – плоскопаралельна пластинка; 5 – металева прокладка;
 6 – напівпрозоре дзеркало; 7 – джерело монохроматичного світла;
 8 – приймач випромінювання; 9 – відліковий пристрій

У разі зменшення температури вала через збільшення товщини повітряного прошарку радіуси інтерференційних кільць зменшуються, кільця стягуються до центра. Досягнувши центра, кільце перетворюється на кружок, який зникає у разі подальшого зменшення температури. Тобто центральна частина інтерференційної картини стає по чергово то світлою, то темною. Одночасно на периферії поля зору зароджуються і пересуваються до центру нові інтерференційні кільця, поки кожне кільце не зникне у центрі картини.

У разі підвищення температури радіус кільця збільшується. В центрі картини зароджуються все нові і нові кільця, які, збільшуючи свій радіус, зникають на периферії поля зору. В центрі картини також відбувається чергування максимумів і мінімумів інтенсивності світла. За значних змін температури рахують кількість екстремумів у центрі картини. Знаючи кількість екстремумів, за результатом попереднього градування визначають температуру вала. У разі зміни температури, значення якої лежить між двома максимумами або мінімумами інтенсивності інтерференційної картини, її визначають за розмірами радіуса найрухомішого найближчого до центру картини кільця.

Якщо під час вимірювань температура зростає повільно, то її визначають за зміною радіуса кільця всієї інтерференційної картини.

У разі швидкої зміни температури її визначають за зростанням інтерференційних кільць у центрі картини.

Чутливість пристрою визначається співвідношенням температурних коефіцієнтів лінійного розширення і розмірами оправи 2 (l_1 і α_1) і прокладки 5 (l_2 і α_2). У разі виготовлення оптичного елемента з прозорих важкотопких матеріалів, зокрема топленого кварцу, пристрій можна застосовувати для вимірювання температури близько 1000°C. Підвищення точності вимірювання температури забезпечується тим, що зміни кількості і радіус інтерференційного кільця не залежать від інтенсивності монохроматичного світла. Чутливість пристрою збільшується зі зростанням різниці добутків $l_1 \cdot \alpha_1 - l_2 \cdot \alpha_2$ і регулюється підбором температурних коефіцієнтів лінійного розширення α та розмірів l прокладки і оправи.

Недоліком первинного термоперетворювача (ПТ) у пристрої [4] є залежність його номінальної характеристики перетворення від сили, з якою опукла оптично прозора пластинка 3 тисне на плоскопаралельну пластинку 4 та металеву прокладку 5. Все це впливає на відтворюваність характеристики ПТ, чутливість та стабільність в часі. Відліковий пристрій 9 вимагає присутності оператора, що робить проблематичним його використання за швидкої та циклічної зміни температури.

Пристрій [5] (рис. 2) дає змогу вимірювати температуру з вищою точністю для обертових об'єктів, їхню кутову швидкість та радіальне биття з безконтактним передаванням сигналу від об'єкта до вимірювального пристрою.

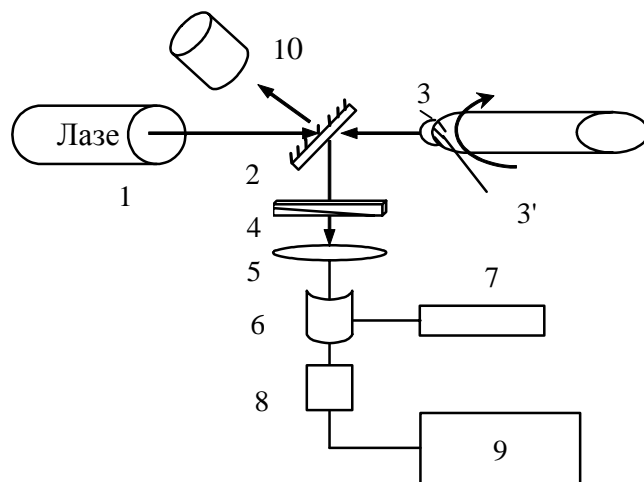


Рис. 2. Схема пристрою для одночасного вимірювання температури, кутової швидкості та радіального биття:

- 1 – джерело монохроматичного паралельного світла;
 2 – напівпрозоре дзеркало; 3 – давач (кристал), що обертається на валу;
 3' – дзеркальна прокладка, напилена на тильній поверхні двозаломлюючого кристала;
 4 – поляризатор; 5 – фокусувальна лінза; 6 – приймач випромінювання;
 7 – частотомір; 8 – згладжувальний фільтр; 9 – аналоговий реверсивний лічильник імпульсів; 10 – пристрій відліку

Тут напівпрозоре дзеркало 2 встановлене під кутом 45° до оптичного променя, спрямованого на давач 3. Оптична вісь пристрою відліку 10 збігається з нормаллю до цього дзеркала.

Первинним термоперетворювачем слугує плоскопаралельна пластинка двозаломлюючого кристала, яка перебуває в термічному та механічному контакті з об'єктом, що обертається.

Інтенсивність світла I , яку реєструє приймач 6, описується виразом [6]:

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin^2 2\varphi = A \sin^2 2\varphi,$$

де $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n' - n'')d$ – різниця фаз між двома променями, що утворюється після проходження світлом крізь двозаломлюючий кристал завтовшки d ; φ – кут між одним з напрямків коливання світла в кристалі та напрямком коливань у поляризаторі (кут повороту об'єкта); n' , n'' – показники заломлення світла у кристалі, λ – довжина хвилі монокристалічного випромінювання лазера I .

Для $\lambda = \text{const}$ різниця фаз δ залежить лише від температури кристала, тому вираз:

$$A = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (1)$$

можна розглядати як амплітуду коливань інтенсивності $I = A \sin^2 2\varphi$, яка залежить від температури. Оскільки кут φ характеризує поворот кристала відносно поляризатора, то він дає інформацію про швидкість обертання об'єкта. Для фіксованої температури ($A = \text{const}$) обертання об'єкта описується кутом φ у межах від 0 до 2π , інтенсивність світла змінюватиметься за законом "sin²" з частотою, пропорційною до швидкості обертання об'єкта, та постійною амплітудою A .

Частотомір, під'єднаний виходу приймача випромінювання, показує частоту, що відповідає частоті обертання об'єкта, помноженій на 4, оскільки в кристалі існують два напрямки коливань світла і за один оберт об'єкта вони чотири рази збігатимуться з напрямками площин поляризації нерухомого аналізатора та площини коливань електричного вектора лазерного випромінювання.

Недоліком пристрою [5] (рис. 2) є неможливість вимірювання частоти обертання. Якщо значення температури t буде визначатися в інтерференційному мінімумі, а вимірювана температура $t_x = \text{const}$, то сигнал на виході фотоприймача 6 відсутній і частотомір 7 не може вимірювати частоту обертання об'єкта. Тобто на шкалі температури існують “мертві зони”, що в процесах контролю та автоматики є недопустимим.

Іншим недоліком цього пристрою є неможливість вимірювання температури у разі швидкої її циклічної зміни, тому що на вході аналогового реверсивного лічильника імпульсів 9 немає інформації про зростання чи спадання температури та відсутній цифровий відлік.

З метою розширення можливостей вимірювання температури кристалооптичним методом та підвищення точності методу, розширення температурного діапазону і автоматизації вимірювального процесу пропонується пристрій, який дасть змогу одночасно вимірювати температуру та частоту обертання об'єкта (рис. 3).

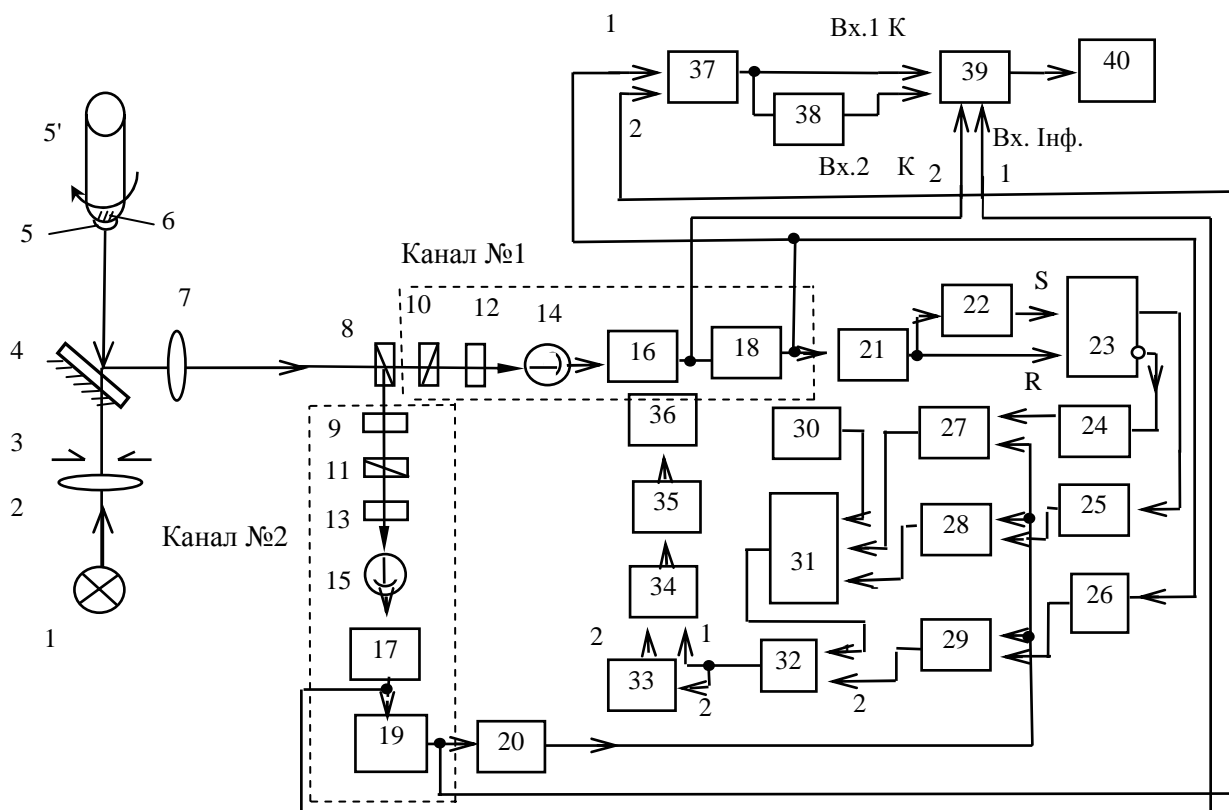


Рис. 3. Пристрій для вимірювання температури та частоти обертаних об'єктів:

- 1 – джерело монохроматичного випромінювання; 2 – фокусувальна лінза; 3 – діафрагма;
- 4 – напівпрозоре дзеркало; 5 – термоперетворювач (кристал), що обертається на валу 5';
- 6 – дзеркальна прокладка, напилена на стороні двозаломлюючого кристала; 5, 7 – фокусувальна лінза;
- 8 – світлоподільник; 9 – фазова пластинка; 10, 11 – аналізатори; 12, 13 – світлофільтри;
- 14, 15 – фотоприймачі; 16, 17 – операційні підсилювачі; 18, 19 – згладжувальні фільтри;
- 20, 21 – формувачі прямокутних імпульсів; 22 – перший інвертор; 23 – R-S тригер;
- 24, 25 – диференціюючі ланки; 26 – АЦП; 27, 28 – ключові схеми; 29 – перший блок пам'яті;
- 30 – блок встановлення; 31 – реверсивний лічильник; 32 – перший суматор; 33 – другий блок пам'яті;
- 34 – другий суматор; 35 – перетворювач “код-код”; 36 – блок індикації; 37 – компаратор;
- 38 – другий інвертор; 39 – мультиплексор; 40 – частотомір

У запропонованому пристрої для вимірювання температури та частоти обертових об'єктів монохроматичний поляризований промінь від джерела світла 1 (лазера типу ЛГН-207Б) проходить через фокусувальну лінзу 2, діафрагму 3, напівпрозоре дзеркало 4, термоперетворювач (двозаломлюючий кристал) 5 і відбивається від дзеркальної прокладки 6, напиленої на тильній стороні кристала, проходить через двозаломлюючий кристал 5, відбивається від напівпрозорого дзеркала 4, проходить через фокусувальну лінзу 7, потрапляє на світлоподільник 8 та поділяється на два промені. Перший промінь проходить через поляризатор 10 і вузькосмуговий світлофільтр 12 і потрапляє на перший фотоприймач 14, а другий після проходження через фазову пластинку 9, другий аналізатор 11 і другий світлофільтр 13 отримує постійний фазовий зсув $-\pi/2$ і потрапляє на другий фотоприймач 15. Електричні сигнали $U_{\phi 14}$ і $U_{\phi 15}$ на виході фотоприймачів 14 і 15, які визначаються квадратом амплітуди відповідних оптичних сигналів на їх вході та чутливістю (крутістю перетворення) S_1 і S_2 , підсилюються операційними підсилювачами 16, 17 та проходять через згладжувальні фільтри 18, 19, відповідно канали № 1 та № 2. Тобто отримуємо співвідношення:

$$U_{18} = S_1 I_0 \sin^2 \pi k t / \lambda, \quad (2)$$

$$U_{19} = S_2 I_0 \sin^2 \pi k (t - T/4) / \lambda, \quad (3)$$

де I_0 – інтенсивність світла на вході термоперетворювача (двозаломлюючого кристала) 5; $\lambda = 632,8$ нм – довжина хвилі джерела 1 монохроматичного поляризованого світла; k – може бути функцією від температури t ; T – характерний температурний інтервал для термоперетворювача 5, що відповідає фазі, кратній 2π .

Тоді значення вимірюваної температури можна подати так:

$$t = t_0 + mT + \Delta t,$$

де t_0 – відома початкова температура; m – кількість мінімумів фотоструму, зареєстрованих за зміни температури термочутливого кристала від відомої початкової ($t_0 = 0$) до вимірної t ; $\Delta t < T$ – температура, що відповідає дробовій частини температурного інтервалу [7, 8].

Для перетворення аналогового сигналу на цифровий у пристрої для вимірювання температури та частоти обертових об'єктів використовується формувач “аналог–код”, тому з виходу першого 18 і другого 19 згладжувальних фільтрів електричні аналогові сигнали U_{18} і U_{19} подаються на входи першого 20 і другого 21 формувачів прямокутних імпульсів.

Додатний імпульс на виході першого формувача прямокутних імпульсів 20 або другого формувача прямокутних імпульсів 21 з'являється, якщо

$$U_{18} \geq U_0 + K S_1 I_0 / 2 \quad \text{або} \quad U_{19} \geq U_0 + K S_2 I_0 / 2,$$

де K – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача; U_0 – рівень порогової напруги.

Якщо напруга U_{18} випереджує за фазою U_{19} , тоді реверсивний лічильник 31 працює в режимі додавання, а коли фаза U_{18} відстає від фази U_{19} , – у режимі віднімання.

Щоб забезпечити можливість автоматичного циклічного вимірювання температури, запропоновано використати схему “аналог–код”, яка складається з блоків 18–31, що дає змогу перетворювати і подавати аналогові сигнали в цифровому коді.

Перетворення число-імпульсного коду, що пропорційний до значення температури, реалізується схемним рішенням за допомогою функціонального перетворювача “код–код” (блоки 32–36), який дає змогу отримувати результат в одиницях вимірюваної величини [9, 10].

Для створення можливості вимірювання частоти обертового об'єкта у разі зміни температури t , з виходів згладжувальних фільтрів 18, 19 аналогові сигнали, які відповідають рівнянню (2), (3), подаються на входи компаратора 37 для порівняння. Якщо $U_{18} \geq U_{19}$, тобто

$$S_1 I_0 \sin^2 \pi k t / \lambda \geq S_2 I_0 \sin^2 \pi k (t - T/4) / \lambda,$$

то на виході компаратора 37 отримуємо логічну «1», яка подається на Вх.1К – перший керуючий вхід мультиплектора 39, а якщо

$$S_1 I_0 \sin^2 \pi kt / \lambda < S_2 I_0 \sin^2 \pi k (t - T/4) / \lambda,$$

то на виході компаратора 37 отримуємо логічний «0», який подається на вхід інвертора 38, вихід якого під'єднаний на Вх.2К – другий керуючий вхід мультиплектора 39. Тобто подається логічна «1» (рис. 4).

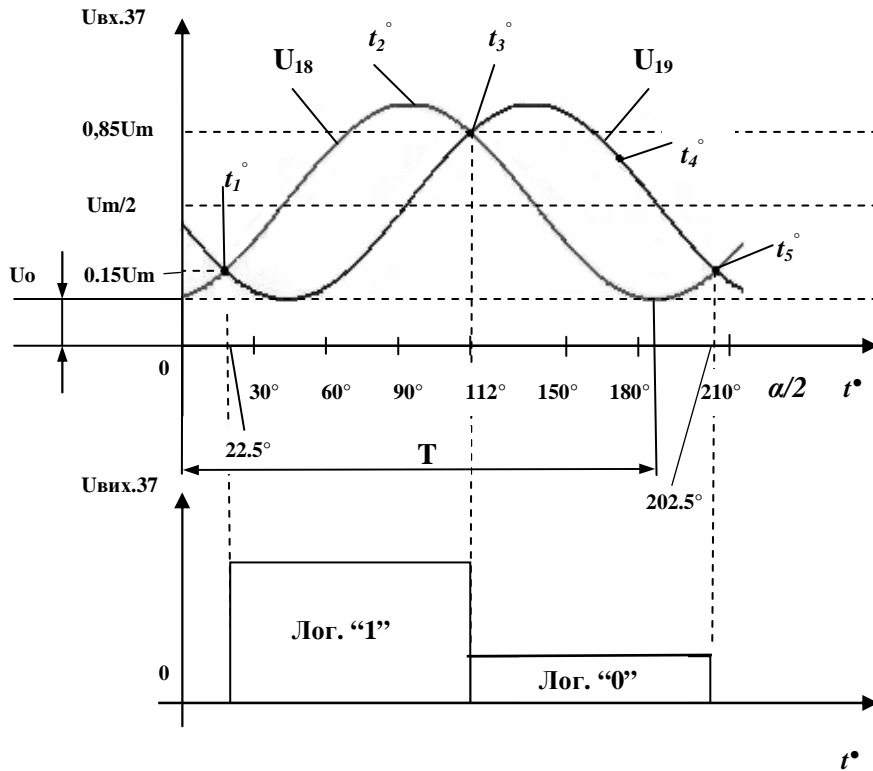


Рис. 4. Вимірювання частоти обертових об'єктів

Визначимо рівень напруги відносно амплітуди U_{18} , U_{19} за яких $U_{18} = U_{19}$, тобто

$$S_1 I_0 \sin^2 \pi kt / \lambda = S_2 I_0 \sin^2 \pi k (t - T/4) / \lambda,$$

якщо $S_1 I_0 = S_2 I_0$, а $\sin^2 \pi kt / \lambda = \sin^2 \pi k (t - T/4) / \lambda$, що можна подати згідно з (1), як

$$\sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) = \sin^2 \left(\frac{\delta - 90^\circ}{2} \right),$$

з урахуванням того, що у каналі № 2 внесено фазовий зсув $-\pi/2$. Звідси $\delta = (45^\circ - \pi n)$, де $n = \pm 0, 1, 2, \dots$ – ціле число. Отримані результати подано на рис. 4 та в таблиці.

Отже, можна вимірювати частоту обертового об'єкта за рахунок того, що інформація на частотомір 40 подається на два канали – № 1 та № 2.

$$U_{16} = (S_1 I_0 \sin^2 \pi kt / \lambda) \sin^2(\pi / T_c),$$

$$U_{17} = [S_2 I_0 \sin^2 \pi k (t - T/4) / \lambda] \sin^2(\pi / T_c),$$

де $T_c = 4 T_n$ – період обертання вала, с; T_n – період, що утворюють два напрямки коливань світла в кристалі за один оберт об'єкта, які чотири рази збігатимуться з напрямками площин поляризації нерухомого аналізатора та площини коливань електричного вектора лазерного випромінювання.

Результати вимірювань частоти обертання подано на рис. 5, 6 та в таблиці.

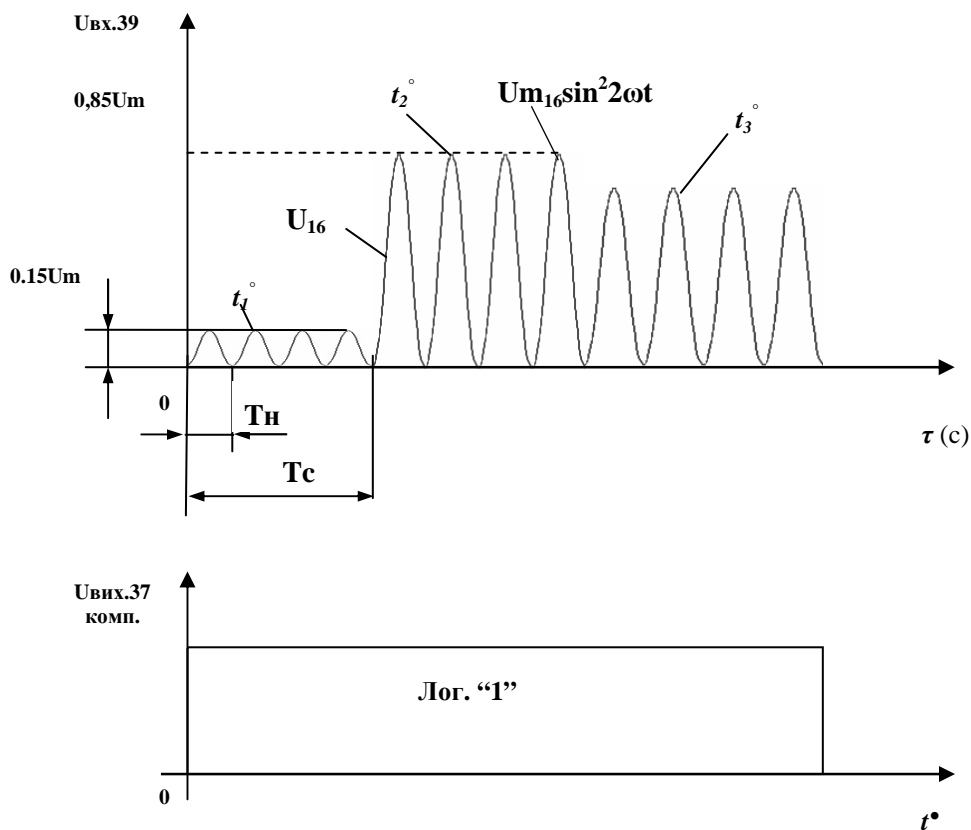


Рис. 5. Вимірювання частоти обертового об'єкта при використанні каналу № 1

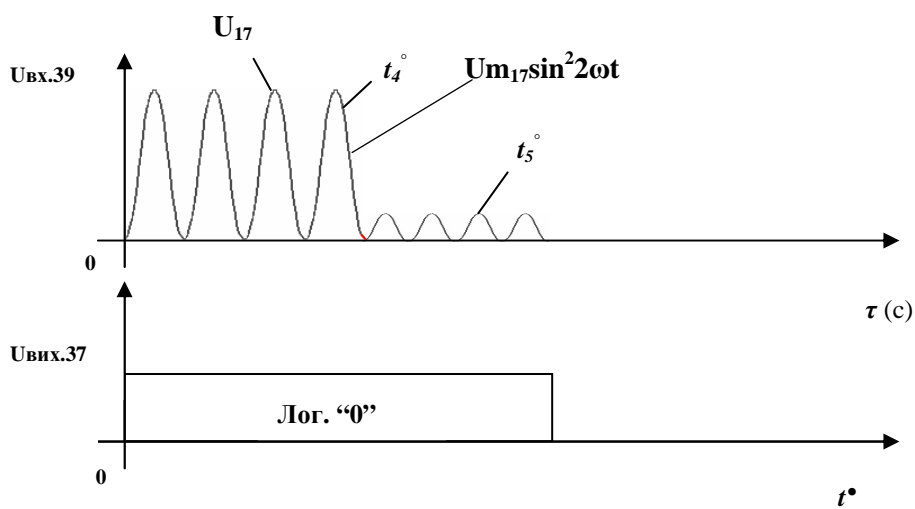


Рис. 6. Вимірювання частоти обертового об'єкта при використанні каналу № 2

Номер робочого каналу та інформаційного входу мультимплексора 39, сигнал з якого подається на вхід частотоміра 40	Рівень напруги, відносно $U_{16, 17 (max)}$, що подається на вхід частотоміра 40	Діапазон зміни кута $\alpha / 2$, що відповідає в сумі набігу фази 2π	Діапазон напруги сигналу (В), що подається на вхід частотоміра 40
1	$(0,15 - 1 - 0,85) U_{16}$	$22,5^0 \text{ — } 112,5^0$	$(0,75 - 5 - 4,25) \text{ В}$
2	$(0,85 - 1 - 0,15) U_{17}$	$112,5^0 \text{ — } 202,5^0$	$(4,25 - 5 - 0,75) \text{ В}$

Висновки. Досліджено кристалооптичний метод вимірювання температури обертових об'єктів та частоти їхнього обертання і запропоновано пристрій для його реалізації, який дає змогу вимірювати ці параметри спільно. У пристрої усунені “мертві зони” на шкалі температур, в яких було неможливо вимірювати частоту обертового об'єкта [4, 5].

Пристрій дає можливість вимірювати температуру для випадків її швидкої і циклічної зміни та забезпечити дистанційні вимірювання з мінімальним тепловідводом, а також за наявності електричного потенціалу.

Результати досліджень термоперетворювачів з анізотропних монокристалів LiNbO_3 дають змогу реалізувати високоточні вимірювання температури в діапазоні $20 \dots 550 \text{ }^\circ\text{C}$ з похибкою близько $\pm 0,5 \text{ К}$ [11] та частоти з цифровим відліком.

1. Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. *Вимірювання температури: теорія та практика*. – Львів: Бескид Біт. 2006. – 560 с. 2. *Енциклопедія термометрії* / Я.Т. Луцик, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Вид. Національного університету “Львівська політехніка”, 2003. – 438 с. 3. Габа В.М., Степаняк М.В., Столярчук П.Г. *К вопросу определения методической погрешности поляризационно-оптического термометра* // В кн. праць Сьомої міжнародної науково-технічної конференції “Електричні методи та засоби вимірювання температури” // Тези доповідей. – Львів, 1992. – С. 34–35. 4. А.с. 909591 (СССР) МКИ G01K 13/08 *Устройство для измерения температуры вращающегося объекта* / Н.А. Романюк, А.М. Костецкий, Н.Н. Романюк. – Оубл. Б.И. №8, 28.02.1982. 5. А.с. 909591 (СССР) МКИ G01K 13/08, G01P 3.36, G 01H 1/04 *Устройство для измерения параметров вращающихся объектов, температуры, скорости и радиальных биений* / Н.А. Романюк, А.М. Костецкий, В.М. Габа. – Оубл. Б.И. № 8, 28.02.1982. 6. Габа В.М. *Спектрально-температурні деформації оптичних індикатрис та фізичні аспекти їх практичного застосування*. – Львів: Ліга-Прес, 2006. – 228 с. 7. Романюк М.О. *Кристаллооптика*. – К., 1997. – С. 432. 8. А.с. 821960 (СССР) *Поляризационно-оптическое устройство для измерения температуры* / Н.А. Романюк, А.М. Костецкий, В.М. Габа / – Оубл. в Б.И., 07.11.91. Бюл. № 5. – С. 41. 9. А.с. 1500864 (СССР) *Поляризационно-оптический цифровой термометр* // М.В. Степаняк, В.О. Кочан, В.М. Габа, П.Г. Столярчук. – Оубл. в Б.И., 1989, Бюл. № 30. 10. А.с. 1689775 (СССР) МКИ G01K 11/12. *Поляризационно-оптический цифровой термометр* // М.В. Степаняк, Б.И. Стадник, П.Г. Столярчук. – Оубл. в Б.И., 07.11.91. Бюл. №5. – С. 41. 11. Стадник Б.І., Луцик Я.Т., Степаняк М.В. *Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів* // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – Львів, 2007. – Вип. 67. – С. 69–73.