

Загалом подальша розробка програмного забезпечення комп'ютерної обробки та створення банків даних отриманих дводіапазонних зображень має великі перспективи, оскільки вона дає змогу значно підвищити ефективність діагностики стану будівель та попередження аварійних ситуацій під час їх експлуатації.

Висновки. Пропонований дводіапазонний тепловізійний комплекс може стати зручним і дієвим засобом контролю порушень і відхилень як у процесі будівництва, так і під час експлуатації житлових будівель і промислових споруд. Зручність і простота керування комплексом, широкий спектр його сервісних функцій і можливостей, наявність діючого макетного взірця, менша, ніж у закордонних аналогів, передбачувана ціна реалізації є серйозними аргументами на користь впровадження такого комплексу у серійне виробництво.

1. Бродський М., Гой В., Зеленовський Ю., Кондратов П. *Тепловізійний аудит промислових та житлових об'єктів // Проблеми економії енергії.* – Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2001. – С.197–198. 2. Госсорг Ж. *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение.* – М.: Мир, 1988. – 216 с.

УДК 621.397+681.723

В.І. Шклярський, Ю.М. Матієшин
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра радіоелектронних пристроїв і систем

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МІКРООБ'ЄКТА ТЕЛЕВІЗІЙНИМ ОПТИЧНИМ СКАНУВАЛЬНИМ МІКРОСКОПОМ У ДВОТАКТНОМУ РЕЖИМІ ВИМІРЮВАННЯ

© Шклярський В.І., Матієшин Ю.М., 2007

Проаналізовано особливості використання телевізійного оптичного сканувального мікроскопа у двотактному режимі роботи для визначення швидкості руху мікрооб'єкта та похибок, що виникають при цьому, а також два варіанти роботи мікроскопа з точки зору способу сканування: 1) сканування із забезпеченням послідовного підсвічення усіх положень сканувальної плями в рядку, що відповідають заданим координатам (неперервне сканування); 2) сканування формуванням положень сканувальної плями в рядку, що відповідають заданим координатам, за допомогою сходящого сигналу рядкової розгортки (дискретне сканування).

Paper is consist of analysis of the television optical scanning microscope peculiarities in double time work mode for determination of the microobject velocity and errors which are arise attached to this. Analyzed two versions of microscope working by mean of scanning method: 1) Scanning with the consecutive lighting of the all scanning spot positions in a row with corresponding coordinates which are set providing (continuous scanning); 2) Scanning by the way of scanning spot positions in a row forming with corresponding coordinates by the stairs signal of row evolve (stepping scanning).

Вступ. У роботі [1] проаналізовано однорядковий однотоктний режим роботи телевізійного оптичного сканувального мікроскопа з точки зору точності визначення швидкості руху мікрооб'єкта та максимального значення швидкості, що вимірюється.

Однорядковий двотактний режим роботи телевізійного оптичного сканувального мікроскопа відрізняється від однотоктного тим, що сканування мікрооб'єкта в рядковому режимі відбувається двічі і отримані при цьому два сигнали від фотоприймача, що виникають за повного чи часткового суміщення сканувальної плями та мікрооб'єкта, використовують з метою визначення місцеположення мікрооб'єкта в рядку під час першого та другого сканування.

Кожному підсвіченому положенню сканувальної плями у рядку відповідає код на вході цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) під час дискретного сканування чи номер імпульсу підсвічення під час неперервного, а відтак і значення координати X . У моменти появи імпульсів від фотоприймача ці коди чи номери запам'ятовуються системою, що дає можливість визначити координати двох послідовних в часі положень мікрооб'єкта та різницю цих координат, тобто переміщення мікрооб'єкта $\Delta X = X_2 - X_1$, де X_1 та X_2 – зафіксовані координати мікрооб'єкта при появі першого та другого імпульсів від фотоприймача відповідно.

Одночасно із цим, за допомогою лічильника, визначається відрізок часу T_B , протягом якого відбувається переміщення мікрооб'єкта на віддаль ΔX . Суть визначення швидкості мікрооб'єкта зводиться до застосування простої формули $V_0 = \Delta X / T_B$, де V_0 – шукана швидкість мікрооб'єкта.

Цей метод, на відміну від однокітного, не потребує додаткових відомостей про розміри та характер розподілу прозорості мікрооб'єкта. Досліджувані типи мікрооб'єктів нерідко можуть мати нерівномірно розподілену прозорість, неправильну форму чи непостійну швидкість руху. Усе це спричиняє те, що точність визначення тривалості імпульсів від фотоприймача і, як наслідок, точність визначення швидкості руху таких мікрооб'єктів однокітним методом падатиме. При цьому на двокітний режим визначення швидкості не накладається обмеження у вигляді потреби визначення тривалості імпульсів від фотоприймача, що дає змогу задавати високий рівень сигналу спрацювання схеми вимірювання з метою уникнення впливу шумів та неоднозначностей. Для двокітного режиму визначення швидкості руху мікрооб'єкта достатньо виявити факт існування цих імпульсів. Похибка вимірювання при цьому є значно меншою.

Необхідно, однак, відмітити, що, як показано у [2], двокітний метод вимірювання швидкості має обмеження максимальної вимірюваної швидкості щонайменше на рівні 0.5 від значення швидкості сканування, а також потребує вирішення питання розширення діапазону вимірюваних швидкостей. Це пояснюється тим, що протягом процесу сканування, тобто проходження сканувальною плямою віддалі, що дорівнює двом рядкам сканування, мікрооб'єкт не повинен вийти за межі поля зору мікроскопа, тобто подолати віддаль, що перевищує довжину рядка сканування.

Слід також зазначити, що близьким до пропонованого є описаний в [3] метод поступально-зворотного сканування, згідно із яким передбачається сканування мікрооб'єкта в напрямку його руху, а потім у зворотному напрямку. При цьому визначається крутість фронту сигналу в першому та другому випадках: $(\Delta U)_1 / \Delta t$ та $(\Delta U)_2 / \Delta t$ відповідно. Формула для визначення шуканої швидкості має вигляд

$$V_0 = V_C \cdot \frac{(\Delta U)_2 / \Delta t - (\Delta U)_1 / \Delta t}{(\Delta U)_2 / \Delta t + (\Delta U)_1 / \Delta t}, \quad (1)$$

де V_C – швидкість руху сканувальної плями. Метод ускладнений тим, що для одержання значень $\Delta U / \Delta t$ необхідно додатково використовувати пристрої диференціювання сигналу. Для цього методу також можуть бути необхідними відомості про напрямок руху та розподіл прозорості мікрооб'єкта, адже у разі нерівномірного розподілу прозорості мікрооб'єкта (наприклад, гауссового) буває важко відрізнити, чим саме спричинене різке наростання чи спадання сигналу: впливом характеру розподілу прозорості мікрооб'єкта чи напрямком та значенням швидкості його руху. Внаслідок цього виникає складність у визначенні напрямку руху мікрооб'єкта, тобто знака та величини швидкості V_0 , адже відомо з [2], що за однакової швидкості мікрооб'єкта, але руху його в різних напрямках по відношенню до сканувальної плями, крутості $(\Delta U)_1 / \Delta t$ та $(\Delta U)_2 / \Delta t$ будуть різними.

Двокітний режим сканування у мікроскопі, як і однокітний, придатний для дослідження тільки тих мікрооб'єктів, траєкторія руху яких в межах поля зору мікроскопа відповідає прямолінійному руху. Такі об'єкти зустрічаються у біологічних та медичних дослідженнях (окремі елементи крові за їх руху капілярами за умови значного збільшення [4]), а також при дослідженнях процесів руху часток чи живих об'єктів в різних середовищах під дією напрямлених сил різного походження. До таких мікрооб'єктів можна також віднести дрібні елементи мікроелектричних та мікрооптичних механізмів.

Мета роботи – розробити методику визначення швидкості мікрооб'єкта з лінійною траєкторією руху за допомогою телевізійного оптичного сканувального мікроскопа, що працює у двокіт-

ному режимі вимірювання швидкості. При цьому зазначаються переваги та можливості цього методу перед вже існуючими, а також аналізуються його обмеження та основні похибки вимірювання.

Проаналізовано похибки вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта, що спричинені зміщенням, стисненням та видовженням рядка сканування у двох варіантах сканування телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом. Окрім того, розглянуто похибки, характерні тільки для неперервного варіанта та тільки для дискретного сканування (див. 4).

Модель процесу сканування та характер сигналу фотоприймача. Розглядається модель, у якій сканувальний елемент (пляма) та мікрооб'єкт мають круглу форму, причому інтенсивність світлення сканувальної плями і прозорість мікрооб'єкта розподілені рівномірно. Прозорий мікрооб'єкт з діаметром $d_o = 2R_o$ та швидкістю руху V_o , що має чіткі границі, розташований на непрозорому тлі (рис. 1, а), або непрозорий мікрооб'єкт із чіткими границями, розташований на прозорому тлі (рис. 1, б). Перший тип моделі використовується у випадку роботи мікроскопа на просвічення, а другий – на відбиття. Сканувальна пляма діаметром $d_c = d_o$ рухається рядком завдовжки L з постійною швидкістю сканування V_c . Така модель є зручною з точки зору аналізу багатьох мікрооб'єктів у мікробіології та медицині (наприклад, елементи крові).

Важливим параметром моделі сканування є крок $\Delta_c = d_c$, який дорівнює віддалі між центрами сусідніх положень сканувальної плями та забезпечує повне перекриття сканувальною плямою всієї довжини рядка сканування, що запобігає можливим втратам інформації про мікрооб'єкт. На вибір величини Δ_c можуть впливати розмір та форма досліджуваного мікрооб'єкта. Зі збільшенням Δ_c необхідно відповідно збільшувати розмір сканувальної плями d_c , проте при цьому зменшується точність вимірювання координат мікрооб'єкта, внаслідок того, що конкретній координаті відповідатиме більший відрізок довжини рядка сканування. Однак необхідно відмітити, що збільшення чи зменшення кроку сканування, як правило, проводиться під час досліджень мікрооб'єктів більших та менших відповідно до розмірів сканувальної плями, тому точність визначення координати при цьому незначно впливатиме на точність вимірювання швидкості конкретного типу мікрооб'єктів.

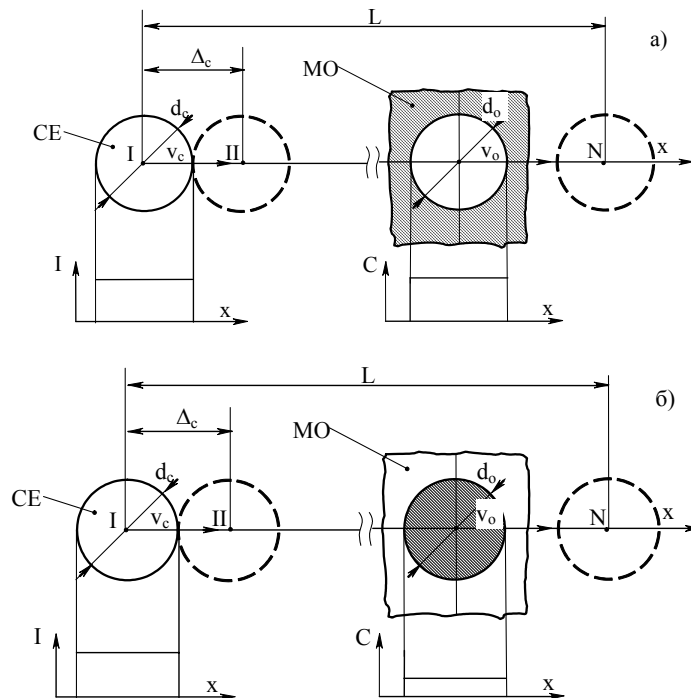


Рис. 1. Графічне подання моделі процесу сканування під час роботи мікроскопа на просвічення (а) та на відбиття (б) за руху мікрооб'єкта в напрямку сканування: СЕ – сканувальний елемент (пляма); МО – мікрооб'єкт; Δ_c – крок сканування; I – інтенсивність світлення СЕ; C – прозорість МО

Під просторовою роздільною здатністю системи вимірювання R розуміємо кількість положень сканувальної плями N в рядку заданої довжини L :

$$R = N = \frac{L}{\Delta_c} \quad (2)$$

Із виразу (2) зрозуміло, що чим більшим є крок сканування, тим меншою буде просторова роздільна здатність, що, очевидно, зменшуватиме точність вимірювань. Зменшення ж кроку сканування призводить до потреби у забезпеченні високої просторової роздільної здатності і відповідно ускладнення системи вимірювання (наприклад, збільшення розрядності цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) для формування координатних положень сканувальної плями). Тому в багатьох випадках за таких вимірювань намагаються підібрати діаметр та крок сканувальної плями відповідно до розміру мікрооб'єкта.

У разі неперервного сканування забезпечення дискретності положень сканувальної плями відбувається за допомогою підсвічення плями, що плавно рухається вздовж рядка, за допомогою прямокутних імпульсів. Під час дискретного сканування використовується принцип формування окремих положень сканувальної плями із застосуванням для рядкової розгортки сходящого сигналу, сформованого за допомогою ЦАП (рис. 2, а).

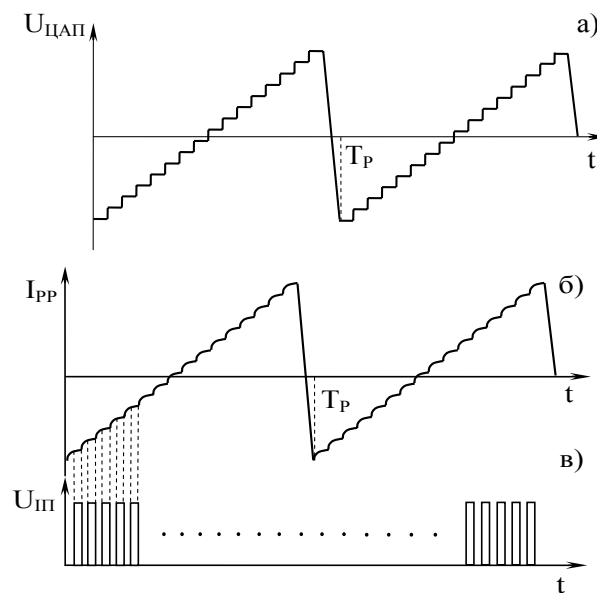


Рис. 2. До дискретного варіанта сканування: $U_{ЦАП}$ – напруга на виході цифро-аналогового перетворювача; I_{PP} – струм в котушках відхилення рядкової розгортки; $U_{П}$ – напруга імпульсів підсвітки; T_P – тривалість рядка сканування

Кожну сходинку цього сигналу додатково підсвічують за допомогою імпульсів підсвічення (рис. 2, б) відповідної тривалості, для уникнення впливу перехідних процесів, що виникають під час формування струму рядкової розгортки. Тривалість імпульсу підсвічення вибирається такою, що відповідає тривалості пологої ділянки сходинки сигналу (рис. 2, в).

Як вже зазначалося, сканування в рядковому режимі здійснюється двічі. При цьому отримують два послідовні в часі імпульси сигналу фотоприймача при збігові сканувальної плями та мікрооб'єкта (рис. 3).

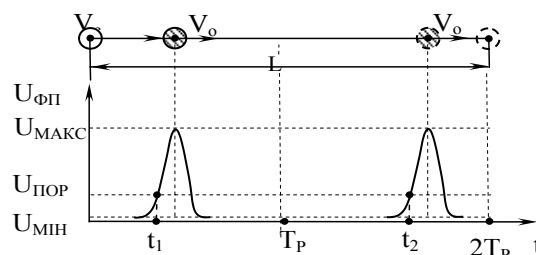


Рис. 3. Сигнал фотоприймача у разі повного перекриття мікрооб'єкта сканувальною плямою

Визначення часу, протягом якого відбувалося переміщення мікрооб'єкта T_B , проілюстровано на рис. 4. Генератор лічильних імпульсів ГЛІ формує N імпульсів підсвічення для кожного рядка сканування тривалістю T_P . При надходженні сигналу $U_{ФП}$ від фотоприймача ФП лічильник імпульсів ЛЛ1 припиняє підрахунок імпульсів підсвічення. Те саме відбувається під час другого сканування. Підраховані імпульси віднімаються за допомогою схеми віднімання імпульсів СВІ.

Отриману величину n використовують для обчислення часу вимірювання за формулою

$$T_B = T \cdot (N + n), \quad (3)$$

де N – кількість імпульсів підсвічення, що відповідає одному рядку сканування; T – період слідування імпульсів підсвічення. Ця формула відповідає руху мікрооб'єкта у напрямку сканування. Формула для визначення часу вимірювання за руху МО проти напрямку сканування матиме такий вигляд:

$$T_B = T \cdot (N - n). \quad (4)$$

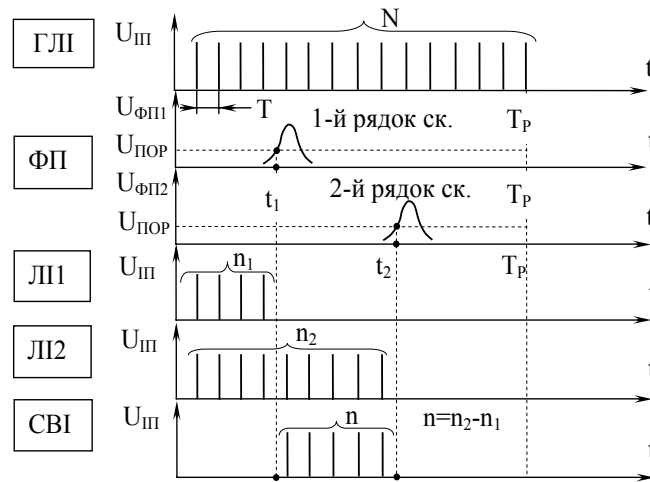


Рис. 4. Графічне подання принципу вимірювання часу переміщення мікрооб'єкта T_B для випадку його руху в напрямку сканування

Формула для визначення переміщення МО за допомогою величини n виглядатиме так:

$$\Delta X = \pm \frac{n}{N} \cdot L, \quad (5)$$

де L – довжина рядка сканування, яка дорівнює

$$L = V_c \cdot T_P. \quad (6)$$

Знак ΔX у формулі (5) залежатиме від напрямку руху МО.

Запишемо загальну формулу для обчислення величини швидкості руху мікрооб'єкта:

$$V_o = \frac{\Delta X}{T_B} = \frac{n \cdot L}{N \cdot T \cdot (N + n)}. \quad (7)$$

Підставимо у вираз (7) формулу для визначення довжини рядка (6). Тоді, враховуючи $T_P = N \cdot T$, отримаємо вираз для обчислення швидкості за збігу напрямку руху мікрооб'єкта та сканувальної плями:

$$V_o = V_c \cdot \frac{n}{(N + n)}. \quad (8)$$

Формула для визначення швидкості за руху мікрооб'єкта та сканувальної плями в протилежних напрямках матиме дещо інший вигляд:

$$V_o = -V_c \cdot \frac{n}{(N - n)}. \quad (9)$$

Як бачимо, у формулах (8) та (9) швидкість V_0 має різні знаки, що відповідає різним напрямкам руху мікрооб'єкта. Окрім того, за умови однакового значення n швидкості, визначені за формулами (8) та (9), будуть різними за абсолютною величиною, а саме – друга швидкість буде більшою, що відповідає фізичному принципу складання швидкостей V_c та V_0 за зустрічного руху СП та МО, та віднімання V_c та V_0 – за руху МО у напрямку сканування.

Для обчислення швидкості V_0 за допомогою цих формул необхідно лише знати швидкість сканування V_c , кількість імпульсів підсвічення, що відповідає одному рядку сканування N , та підраховану кількість імпульсів n . Перші дві величини закладаються в систему як параметри підрахунку, що є сталими. Остання величина визначається в результаті простих обчислень. Отже, ця методика не потребує складних та громіздких обчислень.

Як лічильні імпульси для підрахунку можуть використовуватися також інші імпульси, що постійно формуються системою вимірювання. Це, зокрема, можуть бути імпульси, сформовані із імпульсів підсвічення за допомогою помножувачів чи дільників частоти, що мають іншу тривалість та період слідування. В такому випадку параметри обрахунку, значення яких були раніше закладені в систему, N, T, T_p, L та V_c не будуть відповідати підрахованій величині n і виникає необхідність у встановленні чітких критеріїв підрахунку та введенні в систему нових значень цих параметрів, що відповідають кратності множення чи ділення частоти імпульсів підсвічення.

Оцінка похибки визначення швидкості руху мікрооб'єкта внаслідок зміщення рядка сканування. В результаті аналізу формул (8) та (9) можна виділити багато чинників, що впливають на точність вимірювання швидкості мікрооб'єкта безпосередньо чи опосередковано. Якщо закладені у систему параметри є доволі точними, то одним із джерел появи похибок вимірювання є підрахунок імпульсів підсвічення. Якщо закладені в систему параметри обрахунку є недостатньо точними, тоді точність вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта визначатиметься точністю цих параметрів.

Розглянемо похибки вимірювання, що є характерними як для неперервного, так і для дискретного варіантів сканування, оскільки принцип підрахунку імпульсів підсвічення є однаковим для обох цих варіантів. Нехай рядок сканування завдовжки L зміщується щодо свого початкового положення по осі сканування в той чи інший бік на величину ΔL . При цьому відсутня деформація рядка та не змінюється кількість N положень сканувальної плями в ньому (рис. 5).

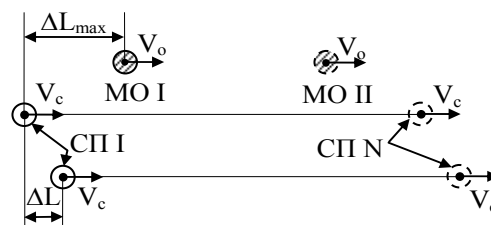


Рис. 5. Зміщення рядка по осі сканування в напрямку сканування:
 СП I та СП N – відповідно перше та останнє положення сканувальної плями в рядку;
 МО I та МО II – відповідно перше та друге положення мікрооб'єкта

Зміщення повинно бути таким, щоб обидва положення МО потрапляли в поле зору зміщеного рядка сканування. У нашому випадку воно повинно відповідати умові $\Delta L \leq \Delta L_{max}$, під час виконання якої можливе отримання сигналу від обох положень мікрооб'єкта, та як наслідок – визначення швидкості його руху V_0 . При цьому координати мікрооб'єкта, отримані системою, матимуть інше значення порівняно із тими, що визначаються незміщеним рядком сканування:

$$X_1' = X_1 - \Delta L_1, X_2' = X_2 - \Delta L_2, \quad (10)$$

де ΔL_1 та ΔL_2 – зміщення першого та другого рядків сканування відповідно; X_1 та X_2 – координати МО, визначені незміщеним рядком сканування. Зміщення МО визначатиметься за формулою

$$\Delta X' = X_2' - X_1'. \quad (11)$$

Підставляючи (10) в (11) отримаємо

$$\Delta X' = \Delta X - (\Delta L_2 - \Delta L_1). \quad (12)$$

Формула показує, що різниця між величинами ΔX та $\Delta X'$ буде тим більшою, чим більшою буде різниця між величинами ΔL_1 та ΔL_2 , тобто зміщення першого рядка сканування щодо другого. У разі, коли $\Delta L_2 = \Delta L_1$, різниця дорівнюватиме нулю. У цьому випадку зміщення обох рядків сканування є однаковим (за напрямком та величиною). В усіх інших випадках: неоднакове зміщення обох рядків сканування в напрямку сканування чи проти нього, різнонаправлене зміщення рядків сканування (включаючи однакове за величиною), з'являється похибка вимірювання кількості підрахованих імпульсів. Графічно це проілюстровано на рис. 6. Як бачимо з цього рисунка, n та n' є різними за величиною, тому швидкість руху мікрооб'єкта буде різною для кожного із цих значень, що вказує на наявність похибки вимірювань. Для n' формула (8) матиме такий вигляд:

$$V_o' = V_c \cdot \frac{n'}{(N + n')}. \quad (13)$$

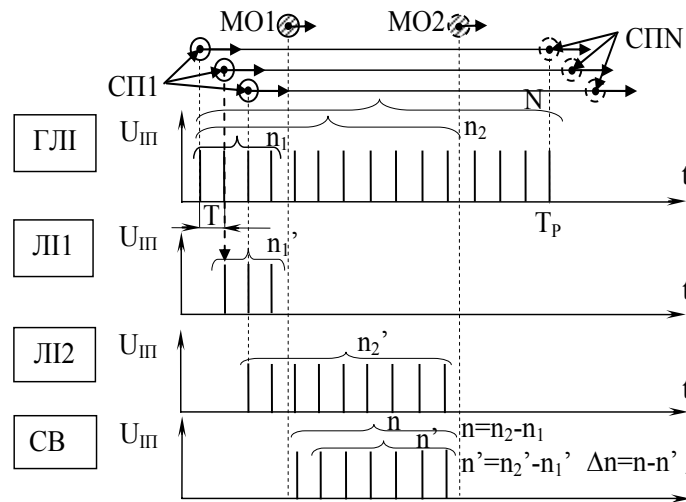


Рис. 6. До похибки визначення швидкості руху мікрооб'єкта при зміщенні рядка сканування в напрямку сканування

Тоді відносна похибка вимірювання швидкості за умови, що V_c є незмінною, визначатиметься за формулою

$$\varepsilon = \delta_{V_o} = 1 - \frac{n'}{n} \cdot \frac{T_B}{T_B'}, \quad (14)$$

де T_B та T_B' – час вимірювання швидкості незміщеним та зміщеним рядком сканування. Враховуючи, що $\delta_{V_o} = (V_o - V_o')/V_o$.

Аналіз усіх основних випадків зміщення рядків сканування дає загальну формулу для обчислення похибки вимірювання (для руху мікрооб'єкта у напрямку сканування чи проти нього):

$$\varepsilon = \delta_{V_o} = \left| 1 - \frac{n'}{n} \cdot \frac{T_B}{T_B'} \right|. \quad (15)$$

При цьому важливо зазначити, що у випадку руху мікрооб'єкта в напрямку сканування, T_B та T_B' визначаються за формулами, аналогічними до (3), а за руху мікрооб'єкта в протилежному напрямку – аналогічними до (4).

Графіки відносної похибки вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта зміщеним рядком сканування зображені на рис. 7.

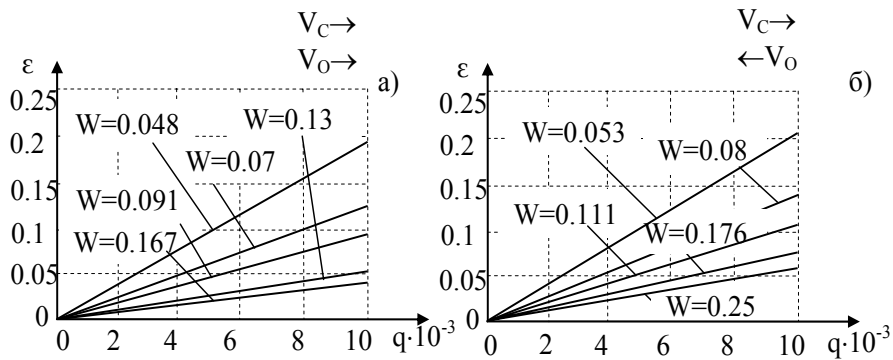


Рис. 7. Похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта під час зміщення рядка сканування (зміщення рядка під час першого сканування стосовно рядка під час другого сканування не більше 1 %)

Як вже було сказано раніше, при зміщенні першого та другого рядків сканування на однакову віддаль в одному напрямку похибка дорівнюватиме нулеві за умови потрапляння обох положень мікрооб'єкта у зміщений рядок сканування. Тому графіки на рис. 7 стосуються лише випадків, коли існує зміщення рядків сканування один стосовно другого, тобто величина $\Delta L = \Delta L_2 - \Delta L_1$ не дорівнює нулеві. Для побудови цих графіків використовувалися такі значення параметрів системи вимірювання: загальна кількість положень сканувальної плями в рядку сканування – $N = 1000$, переміщення мікрооб'єкта в/та проти напрямку сканування (положень сканувальної плями) – $n = 50; 75; 100; 150; 200$, зміщення рядка сканування (положень сканувальної плями) – $\Delta n = 1 \dots 10$, відносна зміщення рядка сканування – $q = \Delta n / N = 0.001 \dots 0.01$, період слідування імпульсів підсвітки – $T = 1$, швидкість руху сканувальної плями – $V_c = 1$, відносна швидкість руху мікрооб'єкта – $W = V_o / V_c$.

Як бачимо з графіків на рис. 7, зі збільшенням зміщення рядка сканування похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта зростає. Величина похибки у другому випадку є більшою згідно з принципом складання швидкостей, тому самому переміщенню в напрямку сканування та проти нього відповідають різні швидкості мікрооб'єкта (для другого випадку ця швидкість є більшою). При цьому конкретне значення зміщення здійснює більший вплив на величину похибки саме у разі руху мікрооб'єкта проти напрямку сканування. Зі збільшенням швидкості та відповідно переміщення мікрооб'єкта за тієї самої величини зміщення Δn похибка як в першому, так і в другому випадку зменшується. Це пояснюється тим, що чим більшим є переміщення мікрооб'єкта, тим менший вплив на нього здійснює конкретна величина зміщення рядка сканування.

Істотним також є те, що швидкість мікрооб'єкта повинна бути такою, щоб він не виходив за межі поля зору мікроскопа. У першому наближенні вона повинна відповідати умові

$$V_o \leq 0.5 \cdot V_c. \quad (16)$$

Детальніший аналіз показує, що швидкість мікрооб'єкта за його руху в напрямку сканування повинна відповідати, зокрема випадку, коли його перше положення може знаходитися в першій половині рядка, а друге – в другій половині, що відповідає вимірювальній швидкості руху мікрооб'єкта: $V_o \leq 0.333 \cdot V_c$. Зміщення першого рядка сканування щодо другого в межах $\pm 10\%$ від його розміру, що є максимально допустимим для вимірювальних телевізійних систем [5], додатково впливає на значення вимірюваної швидкості. Наприклад, для вже згаданих параметрів системи вимірювання за $n_{\max} = 500$ та руху мікрооб'єкта в напрямку сканування границі вимірюваної швидкості повинні відповідати умові

$$\frac{(n_{\max} - \Delta n)}{(N + (n_{\max} - \Delta n))} \cdot V_c \leq V_o \leq \frac{(n_{\max} + \Delta n)}{(N + (n_{\max} + \Delta n))}, \quad (17)$$

де $\Delta n = \pm 0.1N$. Вираз (17) дає значення $0.286 \cdot V_c \leq V_o \leq 0.375 \cdot V_c$. За руху мікрооб'єкта проти напрямку сканування описані граничні умови є дещо іншими за значенням. Швидкість мікрооб'єкта

за його руху проти напрямку сканування, що відповідає, зокрема випадку, коли перше положення мікрооб'єкта може знаходитися в другій половині рядка, а друге – в першій половині, повинна відповідати умові $V_0 \leq V_c$. Для максимально допустимого зміщення рядка сканування для вимірювальних телевізійних систем відповідні границі вимірюваної швидкості становитимуть $0.67 \cdot V_c \leq V_0 \leq 1.5 \cdot V_c$. Отже, з наведених прикладів зрозуміло, що діапазон вимірювальних швидкостей для мікрооб'єкта, що рухається проти напрямку сканування, є ширшим.

Оцінка похибки визначення швидкості руху мікрооб'єкта внаслідок стиснення та видовження рядка сканування. Іншим видом спотворень, що впливають на точність вимірювання, є стиснення чи видовження рядка сканування без зміни його положення та кількості позицій сканувальної плями в ньому. Можна виділити чотири основні типи стиснення рядків сканування: 1) стиснення рядка сканування в напрямку до його початку; 2) стиснення рядка сканування в напрямку до його кінця; 3) рівнозначне стиснення рядка в напрямку від країв до його центра; 4) нерівнозначне стиснення рядка в напрямку від країв до його центра. На рис. 8 показано перший тип стиснення рядка сканування.

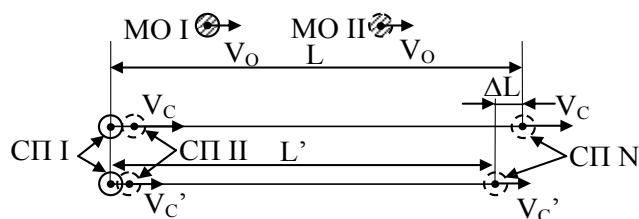


Рис. 8. Стиснення рядка по осі сканування в напрямку до його початку

Як бачимо з цього рисунка, стиснення рядка повинно відповідати такій умові, щоб отриманий в результаті рядок сканування забезпечував потрапляння обох положень мікрооб'єкта в межі поля зору системи сканування.

Аналіз описаних випадків стиснення рядка сканування показує, що загальна відносна похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта визначатиметься за формулою

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{V_c'}{V_c} \cdot \frac{n'}{n} \cdot \frac{T_B}{T_B'} \right|, \quad (18)$$

де V_c та V_c' – швидкості сканування в рядку нормальних розмірів та у стисненому рядку. Їх значення повинні відповідати умові $V_c > V_c'$, n та n' – кількість імпульсів підсвічення, підрахована системою за допомогою нормального та стисненого рядків сканування відповідно, T_B та T_B' – час вимірювання переміщення мікрооб'єкта, що визначаються за формулами, аналогічними до (3), у разі руху мікрооб'єкта в напрямку сканування, та відповідно за формулами, аналогічними до (4), у разі руху мікрооб'єкта проти напрямку сканування.

Графіки похибок вимірювання швидкості мікрооб'єкта стисненим рядком сканування показано на рис. 9. На цьому рисунку літерою k позначено відносне стиснення рядка сканування, що дорівнює $k = (L - L_1)/L$, де L та L_1 – розміри відповідно звичайного та стисненого рядка сканування. Для побудови цих графіків використовувалися такі самі значення параметрів сканування N, n, T, V_c та W , як для випадку зміщення рядка сканування. Варто зазначити, що для випадку стиснення рядка сканування не виконується умова відсутності похибок вимірювання за однакового стиснення рядка сканування під час першого та другого сканування.

Як бачимо з графіків, похибки, спричинені стисненням рядка сканування, є меншими за похибки під час його зміщення. Зі збільшенням стиснення рядка сканування похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта зростає.

Аналогічно до першого випадку, похибка вимірювання швидкості є більшою за руху мікрооб'єкта проти напрямку сканування. Це пояснюється тими самими міркуваннями, що і у першому випадку, тільки роль величини зміщення тут відіграє величина стиснення рядка

сканування. Зворотною є ситуація із впливом швидкості мікрооб'єкта на величину похибки. Як бачимо з рис. 9, зі збільшенням відносної швидкості мікрооб'єкта похибка вимірювання зростає. Це пояснюється тим, що, чим більшою є швидкість i , як наслідок, переміщення мікрооб'єкта, тим більшою є різниця між дійсною кількістю положень сканувальної плями та кількістю її стиснутих положень, що поміщаються у межах зони переміщення мікрооб'єкта.

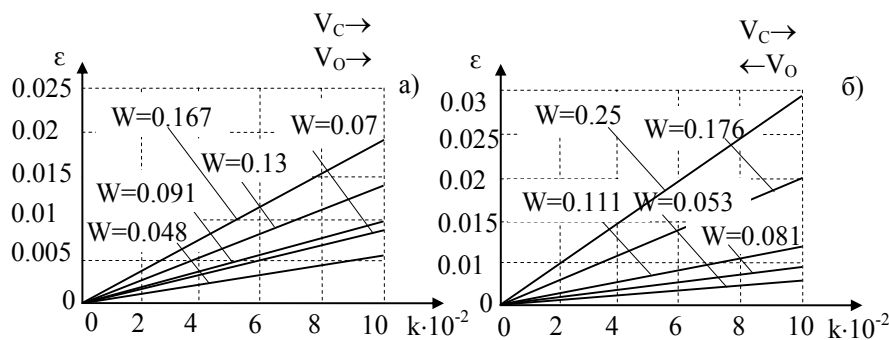


Рис. 9. Похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта внаслідок стиснення рядка сканування (стиснення рядка сканування під час першого та другого сканування не більше 10 %)

Розглянемо випадок, коли рядок сканування видовжується порівняно зі своїм початковим розміром (рис. 10). Параметри моделі обчислення є тими самими.

Граничні умови для вимірювання швидкості стисненим та видовженим рядком сканування визначаються, враховуючи подібні до першого випадку міркування. Стиснення та видовження рядка сканування в межах $\pm 10\%$ від його розміру є максимально допустимим для вимірювальних телевізійних систем [5].

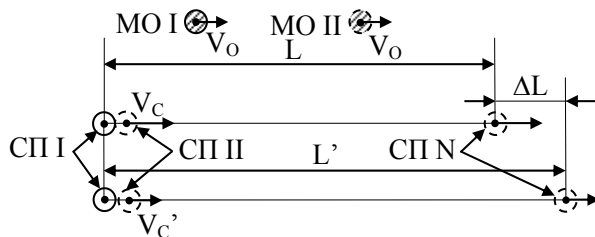


Рис. 10. Видовження рядка по осі сканування в напрямку від його кінця

На рис. 11 зображено графіки похибки вимірювання швидкості мікрооб'єкта видовженим рядком сканування, що також обчислюється за формулою (18), параметри системи вимірювання при цьому не змінюються. Літерою k позначено відносне видовження рядка сканування, що дорівнює $k = (L1 - L)/L$, де L та $L1$ – розміри відповідно звичайного та видовженого рядків сканування. Якщо порівняти рис. 9 та 11, то можна зауважити, що характер зміни похибки вимірювання є таким самим, але величина похибки вимірювання видовженим рядком сканування є дещо меншою.

Інші похибки вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта. Похибки, описані вище, є характерними для обох варіантів сканування. Однак кожен із варіантів сканування має також похибки, характерні лише для нього. Для неперервного сканування можна навести, наприклад, похибки, спричинені скінченною тривалістю імпульсів підсвічення. У цьому випадку за руху сканувальної плями вздовж рядка і підсвіченні її імпульсом тривалістю τ розмір підсвіченої сканувальної плями перебільшуватиме номінальний на величину $\Delta d_c = \tau \cdot V_c$. Це може спричинити похибки у визначенні швидкості руху мікрооб'єкта внаслідок перекриття такою “розмитою” плямою своїх сусідніх положень та присвоєння мікрооб'єкту неправильно визначених координат.

За дискретного варіанта сканування на точність формування окремих положень сканувальної плями і відповідно на точність вимірювання швидкості мікрооб'єкта впливатиме точність формування сходячого сигналу в індуктивному навантаженні. Під час проходження цього сигналу через котушки відхилення відбувається його спотворення через наявність реактивних складових наванта-

ження. Вище вже зазначалося, що ці спотворення усуваються використанням імпульсів підсвічення для виділення пологих ділянок окремих сходинок і забезпечення утворення лінійних ділянок сигналу для формування окремих положень сканувальної плями. Похибки вимірювання швидкості дискретним методом сканування можуть бути також пов'язані із точністю формування сигналу на виході цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП), за допомогою яких формується вже згаданий сходинчастий сигнал. Як відомо, точність ЦАП становить $1/2$ МР (молодшого розряду) цифрових кодів, з якими працює перетворювач [6]. Загальна похибка для n -розрядного ЦАП запишеться так:

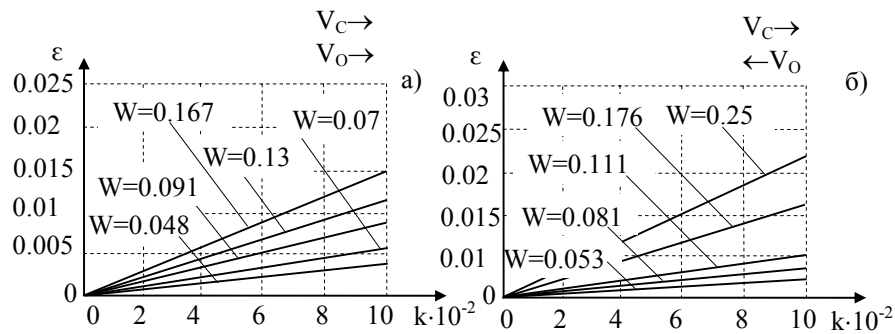


Рис. 11. Похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта внаслідок видовження рядка сканування (видовження рядка сканування під час першого та другого сканування не більше 10 %)

$$\varepsilon_{\text{заг}} = \pm \frac{100}{2^{n+1}} \% \quad (18)$$

Для формування, наприклад, 1000 положень сканувальної плями у рядку сканування необхідно мати ЦАП з розрядністю $n = 10$, тому загальна похибка становитиме $\varepsilon_{\text{заг}} = \pm \frac{100}{2^{11}} = 0.049 \%$ від значення вихідного сигналу. Під час формування сходинчастого сигналу у цифро-аналогових перетворювачах виникають так звані “диференційні похибки”, чи “диференційні нелінійності”, які характеризуються зміною величини аналогового сигналу, що відповідає переходу від одного цифрового числа до іншого суміжного, по всьому діапазону цифрових вхідних і вихідних сигналів і можуть бути причиною немонотонності характеристики перетворення ЦАП [6]. Це, своєю чергою, може спричинити нерівномірне розташування положень сканувальної плями в рядку сканування, неточне визначення положення мікрооб'єкта, та, як наслідок, неправильне визначення його швидкості V_0 . Загалом наведені похибки є незначними порівняно із вже описаними раніше похибками за рахунок зміщення, стиснення та видовження рядка сканування.

Висновки. З використанням спрощеної моделі оцінено можливості застосування однорядкового двотактного режиму сканування для вимірювання швидкості мікрооб'єктів. Перевагою однорядкового двотактного режиму є те, що він не потребує додаткових відомостей про розміри та характер розподілу прозорості мікрооб'єкта. Також на двотактний режим визначення швидкості не накладається обмеження у вигляді потреби визначення тривалості імпульсів від фотоприймача, що дає змогу задавати високий, порівняно із одноктактним, рівень сигналу спрацювання схеми вимірювання з метою уникнення впливу шумів та неоднозначностей.

Основними джерелами виникнення похибок визначення швидкості в цьому методі є зміна початкових розмірів рядка сканування (видовження та стиснення) та зміщення рядка сканування від свого початкового місцерозташування. Для зміщення рядка сканування в межах 1 % від свого номінального розміру отримана максимальна похибка вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта становить $\varepsilon = 0.21 \%$, а вимірювана швидкість – $V_0 = 0.053 \cdot V_c$. Для випадків стиснення та видовження рядка сканування в межах 10 % від номінального розміру ці параметри мають такі значення: 1) стиснений рядок сканування – $\varepsilon = 0.03 \%$ ($V_0 = 0.25 \cdot V_c$); 2) видовжений рядок сканування – $\varepsilon = 0.023 \%$ ($V_0 = 0.25 \cdot V_c$). Отже, зміщення рядка сканування здійснює більший вплив на точність вимірювань та істотніше обмежує значення вимірюваної швидкості. Максимальні значення вимірюваної швидкості є більшими для випадку руху мікрооб'єкта у напрямку, протилежному до сканування.

Одержані у результаті аналізу оцінки похибок та граничних можливостей щодо максимальної вимірюваної швидкості, а також наведені графіки можуть бути використані під час проектування телевізійних оптичних сканувальних мікроскопів. Доцільними напрямками подальших досліджень можуть бути врахування нерівномірності розподілу інтенсивності у сканувальному елементі та оцінка можливостей кадрового методу вимірювання.

1. Грицьків З.Д., Матієшин Ю.М. Визначення швидкості мікрооб'єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом в однорядковому режимі // "Eastern European Journal of Enterprise Technologies". – Харків, 2006. – № 4/2 (22). – С. 27–32. 2. Матієшин Ю.М. Визначення швидкості руху динамічного мікрооб'єкта у телевізійній сканувальній мікроскопії // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2006. – №557. – С. 48–56. 3. Быков Р.Е., Гуревич С.Б. Анализ и обработка цветных и объемных изображений. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с. 4. Физиология человека: В 3-х т. Т. 2 / Пер. с англ.; Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М.: Мир, 1996. – 641 с. 5. Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений. – М.: Связь, 1964. – 592 с. 6. Гнатек Ю.Р. Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1982. – 552 с.

УДК 004.942

Р.-А.Д. Іванців, Р.В. Загарюк, В.М. Теслюк
Національний університет "Львівська політехніка"
кафедра систем автоматизованого проектування

СХЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ АКСЕЛЕРОМЕТРА ЄМНІСНОГО ТИПУ

© Іванців Р.-А.Д., Теслюк В.М., Загарюк Р.В., 2007

Розроблено схему перетворення сигналів акселерометра ємнісного типу. Описано принцип роботи схеми та її основні елементи. Розроблено математичну модель перетворення сигналу. Наведено результати перетворення та зроблено висновки щодо наведеної схеми.

Signal-conditioning circuit for capacitive accelerometer is designed. The main principles and elements of the circuit are described. Model of capacitive accelerometer is designed. Mathematical model of the Signal-conditioning circuit is developed. Work results are presented and drawn conclusions about current circuit.

Вступ. Акселерометр – це пристрій, що вимірює прискорення або ступінь зміни швидкості щодо часу [1–5]. Акселерометри бувають різних форм та розмірів. За останні роки розвиток передових технологій мікрооброблення дав змогу інтегрувати ці пристрої в мікросистеми. Фактором, що стимулював розвиток таких інтегральних давачів, є зростаюча потреба в інформації в різноманітних керувальних технічних системах. Сьогодні є багато напівпровідникових компаній, що виробляють акселерометри, які не тільки вимірюють лінійне прискорення, але й інші параметри, такі як кутова швидкість, вібрації і навіть ступінь нахилу.

В основу інтегрального акселерометра як мікроелектромеханічної системи (МЕМС) [6–9] покладено концепцію "від давача до системи". Одним із ключових питань цієї концепції є перетворення сигналу від давача прискорення до елемента схеми у форму, прийнятну для оброблення керуючим елементом схеми.

У цій роботі запропоновано схему перетворення амплітуди вібрацій, що виконує інтегральний акселерометр ємнісного типу [10] в рівень напруги. Ця схема формує вихідну напругу, яка змінюється пропорційно до величини прискорення прикладеної вздовж осі давача.