

**Висновок.** Проаналізовано основні методи та алгоритми вибору оптимального малошвилювального базису. З урахуванням особливостей структури сигналу, наявності шумів та напрямку досліджень сигналу найвживанішими методами визначення оптимального базису є метод послідовного когерентного трешолдингу, нелінійної порогової фільтрації сигналів та одиничного (частотного) дерева. В усіх згаданих методах критерієм вибору оптимального базису є визначення мінімального значення ентропії розподілу квадратів модулів малошвилювальних коефіцієнтів. Як показує аналіз, вибір конкретного методу залежить переважно від типу вхідного сигналу, точності апроксимації сигналу в часо-частотній області, допустимих програмно-апаратних затрат та часу оброблення сигналу.

1. Donoho D., I. Johnstone (1994) *Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage* // *Biometrika*, vol. 81, pp.425-455. 2. Jonathan Berger, Ronald R. Coifman, and Maxim J. Goldberg. *Removing noise from music using local trigonometric bases and wavelet packets* // *Journal of the Audio Engineering Society*, 42(10):808-818, October 1994. 3. Ronald R. Coifman and Mladen Victor Wickerhauser. *Entropy-based algorithms for best basis selection*. *IEEE Trans. on Information Theory*, 38(2):713-718, March 1992. 4. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. *Теория и практика вейвлет преобразования*. – СПб.: ВУС, 1999. – 203 с. 5. Маллат С. *Вейвлеты в обработке сигналов*. – М.: Мир, 2005. – 671 с. 6. Любушин А.А. *Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга*. – М.: Наука, 2007. – 228 с.

УДК 621.397+681.723

В.І. Шклярський, Ю.М. Матієшин  
Національний університет “Львівська політехніка”

## ОЦІНКА ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МІКРООБ’ЄКТА ТЕЛЕВІЗІЙНИМ СКАНУВАЛЬНИМ ОПТИЧНИМ МІКРОСКОПОМ У КАДРОВОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

© Шклярський В.І., Матієшин Ю.М., 2009

**Проаналізовано похибки визначення швидкості руху мікрооб’єкта, що пов’язані із методикою вимірювання, параметрами сканувальної плями, нестабільністю формування сканувального растра (зміщення, зміна розмірів за рахунок стиснення чи видовження) та геометричними спотвореннями сканувального растра. Визначено максимальні значення похибок вимірювання швидкості руху мікрооб’єкта при різних дестабілізуючих факторах.**

**Errors of microobject velocity of movement definition, which are connected to a technique of measurement, scanning spot parameters, instability of a scanning raster formation (displacement, change of the sizes owing to its narrowing or expansion) and geometrical distortions of a scanning raster are analyzed. The maximal values of the errors of microobject velocity of movement measurement by different instability factors are determined.**

**Вступ.** Останнім часом все більше зростає універсальність телевізійних вимірювальних систем, яка дає змогу розв’язувати різноманітні задачі без істотного перестроювання апаратури із зміною алгоритмів керування і обробки даних. Ця тенденція пов’язана із широким використанням у складі телевізійних вимірювальних систем персональних комп’ютерів та засобів, що керуються заданою програмою роботи та контролюють параметри вимірювальної системи, здійснюють підстроювання, вносять необхідні корективи до результатів, беруть участь в обробці сигналу й оцінці значень вимірюваних величин.

Для дослідження динамічних мікрооб'єктів використовуються телевізійні сканувальні оптичні мікроскопи на базі електронно-променевої трубки надвисокої роздільної здатності [1–4]. При вимірюванні швидкості руху динамічних мікрооб'єктів виникає необхідність розробки таких принципів побудови мікроскопів, які забезпечують необхідну точність вимірювання швидкості руху динамічних мікрооб'єктів.

У статті проаналізовано похибки, які визначають точність вимірювання за допомогою телевізійного сканувального оптичного мікроскопа у кадровому режимі роботи.

**1. Похибки визначення координат мікрооб'єкта, пов'язані із методикою вимірювання та параметрами сканувальної плями.** Для аналізу похибок визначення координат мікрооб'єкта (МО) використаємо математичну модель кадрового режиму сканування, запропоновану в [5, 6]. У цій моделі розмір досліджуваного МО співрозмірний із розміром сканувальної плями (СП) у площині сканування. Окремі положення СП формуються послідовно в часі в напрямку зліва направо вздовж осі  $x$ . У такому разі, навіть за умови розташування фіксованих положень сканувальної плями без проміжків (див. рис. 1), вона може не повністю збігатися із досліджуваним МО. Відбувається часткове перекриття сканувальною плямою мікрооб'єкта, що призводить до неточного визначення координат МО, та, як наслідок, його швидкості. Вибір значення порогового рівня сигналу для спрацювання компаратора у схемі вимірювання координат мікрооб'єкта, підбір відповідної форми, розподілу яскравості свічення чи оптимального розташування координатних положень СП у растрі сканування, незначно впливатимуть на точність вимірювань, а лише на те чи буде виявлено мікрооб'єкт, чи ні у конкретному випадку. Окрім цього, вибір розмірів, форми та яскравості свічення сканувальної плями залежить від наявних відомостей про мікрооб'єкт та його характеристики. Отже, будь-яка координата мікрооб'єкта визначатиметься системою за першим положенням сканувальної плями, за якого відбулося перевищення порогового рівня сигналу компаратора з точністю, що відповідає розміру цієї плями. Тобто фактично досяжною точністю вимірювання системи є роздільна здатність сканувальної трубки.

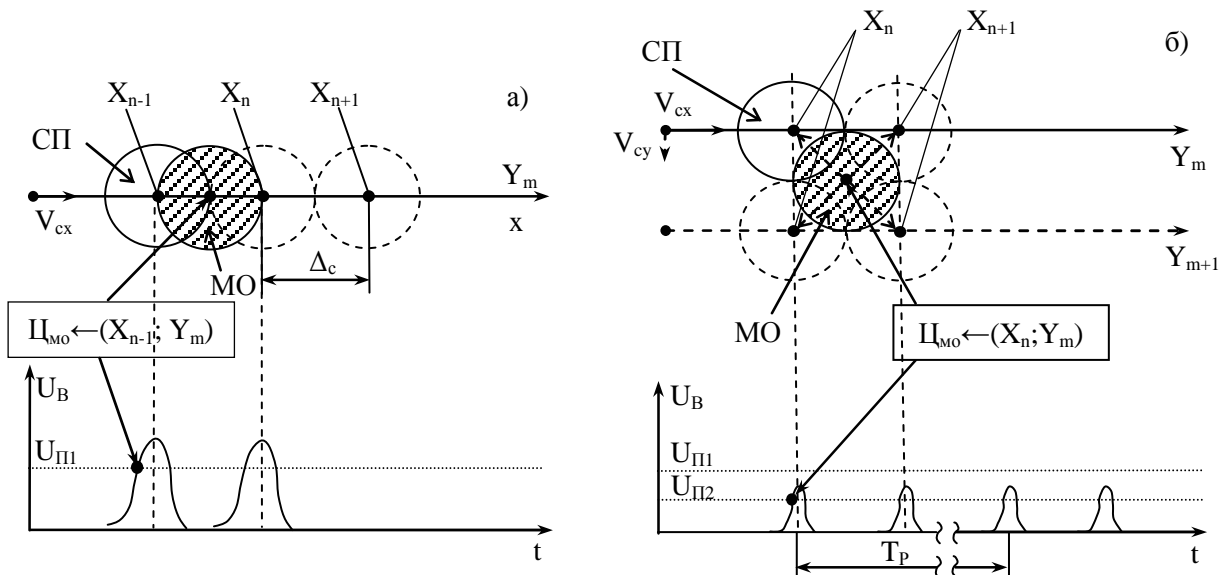


Рис. 1. Часткове перекриття сканувальною плямою мікрооб'єкта при визначенні його координат:  
 а – випадок розташування МО на однаковій віддалі від центрів сусідніх положень СП вздовж осі  $x$ ;  
 б – випадок розташування МО на однаковій віддалі від центрів всіх сусідніх положень СП

Як видно з рисунків, рівень сигналу від всіх положень сканувальної плями буде однаковим. Зрозуміло, що у випадку, зображеному на рис. 1, б, мінімально допустимий пороговий рівень сигналу компаратора повинен бути меншим, ніж у випадку на рис. 1, а, інакше мікрооб'єкт не буде

зафіксований ні в одному із положень сканувальної плями. Запишемо допустимі значення порогового рівня сигналу компаратора  $U_{\Pi}$  для обох зображених випадків розташування МО. У першому випадку є ситуація, коли центр мікрооб'єкта  $\Pi_{MO}$  потрапляє посередині між сусідніми положеннями СП при його русі вздовж осі  $x$ . Можна підрахувати [7], що поріг спрацювання, який визначається через площу перекриття, дорівнює:

$$U_{\Pi} = a \cdot S_{\Pi} \geq \pi R^2 - \Delta \left[ R^2 - \left( \frac{\Delta}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - 2R^2 \arcsin(\Delta/2R) \approx \frac{2}{5} \cdot \pi R^2 \geq 0.4 \cdot S_{\max}, \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт пропорційності;  $R$  – радіус сканувальної плями (мікрооб'єкта);  $\Delta$  – віддаль між центрами СП та МО;  $S_{\Pi}$  та  $S_{\max} = \pi R^2$  – площа перекриття, що відповідає пороговому та максимальному рівням сигналу спрацювання компаратора відповідно. Наведені міркування стосуються як випадків руху мікрооб'єкта як вздовж осі  $x$ , так і вздовж осі  $y$ . Для руху вздовж осей  $x$  та  $y$  одночасно (напр., діагонального – рис. 1, б) поріг спрацювання повинен дорівнювати:

$$U_{\Pi 2} = a \cdot S_{\Pi 2} \geq \pi R^2 - R \cdot \sqrt{2} \left[ R^2 - \left( \frac{R \cdot \sqrt{2}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - 2R^2 \arcsin\left(\frac{R \cdot \sqrt{2}}{2R}\right) \approx \frac{1}{5} \cdot \pi R^2 \geq 0.2 \cdot S_{\max}. \quad (2)$$

Тобто мінімально допустимий пороговий рівень сигналу спрацювання компаратора для цього випадку повинен бути у два рази меншим, ніж у першому. Подібні міркування використовуються також для інших випадків руху мікрооб'єкта, щоб забезпечити вибір відповідного порогового рівня сигналу та уникнення ситуації пропуску мікрооб'єкта. Наприклад, вибір порогового рівня  $S_{\Pi} > 0.4 \cdot S_{\max}$  дає змогу однозначно визначити координату мікрооб'єкта.

Іншим параметром сканування, який впливає на точність вимірювання координат мікрооб'єкта, є співвідношення швидкостей сканування  $V_C$  та мікрооб'єкта  $V_O$ . Розглянемо детальніше різні співвідношення цих швидкостей. Якщо при вимірюванні поточної координати МО компаратор послідовно спрацьовує в обох чи більше сусідніх між собою положеннях СП, може виникати ситуація, коли неможливо чітко відповісти на запитання, чи мікрооб'єкт рухається із незначною швидкістю, чи просто перекриває собою два або більше сусідні положення СП. Тим самим ускладнюється однозначне вимірювання та розпізнавання необхідної координати мікрооб'єкта, що рухається зі швидкістю:

$$V_O < V_C / N^2 = \frac{d_c}{t_1 \cdot N^2}, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість положень сканувальної плями в рядку сканування (та рядків сканування у кадрі для растра квадратної форми);  $d_c$  – діаметр сканувальної плями;  $t_1$  – час формування одного положення сканувальної плями. Уникнути цієї ситуації можна, використовуючи метод багатокадрових вимірювань, за яким визначення наступної координати мікрооб'єкта розтягується у часі до моменту, коли зміна координат МО є такою, що він перемістився хоча би в сусідню адресовану точку. Чим меншою є вимірювана швидкість руху мікрооб'єкта, тим більшою повинна бути кількість кадрів сканування (рис. 2).

Якщо ж повторного спрацювання все ж не вдається уникнути (наприклад, якщо неправильна форма мікрооб'єкта), то в систему програмно закладається активізація вимірювання координати за першим сигналом спрацювання схеми компаратора та відсутність реакції системи вимірювання до повторного спрацювання схеми компаратора у межах формування двох чи більше послідовних положень сканувальної плями.

Можливості точного вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта обмежені також за великих значень швидкості руху МО:

$$V_O \geq V_C. \quad (4)$$

Адже у такому разі сканувальна пляма “не встигає” послідовно перекрити мікроб’єкт. Потрапляння сканувальної плями на МО може бути лише випадковим і не відображати реального характеру його руху.

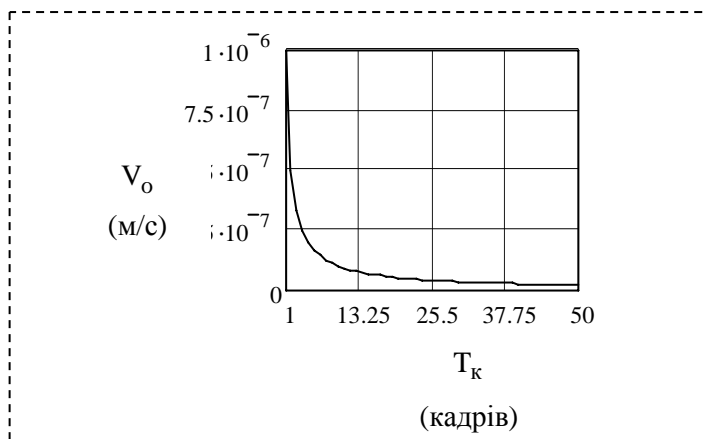


Рис. 2. До вимірювання малої швидкості руху мікроб’єкта

Щоб забезпечити вимірювання координат мікроб’єкта, у цьому випадку необхідно зменшити час формування одного положення сканувальної плями  $t_1$ , та, як наслідок, час формування усього сканувального растра  $T_k \approx N^2 \cdot t_1$ . Час формування одного положення сканувальної плями складається із часу її свічення  $t_c$  та часу переміщення сканувальної плями в сусіднє положення у незасвіченому стані  $t_n$ . Час свічення сканувальної плями  $t_c$  повинен відповідати такій умові:

$$t_c \gg t_n = t_p + t_{zg}, \quad (5)$$

де  $t_p$ ,  $t_r$  та  $t_{zg}$  – час післясвічення, розгорання та згасання люмінофора відповідно. Тому вибирають люмінофор із якомога меншим часом післясвічення. Час переміщення СП у незасвіченому стані в сусіднє положення  $t_n$  зумовлений, як правило, технічними особливостями систем відхилення сканувального променя.

Іншими методами, за допомогою яких можна збільшити швидкість сканування, є такі методи формування сканувального растра [8]:

1. Зменшення розмірів сканувального растра зі збереженням роздільної здатності.
2. Зменшення кількості положень сканувальної плями у растрі.
3. Застосування зупинки формування сканувального растра після знаходження координат МО.
4. Застосування спеціальних технічних засобів, що зменшують тривалість зворотного ходу розгортки сканування.

Найкращою щодо точності вимірювання є швидкість руху мікроб’єкта  $V_o$ , що лежить у межах:

$$V_c / N^2 \leq V_o \leq 0.5 \cdot V_c. \quad (6)$$

В таких випадках при визначенні точності вимірювання переміщення мікроб’єкта  $L$  враховується, що похибка одного вимірювання координати  $x$  чи  $y$  мікроб’єкта незмінно становитиме одне значення цієї координати. За умови однакового розташування СП та МО один відносно іншого при вимірюванні першої та другої координат  $X$  та (або)  $Y$  мікроб’єкта відповідно, величина похибки вимірювання переміщення мікроб’єкта буде дорівнювати нулеві, оскільки похибки двох окремих вимірювань координати мікроб’єкта компенсують одна одну (рис. 3).

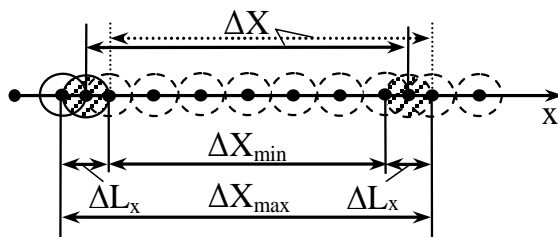


Рис. 3. Похибка вимірювання переміщення  $L$  мікроб’єкта

У разі ж протилежного за характером перекриття СП та МО, тобто, наприклад, знаходження першої координати мікрооб'єкта сусіднім правим (від нього) положенням сканувальної плями, а другої – сусіднім лівим положенням сканувальної плями, ці похибки підсумовуються, тим самим забезпечуючи сумарну похибку вимірювання переміщення мікрооб'єкта – одне значення кожної координати. На рисунку подано частковий випадок руху мікрооб'єкта вздовж осі x у напрямку сканування. Абсолютна похибка вимірювання переміщення  $\Delta L_x$  мікрооб'єкта вздовж осі x виміряна в координатах, буде дорівнювати кроку сканування:

$$\Delta L_x = \Delta_c = \Delta X - \Delta X_{\min} = \Delta X_{\max} - \Delta X = 1, \quad (7)$$

де  $\Delta X$ ,  $\Delta X_{\min}$ ,  $\Delta X_{\max}$  – відповідно дійсне, хибне занижене та хибне завищене значення переміщення МО. Зрозуміло, що ті самі міркування стосуються часткового випадку руху МО вздовж осі y.

Сумарне переміщення мікрооб'єкта у випадку, наприклад, складнішого діагонального руху (для растра квадратної форми  $L_x = L_y$  та однакової роздільної здатності  $R_x = R_y$ ) буде обчислене з максимальною похибкою, що становитиме  $\Delta L_{\max} = 1,41 \cdot \Delta L_x = 1,41 \cdot \Delta L_y \approx 1$  згідно з формулою:

$$L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} = \sqrt{2L_x^2} = \sqrt{2L_y^2} = \sqrt{2 \cdot (\Delta X \pm \Delta L_x)^2} = \sqrt{2 \cdot (\Delta Y \pm \Delta L_y)^2}, \quad (8)$$

де  $L$  – загальне переміщення мікрооб'єкта;  $L_x$  та  $L_y$  – складові переміщення мікрооб'єкта вздовж осей x та y відповідно;  $\Delta L_x$  та  $\Delta L_y$  – похибки переміщення мікрооб'єкта вздовж осей x та y відповідно;  $\Delta X$  та  $\Delta Y$  – дійсне переміщення мікрооб'єкта вздовж осей x та y відповідно. Знаки “+” та “-” відповідають завищеному та заниженому хибному значенню переміщення. В інших випадках (недіагональний рух мікрооб'єкта) сумарна похибка вимірювання переміщення формуватиметься тільки однією з координатних складових, що є впливовішою для цього переміщення, тобто не перевищуватиме 1. Отже, закладена в систему максимальна методична похибка одного вимірювання координати, та відповідно максимальна похибка вимірювання переміщення мікрооб'єкта дорівнюватиме значенню одного діаметра (координати) сканувальної плями.

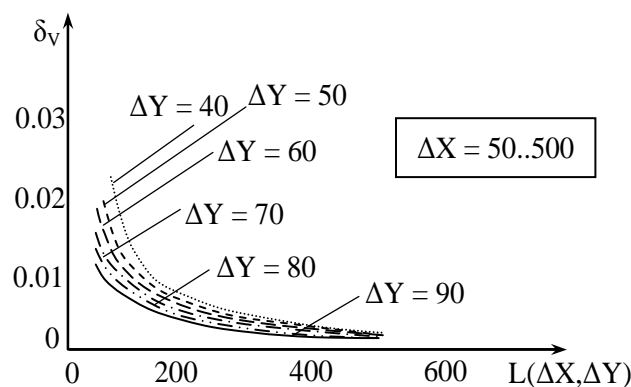


Рис. 4. Приклади графіків відносної методичної похибки визначення швидкості руху мікрооб'єкта  $\delta_v$  внаслідок неточного визначення його координат при різних значеннях складових переміщення вздовж осей x та y

Необхідно також зазначити, що згідно з методикою вимірювання (див. [5]) відносні похибки визначення переміщення мікрооб'єкта  $\delta_L$  та визначення часу вимірювання  $\delta_T$  є зв'язаними величинами, тому похибку вимірювання швидкості руху МО, яку знаходять за загальновідомою формулою  $V_0 = L/T_B$ , можна вважати залежною та відповідно такою, що числово дорівнює тільки похибці вимірювання переміщення  $\delta_v = \delta_L$ , яка обчислюється за формулою:

$$\delta_v = \delta_L = \frac{|L_d - L|}{L_d} = \frac{|\Delta L|}{L_d} = \frac{1}{L_d}. \quad (9)$$

З формули зрозуміло, що методична похибка вимірювання швидкості мікрооб'єкта  $\delta_V$  є обернено пропорційною до дійсного значення переміщення мікрооб'єкта  $L_d$ .

Графіки похибки визначення швидкості мікрооб'єкта  $\delta_V$  внаслідок неточного визначення його координат наведено на рис. 4. Характер залежностей та значення похибок за координатою  $x$  та координатою  $y$  є однаковими через те, що сканувальний растр є квадратним, тому немає необхідності у додатковому наведенні графіків похибок при покроковій зміні переміщення вздовж осі  $y$  та вибраних значеннях переміщення вздовж осі  $x$ .

**2. Похибки визначення координат мікрооб'єкта, пов'язані із нестабільністю формування сканувального растра.** Серед похибок, пов'язаних із нестабільністю формування сканувального растра, можна назвати такі:

- похибки, пов'язані із стисненням сканувального растра (вздовж осі  $x$ , вздовж осі  $y$ , в обох напрямках одночасно);
- похибки, пов'язані із видовженням сканувального растра (вздовж осі  $x$ , вздовж осі  $y$ , в обох напрямках одночасно);
- похибки, пов'язані із зміщенням сканувального растра (вздовж осі  $x$ , вздовж осі  $y$ , в обох напрямках одночасно).

Вони пов'язані переважно з особливостями формування сканувального растра на екрані електронно-променевої трубки. Можна виділити два основні способи формування сканувального растра [7, 9]: 1) неперервний – із використанням плавного режиму руху СП та забезпеченням відліку її координат за допомогою підрахунку імпульсів, що формуються генератором лічильних імпульсів під час сканування (ТВ – стандарт); 2) дискретний – із застосуванням крокового режиму руху СП чи формування окремих координатних положень при її неперервному русі підсвіченням за допомогою прямокутних імпульсів. Запропонована модель кадрового режиму сканування та аналізовані похибки стосуються дискретного способу формування сканувального растра.

Розглянемо випадок, коли сканувальний растр стискається вздовж осей  $x$  та  $y$  одночасно. Для побудови відповідних графічних залежностей відносної похибки вимірювання швидкості руху динамічного мікрооб'єкта  $\delta_V$  від відносного стиснення сканувального растра вздовж осей  $x$  та  $y$  –  $\delta_{Lx}$  та  $\delta_{Ly}$  відповідно використано програмне середовище MathCAD. Введено такі значення параметрів розрахунку:

1. Кількість положень сканувальної плями в рядку (рядків у кадрі) –  $N = 1000$ .
2. Переміщення мікрооб'єкта вздовж осі  $x$  –  $n = 100$  (положень сканувальної плями).
3. Переміщення мікрооб'єкта вздовж осі  $y$  –  $m = 100$  (положень сканувальної плями).
4. Відносне стиснення сканувального растра вздовж осі  $x$  –  $\delta_{Lx} = 0,01 \dots 0,1$  (1%...10%).
5. Відносне стиснення сканувального растра вздовж осі  $y$  –  $\delta_{Ly} = 0,01 \dots 0,1$  (1%...10%).
6. Період слідування імпульсів підсвічування –  $T = 1$  мкс.
7. Діаметр сканувальної плями у площині мікрооб'єкта –  $d_c = 1$  мкм.
8. Швидкість руху сканувальної плями –  $V_c = d_c / T = 1$  мкм/мкс.
9. Розміри квадратного сканувального растра –  $L_p \times L_p = 1 \times 1$  мм.

Отримано графічні залежності, зображені на рис. 5. Формулу для визначення сумарної відносної похибки вимірювання швидкості мікрооб'єкта вздовж осей  $x$  та  $y$  з тих самих міркувань, що і у першому випадку, одержують через похибку вимірювання переміщення  $\delta_L$ . Вона матиме вигляд:

$$\delta_V = \delta_L = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}, \quad (10)$$

де  $\delta_x$  та  $\delta_y$  – відносні похибки вимірювання переміщення вздовж осей  $x$  та  $y$ , відповідно. Вони, своєю чергою, визначаються за формулами:

$$\delta_x = |1 - \delta_{vx} \cdot \delta_{nx} \cdot \delta_{Tx}|, \quad (11)$$

$$\delta_y = |1 - \delta_{vy} \cdot \delta_{ny} \cdot \delta_{Ty}|, \quad (12)$$

де  $\delta_{vx,vy}$ ;  $\delta_{nx,ny}$ ;  $\delta_{Tx,Ty}$  – відповідно рядкові та кадрові відносні зміни швидкості сканування  $V_C$ , переміщення мікрооб'єкта  $n$  та часу вимірювання  $T_B$ , спричинені відповідним стисненням вздовж рядка чи кадра сканування [9].

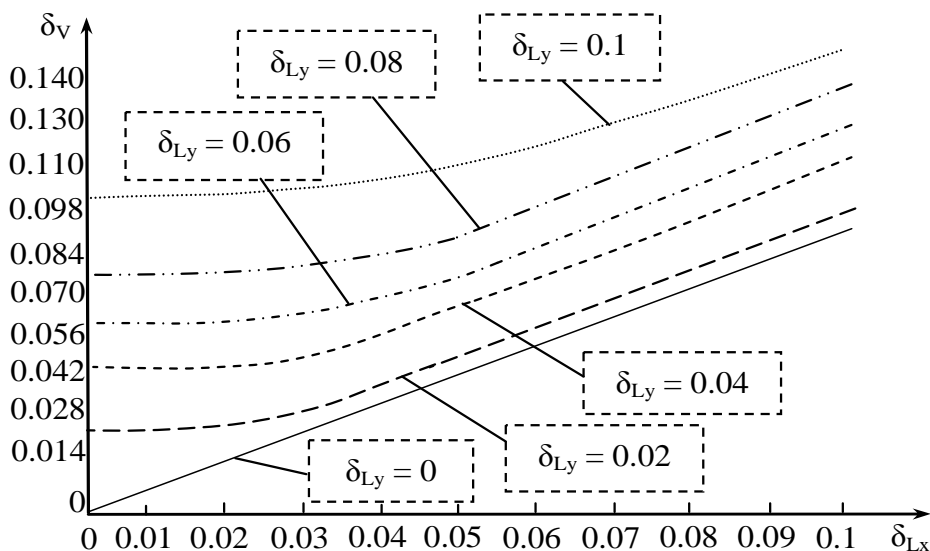


Рис. 5. Приклади графіків відносної похибки визначення швидкості руху мікрооб'єкта  $\delta_v$  внаслідок одночасного стиснення сканувального растра вздовж осей  $x$  та  $y$

У разі одночасного видовження сканувального растра вздовж осей  $x$  та  $y$  графік залежності відносної похибки визначення швидкості мікрооб'єкта було побудовано для наведених вище значень параметрів розрахунку та відносного видовження растра вздовж осей  $x$  та  $y$  –  $\epsilon_{Lx} = \epsilon_{Ly} = 0,01 \dots 0,1$  (1%...10%).

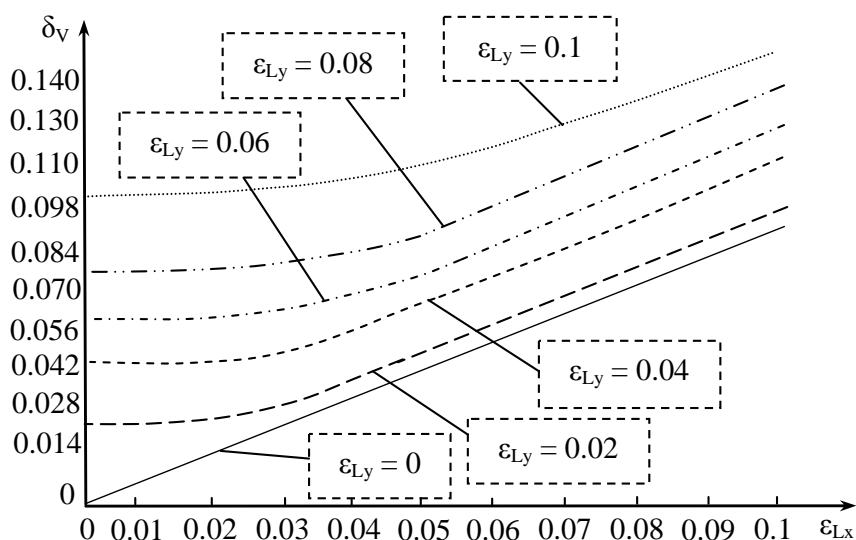


Рис. 6. Приклади графіків відносної похибки визначення швидкості руху мікрооб'єкта  $\delta_v$  внаслідок одночасного видовження сканувального растра вздовж осей  $x$  та  $y$

Отримано такі самі значення відносної похибки визначення швидкості мікрооб'єкта  $\delta_v$  (рис. 6). Це пояснюється тим, що сканувальний растр при стисненні та видовженні набуває однакових відносних змін розмірів у межах 10 % по кожній координаті.

Розгляд випадків, коли стиснення чи видовження відбувається тільки по одній із координат, є недоцільним, оскільки отримувані похибки аналізують аналогічно. Зрозуміло, що ці похибки є меншими.

Однотимчасне стиснення та видовження сканувального растра по різних координатах є менш імовірним з технічного погляду, проте може спостерігатися у випадку, наприклад, протилежних за характером спотворень, що вносяться рядковою та кадровою розгортками. Цей випадок розглянуто для тих самих параметрів розрахунку, що і випадки стиснення та видовження растра вздовж обох координатних осей, щоб мати можливість зіставити результати моделювання. Різниця була лише у тому, що по одній з осей сканування як параметр розрахунку використовувалося відносне видовження сканувального растра  $\epsilon$ , а по іншій – відносне стиснення  $\delta$  сканувального растра. Отримані за допомогою програмного середовища MathCAD результати є такими самими, як і для двох попередніх випадків, що свідчить про те, що кожна зі складових переміщення мікрооб'єкта є незалежною і тому сумарна відносна похибка вимірювання швидкості не змінюється. Через це немає необхідності у наведенні графіків цих похибок.

Випадок зміщення сканувального растра розглянемо на прикладі, коли зміщення сканувального растра відбувається по обох осях  $x$  та  $y$  одночасно в межах до 1 % від розміру сканувального растра. Інші параметри розрахунку є такими самими, що і для зміни розмірів растра, а саме:

1. Кількість положень сканувальної плями в рядку (рядків у кадрі) –  $N = 1000$ .
2. Переміщення мікрооб'єкта вздовж осі  $x$  –  $n = 100$  (положень сканувальної плями).
3. Переміщення мікрооб'єкта вздовж осі  $y$  –  $m = 100$  (положень сканувальної плями).
4. Відносне зміщення сканувального растра вздовж осі  $x$  –  $\delta_{3x} = 0,001 \dots 0,01$  (0,1 % ... 1 %).
5. Відносне зміщення сканувального растра вздовж осі  $y$  –  $\delta_{3y} = 0,001 \dots 0,01$  (0,1 % ... 1 %).
6. Період слідування імпульсів підсвічування –  $T = 1$  мкс.
7. Діаметр сканувальної плями у площині мікрооб'єкта –  $d_c = 1$  мкм.
8. Швидкість руху сканувальної плями –  $V_c = d_c / T = 1$  мкм/мкс.
9. Розміри сканувального растра –  $L_p \times L_p = 1 \times 1$  мм.

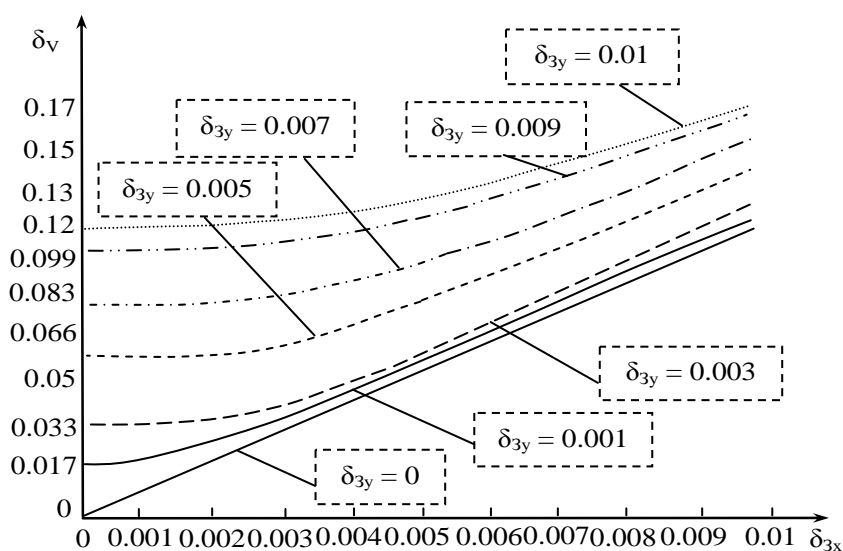


Рис. 7. Приклади графіків відносної похибки визначення швидкості мікрооб'єкта  $\delta_v$  внаслідок одночасного зміщення сканувального растра вздовж осей  $x$  та  $y$

Побудовані графіки для осей  $x$  та  $y$  є однаковими через квадратну форму сканувального растра, тому на рис. 7 наведено приклади графіків сім'ї характеристик для зміщення сканувального



растра вздовж осі  $x$  за постійних значень його зміщення по осі  $y$ . Як видно з графіків, зміщення сканувального растра вздовж осей  $x$  та  $y$  істотніше впливає на значення похибки вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта, ніж зміна його розмірів, адже навіть при сумарному зміні растра на 1–2 %, похибка набуває значення, співмірного із величиною похибки вимірювання, що відповідає сумарній зміні розмірів растра на 10–14 %. Аналогічно до наведених вище міркувань графіки похибки  $\delta_V$ , що стосуються зміщення растра тільки по одній з осей, не наводяться, оскільки похибка вимірювання тоді буде меншою за описану вище.

**3. Похибки визначення координат мікрооб'єкта, пов'язані із геометричними спотвореннями сканувального растра.** Як відомо, геометричні спотворення є наслідком недосконалості систем відхилення, неправильного їх положення і виявляються у порушенні прямокутності сканувального растра та викривленні його країв [10]. До похибок, що пов'язані із геометричними спотвореннями, відповідно до форми спотвореного сканувального растра можна зарахувати такі:

- похибки, пов'язані із “бочкоподібним” спотворенням растра;
- похибки, пов'язані із “подушкоподібним” спотворенням растра;
- похибки, пов'язані із спотворенням растра у вигляді трапеції;
- похибки, пов'язані із спотворенням растра у вигляді паралелограма;
- комбінації наведених вище прикладів похибок вимірювання (напр., “подушка” – вісь  $y$  + “трапеція” – вісь  $x$ ).

У цьому розділі розглянуто похибки, що належать до останньої групи. Побудовано відповідні графічні залежності. Приділено також увагу основним способам компенсації та мінімізації зазначених похибок.

Як зазначається у [11], похибки, викликані геометричними спотвореннями сканувального растра вздовж осі  $x$ , можуть бути визначені із формули:

$$\delta_{\Gamma x} = \Delta X / X, \quad (13)$$

де  $\Delta X$  – відхилення місцезнаходження крайніх точок сканувального растра від ідеального за рахунок геометричних спотворень по координаті  $x$ ;  $X$  – розмір сканувального растра по координаті  $x$ . Максимальна похибка за рахунок геометричних спотворень по координаті  $y$  визначається аналогічно. Сумарна похибка за рахунок геометричних спотворень сканувальних растрів становитиме:

$$\delta_{\Gamma} = \sqrt{\delta_{\Gamma x}^2 + \delta_{\Gamma y}^2}. \quad (14)$$

У центрі сканувального растра похибка  $\delta_{\Gamma}$  дорівнює нулю і буде збільшуватися при переміщенні з центра на край растра. Для визначення максимальної похибки  $\delta_{\Gamma}$  можна умовно сумістити растр із геометричними спотвореннями та ідеальний за допомогою регулювання розмірів растрів у крайніх діагональних точках або у крайніх точках растрів по координатах  $x$  та  $y$ . Похибка  $\delta_{\Gamma}$  при суміщенні цих растрів у крайніх діагональних точках буде максимальною на краях растрів по координатах  $x$  та  $y$ , а при суміщенні в крайніх точках растрів по координатах  $x$  та  $y$  максимальною похибка  $\delta_{\Gamma}$  буде в діагональних точках растрів. Якщо відома сумарна величина та тип геометричних спотворень  $\Gamma$ , то похибку  $\delta_{\Gamma}$  для будь-якої точки растра можна знайти з виразу:

$$\delta_{\Gamma} = \Gamma \cdot (\sqrt{X_{\Gamma}^2 + Y_{\Gamma}^2}) / (\sqrt{X^2 + Y^2}), \quad (15)$$

де  $X_{\Gamma}$ ,  $Y_{\Gamma}$  – координати точки растра, для якої визначається похибка  $\delta_{\Gamma}$ ;  $X$  та  $Y$  – розміри сканувального растра по координатах  $x$  та  $y$  відповідно. Сумарна похибка переміщення мікрооб'єкта визначається величиною геометричних спотворень при послідовному вимірюванні координат двох положень мікрооб'єкта, кожне з яких визначається окремим скануванням. Вираз для визначення похибки вимірювання переміщення мікрооб'єкта за рахунок геометричних спотворень сканувального растра матиме вигляд:

$$\delta_{L\Gamma} = \delta_{\Gamma 1} + \delta_{\Gamma 2}, \quad (16)$$

де  $\delta_{\Gamma 1}$  та  $\delta_{\Gamma 2}$  – незалежні похибки визначення координат першого та другого послідовних у часі положень мікрооб'єкта сканувальним растром із геометричними спотвореннями. Кожну зі складових

формули (16) визначають із виразу (15), підставляючи відповідні значення отриманих координат та відоме значення сумарних геометричних спотворень  $\Gamma$  сканувального растра, що є незмінним для кожного типу геометричних спотворень. З урахуванням цього запишемо вираз для визначення похибки вимірювання швидкості мікрооб'єкта через похибку вимірювання його переміщення  $\delta_{L\Gamma}$ :

$$\delta_v = \delta_{L\Gamma} = \Gamma \cdot \frac{\left( \sqrt{X_{T1}^2 + Y_{T1}^2} + \sqrt{X_{T2}^2 + Y_{T2}^2} \right)}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \quad (17)$$

де сумарний коефіцієнт геометричних спотворень  $\Gamma$  з урахуванням того, що кожна із складових переміщення вздовж осей  $x$  та  $y$  є незалежною, буде дорівнювати:

$$\Gamma = \Gamma_x + \Gamma_y. \quad (18)$$

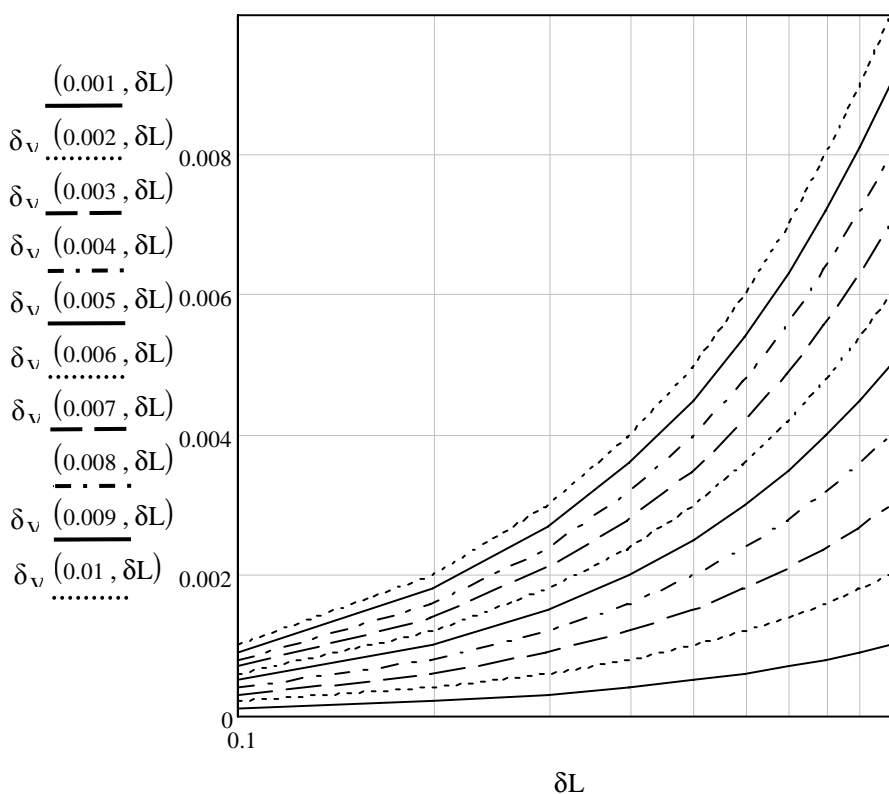


Рис. 8. Приклади графіків відносної похибки визначення швидкості мікрооб'єкта  $\delta_v$  внаслідок геометричних спотворень сканувального растра

На рис. 8 наведено приклад графіка, який було побудовано на підставі (17) з використанням таких параметрів:

1. Розмір сканувального растра по осі  $x$  –  $X = 1000$  (координатних положень сканувальної плями).
2. Розмір сканувального растра по осі  $y$  –  $Y = 1000$  (координатних положень сканувальної плями).
3. Сумарна величина геометричних спотворень сканувального растра –  $\Gamma = 0,001 \dots 0,01$  (0,1 % ... 1 %).
4. Величина відносного переміщення мікрооб'єкта –  $\delta L = 0,1 \dots 1$  (діагонального розміру сканувального растра).

Необхідно також зазначити, що величина та характер зміни геометричних спотворень  $\Gamma$  залежать від конкретного типу досліджуваних спотворень і визначаються через відповідні коефіцієнти геометричних спотворень (див. [12]).

Зменшити сумарну похибку за рахунок геометричних спотворень  $\delta_{\Gamma}$  можна, використовуючи відхилювальні системи з меншими геометричними спотвореннями, відхилювальні системи з ідентичними геометричними спотвореннями по двох координатах  $x$  та  $y$  або застосовуючи в генераторах розгортки по координатах  $x$  та  $y$  відповідних коректуючих сигналів.

**Висновки.** Проаналізовано особливості використання кадрового режиму вимірювання швидкості руху динамічного мікрооб'єкта у телевізійному сканувальному оптичному мікроскопі з погляду точності вимірювання та факторів, що на неї впливають. Запропоновано методики компенсації та врахування описаних похибок вимірювання. Описані моделі похибок вимірювання стосуються дискретного способу формування сканувального растра.

1. Дюков В.Г., Кудеяров Ю.А. *Растровая оптическая микроскопия*. – М.: Наука, 1992. – 208 с.
2. Hrytskiy Z.D., Pedan A.D., Shkliarskiy V.I. *Television-computer scanning optical microscope: foretime, nowadays and the near future // Proc. 7th Int. Conf. of Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting services. IEEE TELSIS'2005*. – Nis (Serbia and Montenegro). – September 28-30, 2005. – № 15. – P. 243–252.
3. Hrytskiy Z.D., Pedan A.D. *Concerning on Advantage of Television Scanning Optical Microscopy // Proc. Int. Conf. Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science. TCSET'2006*. – Lviv-Slavsko (Ukraine). – February 24 – March 4, 2006. – P. 522–523.
4. Hrytskiy Z.D., Pedan A.D., Shkliarskiy V.I. *Back to television scanning optical microscopy? // Biomedical Optics Topical Meeting and Tabletop Exhibit*. – Fort Lauderdale, Florida (USA). – 2006. – ISBN1-55752-807-1, Tul76, CD-ROM edition.
5. Шклярський В.І., Матієшин Ю.М. *Вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом у кадровому режимі роботи // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи та мережі*. – Львів, 2007. – № 603. – С. 128–136.
6. Shkliarskiy V.I., Matiieshyn Y.M. *Measurement of the microobject velocity in the microscope frame mode // Proc. Int. Conf. Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computers Science. TCSET'2008*. – Lviv-Slavsko (Ukraine). – February 19–23, 2008. – P. 239–241.
7. Грицьків З.Д., Матієшин Ю.М. *Визначення швидкості руху мікрооб'єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом в однорядковому режимі // Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – Харків: Технологічний центр. – 2006. – № 4/2 (22). – С. 27–32.
8. Шклярський В.І., Матієшин Ю.М. *Особливості роботи телевізійного сканувального оптичного мікроскопа в кадровому режимі вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Львів, 2008. – № 618. – С. 22–30.
9. Шклярський В.І., Матієшин Ю.М. *Визначення швидкості руху мікрооб'єкта телевізійним оптичним сканувальним мікроскопом у двотактному режимі вимірювання // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Львів, 2007. – № 595. – С. 32–42.
10. Кривошеев М.И. *Основы телевизионных измерений* – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Радио и связь, 1989. – 608 с.
11. Грицьків З.Д., Туркінов Г.О., Шклярський В.І. *Аналіз вимог до стереопари растрів скануючого телевізійного стереомікроскопа на основі ЕПТ // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Львів, 2002. – № 440. – С. 247–256.
12. Педан А.Д., Любинецька Б.І. *Муаровий метод контролю растрів скануючого оптичного мікроскопа на базі ЕПТ // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. – Львів, 2003. – № 477. – С. 92–97.