

УДК 621.385;621.397.13;681.4

**Зенон Грицьків, Анатолій Педан, Геннадій Туркінов, Володимир Шклярський**  
 Національний університет “Львівська політехніка”,  
 кафедра радіоелектронних пристроїв та систем

## **ПОХИБКИ СПРИЙНЯТТЯ КООРДИНАТ ОБ’ЄКТА У СТЕРЕОТЕЛЕВІЗІЙНОМУ СКАНУЮЧОМУ ОПТИЧНОМУ МІКРОСКОПІ**

© Грицьків Зенон, Педан Анатолій, Туркінов Геннадій, Шклярський Володимир, 2003

**Розглянуто похибки сприйняття стереоскопічного зображення об’єкта, досліджуваного за допомогою стереоскопічного скануючого оптичного мікроскопа, які виникають при зміщенні спостерігача відносно оптимального положення. Аналізується варіант мікроскопа, в якому зображення кадрів для лівого та правого ока формується на екрані монітора послідовно у часі і сприймається з використанням екліпсних окулярів. Одержані аналітичні вирази дозволяють кількісно оцінити ці похибки.**

**The perception errors of stereoscopic image of an object, examined with stereotelevision scanning optical microscope, that are determined by observer displacement from optimal position, are considered in the paper. A variant of microscope, in which image of frames for left and right eyes are formed in the monitor screen successively in time and are perceived with eclipse glasses, is analysed. Obtained analytical formulas make it possible to estimate these errors.**

Деякі особливості стереотелевізійного скануючого оптичного мікроскопа, пов’язані з тривимірним відображенням досліджуваного об’єкта, розглянуті в роботах [1, 2]. У такому мікроскопі використовуються дві електронно-променеві трубки високої роздільної здатності, на екранах яких формуються скануючі телевізійні растри, що суміщаються оптичною системою на досліджуваному об’єкті, утворюючи стереопару скануючих растрів. Відбите від досліджуваного об’єкта світло сприймається перетворювачами світло-сигнал, наприклад, фотоелектронними помножувачами, вихідні сигнали яких після підсилення та перетворення використовуються для формування стереозображення за допомогою стереоскопічного пристрою відображення (СПВ). СПВ можна реалізувати за допомогою монітора, на екрані якого покадрово послідовно в часі виводяться зображення досліджуваного об’єкта для лівого та правого ока. Для забезпечення об’ємного сприйняття об’єкта застосовуються екліпсні окуляри, які використовуються для подання “лівого” та “правого” оптичних сигналів у відповідне око спостерігача синхронно з відтворенням відповідного зображення на екрані СПВ.

Відомими є стереотелевізійні пристрої відображення, які з метою геометрично правильного відтворення стереоскопічного зображення досліджуваного об’єкта відслідковують положення спостерігача [3, 4]. У цих пристроях синхронно змінюються положення спостерігача і передавальних камер. Застосування такого принципу у стереотелевізійному оптичному скануючому мікроскопі є технічно складним, оскільки при цьому необхідно передбачити можливість повороту скануючих електронно-променевих трубок порівняно великих розмірів (довжина трубки 390 мм при діаметрі екрана 130 мм) і зміщення та повороту об’єктивів. При фіксованому положенні об’єктивів та скануючих електронно-променевих

трубок при зміщенні спостерігача відносно оптимального положення в скануючому стереотелевізійному мікроскопі будуть виникати похибки сприйняття координат досліджуваного об'єкта, дослідженню яких присвячена ця стаття.

Як відомо, умовою геометрично правильного відтворення стереоскопічного зображення досліджуваного об'єкта є забезпечення рівності кута "спостереження" (кут  $\beta$  на рис. 1) досліджуваного об'єкта з боку об'єктивів стереотелевізійного скануючого оптичного мікроскопа та кута спостереження (кут  $\beta'$  на рис. 2) на екрані СПВ спостерігачем [4]. З цього випливає, що геометрично правильне відтворення можливе лише для однієї позиції спостерігача, коли база спостереження знаходиться на осі, перпендикулярній до центру екрана СПВ, на віддалі, яка забезпечує однаковість кутів спостереження. При зміщенні від цього положення будуть виникати похибки сприйняття координат об'єкта.

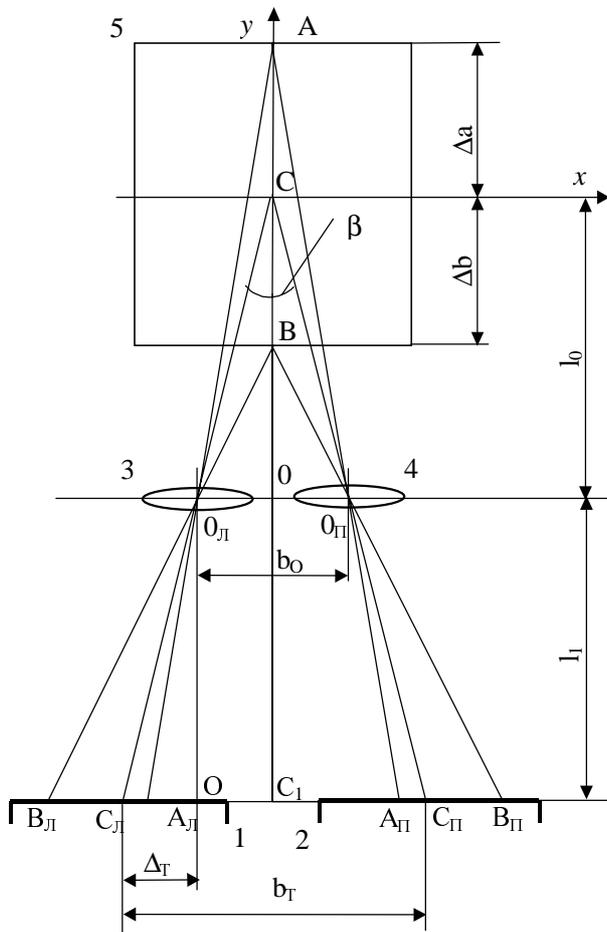


Рис. 1. Схема середовища досліджуваного об'єкта

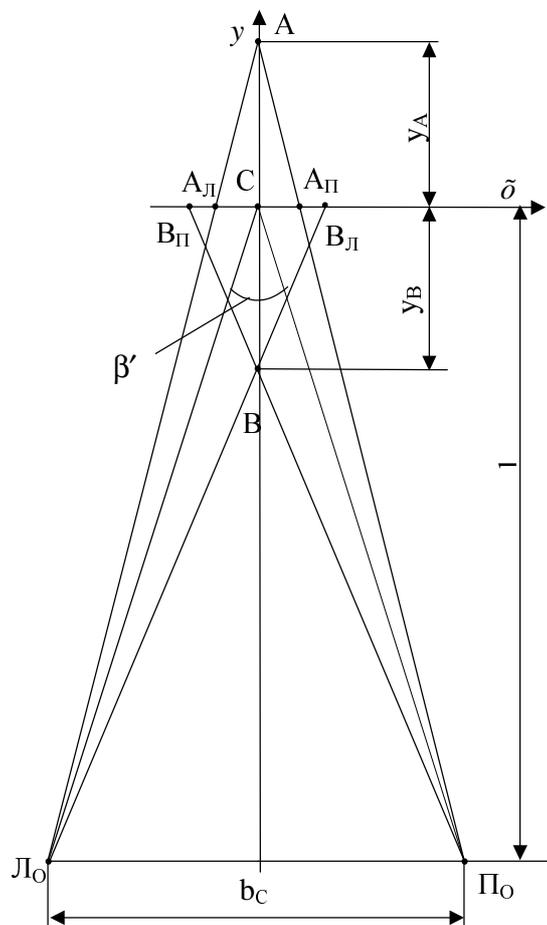


Рис. 2. Схема сприйняття окремих точок при оптимальному положенні спостерігача відносно екрана СПВ

Для визначення похибок сприйняття координат об'єкта розглянемо схему, яка відповідає середовищу досліджуваного об'єкта, наведену на рис. 1. Схема складається з двох скануючих трубок 1 та 2, двох об'єктивів 3 та 4 з центрами  $O_L$  та  $O_P$ , досліджуваного об'єкта 5. Як досліджуваний об'єкт вибрано куб, який на рис. 1 представлений квадратом, отриманим внаслідок перерізу куба уявною площиною, яка проходить горизонтально через центр куба. Площина суміщення стереопари растрів проходить через центр досліджуваного об'єкта  $C$  вертикально і збігається з віссю  $x$ . Екрани трубок розташовані в одній площині, а

їх центри  $C_L$  та  $C_P$  рознесені на величину стереобазу  $b_T$ . Об'єктиви 3, 4 мають паралельні оптичні осі, які розташовані перпендикулярно до площини трубок і зміщені відносно центрів екранів трубок на величину  $\Delta_T$ . Це забезпечує суміщення центрів стереопари скануючих растрів в точці С досліджуваного об'єкта в площині суміщення.

За рахунок зміщення  $\Delta_T$  об'єктиви виявляються рознесеними на величину стереобазу  $b_O$ . З подібності трикутників  $C_L C C_1$  та  $C_L O_L O$  знаходимо величину зміщення центрів об'єктивів  $\Delta_T$  відносно центрів скануючих растрів:

$$\Delta_T = (b_T - b_O)/2. \quad (1)$$

При цьому стереобаза об'єктивів становитиме:

$$b_O = b_T \cdot l_0 / (l_0 + l_1),$$

де  $l_1$  – віддаль від площини екранів скануючих трубок до площини об'єктивів,  $l_0$  – віддаль від площини об'єктивів до площини суміщення стереопари скануючих растрів на досліджуваному об'єкті.

При дослідженні об'ємних об'єктів точки на їх поверхні розташовані ближче (точка В) або далі (точка А) від площини суміщення (точка С). Точці А на об'єкті відповідають точки  $A_L$  та  $A_P$  на екранах скануючих трубок, а точці В – точки  $B_L$  та  $B_P$ . Лінійний паралакс точки А на екранах скануючих трубок

$$p_A = C_L A_L - C_P A_P, \quad (2)$$

а точки В

$$p_B = C_L B_L - C_P B_P. \quad (3)$$

Схема сприйняття окремих точок досліджуваного об'єкта з екрана СПВ наведена на рис. 2. На рисунку  $b_C$  – база очей спостерігача,  $l$  – віддаль від очей спостерігача до екрана СПВ. На екрані положення точки С (див. рис. 1) досліджуваного об'єкта відображається точкою С (див. рис. 2). Точка А відображається як точки  $A_L$  для лівого ока та точкою  $A_P$  для правого ока, тобто відображення цієї точки характеризується паралаксом  $p_A = A_L A_P$ . Подібним чином відображення точки В характеризується паралаксом  $p_B = B_L B_P$ .

Відповідно до рис. 1 кут спостереження об'єкта  $\angle C_L C C_P = \beta$ . При цьому

$$\operatorname{tg}(\beta/2) = b_O / 2l_O.$$

Відповідно до рис. 2 кут спостереження зображення об'єкта на екрані СПВ  $\angle L_O C_P O = \beta'$ . При цьому

$$\operatorname{tg}(\beta'/2) = b_C / 2l.$$

З умови геометрично правильного відображення об'єкта випливає:

$$\operatorname{tg} \beta/2 = \operatorname{tg} \beta'/2; \quad b_O / 2l_O = b_C / 2l;$$

$$l = b_C l_O / b_O. \quad (4)$$

Згідно з виразом (4) оптимальна віддаль  $l$  розташування очей від екрана СПВ з умови геометрично правильного відтворення стереоскопічного зображення досліджуваного об'єкта залежить від стереобазу об'єктивів  $b_O$ , від бази очей спостерігача  $b_C$  та віддалі об'єктивів від площини суміщення стереопари растрів на досліджуваному об'єкті  $l_O$ .

Ординату точки А (на рис. 2 –  $y_A$ ), яка сприймається в тривимірному просторі при відомому лінійному паралаксі  $p_A = A_L A_P$  на екрані СПВ та відомих значеннях  $l$  та  $b_C$ , визначимо з подібності трикутників  $A_L A A_P$  та  $L_O A P_O$ :

$$y_A = l \cdot p_A / (b_C - p_A). \quad (5)$$

Ординату точки В (на рис. 2 –  $y_B$ ), яка сприймається в тривимірному просторі при відомому лінійному паралаксі  $p_B = V_{ЛВ\Pi}$  на екрані СПВ та відомих значеннях  $l$  та  $b_C$ , визначимо з подібності трикутників  $V_{ЛВ\Pi}$  та  $L_0V\Pi_0$ :

$$y_B = l \cdot p_B / (b_C + p_B). \quad (6)$$

Схема сприйняття окремих точок досліджуваного об'єкта з екрана СПВ при зміщенні спостерігача від оптимального положення перпендикулярно до площини екрана СПВ вздовж осі  $y$  на величину  $\Delta l$  показана на рис. 3 (віддалення спостерігача від екрана).

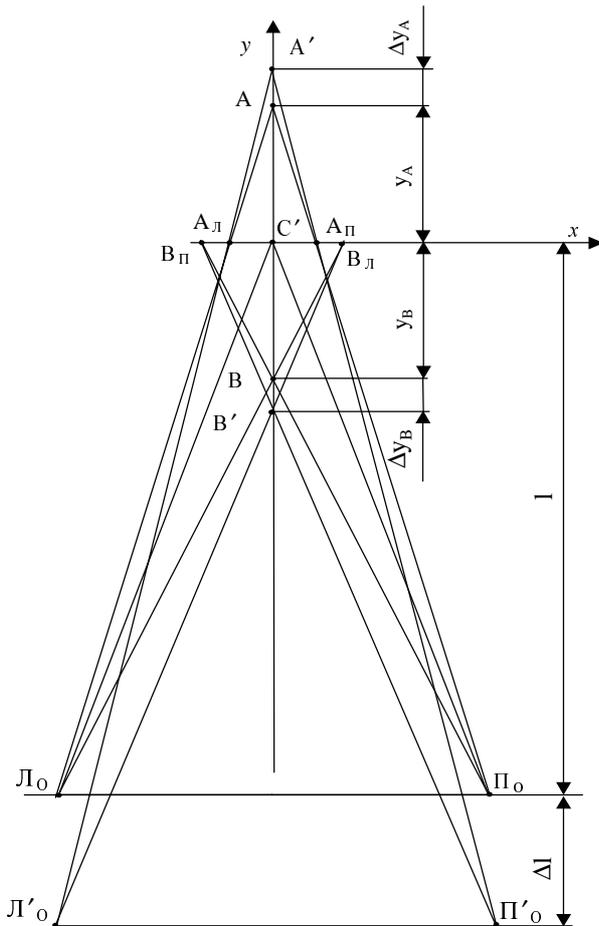


Рис. 3. Схема сприйняття окремих точок при зміщенні спостерігача вздовж осі  $y$

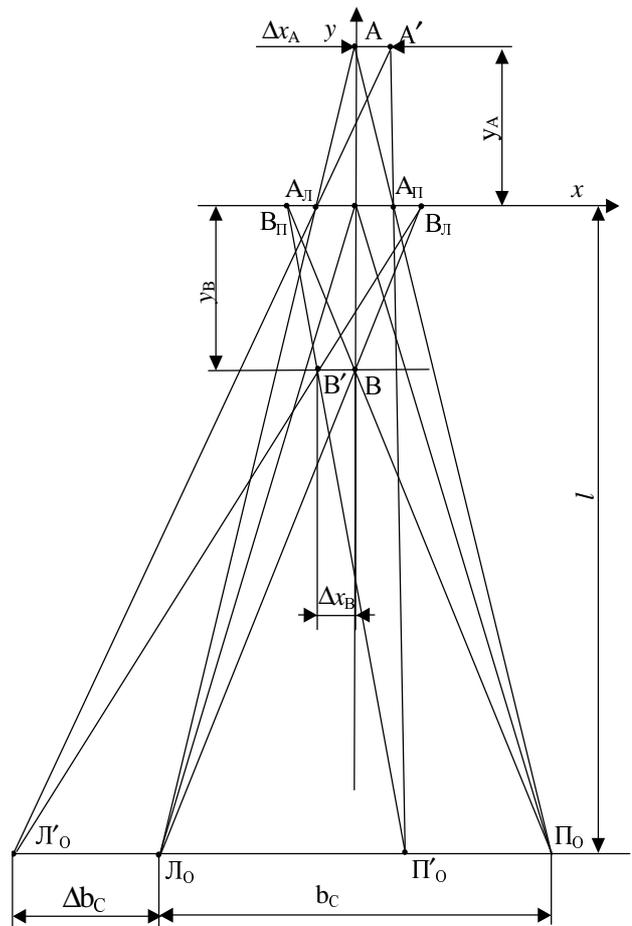


Рис. 4. Схема сприйняття окремих точок при зміщенні спостерігача паралельно осі  $x$

Як бачимо, при зміщенні спостерігача на віддаль  $\Delta l$  ордината точки А зміниться на віддаль  $\Delta y_A$ , а ордината точки В на віддаль  $\Delta y_B$ . З рис. 3 видно, що при зміщенні спостерігача назад від оптимального положення точки, які знаходяться за площиною суміщення стереопари растрів, будуть переміщатися від спостерігача вздовж осі  $y$ , а точки, які знаходяться перед площиною суміщення, будуть зміщатися до спостерігача, тобто об'єкт спостереження буде видовжуватися вздовж осі  $y$ . Очевидно, що при зміщенні спостерігача вперед від оптимального положення об'єкт спостереження буде стискатися вздовж осі  $y$ . З умови подібності трикутників  $L'_0A'\Pi'_0$  та  $A_{Л}A'A_{\Pi}$  впливає:

$$\frac{p_A}{b_C} = \frac{y_A + \Delta y_A}{(l + \Delta l) + (y_A + \Delta y_A)}.$$

З цього виразу знаходимо величину зміни ординати точки А:

$$\Delta y_A = \Delta l \cdot p_A / (b_C - p_A). \quad (7)$$

З урахуванням (5) та (6) знаходимо

$$\Delta y_A / y_A = \Delta l / l, \quad (8)$$

а це означає, що при зміщенні спостерігача вздовж осі  $y$  відносна зміна ординати точки, яка знаходиться позаду площини фокусування, є пропорційною відносному зміщенню спостерігача.

Величину зміни ординати точки В знаходимо з умови подібності трикутників  $L'O'B'P'O$  та  $B_{л}B'_{л}B_{п}$ :

$$\Delta y_B = \Delta l \cdot p_B / (b_C - p_B). \quad (9)$$

З урахуванням (6) та (9) знаходимо:

$$\Delta y_B / y_B = \Delta l / l. \quad (10)$$

З виразів (8) та (10) видно, що відносні зміни ординат точок А та В при зміщенні оператора вздовж осі  $y$  є однаковими.

Схема сприйняття точок досліджуваного об'єкта з екрана СПВ при зміщенні спостерігача відносно оптимального положення паралельно осі  $x$  показана на рис. 4.

При зміщенні спостерігача, наприклад, вліво на віддаль  $\Delta b_C$  точка А зміститься вправо і займе положення А', точка В зміститься вліво і займе положення В'. З рис. 4 видно, що точки об'єкта, які знаходяться позаду площини суміщення стереопари растрів, будуть зміщуватися в напрямку, протилежному до зміщення спостерігача, а точки об'єкта, які знаходяться перед площиною суміщення, будуть зміщуватися в напрямку зміщення спостерігача. При цьому абсциса точки А зміниться на величину  $\Delta x_A$ , а абсциса точки В на величину  $\Delta x_B$ . Величину зміни абсциси точки А знаходимо з умови подібності трикутників  $A'AA_{л}$  та  $L_OA_{л}L'O$ :

$$\Delta x_A = \Delta b_C \cdot p_A / (b_C - p_A).$$

Відносна зміна абсциси точки А при зміщенні спостерігача паралельно до екрана складатиме:

$$\Delta x_A / x = \Delta x_A / b_{СПВ} = \Delta b_C p_A / b_{СПВ} (b_C - p_A).$$

Величину зміни абсциси точки В знаходимо з умови подібності трикутників  $B'BB_{л}$  та  $L_OB_{л}L'O$ :

$$\Delta x_B / \Delta b_C = y_B / (l - y_B).$$

З урахуванням (6) отримаємо:

$$\Delta x_B = \Delta b_C \cdot p_B / b_C.$$

Схема сприйняття окремих точок досліджуваного об'єкта з екрана СПВ при зміщенні спостерігача вертикально паралельно осі  $z$  відносно оптимального положення є ідентичною схемі сприйняття при зміщенні спостерігача паралельно осі  $x$  (див. рис. 4). При зміщенні спостерігача, наприклад, вгору на віддаль  $\Delta b_z$  точка А зміститься вниз на віддаль  $\Delta z_A$ , а точка В зміститься вгору на віддаль  $\Delta z_B$ . При цьому апліката точки А зміниться на величину  $\Delta z_A$ , а апліката точки В на величину  $\Delta z_B$ . Значення зміни аплікат точок А і В знаходимо так:

$$\Delta z_A = \Delta b_Z \cdot p_A / (b_C - p_A); \quad \Delta z_B = \Delta b_Z \cdot p_B / b_C, \quad (11)$$

де  $b_Z$  – зміщення спостерігача паралельно осі  $z$ .

Якщо відомі конструктивні розміри скануючої частини стереотелевізійного оптичного мікроскопа (рис. 1) та розміри  $\Delta a$  та  $\Delta b$  досліджуваного об'єкта, то з урахуванням масштабу збільшення досліджуваного об'єкта  $K_M$  за рахунок різних розмірів растрів на екранах монітора  $b_{СПВ}$  та скануючих трубок  $b_{ЕПТ}$  можна визначити паралакс точок А та В на екрані СПВ:

$$p_{АСПВ} = \Delta a \cdot b_T \cdot l_1 \cdot K_M / (l_0 + l_1) \cdot (l_0 + \Delta a), \quad (12)$$

$$p_{ВСПВ} = \Delta b \cdot b_T \cdot l_1 \cdot K_M / (l_0 + l_1)(l_0 + \Delta b), \quad (13)$$

де

$$K_M = b_{СПВ} / b_{ЕПТ}. \quad (14)$$

Максимальне значення паралакса  $p_{МАКС}$  на екрані СПВ визначається шляхом вибору більшого із значень паралаксів, розрахованих відповідно до виразів (12) або (13). Мінімально допустиме значення паралакса  $p_{МИН}$  обмежується мінімальним розміром елемента відображення на екрані СПВ  $d_{СПВ}$ . Розрізнявальна здатність стереотелевізійного оптичного скануючого телевізійного мікроскопа за глибиною визначається кількістю розпізнаваних планів за глибиною  $N_{ПЛ} = p_{МАКС} / p_{МИН}$ . Очевидно, що похибка сприйняття координат об'єкта у мікроскопі буде виникати в тому випадку, коли за рахунок зміщення спостерігача від оптимального положення відтворювана точка зображення буде переходити з одного плану за глибиною на інший.

Розглянемо приклад реалізації стереотелевізійного скануючого мікроскопа для використання при хірургічних операціях на оці. Будемо орієнтуватися на використання скануючих ЕПТ високої роздільної здатності з діаметром екрана 130 мм [5]. Діаметр світної плями на екрані такої трубки не перевищує 0,02 мм. Максимальний розмір світного растра квадратної форми становитиме 80×80 мм. З урахуванням діаметра світної плями і максимального розміру растра роздільна здатність трубки є не меншою за 4000 елементів. Середньостатистичне око має форму кулі діаметром 25 – 30 мм [6]. Для того, щоб око було повністю відображене на екрані СПВ, розмір растрів стереопари на досліджуваному об'єкті вибираємо таким, що дорівнює 30 x 30 мм. Віддаль від площини об'єктивів до площини суміщення стереопари растрів на досліджуваному об'єкті  $l_0$  визначається необхідним розміром простору для маніпуляцій хірургічним інструментом, який дорівнюватиме 300 мм. При таких вибраних конструктивних параметрах стереотелевізійного скануючого оптичного мікроскопа він має збільшення 10. З урахуванням запасу за роздільною здатністю при збереженні чіткості, яка відповідає телевізійному стандарту (близько 500 активних ліній на висоту растра), розмір скануючого растра можна зменшити практично у 8 разів. Це приведе до збільшення фрагмента досліджуваного об'єкта на екрані СПВ у 8 разів, тобто загальний коефіцієнт збільшення мікроскопа досягне 80.

Для оптичної частини мікроскопа використаємо об'єктиви типу “Индустар-51” з зовнішнім діаметром 60 мм та фокусною віддаллю 210 мм. Зовнішній діаметр об'єктивів задає мінімально допустимий розмір стереобазис об'єктивів  $b_0 = 60$  мм. При цьому віддаль від площини екранів скануючих трубок до площини об'єктивів  $l_1$  складатиме 800 мм. Величину зміщення центрів об'єктивів  $\Delta_T$  відносно центрів скануючих растрів визначаємо згідно з (1) –  $\Delta_T = 40$  мм.

Оптимальна віддаль  $l$  розташування очей спостерігача від екрану СПВ для забезпечення умови геометрично правильного відтворення стереоскопічного зображення досліджува-

ного об'єкта згідно з (4) становить 320 мм. При необхідності збільшити цю віддаль можна двома шляхами: 1) зменшенням стереобазиса використовуваних об'єктивів  $b_0$ , яка, однак, обмежена їх конструктивними параметрами; 2) збільшенням віддалі від площини об'єктивів до площини суміщення стереопари растрів на досліджуваному об'єкті  $l_0$ . З точки зору роботи хірурга другий варіант є більш доцільним, оскільки дозволяє збільшити оперативний простір для маніпуляцій з хірургічним інструментом.

Максимальне значення паралакса  $p_{\text{МАКС}}$  точок А та В досліджуваного об'єкта на екрані СПВ (рис. 2), яке відповідає габаритним розмірам досліджуваного об'єкта ( $\Delta a = \Delta b = 15$  мм на рис. 1), становить відповідно до (12) 6,9 мм. При мінімальному розмірі елемента зображення на екрані СПВ  $d_{\text{СПВ}} = 0,3$  мм кількість розрізняваних планів за глибиною досліджуваного об'єкта складатиме 23. Це означає, що відносна похибка сприйняття координат об'єкта при зміщенні спостерігача від оптимального положення для сприйняття зображення неспотвореним не перевищує  $1/23 = 0,043$  (тобто, 4,3 %).

Графіки залежності відносної похибки ординати точок при різних  $l$  та при зміщенні спостерігача перпендикулярно до площини екрана СПВ показані на рис. 5 (прямі 1). Графіки залежності відносної похибки абсциси точок при різних  $l$  та зміщенні спостерігача паралельно до площини екрана показані на рис. 5 прямими 2. З графіків, наведених на рис. 5, видно, що відносна похибка ординати порівняно з відносною похибкою абсциси при тих самих зміщеннях є значно більшою. Відносну похибку аплікати точки досліджуваного об'єкта можна знайти аналогічно, користуючись прямими 2 на рис. 5.

Розглянемо приклад сприйняття координат досліджуваного об'єкта на прикладі фігури, отриманої внаслідок перерізу куба уявною площиною, представленою на рис. 1 квадратом. При оптимальному положенні спостерігача уявний квадрат сприймається уявною фігурою у вигляді правильної рівнобедреної трапеції KLMN (див. рис. 6). При зміщенні спостерігача назад і вліво відносно оптимального положення фігура KLMN трансформується в уявну фігуру K'L'M'N', яка є видовженою трапецією в бік зміщення спостерігача.

Виконаний аналіз дозволяє кількісно оцінити похибки сприйняття координат досліджуваного об'єкта, які виникають у стереотелевізійному скануючому оптичному мікроскопі при зміщенні спостерігача від оптимального положення. Проблема визначення допустимих похибок сприйняття коор-

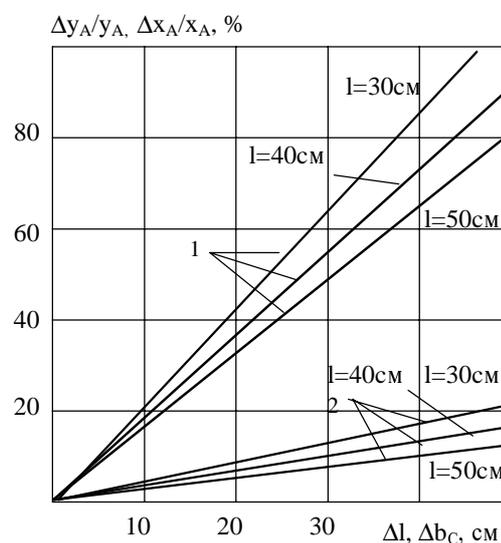


Рис. 5. Залежність відносної похибки абсциси та ординати точки при зміщенні спостерігача відносно оптимального положення

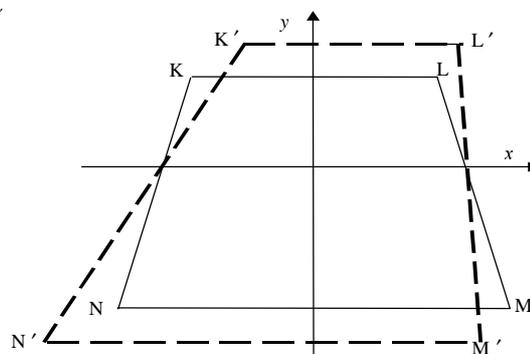


Рис. 6. Сприйняття зображення при зміщенні спостерігача назад і вліво відносно екрана СПВ

динат досліджуваного об'єкта при використанні стереотелевізійного скануючого оптичного мікроскопа потребує окремого опрацювання.

1. Грицьків З.Д., Туркінов Г.О., Шклярський В.І. Вибір основних параметрів скануючого телевізійного стереомікроскопа // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 2002. – № 443. – С. 150 – 159. 2. Грицьків З.Д., Туркінов Г.О., Шклярський В.І. Аналіз вимог до стереопари растрів скануючого телевізійного стереомікроскопа на основі ЕПТ // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 2002. – № 440. – С. 247– 256. 3. Лопухина Н.И., Овчинников Н.В. Особенности работы стереотелевизионной установки на близких расстояниях от камеры до наблюдаемого объекта // Вопросы радиоэлектроники: Сер. "Техника телевидения". – 1973. – Вып. 5. – С. 53 – 59. 4. Мамчев Г.В. Стереотелевизионные устройства отображения информации. – М.: Радио и связь, 1983. – 96 с. 5. Кацнельсон Б.В. Калугин А.М., Ларионов А.С. Электровакуумные, электронные и ионные приборы: Справочник / Под общ. ред. А.С. Ларионова. – М.: Энергия, 1976. – 920 с. 6. Петров В.В. Качество кинопроекции. – М.: Искусство, 1982. – 222 с.

УДК 62-501.14

**Борис Капустій, Олег Надобко**

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

## **АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА НЕСУЧІЙ ЧАСТОТІ**

© Капустій Борис, Надобко Олег, 2003

**Розроблена структурна схема алгоритму та описана робота програми для знаходження верхньої межі першої зони стійкого підсилення систем з амплітудною модуляцією.**

**This article presents the developed structural scheme of the algorithm for finding the upper limit of the first zone of sustainable amplification for AM-systems. The work of the designed software is also described.**

### **Постановка задачі**

Широке використання систем з амплітудною модуляцією, підвищення вимог до їх точності та надійності функціонування потребують подальшого вдосконалення методів проектування пристроїв такого класу, які в більшості випадків зводяться до макетного моделювання конкретних схем. Це не дозволяє встановити загальні закономірності проектування таких систем, знижує якість аналізу їх точності і стабільності та ефективність розробок загалом. Така ситуація пояснюється достатньою складністю математичних моделей досліджуваного класу систем, відсутністю ефективних методик їх аналізу, а також алгоритмічного та програмного забезпечення.

Питанню аналізу систем з амплітудною модуляцією присвячені роботи авторів [3 – 6], у яких висвітлені необхідні аспекти аналізу систем такого класу, зокрема розроблена числова методика їх дослідження. Метою даної роботи є розробка загального алгоритму програми дослідження стійкості систем, які працюють на несучій частоті, а також практична апробація їх ефективності на прикладі вимірювальних перетворювачів.