

УДК.621.37/39.001; 621.397

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

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЯСКРАВОСТІ ЕПТ СКАНУЮЧОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА З УРАХУВАННЯМ ШУМІВ**

© Грицьків Зенон, Шклярський Володимир, 2001

**Пропонується метод визначення необхідної яскравості свічення електронно-променевої трубки скануючого оптичного мікроскопа для забезпечення заданої якості відображення досліджуваного мікрооб'єкта з урахуванням впливу шумів формувача повного відеосигналу, фотоелектронного помножувача і власних шумів електроннопроменевої трубки.**

**A method of necessary brightness of scanning optical microscope cathode ray tube determination is proposed, that ensures ordered quality of investigated microobject with influence consideration of noise, created by video signal formation unit, photoelectric multiplier, and noise of cathode ray tube.**

Скануючий оптичний мікроскоп (СОМ) на основі електроннопроменевої трубки (ЕПТ) високої роздільної здатності призначений для дослідження мікрооб'єктів. СОМ забезпечує відтворення зображення мікрооб'єкта на екрані відеоконтрольного пристрою (ВКП). Принцип роботи СОМ полягає в скануванні досліджуваного мікрооб'єкта світловим зондом, перетворенні інтенсивності світла від досліджуваного об'єкта в електричний сигнал, обробці цього сигналу та відображенні мікрооб'єкта на екрані ВКП (див., наприклад, [1]). Світловий зонд формується оптичним каналом, як джерело світла використовується скануюча ЕПТ високої роздільної здатності, на екрані якої за допомогою електронної розгортки формується світний растр, синхронізований з растром ВКП. Світний растр на екрані скануючої ЕПТ забезпечує поелементне сканування досліджуваного мікрооб'єкта світловим зондом постійної інтенсивності. Залежно від оптичних характеристик елементів об'єкта інтенсивність світла виявляється промодульованою за амплітудою. Розсіяне світло збирається і спрямовується на фотоелектронний помножувач (ФЕП), на виході якого формується електричний сигнал, пропорційний інтенсивності розсіяного світла, який надалі перетворюється в повний телевізійний сигнал. Повний телевізійний сигнал використовується для відтворення зображення мікрооб'єкта на екрані ВКП або для введення інформації в персональний комп'ютер. Скануючі оптичні мікроскопи застосовують у різних галузях – медицині, біології, хімії, криміналістиці тощо.

Якість відтворюваного на екрані ВКП зображення значною мірою залежить від помітності шумів, основними джерелами яких у СОМ є формувач повного відеосигналу, фото-електронний помножувач та скануюча електронно-променева трубка.

У свою чергу, помітність шумів визначається відношенням сигнал-шум на виході формувача відеосигналу. Як відомо, у телевізійних системах відношення сигнал-шум є тим більшим, чим вищою є освітленість об'єкта за умови, що джерело світла можна вважати таким, що не шумить. Відомим є метод визначення необхідної освітленості об'єкта у цьому випадку [2]. Однак використовуване у СОМ джерело світла – це, як вище згадувалось, ЕПТ. Для всіх ЕПТ характерним є значний рівень шуму і, отже, до вибору ЕПТ для СОМ треба підходити з урахуванням шумів ЕПТ.

У цій роботі пропонується метод, який дозволяє за заданим значенням відношення сигнал-шум на виході формувача сигналу визначити необхідну яскравість свічення екрана скануючої ЕПТ з урахуванням шумів як самої ЕПТ, так і фотоелектронного помножувача з опором навантаження та власних шумів формувача сигналу.

Структурна схема СОМ з погляду формування повного відеосигналу показана на рис. 1. До її складу входять скануюча ЕПТ, перший оптичний канал ОК1, який проектує світний растр на досліджуваний об'єкт ДО, другий оптичний канал ОК2, який збирає розсіяне світло від досліджуваного об'єкта при роботі СОМ на відбиття, або збирає світло, яке пройшло через досліджуваний об'єкт при роботі СОМ на просвічення, фотоелектронний помножувач ФЕП, який перетворює світловий сигнал в електричний, та формувач повного відеосигналу ФС, який підсилює сигнал ФЕП до нормованого значення та заміщує в нього імпульси синхронізації та гасіння.

Для аналізу представимо ФС лінійним активним чотириполосником, який можна охарактеризувати диференціальним коефіцієнтом шуму  $Ш_{\Phi C}(F)$  [2], що показує, у скільки разів зменшується відношення потужності сигналу  $P_C$  до шуму  $P_{\text{ш}}$  в безмежно малій смузі частот  $dF$  при їх проходженні через чотириполосник. Відповідно з [3]

$$Ш_{\Phi C}(F) = 1 + \frac{S_{Ш\Phi C}(F)}{S_{Ш\Phi EP}(F)}, \quad (1)$$

де  $Ш_{\Phi C}$  – коефіцієнт шуму формувача повного відеосигналу;  $S_{Ш\Phi C}$  – спектральна густина потужності сигналу ФС з безперервним спектром;  $S_{Ш\Phi EP}$  – спектральна густина потужності сигналу ФЕП з безперервним спектром.

Зазначимо, що у випадку, коли формувач сигналу складається з  $N$  лінійних каскадів, то

$$Ш_{\Phi C}(F) = Ш_{1\Phi C}(F) + \frac{Ш_{2\Phi C}(F) - 1}{G_{1\Phi C}(F)} + \dots + \frac{Ш_{N\Phi C}(F) - 1}{G_{1\Phi C}(F)G_{2\Phi C}(F)\dots G_{N-1\Phi C}(F)}, \quad (2)$$

де  $Ш_{N\Phi C}(F)$  – коефіцієнт шуму  $N$ -го каскаду,  $G_{N-1\Phi C}(F)$  – коефіцієнт підсилення  $N$ -го каскаду.

У припущенні, що власний шум формувача сигналу є білим шумом, його диференціальний та інтегральний (середній) коефіцієнти шуму числово рівні [3], за відомим значенням коефіцієнта шуму  $Ш_{\Phi C}$  можна визначити необхідне відношення сигнал-шум на вході формувача сигналу, яке необхідно забезпечити для заданої якості відтворення зображення досліджуваного об'єкта

$$\Psi_{\text{ВХ}\Phi C} = \Psi_{Ш\Phi C}, \quad (3)$$

де  $\Psi$  – задане наперед відношення сигнал-шум на виході формувача сигналу. За даними [2] якість зображення з погляду впливу шумів вважається задовільною при  $\Psi = 10$ , доброю при  $\Psi = 30$  і відмінною при  $\Psi = 50$ .

З'ясуємо, якою б мала бути мінімально необхідна яскравість ЕПТ для отримання потрібного значення  $\Psi_{\text{ВХ}\Phi C}$ , якщо ЕПТ, ФЕП та опір навантаження ФЕП  $R_H$  не шумлять. Якщо на фотокатод ФЕП за допомогою конденсорної лінзи в оптичному каналі ОК2 потрапляє світловий потік  $\Phi_{\text{ДО}}$  від елемента досліджуваного об'єкта, то струм, який буде протікати на виході ФЕП, становитиме

$$I_{\text{ФЕП}} = \varepsilon \Phi_{\text{ДО}} P_{\text{ОК2}} \Omega_{\text{ОК2}} = \frac{\varepsilon \Phi_{\text{ДО}} P_{\text{ОК2}} S_{\text{ОК2}}}{I_{\text{ОК2}}^2}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – чутливість фотокатоду;  $P_{\text{ОК2}}$  – коефіцієнт пропускання конденсорної лінзи в оптичному каналі ОК2;  $\Omega_{\text{ОК2}}$  тілесний кут, в межах якого світловий потік від об'єкта потрапляє на

конденсорну лінзу;  $S_{OK2}$  – площа входної зіниці конденсорної лінзи;  $L_{OK2}$  – віддаль від досліджуваного об'єкта до конденсорної лінзи.

Враховуючи (4) і скориставшись [2], відношення сигнал-шум на виході ФЕП з урахуванням лише власних шумів формувача сигналу можна визначити як

$$\Psi_{ВХ\Phi C} = \frac{\varepsilon \Phi_{ДО} P_{OK2} S_{OK2} \sqrt{R_H}}{L_{OK2}^2 \sqrt{4kT\Delta F}}. \quad (5)$$

З виразу (5) можна знайти світловий потік від досліджуваного об'єкта  $\Phi_{ДО}$ , який необхідний для того, щоб виконувалось задане відношення сигнал/шум на виході ФЕП, яке надалі забезпечує задану якість зображення на екрані ВКП

$$\Phi_{ДО} = \frac{\Psi_{ВХ\Phi C} L_{OK2}^2 \sqrt{4kT\Delta F}}{\varepsilon P_{OK2} S_{OK2} \sqrt{R_H}}. \quad (6)$$

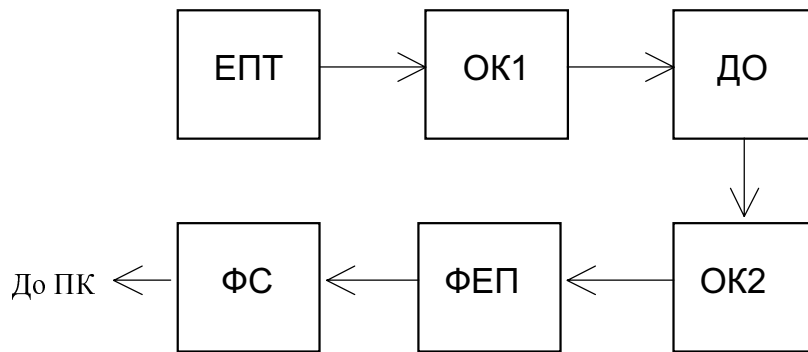


Рис. 1. Структурна схема формувача відеосигналу СОМ

З іншого боку, світловий потік від досліджуваного об'єкта  $\Phi_{ДО}$ , залежить від яскравості свічення елемента світного растру ЕПТ  $B_{ЕПТ}$ , площі цього елемента  $S_{ЕПТ}$ , коефіцієнта оптичного пропускання мікроскопного об'єктива  $P_{OK1}$ , розташованого в першому оптичному каналі ОК1, тілесного кута  $\Omega_{OK1}$ , в якому світло від скануючої ЕПТ потрапляє через мікроскопний об'єктив на досліджуваний об'єкт

$$\Phi_{ДО} = B_{ЕПТ} S_{ЕПТ} P_{OK1} \Omega_{OK1} = \frac{B_{ЕПТ} S_{ЕПТ} P_{OK1} S_{OK1}}{L_{OK1}^2}, \quad (7)$$

де  $S_{OK1}$  – площа входної зіниці мікроскопного об'єктива;  $L_{OK1}$  – віддаль від площини екрана ЕПТ до мікроскопного об'єктива.

Прирівнюючи праві частини виразів (6) і (7), можна знайти мінімальне значення яскравості свічення елемента скануючої ЕПТ  $B_{ЕПТ}$ , необхідне для забезпечення заданого відношення сигнал/шум на вході формувача сигналу

$$B_{ЕПТ} = \frac{\Psi_{ВХ\Phi C} L_{OK1}^2 L_{OK2}^2 \sqrt{4kT\Delta F}}{\varepsilon P_{OK1} P_{OK2} S_{OK1} S_{OK2} S_{ЕПТ} \sqrt{R_H}}. \quad (8)$$

Очевидно, що визначене у такий спосіб значення яскравості свічення елемента світного растру не дає остаточного розв'язку поставленої задачі, оскільки ще не враховані шуми ЕПТ, ФЕП та резистора навантаження ФЕП. Врахувати вплив ЕПТ на якість формованого зображення досліджуваного об'єкта можна, скориставшись [5]

$$\bar{U}^2_{ШЕПТ} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_m}{2\pi\nu\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-r^2 w^2}{\nu}\right) dw. \quad (9)$$

де  $\bar{U}^2_{ШЕПТ}$  – середньоквадратичне значення шуму на виході ФЕП, спричинене шумом ЕПТ за умови, що шуми ФЕП відсутні;  $B_0$  – постійний коефіцієнт, який визначається відповідно до такого виразу:  $B_0 = J_0^2 A R^2 \delta^2 P_{OK1}^2$ , де  $J_0$  – середня густина емісійного струму катода,  $A$  – коефіцієнт, який враховує зміну віддачі люмінофору по полю екрана ЕПТ (при малих кутах відхилення, близький до 1),  $\delta^3$  – коефіцієнт підсилення ФЕП;  $\delta$  – коефіцієнт вторинної емісії ФЕП,  $p$  – кількість динодів ФЕП,  $r$  – радіус кросовера ЕПТ,  $w$  – просторова частота;  $\nu$  – швидкість сканування екрана променем ЕПТ.

Вплив ФЕП на якість формованого зображення досліджуваного об'єкта можна визначити, скориставшись виразом для середньоквадратичного значення шумового струму на виході ФЕП [2]

$$\bar{I}^2_{ШФПТ} = 2eI_0\Delta F \frac{\delta^{2p+1}}{\delta-1} - 2e \frac{I_{ФЕП}}{\delta^2} \Delta F \frac{\delta^{2p+1}}{\delta-1}, \quad (10)$$

де  $e$  – заряд електрона,  $I_0$  – струм першого диноду ФЕП;  $I_{ФЕП}$  – струм на виході ФЕП за умови, що шуми останнього відсутні,  $\Delta F$  – смуга частот.

Вплив опору резистора навантаження  $R_H$  на якість формованого зображення врахуємо за допомогою відомого виразу [5]

$$\bar{U}^2_{ШR_H} = 4kTR_H\Delta F, \quad (11)$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура.

Враховуючи (9), (10) і (11), середньоквадратичне значення шуму струму на виході ФЕП визначимо як

$$\boxed{\hspace{15em}} \quad (12)$$

а відношення сигнал-шум на виході ФЕП

$$\boxed{\hspace{15em}} \quad (13)$$

Для забезпечення заданої якості відтворення зображення досліджуваного об'єкта повинна виконуватись умова:  $\Psi_{ФЕП} > \Psi_{ВХФС}$ .

Кількісна оцінка доданків під коренем у знаменнику (13) показує, що найбільший вплив на значення відношення сигнал-шум  $\Psi_{ФЕП}$  має середньоквадратичне значення шуму струму ФЕП, яке передусім залежить від коефіцієнта вторинної емісії ФЕП  $\delta$ . Графік залежності  $\Psi_{ФЕП} = f(\delta)$  при опорі навантаження  $R_H = 100$  кОм і смузі пропускання  $\Delta F = 6,5$  МГц зображений на рис. 2. При коефіцієнті шуму формувача сигналу  $\Psi_{ФС} = 1,2$  і  $\Psi = 30$  (добра якість зображення)  $\Psi_{ВХФС} = 36$ . Для забезпечення  $\Psi_{ФЕП} > \Psi_{ВХФС}$  відповідно до рис. 2 значення коефіцієнта вторинної емісії ФЕП  $\delta$  не повинно перевищувати 1,8.

На практиці для забезпечення доброї якості відображення досліджуваного об'єкта на екрані ВКП скануючого оптичного мікроскопа необхідно визначити мінімальну яскравість скануючої ЕПТ, яка забезпечує достатню освітленість досліджуваного об'єкта ДО. Для цього відповідно до (2) визначається коефіцієнт шуму формувача повного відеосигналу  $\Psi_{ФС}(F)$ , у відповідно до (3) – необхідне відношення сигнал/шум  $\Psi_{ВХФС}$ , відповідно до (13) – відношення сигнал/шум на виході ФЕП з врахуванням шумів ЕПТ, ФЕП та резистора навантаження  $R_H$ . При виконанні умови  $\Psi_{ФЕП} > \Psi_{ВХФС}$  мінімально необхідна яскравість свічення ЕПТ визначиться відповідно до виразу (8).

Якщо, наприклад, орієнтуватись на використання фотоелектронного помножувача ФЭУ-60, у якого катодна чутливість  $\epsilon = 30$  А/лм, то відповідно до (8) мінімально необхідна яскравість свічення скануючої ЕПТ при  $\Psi=30$ ;  $\Pi_{\text{ФС}}=1,2$ ;  $L_{\text{OK1}}=0,5$  м;  $L_{\text{OK2}}=0,01$  м;  $P_{\text{OK1}}=0,8$ ;  $P_{\text{OK2}}=0,8$ ;  $S_{\text{OK1}}=2 \times 10^{-5} \text{ м}^2$  (діаметр вхідної зіниці мікроскопного об'єктива 5 мм);  $S_{\text{OK2}}=8 \times 10^{-5} \text{ м}^2$  (діаметр вхідної зіниці конденсора 10 мм);  $S_{\text{ЕПТ}} = 4 \times 10^{-10} \text{ м}^2$  (площа одного елемента світного растра при розмірі світного растра на екрані скануючої ЕПТ  $40 \times 40 \text{ мм}^2$  і роздільній здатності  $2000 \times 2000$  елементів);  $\Delta F=6,5$  МГц;  $k=1,37 \cdot 10^{-23}$  Дж/град;  $T=290$  К;  $R_{\text{НФЕП}}=100$  кОм складатиме  $78000$  кд/м<sup>2</sup>. Спеціальні скануючі ЕПТ, як правило, забезпечують таку яскравість. При необхідності забезпечення вищої якості відтворення зображення досліджуваного мікрооб'єкта можна вибрати ФЕП з більшою катодною чутливістю, збільшувати опір резистора навантаження ФЕП у межах, дозволених з погляду смуги пропускання ФС, та зменшувати швидкість розгортки променя скануючої ЕПТ.

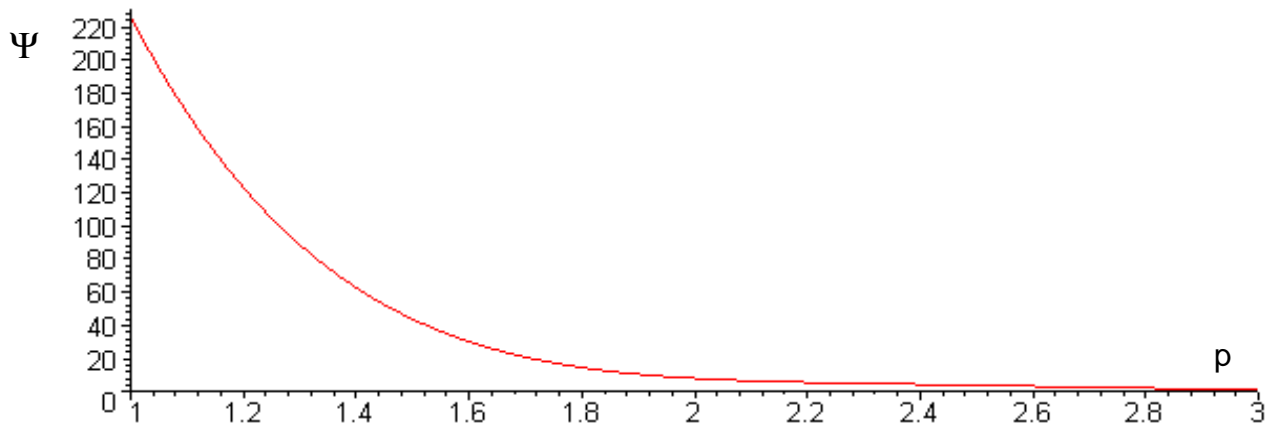


Рис. 2. Залежність відношення сигнал/шум на виході ФЕП від коефіцієнта вторинної емісії

Запропонований метод визначення мінімально необхідної яскравості скануючої ЕПТ дає змогу використовувати скануючу ЕПТ того чи іншого типу при проектуванні СОМ, визначитися з типом ФЕП для перетворення світлового сигналу в електричний з урахуванням шумів ЕПТ, власних шумів та чутливості фотокатода ФЕП, а також визначити вимоги до шумових властивостей формувача повного відеосигналу з погляду забезпечення заданої якості відображення досліджуваного мікрооб'єкта на екрані ВКП щодо впливу шумової завади.

1. Гой В.М., Грицьків З.Д., Педан А.Д., Туркінов Г.О., Шклярський В.І. Скануючий оптичний мікроскоп на основі електронно-променевої трубки високої роздільної здатності. // *Мат. Міжнар. НТК "Сучасні проблеми засобів телекомунікації, комп'ютерної інженерії та підготовки спеціалістів"*, 1998 р., м. Львів. – С. 184–185. 2. Орловський Е.Л., Халфин А.М., Хазов Л.Д., Заварин Г.Д., Круссер Б.В., Шелованов Л.Н. – *Теоретические основы электрической передачи изображений. Телевидение и фото-телеграфия*. // Под общ. ред. А.В.Таранцова. – М.: Советское радио, 1962. – 728 с. 3. Крейнгель Н.С. *Шумовые параметры радиоприемных устройств*. – Л.: Энергия, 1969. – 168 с. 4. Васьков С.Т., Мамонтов Г.М., Поташиников А.К., Ткач С.Е. *Сканирующие устройства на ЭЛТ высокого разрешения*. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1978. – 136 с. 5. Ван дер Зил А. *Шум. Источники, описание, измерение*. // Пер. с англ. под ред. А.К.Нарышкина. – М.: Советское радио, 1973. – 228 с.