

Таблиця 1 – Статична характеристика вольтметра постійної напруги.

$U_{вх}$	0,000	0,200	0,400	0,600	0,800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800
$U_{вих}$	0,000	0,191	0,392	0,590	0,793	1,001	1,203	1,410	1,621	1,816

Аналізуючи статичну характеристику, можна зробити висновок, що вона є більш лінійною на середній діапазоні вимірювання, покази при напругах менше 1 В є заниженими, а при напругах більше 1 В є завищеними. В цілому похибка від нелінійності не перевищує 2 %. Вхідний опір вольтметра, визначений за методикою згідно (3), є не меншим 1,2 ГОм, що з достатнім запасом перевищує мінімально допустимий. Таким чином, сконструйований прилад можна вважати придатним для вимірювання напру-

ги протікання при дослідженні електрокінетичних явищ в пористих тілах.

1. Кісіль І. С., Храпач І. М. Електрокінетичні явища в процесі видобутку нафти і газу // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 6. - С. 43.
2. Фролов Ю. Г. Курс коллоїдної хімії. – М.: Хімія, 1982. - С. 219-231.

УДК 621.397.13

ЙМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ

© Порєв В. А., Порєв Г. В., 2002
НТУУ “Київський політехнічний інститут”

© Кісіль Р. І., 2002

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Обґрунтована методика застосування телевізійних засобів контролю, яка забезпечує можливість збільшення точності визначення геометричних характеристик телевізійних зображень. Методика базується на ймовірнісному підході, враховує вимоги загальної концепції використання телевізійних засобів для аналізу оптичних полів, а програмне забезпечення доповнюється функцією деталізації.

Визначимо телевізійний засіб контролю (ТЗК) як сукупність оптичних, електронних та обчислювальних пристроїв, що виконують функції формування та аналізу зображення, утвореного оптичним випромінюванням. У відповідності із класифікацією Ф. Темнікова [1] ТЗК можуть бути віднесені до розгортаючих систем, в яких розгортання фізичної величини характеризується інтегруванням освітленості.

В загальному плані зображення визначається як розподіл параметрів електромагнітного поля в просторі, в часі та по спектру [2]. Розглядаючи поняття зображення як узагальнене поняття сигналу, дійдемо висновку, що зображення може існувати або у вигляді розподілу електромагнітного поля, або у вигляді певної, обумовленої цим розподілом, сукупності сигналів.

Враховуючи, що характеристики спектральної чутливості сучасних ТЗК перекривають ультрафіолетовий, видимий та ближній інфрачервоний діапазони, а електромагнітне випромінювання цих діапа-

зонів відносять до оптичного, можна визначити телевізійне зображення, як розподіл параметрів оптичного поля (випромінювання) в просторі, часі та по спектру.

Фізично робота ТЗК базується на послідовності перетворень потоку випромінювання, яке попадає у вхідну апертуру. Оптична система формує зображення об'єкту в чутливій площині світлоелектричного перетворювача (СЕР), де за допомогою розгортання (електронним променем в променевої телевізійній трубці (ПТТ) або комбінацією електронних імпульсів в приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ)) утворюється первинний відеосигнал. Повний відеосигнал, сформований в наступному блоці формування відеосигналу, подається на вхід електросвітлового перетворювача та до пристрою введення зображення в комп'ютер (рис. 1).

Кінцевою ланкою цієї послідовності перетворень є яскравість екрану відеоконтрольного пристрою або цифровий сигнал, пропорційний значенню вхідного сигналу.

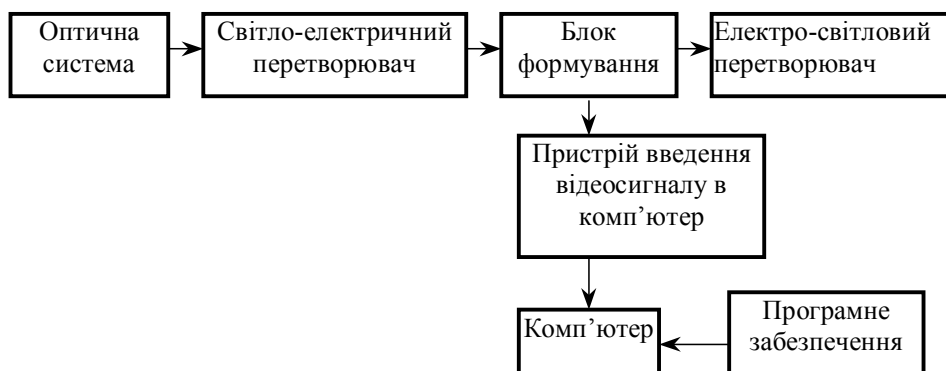


Рис. 1. Узагальнена структура ТЗК

Перетворення освітленості зображення в первинні відеосигнали проводиться малими ділянками чутливої площини — елементами розкладу (пікселями). Розміри пікселя визначаються типом СЕП і можуть бути в межах від одиниць мкм до десятків мкм. З деякими застереженнями [3] СЕП можна розглядати як упорядковану матрицю, складену з великої кількості ідентичних і незалежних мікроприймачів, в межах кожного з яких виконується інтегрування оптичного сигналу по просторових змінних і реакція яких є функцією часу.

У відповідності із структурою ТЗК та викладеному вище телевізійне зображення може існувати як розподіл освітленості на чутливій поверхні СЕП, як розподіл зарядів по матриці СЕП, як сформована законом розгортки послідовність аналогових електричних сигналів, як цифровий масив (цифрове зображення), як розподіл яскравості екрану відеоконтрольного пристрою.

Телевізійне зображення можна визначити також як сукупність відліків сигналу з прив'язкою до координат мішені СЕП. Значення відліків характеризують освітленість піксел, а їх координати визначають геометричні характеристики телевізійного зображення (ГХТЗ). До ГХТЗ крім координат точки відносять також відстань між точками. Отже, в основі при визначенні ГХТЗ є формування амплітудних відліків з їх координатною прив'язкою. Зрозуміло, що кожний компонент ТЗК впливає певним чином на точність визначення ГХТЗ, але в даному випадку обмежимося розглядом тих компонентів, які є основними джерелами можливих похибок визначення ГХТЗ.

В оптичній системі похибки можуть виникати внаслідок фільтрації просторових частот, неізотропності коефіцієнту пропускання світлофільтра, залежності освітленості від кута між оптичною віссю і напрямком поширення пучка.

Основними джерелами похибок в СЕП є нерівномірність чутливості, фільтрація просторових час-

тот, власні шуми.

На етапі існування телевізійного зображення у вигляді цифрових масивів джерелом похибок можуть бути методичні похибки, що визначаються алгоритмом визначення заданої характеристики.

Аналіз літературних джерел [4, 5, 6] дає всі підстави зробити висновок про те, що найбільший вклад в сумарну похибку визначення ГХТЗ вносять нерівномірність чутливості та фільтрація просторових частот, а це, в свою чергу, дозволяє віднести їх до головних факторів, які впливають на роздільну здатність ТЗК.

При застосуванні ТЗК в складі контрольно-вимірювальних засобів, як правило приймають, що розрізнення в площині зображення визначається розмірами пікселя, тобто точність визначення ГХТЗ обмежується лінійним розміром пікселя по відповідній координаті.

Впровадження просторово-частотних уявлень в практику аналізу ТЗК дозволило визначити роздільну здатність через функцію передачі модуляції (ФПМ) та деякий пороговий рівень коефіцієнта передачі модуляції $K_{П}$. При умові, що СЕП працює в діапазоні лінійності

$$K_{П} = \frac{q(P)}{K_{ВХ}q(E)}, \quad (1)$$

де $q(E)$, $q(P)$ — відношення сигнал/шум при освітленості E та при імовірності P ; $K_{ВХ}$ — вхідний контраст.

В експериментальних дослідженнях ФПМ, як правило, використовуються міри з $K_{ВХ}=1$. Отримане таким чином значення $K_{П}$ може бути заниженим, а роздільна здатність, відповідно, завищеною, але для оцінки потенційної роздільної здатності використання моделі з $K_{ВХ}=1$ є цілком прийнятним.

Розглянемо узагальнену світлосигнальну характеристику ПЗЗ-матриці (рис. 2).

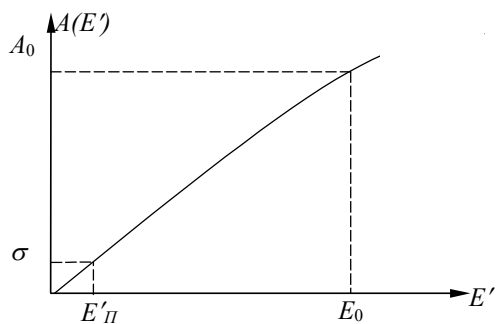


Рис. 2. Узагальнена світлосигнальна характеристика ПЗЗ-матриці

Нехай сигнал, який формується пікселом в межах лінійної ділянки світлосигнальної характеристики ПЗЗ-матриці знаходиться в діапазоні від середнього квадратичного значення шуму σ до деякого максимального A_0 (при освітленості E'_0).

Очевидно, що зміну сигналу в цих межах можна отримати, збільшуючи освітленість від $E'_П$ до E'_0 , або навпаки, зменшуючи її від E'_0 до $E'_П$. При цьому вважаємо, що реєстрація падаючого на СЕП потоку можлива при умові, що цей потік дорівнює пороговому потоку $\Phi_{П}$, під дією якого утворюється сигнал, рівний середньоквадратичному значенню шумового сигналу в даній полосі частот. Відомо також, що пороговий потік пропорційний кореню квадратному із площі приймача S та полоси частот ΔF [7]:

$$\Phi_{П} = \Phi_{П}^* \sqrt{S \Delta F}. \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності $\Phi_{П}^*$ називають питомих пороговим потоком. Розмірність цієї величини $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. В теоретичних дослідженнях та на практиці частіше використовується питома виявлювальна здатність D^* :

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{П}^*}. \quad (3)$$

Розмірність цієї величини $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ (числові значення для деяких СЕП наведені, наприклад, у [7], стор. 514).

В свою чергу, порогове значення освітленості $E'_П$, тобто освітленості, при якій сигнал, утворений пікселом, дорівнює середньому квадратичному значенню шуму, визначається наступним співвідношенням:

$$E'_П = \Phi_{П}^* \sqrt{\frac{\Delta F}{S}} = \frac{1}{D^*} \sqrt{\frac{\Delta F}{S}}. \quad (4)$$

Розглянемо довільний піксел з лінійним розміром Δ . Площа піксела S , середнє квадратичне значення шумового сигналу σ . Якщо при постійній освітленості, наприклад, E'_0 , частково перекрити потік, який падає на піксел, а потім змінювати спів-

відношення між відкритою і закритою ділянками піксела, то при роботі в межах діапазону лінійності ТЗК залежність сформованого пікселом сигналу матиме вигляд, аналогічний зображеному на рис. 2. Цю обставину можна використати для збільшення роздільної здатності ТЗК понад ту, яка визначається лінійним розміром піксела.

Нехай в момент часу t сигнал $A(t)$, а шум $A_{Ш}(t)$. Визначимо поріг $A_{П}$ і встановимо, що сигнал $A(t)$ може бути зареєстрований за умови $A(t) > A_{П} + A_{Ш}(t)$, або $A_{Ш}(t) < A(t) - A_{П}$.

Введемо приведені значення $a_1 = A(t) / \sigma$, $a_2 = A_{П} / \sigma$, $a_3 = A_{Ш}(t) / \sigma$. Тоді умова реєстрації сигналу буде такою: $a_3 < a_1 - a_2$. Шум піксела $A_{Ш}(t)$, а також приведені значення a_3 є випадковими величинами. Повною характеристикою випадкової величини є функція розподілу $F(z)$, яка визначає ймовірність того, що випадкова величина z приймає значення $z < z_0$, отже $P(z < z_0) = F(z)$.

Для найбільш поширених в науковій практиці ТЗК на базі ПТТ і ПЗЗ шум СЕП описується нормальним законом розподілу [8], оскільки шумовий сигнал утворюється внаслідок одночасної дії кількох незалежних факторів, жоден з яких не домінує. Тоді ймовірність реєстрації сигналу, тобто ймовірність того, що $P(a_3 < a_1 - a_2)$ визначиться так:

$$P(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (5)$$

Скориставшись табличними значеннями нормованої функції $F(z)$ можна встановити залежність між будь-якими величинами, що входять у формулу (5), а також визначити $q(P)$ у формулі (1). Наприклад, при $a_2 = 1$, тобто при $A_{П} = \sigma$ значення ймовірності реєстрації $P = 0,99$ буде забезпечуватись при $A(t) = 3,2\sigma$. Якщо такий сигнал буде сформований частиною піксела, площа якого $S_{П}^*$ і при цьому $A(t) \ll A_0$, то очевидно, що $S_{П}^* = S \cdot A(t) / A_0 = (S \cdot 3,2\sigma) / A_0$. Тоді кількість ділянок, що можуть бути розрізнені в межах піксела як окремі, буде такою:

$$N_1 = \frac{S}{S_{П}^*} = \frac{A_0}{3,2\sigma}. \quad (6)$$

В цілому все викладене вище свідчить про можливість розрізнення елемента піксела з лінійним розміром $\Delta_p = \Delta / N$. Отже, використовуючи залежність вихідного сигналу піксела від співвідношення між більш освітленою і менш освітленою його ділянками можна збільшити точність визначення координати без зміни структури та оптико-електронної схеми приладу.

В принципі, метод інтерполяції вихідного сигналу ПЗЗ підвищує точність визначення координати до рівня, який обмежується дисперсією шуму. Найбільш достовірні експериментальні результати в

цьому плані отримані в [6], де вказується, що гранична похибка вимірювання координати для сучасних ПЗЗ може бути зменшена до величини 1...2 мкм.

Спроекуємо розглянутий вище підхід на задачу визначення розмірів обертової краплі [9], врахувавши деякі особливості цієї задачі.

По-перше, сигнал, який може бути сформований пікселом, в даній задачі змінюється від $A_{KP}=32$ одиниці (на межі зображення краплі) до $A_{\Phi}=220$ одиниць (фоновий сигнал) [10].

По-друге, значення A_{KP} , як це впливає з результатів дослідження, виконаного раніше, перевищує середнє квадратичне значення шумового сигналу ПЗЗ-камери. Тобто, при попередніх припущеннях формула (6) матиме такий вигляд:

$$N = \frac{A_{\Phi}}{3,2A_{KP}}. \quad (7)$$

Таким чином, виходячи з оцінки сигналу, який формується в полі зору приладу, можна стверджувати, що в даній задачі в межах піксела з ймовірністю 0,99 можна розрізнити 2 ділянки. Тобто, при лінійному розмірі піксела $\Delta=7$ мкм прилад дозволяє розрізнити ділянку $\Delta_p=4$ мкм. При імовірності реєстрації 0,9, яка є цілком прийнятною для даної задачі $N = A_{\Phi} / (2,3A_{KP}) = 3$.

Відповідно $\Delta_p=2$ мкм. Безумовною перевагою даного підходу є те, що підвищення роздільної здатності досягається в межах існуючої структури приладу виключно за рахунок вдосконалення методики застосування ТЗК для визначення параметрів зображення краплі. Вдосконалена методика базується на ймовірнісному підході, враховує вимоги загальної концепції використання ТЗК для аналізу оптичних полів, а програмне забезпечення приладу доповнюється функцією деталізації. Згідно з цією функцією після знаходження заданого розміру об'єкта (в цілих значеннях піксел) сигнал, сформований крайніми пікселами, співставляється з визначеними по формулі (7) рівнями квантування і відноситься до одного з них. Після цього значення розміру уточнюється.

При цьому слід відзначити, що практична реа-

лізація такої методики в задачі визначення геометричних параметрів обертової краплі на даному етапі супроводжується значними труднощами, пов'язаними з розробкою методів і технічних засобів захисту від мікрівібрацій, які виникають при роботі електродвигуна приладу, вимогою забезпечення рівномірності освітлення в межах всього поля зору, необхідністю використання в приладі мікрооб'єктивів з високим ступенем корекції аберацій, які мають надзвичайно високу вартість.

1. Темников Ф. Е. Методы и модели развёртывающих систем. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. - 136 с. 2. Смирнов А. Я. Математические модели теории передачи изображений. - М.: Связь, 1979. - 96 с. 3. Порев В. А., Порев Г. В. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів // Наукові вісті НТУУ "КПІ". - 2000. - № 1. - С. 56-61. 4. Горелик С. Л., Кац Б. М., Киврин В. И. Телевизионные измерительные системы. - М.: Связь, 1980. - 168 с. 5. Петраков А. В. Автоматические телевизионные комплексы для регистрации быстротекающих процессов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. 6. Маслоков Ю. С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико-механическая промышленность. - 1990. - № 4. - С. 70-73. 7. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. - 696 с. 8. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. - М.: Радио и связь, 1986. - 248 с. 9. Кісіль Р. І., Порев Г. В. Вимірювання геометричних розмірів обертової краплі за допомогою телевізійної системи контролю // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 5 - С. 87-91. 10. Порев В. А., Порев Г. В., Кісіль Р. І. Виділення контурів зображень складної форми методом радіальної розгортки // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 6 - С. 32-36.