

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК.620.179.15

Б.Клим, Є.Почапський, Г.Микитин

Фізико-механічний інститут імені В.Карпенка

ФОТОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ПРИ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Запропоновано спосіб оцінювання параметрів оптичного сигналу в умовах наявності шумової складової при фотометричному методі неруйнівного контролю якості матеріалів.

Умовні позначення:

- p - інтенсивність оптичного сумарного сигналу;
- δ , - задана відносна середньоквадратична похибка;
- N , - кількість нагромадження імпульсів сигналу;
- $\bar{p}$ - оцінка інтенсивності;
- T - час нагромадження імпульсів;
- n_1 - інтенсивність шумової складової;
- $(n - n_1)$ - різниця інтенсивностей;
- N, N_1 - кількість імпульсів сумарного і шумового потоків;
- $[(n \pm n_1)]$ - математичне сподівання оцінювання різниці інтенсивностей;
- $D(n \pm n_1)$ - дисперсія оцінювання;
- Δt_{N_1} - час нагромадження N_1 імпульсів різниці;
- $\delta(n \pm n_1)$ - відносна середньоквадратична похибка різниці інтенсивностей;
- ΔN - кількість нагромаджених імпульсів різниці;
- $\mathfrak{S}_{\Delta N}$ - час нагромадження ΔN імпульсів різниці;
- $\mathfrak{S}_N$ - час накопичення різниці імпульсів до величини N_1 ;
- ΔT - час спрацювання переривача світла;
- $N_{\text{с+ш}}^1$ - сума світлових і шумових імпульсів;
- k_1 - кількість циклів;
- k_0 - коефіцієнт поділу частоти.

Оптичний неруйнівний контроль ґрунтується на взаємодії світлового випромінювання з об'єктом контролю та реєстрації результатів цієї взаємодії. Серед методів, що ґрунтуються на вимірюванні величин, які характеризують світлове випромінювання, шляхом перетворення їх на електричний сигнал, актуальними є фотометричні. Фотометричний метод передбачає вимірювання вторинного освітлення, яскравості, світлового потоку або інтенсивності світлового випромінювання, отриманого внаслідок взаємодії з об'єктом контролю. Фотометричний метод на практиці застосовується для розв'язування таких задач неруйнівного контролю якості матеріалів: вимірювання геометричних розмірів та площ, контролю коефіцієнта зникання, пропускання або відбиття, дефектоскопії [1].

1. Спосіб оцінювання різниці інтенсивностей сумарного і шумового сигналів при фотометричних вимірюваннях

При фотометричних вимірюваннях у випадку реєстрації слабкого світлового потоку адекватною моделлю імпульсного сигналу після фотоелектричного перетворювача буде випадковий точковий процес, статистичні властивості якого

описуються законом Пуасона [2,3]. Інформативним параметром сигналу в рамках розглядуваної моделі є його інтенсивність n , пов'язана з фотометричною величиною. Експериментаторові, як правило, апріорі відома допусксова відносна середньоквадратична похибка оцінювання інформативного параметра сигналу. Відомо також, що для оцінювання інтенсивності сигналу із заданою відносною середньоквадратичною похибкою δ , необхідне нагромадження кількості імпульсів сигналу $N_s = \delta_s^{-2}$ [4]. Тобто відносна середньоквадратична похибка оцінювання

інтенсивності за алгоритмом $\hat{n} = \frac{N_s}{T}$ така

$$\delta_{\hat{n}} = \frac{1}{\sqrt{N_s}} = \delta_s. \quad (1)$$

Суттєвим фактором впливу на точність оцінювання фотометричної величини є адитивна складова шумів, обумовлена шумами фотоелектричного перетворювача і шумами оптичного каналу передачі. В умовах адитивної шумової складової сигнал інтенсивністю n на виході фотоперетворювача відповідає сумарному сигналові, який охоплює інформативну і шумову (інтенсивністю n_1) складові, причому статистичні властивості останньої необхідно розглядати в рамках моделі Пуасона. Оскільки шумова складова входить до сумарного потоку адитивно і сума двох пуасонівських потоків є також пуасонівським потоком з інтенсивністю, що дорівнює сумі інтенсивностей складових, то фотометрична величина буде пропорційною до різниці інтенсивностей $(n - n_1)$ відповідних потоків. Інтенсивність складової можна оцінити, якщо світловий сигнал, реєстрований фотоелектричним перетворювачем, періодично переривати.

Очевидно, що при наявності шуму для оцінювання із заданою відносною середньоквадратичною похибкою фотометричної величини необхідно оцінити з такою ж похибкою різницю інтенсивностей $(n - n_1)$. З літератури відомий алгоритм оцінювання [5], фізичне тлумачення якого зводиться до нагромадження за час спостереження T кількості імпульсів, що дорівнює різниці нагромадженої кількості імпульсів сумарного N і шумового N_1 потоків

$$(n \hat{=} n_1) = \frac{N - N_1}{T}. \quad (2)$$

Математичне сподівання оцінювання різниці інтенсивностей за алгоритмом $[(n \hat{=} n_1)] = n - n_1$, дисперсія оцінювання

$$D(n \hat{=} n_1) = \frac{1}{T} (n - n_1),$$

відносна середньоквадратична похибка дорівнює

$$\delta(n \hat{=} n_1) = \frac{1}{(n - n_1)} \sqrt{\frac{(n + n_1)}{T}}. \quad (3)$$

З формули (3) бачимо, що похибка оцінювання різниці інтенсивностей за таким алгоритмом залежить від співвідношення інтенсивностей сумарного і шумового потоків, і апріорі невідомо, який необхідно вибрати час нагромадження, щоб забезпечити задану похибку.

Виходячи з алгоритму (2), синтезуємо алгоритм оцінювання різниці інтенсивностей з наперед заданою відносною похибкою δ_s . Для цього необхідна умова постійної похибки (3) та відповідності її аналогічно з (1) величині $1/\sqrt{N_s}$.

Після алгебраїчних перетворень виразу (3) отримаємо

$$\sqrt{\frac{1}{\Delta N} \left(1 + \frac{2n_1}{n - n_1} \right)} = \text{const} = \frac{1}{\sqrt{N_1}},$$

$\Delta N = (n - n_1)T = [N] - [N_1] \approx N - N_1, N_1$, яке визначає величину похибки.

З останньої рівності для кількості імпульсів різниці, яку необхідно нагромадити, з метою забезпечення постійної похибки отримаємо $\Delta N = N_1 + 2N_1 \frac{n_1}{n - n_1}$. Щоб в

останньому виразі відійти від апіорі невідомих n та n_1 , помножимо чисельник і знаменник другої складової на Δt_{N_1} - час, за який нагромаджується N_1 імпульсів різниці. Тоді $\Delta t_{N_1} (n - n_1) \approx N_1$, а $\Delta t_{N_1} n_1 \approx N_1$,

де N_1 - кількість імпульсів шуму, нагромаджена за час, через який різниця набере значення N_1 . З урахуванням таких зауваг

$$\Delta N = N_1 + 2N_1. \quad (4)$$

Висновок такий: якщо ми оцінюємо $(n - n_1)$ з відносною середньоквадратичною похибкою $\delta (n - n_1) = \text{const} = 1/\sqrt{N_1}$, то для цього нагромадження різниці імпульсів необхідно доводити не до числа N_1 , а до скоректованого числа $\Delta N = N_1 + 2N_1$. Тут необхідно пам'ятати, що при отриманні виразу (4) ми перейшли від математичних сподівань величин різниці нагромаджених імпульсів і нагромаджених імпульсів фону до їх оцінювань, що призводить внаслідок великого значення тільки до відхилень другого порядку меншості значення похибки від наперед заданої.

Синтезований алгоритм оцінювання різниці інтенсивностей з заданою відносною середньоквадратичною похибкою аналітично запишемо

$$(n - n_1) = \frac{(N_1 + 2N_1)}{\theta_{\Delta N}}. \quad (5)$$

Відомий пристрій [6] обчислює оцінювання різниці інтенсивностей за алгоритмом

$$n - n_1 = \frac{N_2}{\theta_{N_2}}. \quad (6)$$

Тут N_2 - нагромаджена кількість імпульсів різниці, що дорівнює наперед заданому числові, θ_{N_2} - час нагромадження різниці імпульсів до величини N_2 . З вищеподаного аналізу, зокрема з виразу (3), виходить, що відносна похибка оцінювання різниці інтенсивностей за алгоритмом (6) залежить від співвідношення між інтенсивностями n і n_1 , відповідно сумарного і шумового потоків.

2. Пристрій оцінювання різниці інтенсивностей сумарного і шумового сигналів

На рис.1 подана функціональна схема пристрою оцінювання різниці інтенсивностей із заданою відносною середньоквадратичною похибкою.

Схема працює за алгоритмом (5) і не має недоліків відомих пристроїв. Пристрій має схему порівняння 3 з джерелом опорної напруги 2, елемент "І-НЕ" 4, елемент "І" 5, блок формування керівних сигналів 8, перший реєстр 9, реверсивний лічильник 10, лічильник фону 11, другий реєстр 13, третій реєстр 12, схему порівняння кодів 14, елемент затримки 15, перший тригер 16, елемент "АБО-НЕ" 17, другий тригер 18, лічильник циклів 19, блок обчислення 20.

Призначення елементів функціональної схеми таке: блок формування керівних сигналів 8 формує сигнали для управління роботою пристрою. На рис.2 подано приклад реалізації блоку формування керівних сигналів.

До його складу входять: елемент "АБО" 21, перший елемент затримки 22, перший тригер 23, другий тригер 24, генератор імпульсів 25, елемент "І-НЕ" 26, третій тригер 27, перший і другий елемент "І" 28,29, другий елемент затримки 30.

Діаграми імпульсів у деяких точках блоку 8 подані на рис.3.

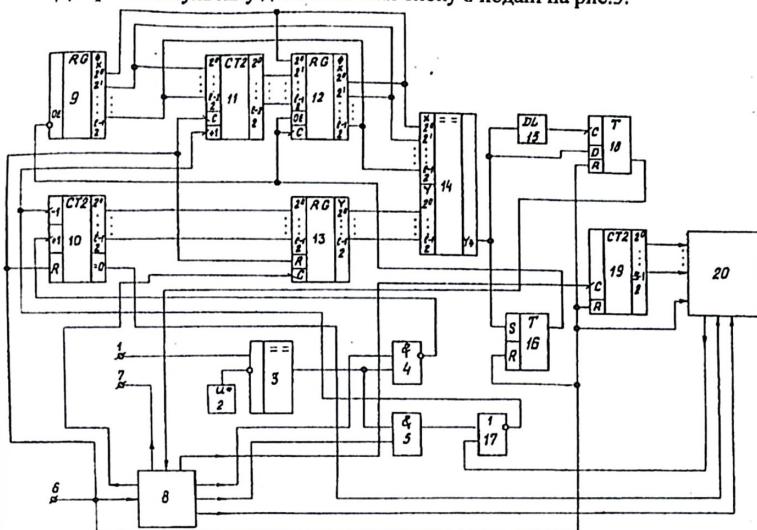


Рис.1. Функціональна схема пристрою обчислення оцінювання різниці інтенсивностей із заданою відносною середньоквадратичною похибкою.

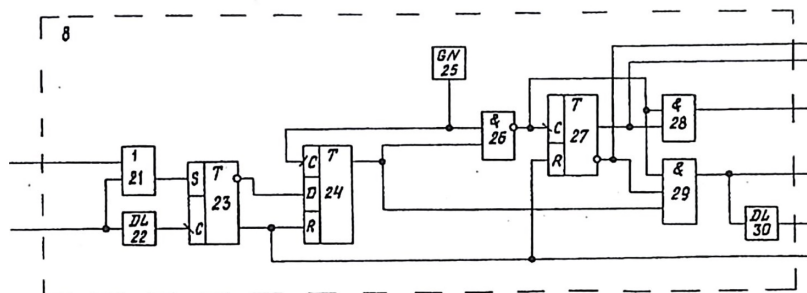


Рис.2. Приклад реалізації блоку формування керівних сигналів пристрою обчислення оцінювання різниці інтенсивностей.

У цілому блок формування керівних сигналів 8 функціонує так: імпульс додатньої полярності на вхідній шині управління (точка 6) надходить на вхід блоку формування керівних сигналів 8 (рис.3а), внаслідок чого перший тригер 23, що працює в лічильному режимі, попередньо встановлюється в одиничний стан; при цьому другий і третій тригери встановлюються в нульові стани; заднім фронтом керівного імпульсу, затриманого елементом 22, перший тригер переходить в нульовий стан, далі на D-вході другого тригера встановлюється потенціал логічної одиниці; генератор імпульсів 25 генерує неперервну послідовність імпульсів додатньої полярності, причому

тривалість їх ΔT вибирається рівною або більшою відмертвого часу спрацювання переривача світла, який ділить у часі сумарний і шумовий потоки.

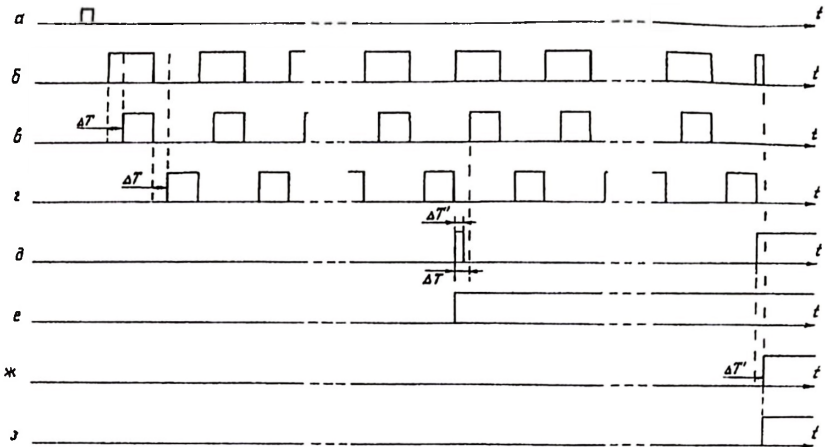


Рис.3. Діаграми імпульсів у деяких точках блоку формування керівних сигналів пристрою обчислення оцінювання різниці інтенсивностей.

Переднім фронтом імпульсу генератора 25 другий тригер переходить в одиничний стан, внаслідок чого на другому вході елемента "І-НЕ" 26 з'являється потенціал дозволу на проходження імпульсів генератора 25. Імпульси з виходу елемента "І-НЕ" 26 надходять на вхід третього тригера, який працює в режимі лічильника, і на перші входи першого і другого елементів "Т" 28,29, на виходах яких формуються відповідні сигнали управління. На першому виході третього тригера 27 формуються імпульси управління переривачем світла (рис.3.б), які надходять з виходу блоку формування на точку 7, до якої під'єднується вхід переривача світла. На інверсному вході того ж тригера формується сигнал, що надходить на вхід лічильника циклів 19. На виходах першого і другого елементів "Т" 28,29 формуються керівні імпульси (рис.3 в,г), що надходять на перші входи відповідно елемента "І-НЕ" 4, "І" 5. На виході другого елемента затримки 30 формується керівний сигнал, що надходить на вхід паралельного запису другого реєстра 13, а на прямому виході тригера 23- керівний сигнал, що надходить на блок обчислення 20.

У першому 1- розрядному реєстрі 9 попередньо записується код числа N , що визначає надалі відносну середньоквадратичну похибку оцінювання різниці інтенсивностей. У третьому реєстрі 12 записується скоректована кількість імпульсів різниці. Лічильник фону 11 призначений для паралельного підрахунку кількості імпульсів фону.

Пристрій загалом функціонує так. При надходженні на вхідну шину управління 6 пусковою імпульсу додатньої полярності (рис.3а) обумовлюється реверсивний лічильник 10, другий реєстр 13, лічильник циклів 19, перший тригер 16, другий тригер 18, елементи блоку обчислення 20. При цьому блок формування керівних сигналів 8 встановлюється у початковому стані, а за заднім фронтом пускового імпульсу він запускається.

Заднім фронтом пускового імпульсу записується вміст інформації першого реєстра 9, крім вмісту його молодшого розряду, у лічильнику фону 11 на його входах паралельного запису ($2^0, \dots, 2^{12}$). Під дією керівного сигналу з першого виходу блоку 8 (рис.3б) відкривається переривач світла, який під'єднується до точки 7 (рис.1).

Протягом часу ΔT повного спрацювання переривача світла під дією керівного сигналу з другого виходу блоку 8 (рис.3.в) відкривається на час T елемент "І-НЕ" 4. Нормовані за амплітудою імпульси з виходу схеми порівняння 3 через елемент 4 потрапляють на сумарний вхід реверсивного лічильника 10, в якому нагромаджується сума світлових і шумових імпульсів $N_{T_{\text{sum}}}^1$. При надходженні з першого виходу блоку 8 на керівний вхід переривача світла потенціал логічної одиниці переривач закривається, при цьому елементи "І-НЕ" 4 та "І"5 закриті.

Через час ΔT повного закривання переривача світла під дією керівного сигналу з третього виходу блоку 8 (рис.3.г) відкривається на час T елемент "І" 5 і через елемент "АБО-НЕ" 17 на вхід відлімання реверсивного лічильника 10 надходить кількість імпульсів $N_{T_{\text{sum}}}^1$ шуму, оскільки переривач світла в цей час закритий. Паралельно ці імпульси надходять на вхід сумарної лічильника фону 11.

У реверсивному лічильнику 10 нагромаджується кількість імпульсів

$$\Delta N_1 = N_{T_{\text{sum}}}^1 - N_{T_{\text{sum}}}^1. \text{ Це число } \Delta N_1 = y \text{ перезаписується на другий реєстр 13}$$

заднім фронтом сигналу з четвертого виходу блоку формування керівних сигналів 8 і в схемі порівняння кодів 14 порівнюється з числом x , записаним на першому реєстрі 9. Якщо $y \geq x$, то на виході схеми порівняння з'являється потенціал логічної одиниці, який встановлює перший тригер 16 в одиничний стан. Якщо $y < x$, починається наступний цикл нагромадження, подібний до першого. За два цикли нагромадження у реверсивному лічильнику 10 нагромаджується кількість імпульсів $N_0 = \Delta N_1 + \Delta N_2$, а в лічильнику фону до записаного попередньо числа додається число $N_1 = N_{T_{\text{sum}}}^1 + N_{T_{\text{sum}}}^2$. Далі перезаписується вміст реверсивного лічильника 10 на реєстр 13 і порівнюється в схемі порівняння кодів 14 з числом x записаним в реєстрі 9.

Якщо $(N_0 = y) \geq x$, то тригер 16 встановлюється в одиничний стан. Якщо знову $y < x$, то процес нагромадження продовжується аналогічно тому часові, поки число імпульсів $N_0 = \Delta N_1 + \dots + \Delta N_{k_1}$, нагромаджених у реверсивному лічильнику 10, не зрівняється або перевищить задане в першому реєстрі 9 число x . Тут k_1 – кількість циклів за цей час. Тоді на виході схеми порівняння кодів 14 з'являється потенціал логічної одиниці (рис.3.д), який встановлює перший тригер 16 в одиничний стан (рис.3.е). Додатнім перепадом сигналу з виходу тригера 16 переписується на третій реєстр 12 вміст лічильника фону 11 і вміст молодшого розряду першого реєстру 9. Після цього тим же сигналом на входах дозволу видання вмісту реєстрів ОЕ група виходів першого реєстру 9 переводиться у третій стан і під'єднується до схеми 14 третій реєстр 12.

Внаслідок запропонованого під'єднування групи виходів першого реєстру $(2^1, \dots, 2^{l-1})$ до групи входів $(2^0, \dots, 2^{l-2})$ лічильника фону 11 фактично отримуємо ефект поділу на два, і тому в лічильник фону попередньо, заднім фронтом пускового імпульсу, записується число $\text{Ent}\left(\frac{N_2}{2}\right)$, де N_2 – число, записане в реєстрі 9. За час, за

який у реверсивному лічильнику 10 нагромадиться кількість імпульсів $(N_0 = y) \geq (N_2 = x)$, у лічильнику фону 11 з'явиться число $\text{Ent}\left(\frac{N_2}{2}\right) + N_1$. Тут

$N_1 = N_{T_{\text{sum}}}^1 + \dots + N_{T_{\text{sum}}}^{k_1}$ – кількість імпульсів шуму, нагромаджених за цей же час, k_1 – кількість проведених за цей час циклів накопичення. Внаслідок запропонованого під'єднання групи виходів $(2^0, \dots, 2^{l-2})$ лічильника фону 11 до групи входів третього реєстру 12 і молодшого розряду реєстру 9 до молодшого розряду реєстру 12. Після перепису в третьому реєстрі 12 отримуємо число $\Delta N = N_2 + 2N_1$, тобто фактично маємо ефект множення на два. Після встановлення на першій групі входів схеми – порівняння кодів 14 скоректованого числа $\Delta N = N_2 + 2N_1$ з групи виходів третього реєстру 12 на

виході схеми 14 з'являється потенціал логічного нуля (рис.3.д). Внаслідок цього другий тригер 18 переднім фронтом сигналу з виходу схеми 14, затриманого елементом затримки 15 на $\Delta T'$, не встановиться в одиничному стані. Відповідно блок формування керівних сигналів 8 не встановиться у початковому стані, а це продовжить процес нагромадження. Час затримки $\Delta T'$ елемента 15 вибирається трохи більший за сумарний час переписування числа у реєстрі 12 і зворотнього спрацювання схеми порівняння кодів 14, але менший за час T спрацювання переривача.

Процес нагромадження триває доти, доки число імпульсів

$$N = N_0 + \Delta N_{k_1+1} + \dots + \Delta N_{k_1+k_2}$$

зрівняється або перевищить скоректоване число $\Delta N = N_0 + 2N_1$ у третьому реєстрі 12, де k_2 - число циклів нагромадження, проведених додатково. Тоді на виході схеми порівняння 14 знову з'явиться потенціал логічної одиниці. Переднім фронтом цього сигналу за час затримки $\Delta T'$ елемента затримки 15 другий тригер 18 встановлюється в одиничному стані (рис.3.ж), що приводить до скидання блоку 8 у початковий стан. На цьому процес нагромадження припиняється. Кількість циклів нагромадження фіксується за допомогою лічильника циклів 19, який спрацьовує від переднього фронту імпульсів, що надходять з п'ятого виходу блоку формування 8 і виникають при проведенні кожного циклу нагромадження.

На основі результатів нагромадження блок обчислення 20 обчислює оцінювання. Цей блок запускається сигналом з шостого виходу блоку формування керівних сигналів 8 (рис.3.з). Можливий варіант реалізації блоку подано на рис.4

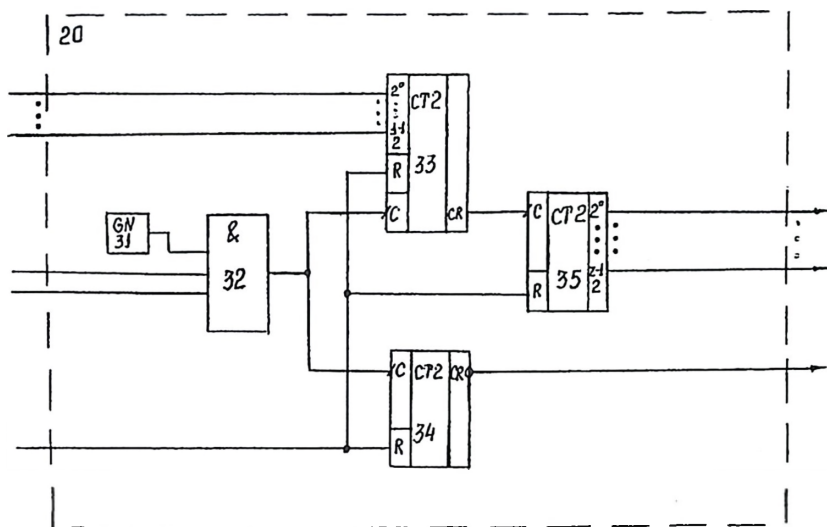


Рис.4. Приклад реалізації блоку обчислення пристрою обчислення оцінювання різниці інтенсивностей.

Схема складається з генератора імпульсів 31, елемента "Г" 32, керуваного подільника частоти 33, подільника частоти 34, основного лічильника 35. Код управління на керуваний подільник частоти надходить з групи виходів ($2^0, \dots, 2^{k-1}$) лічильника циклів 19, а імпульси генератора 31 - через елемент "Г" 32, подільник частоти блоку 20 далі надходять через елемент "АБО-НЕ" 17 на вхід віднімання реверсивного лічильника 10, вихід індикації нульового стану якого зв'язаний з одним з виходів елемента "Г" блоку 20. Результат обчислення оцінювання блоком 20 з точністю

до постійного множника T дорівнює різниці інтенсивності i у двійковій формі задається числом

$$N' = \frac{(N_2 + 2N_1)}{(\kappa_1 + \kappa_2)} \cdot \kappa_0$$

Тут (κ_1, κ_2) – коефіцієнт поділу керованого подільника частоти 33, що визначається кодом на його групі входів $(2^0, \dots, 2^{s-1})$ і дорівнює числові реалізованих циклів нагромадження, κ_0 – коефіцієнт поділу подільника частоти 34. Коефіцієнт зручно вибрати у вигляді $\kappa_0 = 2^m$, тоді m молодших розрядів основного лічильника є розрядами дробової частини результату обчислення.

У результаті такого процесу нагромадження отримаємо у реверсивному лічильнику 10 кількість імпульсів

$$N = N_2 + 2N_1,$$

за якою, згідно з (5) в умовах суттєвої шумової перешкоди незалежно від відношення між інтенсивностями сумарного і шумового сигналів, різницю інтенсивностей визначаємо з відносною середньоквадратичною похибкою $\delta_{N=N_1}$.

Висновок

Описаний спосіб оцінювання та пристрій його реалізації забезпечує задану відносну середньоквадратичну похибку оцінки різниці інтенсивностей світлових потоків.

Для випадку лінійного зв'язку параметрів світлового сигналу з параметрами матеріалу останні також оцінюються із заданою відносною середньоквадратичною похибкою адекватно похибці оцінювання різниці інтенсивностей світлових потоків.

The method of estimation of the parameters of optical signal with a noise component in photometrical approach of nondestructive testing of the material quality was proposed in this papers.

Література

1. Ермолов И.Н. Останин Ю.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества.-М.Высш.шк., 1988.- 368 с.
2. Большаков И.А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума.-М.:Советское радио, 1968.- 464 с.
3. Апанасович В.В., Коляда А.А., Чернявский А.Ф. Статистический анализ случайных потоков в физическом эксперименте.- Минск:Изд. Университетское, 1988.- 276с.
4. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях.- Минск:Изд.Университетское, 1989.- 256с.
5. Демчук М.И., Иванов М.А. Статистический одноквантовый метод в оптико-физическом эксперименте.- Минск: Издательство БГУ, 1981.-176с.
6. А.с. 968624 СССР. МКИ G01J 1/44 Счетчик фотонов // О.Е. Вилингис. А.П. Круминьш и др.- Заявлено 10.04.81.
7. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н., Резников И.В. Одноэлектронные фотоприемники.- М.:Энергоатомиздат, 1986.- 160 с.
8. Клим Б.П., Почапский Е.П., Федорив Р.Ф. Аналоговый измеритель интенсивности слабых световых потоков ./ПТЭ.1984.№3.с.183.

Статтю подав до друку докт. техн. наук, проф. Я.П.Драган