

УДК 543.4: 681.2.08

ВПЛИВ СТАЛОЇ ЧАСУ АНОДНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРОННОГО ПОМНОЖУВАЧА НА РЕЄСТРАЦІЮ ІМПУЛЬСНИХ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

В. Гетьман

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська, 1, Львів, 790000, Україна*

Розроблено метод визначення форми вихідного сигналу фотоелектронного помножувача при відомому вхідному оптичному сигналі. З'ясовано існування оптимальної сталої часу навантаження фотоелектронного помножувача в разі реєстрації імпульсних оптичних сигналів.

Ключові слова: фотоелектронний помножувач, одноелектронний імпульс, пуасонівський процес.

Згідно з сучасними вимогами, необхідно контролювати вміст частинок субмікронних розмірів у технологічних середовищах та повітрі виробничих приміщень. Для визначення вмісту аерозолів та пилу в газах, твердих домішок у рідинах застосовують оптичні лічильники з реєстрацією світла, розсіяного частинками, які в потоці середовища перетинають освітлену зону. Надійна реєстрація малих частинок можлива за умови виділення відповідних сигналів на фоні шумів.

Для визначення вмісту і розмірів частинок у дисперсних середовищах застосовують реєстрацію розсіяного світла [5] та наступне опрацювання отриманого електричного сигналу. Для перетворення оптичних сигналів у електричні можна використовувати різні типи фотоприймачів [4]. Вибір типу фотоприймача зумовлений параметрами сигналів: інтенсивністю, тривалістю, динамічним діапазоном. Особливістю розсіяння світла субмікронними частинками є швидке зниження інтенсивності зі зменшенням розмірів частинки [2]. Це зумовлює необхідність застосування фотоприймача з високою чутливістю, малим рівнем власних шумів. Такими є фотоелектронні помножувачі (ФЕП), які працюють на основі зовнішнього фотоефекту і наступного багатокаскадного помноження фотоструму на вторинних електронних емітерах. Кожному зареєстрованому фотону на виході фотоелектронного помножувача відповідає електричний імпульс малої тривалості, який називають одноелектронним імпульсом. Тому сигнал на виході ФЕП можна відобразити випадковим імпульсним процесом, причому середня частота імпульсів буде пропорційною до інтенсивності світла, що потрапляє на фотокатод. Є два головні способи вимірювання інтенсивності світла за допомогою ФЕП – метод рахунку фотонів та метод вимірювання струму [3]. В методі рахунку фотонів визначають підрахунок

числа імпульсів, які надходять за вибрані проміжки часу. Отримані значення використовують для наступного опрацювання сигналів. Другий метод полягає у вимірюванні середнього струму, що протікає через анодне навантаження ФЕП. Обидва методи застосовують для реєстрації сигналів розсіяного частинками світла [1, 6]. Перевагою методу рахунку фотонів є малий вплив власних шумів підсилювача та системи опрацювання сигналу на результати вимірювання. Суттєвий недолік, що обмежує застосування цього методу в оптичних лічильниках, – малий інтервал розмірів частинок. Це зумовлено тим, що в цьому випадку мала тривалість сигналу, який реєструють, унаслідок ненульової тривалості одноелектронного імпульсу обмежує динамічний діапазон сигналів, які можна реєструвати.

Такого недоліку позбавлена схема вимірювання анодного струму. В цьому методі анодне навантаження розглядають як інтегральну RC-ланку, причому ємністю може слугувати власна ємність анода. На результати вимірювання суттєво впливає стала часу цієї ланки. Малий час призводить до слабкого згладження сигналу. Великий час приводить до злиття імпульсів, що відповідають окремим частинкам. Оптимальне значення залежить від параметрів сигналу, який контролюють.

Наша мета – моделювання форми вихідного сигналу фотоелектронного помножувача за відомого вхідного оптичного сигналу та розробка методу оцінки оптимального значення сталої часу анодного навантаження фотоелектронного помножувача залежно від параметрів сигналу, який реєструють.

Моделювання виконуємо за припущенням про пуасонівську статистику одноелектронних імпульсів на виході ФЕП у разі надходження на вхід оптичного сигналу одної інтенсивності. Іншими словами, ймовірність отримання N відліків за час t визначають з виразу

$$P_N = \frac{(nt)^N \exp(-nt)}{N!}, \quad (1)$$

де n – середня частота фотовідліків. Уважаємо, що n пропорційне до інтенсивності вхідного оптичного сигналу.

Модель послідовності одноелектронних імпульсів будемо у вигляді вектора T , компоненти якого t_i дорівнюють значенню інтервалів часу з початку відліку до моменту появи відповідних імпульсів. Розраховуємо цей вектор на підставі того, що в разі пуасонівського процесу (1) проміжки часу між послідовними подіями є випадковою величиною з густиною розподілу

$$\varphi(\tau) = n \exp(-n\tau). \quad (2)$$

За заданою середньою частотою появи одноелектронних імпульсів n будемо вектор τ , компоненти якого τ_i є реалізаціями випадкової величини (2). Компоненти вектора T обчислюємо за формулою

$$t_j = t_0 + \sum_{i=1}^j \tau_i, \quad (3)$$

де t_0 – початковий момент часу.

Кількість компонентів вектора T вибираємо з умови

$$k : t_k - t_0 \leq Z, \quad (4)$$

де Z – час, упродовж якого на вхід ФЕП надходить сигнал, що в середньому спричинює n фотовідліків.

Під час реєстрування нестационарного оптичного сигналу його розбивають на проміжки, упродовж яких сигнал можна вважати сталим. На кожному з проміжків моделювання виконують за описаною вище методикою. Отримані вектори об'єднують в один. У разі, коли сигнал можна подати у вигляді суми кількох складових, моделюють вектори послідовності одноелектронних імпульсів для всіх складових окремо. Отримані вектори об'єднують з наступним сортуванням компонентів за значенням.

Уважатимемо, що в разі надходження одноелектронного імпульсу на вхід інтегрувальної ланки, амплітуда сигналу зростає на однакову для всіх одноелектронних імпульсів величину u . Приймемо час наростання сигналу малим і надалі нехтуватимемо ним. Напругу на виході інтегрувальної ланки вважатимемо такою, що дорівнює нулю в початковий момент часу. У проміжках між надходженнями одноелектронних імпульсів відбувається розряд конденсатора C через резистор R . За висловленими припущеннями, напругу сигналу на виході фотоприймача визначаємо з виразу

$$U(t) = u \sum_i \exp(-\lambda(t-t_i)), \quad i: t_i \leq t, \quad (5)$$

де $\lambda = \frac{1}{RC}$ – величина, обернена до сталої часу інтегрувальної ланки.

Розроблений метод, згідно з (3)–(5), дає змогу моделювати форму вихідного сигналу ФЕП за відомої залежності інтенсивності вхідного оптичного сигналу від часу.

Оптичний сигнал, який реєструють в оптичних лічильниках наближено можна вважати послідовністю імпульсів на фоні сталої шумового засвічення. Метою первинного опрацювання сигналу в оптичних лічильниках є виділення сигналу на фоні шумів та підрахунок кількості зареєстрованих імпульсів. На рис. 1А зображено типову схему реєстрації сигналу в разі застосування ФЕП у режимі вимірювання струму.

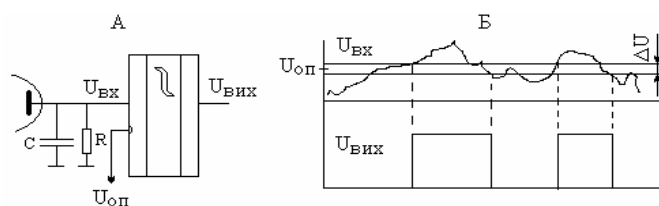


Рис. 1. Схема виділення сигналів на фоні шумів – А, та сигнали на вході й виході компаратора – Б.

Одноелектронні імпульси з виходу ФЕП надходять на інтегрувальну ланку і на вхід компаратора. У разі перевищення сигналом $U_{\text{вх}}$ значення $U_{\text{оп}}$ на виході компаратора відбувається перехід з 0 в 1. Зниження напруги сигналу до рівня,

меншого за $U_{оп}$ приводить до зворотного переходу. Кількість імпульсів на виході компаратора підраховують і трактують як кількість зареєстрованих частинок. Для зменшення впливу малих флуктуацій сигналу на результати вимірювання застосовують компаратор з гістерезисом, тобто перехід виходу компаратора з нульового в одиничний рівень і навпаки відбувається за різних значень напруги сигналу (рис. 2, Б). Гістерезис компаратора будемо характеризувати величиною різниці верхньої й нижньої порогової напруги ΔU .

Точність підрахунку кількості частинок залежить від вибраних значень сталої часу інтегрувальної ланки, $U_{оп}$, ΔU . Розглянемо метод оцінки оптимальних значень цих параметрів для відомого вхідного оптичного сигналу.

Надалі вважатимемо оптичний сигнал, який надходить на вхід фотоприймача, сумою шумового засвічення, середня інтенсивність якого є сталою впродовж одного експерименту, та сигналу у вигляді імпульсів прямокутної форми однакової інтенсивності та тривалості. Надходження сигналів вважаємо пуасонівським процесом.

На рис. 2 зображено типовий аналоговий сигнал за різних значень сталої часу інтегрувальної ланки.

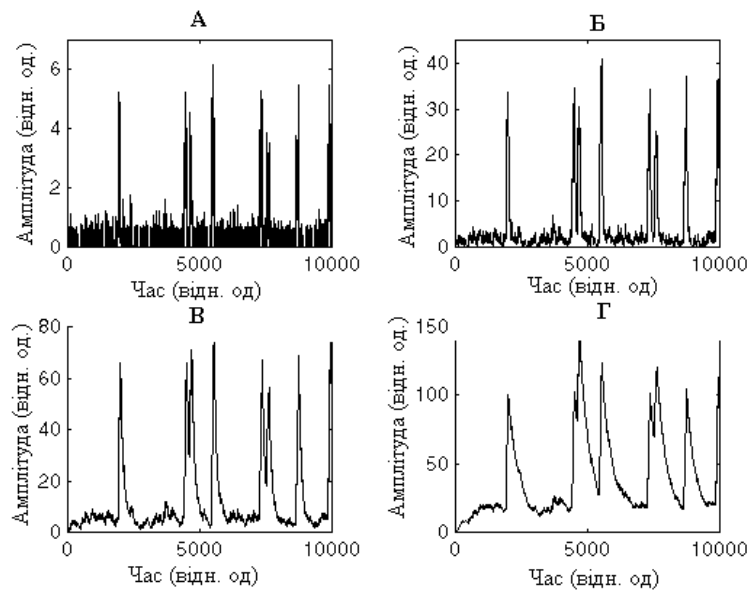


Рис. 2. Форма сигналу на виході фотоприймача. А – $\lambda=0,3$;
Б – $\lambda=0,03$.

Величину λ вимірюють в одиницях, узгоджених з вибраним масштабом вимірювання часу. За малих часів інтегрування сигнал слабо згладжений, за великих – кілька імпульсів зливаються в один. Зазначені особливості впливають на точність підрахунку кількості частинок. На рис. 3 показано типовий результат підрахунку кількості імпульсів на виході компаратора під час реєстрування шумового засвічення, та для сигналу на фоні того ж шуму. Можна виділити чотири

характерні зони зміни залежності кількості частинок від порога спрацювання компаратора (рис. 3, Б). Зона I – це зона малих значень опорної напруги. Вона має велику кількість зареєстрованих імпульсів, що значно залежить від гістерезису компаратора. Порівняння з рис. 3, А, на якому зображено залежності для чисто шумового сигналу, свідчить, що в цій зоні реєструють шумові імпульси. Зона II характерна тим, що кількості зареєстрованих імпульсів є практично стабільна при змінах $U_{оп}$ і ΔU . У зоні III простежується збільшення кількості зареєстрованих імпульсів у разі зростання опорної напруги при малих значеннях гістерезису. Це пояснюється реєстрацією флуктуацій амплітуди сигналу на вершинах імпульсів. Зоні IV властиве швидке зменшення кількості зареєстрованих імпульсів зі зростанням порогу. Очевидно, що в разі практичного застосування цієї схеми реєстрації необхідно вибирати значення опорної напруги компаратора в зоні II, оскільки результати вимірювання мало змінюються за незначних змін умов. Відсутність такої області в залежності свідчить про неможливість, за заданих параметрів сигналу і схеми надійно виділяти сигнал на фоні шуму.

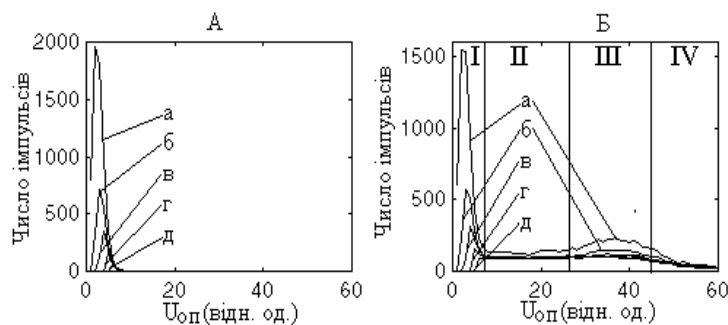


Рис. 3. Залежність кількості зареєстрованих імпульсів від порога компаратора для шумового сигналу А та сигналу з шумом Б. Значення гістерезису компаратора: а – $\Delta U = 0$; б – $\Delta U = 1$; в – $\Delta U = 2$; г – $\Delta U = 3$; д – $\Delta U = 4$.

Вплив сталої часу анодного навантаження ФЕП на реєстрацію імпульсного оптичного сигналу на фоні шумів демонструє рис. 4. На рис. 4 зображено залежності, отримані для одного оптичного сигналу для різних значень сталої часу анодного навантаження ФЕП. Критерієм оцінки точності виділення сигналу вважаємо наявність зони стабільної кількості підрахованих імпульсів у разі зміни опорної напруги компаратора. Точність визначення кількості частинок оцінюємо на підставі того, що на вхід компаратора за час експерименту надійшло 97 імпульсів. У цьому випадку середній проміжок між сигналами вибрано в десять разів більшим від тривалості сигнального імпульсу. Тому приблизно одна десята частина імпульсів зливаються, і їх не можна розрізнити. Тобто реальною кількістю зареєстрованих сигналів повинно бути значення в межах 85–90. За малих значень параметра λ 0,01 і 0,03 (залежності А і Б) кількість зареєстрованих імпульсів є в межах 60–70, що свідчить про велику похибку визначення кількості частинок. Отримані занижені значення пояснюють злиттям близько розміщених сигналів за великої сталої часу інтегрувальної ланки. Для значень параметра 0,1 і 0,3 (залежності Д і Е) результати сильно залежать від значення гістерезису. Це

пояснюють тим, що при великих значеннях λ сигнали розпадаються на низку імпульсів (рис. 2, А), тому і немає зони стійкої реєстрації. Графіки В і Г свідчать, що область значень λ від 0.01 до 0.03 є оптимальною для реєстрації сигналу, оскільки тут простежується зона слабкої залежності кількості зареєстрованих імпульсів від опорної напруги і гістерезису, а кількість зареєстрованих імпульсів близька до апіорі відомої кількості частинок.

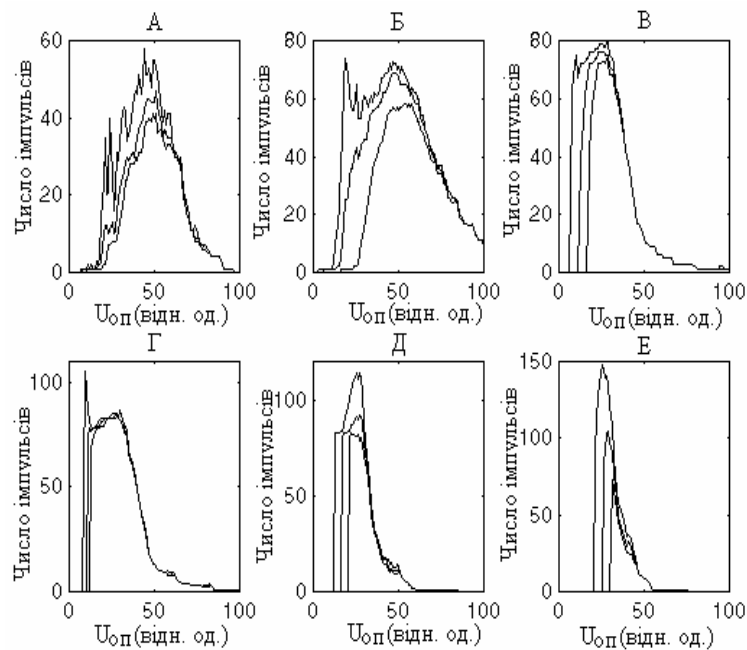


Рис. 4. Залежність кількості імпульсів від порога спрацювання компаратора для трьох значень гістерезису: А – $\lambda=0.001$; Б – $\lambda=0.003$; В – $\lambda=0.01$; Г – $\lambda=0.03$; Д – $\lambda=0.1$; Е – $\lambda=0.3$.

Отже, розроблено метод визначення вихідної напруги фотоелектронного помножувача залежно від сталої часу анодного навантаження за відомою інтенсивністю оптичного сигналу на вході. Застосування результатів, отриманих цим методом, дає змогу визначити оптимальні параметри електричної схеми під час реєстрації імпульсних оптичних сигналів.

1. Банников В.С., Безручко С.М. Приборы контроля содержания частиц в жидкостях, применяемых при производстве ИС // Электронная промышленность. 1986. Вып. 7. С. 46–49.
2. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 664 с.

3. Одноэлектронные фотоприемники / С.С. Ветохин, И.Р. Гулаков, А.Н. Перцев, И.В. Резников. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
4. Пароль И.В., Кайдалов С.А. Фоточувствительные приборы и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 112 с.
5. Kerker M. Light scattering instrumentation for aerosol studies: An historical overview// Aerosol Sci. and Technol. 1997. Vol. 27. P. 522–540.
6. Ishicava M., Kanebako M., Akiyama K., Asakura T. Detection of nano-size particles in water using the photon counting method// Optik. 1990. Vol. 84. N 2. P. 59–63.

**INFLUENCE OF CONSTANT TIME OF ANODIC LOADING OF THE
PHOTOELECTRONIC MULTIPLIER ON REGISTRATION OF PULSE
OPTICAL SIGNALS**

V. Getman

*Ivan Franko National University of Lviv
Universytetska str.,1, Lviv, 790000, Ukraine*

The method of definition of the form of a target signal of the photoelectronic multiplier is developed at a known entrance optical signal. The existence of optimum constant time of loading of the photoelectronic multiplier is established at registration of pulse optical signals.

Key words: photoelectronic multiplier, one-electronic pulse, Poisson process.

Стаття надійшла до редколегії 03.01.2004
Прийнята до друку 01.06.2004