

## АНАЛІЗ ПОРОГОВОЇ ЧУТЛИВОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ВИМІРЮВАЧА ОБСЯГУ ПСЕВДОАКОМОДАЦІЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОКА

*Показано, що процес вимірювання обсягу псевдоакомодації пресбіопічного ока, методом фотоелектричного аналізу тривимірного повітряного зображення світлової мікроплями на сітківці ока, супроводжується негативним впливом багатьох чинників. Головними серед них є власний фотоелектричний шум приймача випромінювання та негативний вплив спеклової структури лазерного випромінювання. Проаналізовано вплив даних чинників на результат вимірювання, отримано математичні вирази для визначення світлового центру ваги мікроплями, та запропоновано метод руйнування спекул лазерного випромінювання.*

*Ключові слова: об'єктивне вимірювання обсягу псевдоакомодації, оптико-електронний вимірювач.*

O.O. HOLEMBOVSKYI

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

### ANALYSIS OF THE THRESHOLD SENSITIVITY OPTO-ELECTRONIC METER OF VOLUME PSEUDOACCOMMODATION OPTICAL SYSTEM OF THE EYE

*It is shown that the process of measuring the volume of pseudoaccommodation of presbyopic eye by photoelectric analysis three-dimensional air image of light microspot on the retina, accompanied by the negative impact of many factors. Chief among them has a photoelectric detector noise and the negative impact speckle structure of laser radiation. The influence of these factors on the measurement result obtained mathematical expressions to determine the center of gravity microspot light, and the method of laser speckle destruction.*

*The key words: eye, accommodation, pseudoaccommodation, device.*

#### Вступ

З віком око людини втрачає свої акомодативні властивості та стає пресбіопічним, що є наслідком зменшення еластичності м'язів кришталика, або його заміни на штучний. В такому випадку втрачається можливість чітко розрізняти предмети, що знаходяться на різних відстанях від ока. Це викликає певний фізичний дискомфорт, переважно очей та змушує використовувати декілька пар окулярів. З подібною проблемою стикаються пацієнти з імплантованим штучним кришталиком (інтраокулярною лінзою). Однак дослідження показали, що оку притаманний незначний обсяг акомодативності, навіть за відсутності кришталика (афакія). Це явище отримало назву обсягу псевдоакомодації. Природа цього явища пояснюється наявністю двох складових у звичайного обсягу акомодативності. Перша складова – це геометричні параметри фокусної області ока, її видовженість вздовж оптичної осі внаслідок дифракції світлових променів на краях зіниці ока, друга – пов'язана з роботою нейроапарату головного мозку. Наявність псевдоакомодації пояснюють саме довжиною фокусної області (ДФО) оптичної системи ока [1]. Дослідженню параметрів фокусної області була приділена велика увага зі сторони лікарів-офтальмологів як в Україні, так і за її межами. Важливість даних ДФО ока полягає в тому, що маючи більш точну інформацію про стан оптичної системи ока пацієнта, лікар офтальмохірург може більш точно здійснити підбір інтраокулярної лінзи і тим самим позбавити пацієнта від необхідності використання ним окулярів після її імплантації.

На сьогоднішній день відомі суб'єктивні та об'єктивні методи дослідження обсягу псевдоакомодації ОС ока [1]. Автором запропонований об'єктивний метод визначення обсягу псевдоакомодації ока через аналіз розподілу освітленості тривимірного «повітряного» зображення світлової мікроплями, сформованого оптичною системою ока в зворотному ході променів [2,3]. В попередніх дослідженнях детально розглянуто метод та апаратний засіб вимірювання обсягу псевдоакомодації пресбіопічного ока, вказано на його переваги та недоліки [4]. Однак на сьогоднішній день відсутні експериментальні дані про порогову чутливість вимірювача та не здійснена оцінка потенційної можливості здійснення ним вимірювань обсягу псевдоакомодації.

**Метою** даної публікації є попередня оцінка порогової чутливості даного вимірювача, та експериментальне дослідження рівня корисного сигналу на фотоприймачі зображення, на фоні спекул лазерного випромінювання, полисків від компонентів системи, негативних засвіток та власного електронного шуму фотоприймача.

**Задачею** даної публікації є отримання експериментальних даних про середнє значення та СКВ шумового фотоелектричного сигналу при різних значеннях рівномірної освітленості фоточутливого шару приймача, отримання експериментальних даних про точність визначення світлового центру ваги мікроплями на сітківці ока, аналізуючи її повітряне зображення на фотоприймачі. Визначити вплив похибки визначення «центру ваги» на точність визначення мінімуму функції  $RMS(\Phi)$ . Отримати експериментальні дані про вплив спекул лазерного випромінювання на точність визначення світлового центру ваги мікроплями на фотоприймачі зображень, оцінити їх вплив, та порівняти із впливом власного фотоелектричного шуму приймача. Розглянути можливі методи зменшення шкідливого впливу спекул лазерного випромінювання.

**Метод вирішення поставленої задачі**

Метод даного дослідження полягає в статистичній обробці даних розподілу фонові освітленості в зображенні кадру розміром 840 на 600 пікселів, отриманні гістограми розподілу побітової освітленості в кожному пікселі (кількість пікселів з інтенсивністю від 1 до 255 біт), отримання графіка функціональної залежності СКВ виміряних значень від наявної освітленості фотоприймача зображень.

На рис. 1 зображено отриману апроксимуючу криву по результатам вимірювання СКВ кадрів. Отриманий графік СКВ показує лінійну залежність СКВ від рівня освітленості фотоприймача, та нормальний розподіл шуму на фотоприймача(згідно отриманих гістограм фотознімків). Отримані дані розподілу випадкового шумового сигналу фотоприймача дають потенційну можливість розрахувати його вплив на точність визначення координат світлового центру ваги мікроплями, які в свою чергу використовуються для подальшого розрахунку полярного, осьових та відцентрового моменту інерції мікроплями та розрахунку її  $RMS$ .

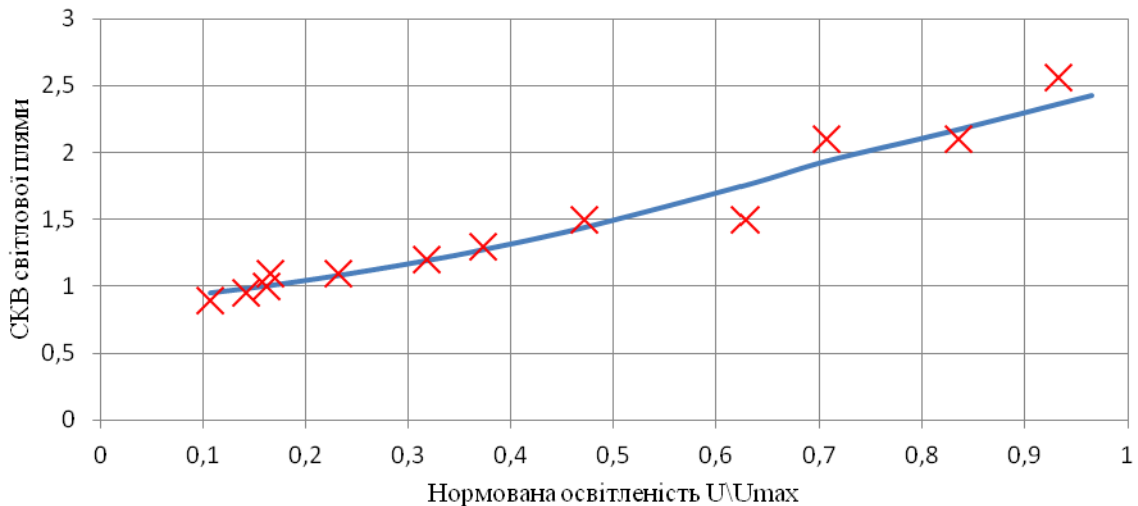


Рис. 1 Графік залежності СКВ випадкового шумового сигналу

Розрахунок  $RMS_r(\Phi_k)$ , з використанням електричних сигналів від кожного пікселя багатоелементної фотоприймальної матриці відеокамери, здійснюються за формулою:

$$RMS_r(\Phi_k) = \sqrt{\frac{\sum_{ij} (\bar{U}_{ij} + \delta U_{ij})(x_i^2 + y_j^2)}{\sum_{ij} (\bar{U}_{ij} + \delta U_{ij})}}, \quad (1)$$

де  $\bar{U}_{ij}$  – середнє значення електричного сигналу, зчитаного декілька раз з пікселя, що знаходиться у стовпчику з номером  $i$  вздовж осі  $OX$  та у рядку з номером  $j$  вздовж осі  $OY$ ;

$\delta U_{ij}$  – випадкова шумова складова електричного сигналу  $U_{ij}$ ;

$x_i = X_i - x_c$  та  $y_j = Y_j - y_c$  – координати вказаного пікселя відносно центру «ваги» всього масиву електричних сигналів, розраховані за формулами:

$$x_c = \frac{\sum_{ij} (\bar{U}_{ij} + \delta U_{ij}) X_i}{\sum_{ij} (\bar{U}_{ij} + \delta U_{ij})} \quad (2) \quad y_c = \frac{\sum_{ij} (\bar{U}_{ij} + \delta U_{ij}) Y_j}{\sum_{ij} (\bar{U}_{ij} + \delta U_{ij})}, \quad (3)$$

в яких  $X_i = \Delta_x i$ ,  $Y_j = \Delta_y j$  – координати центру пікселя з номером  $i, j$  відносно кута матриці, з якого починається відлік номерів пікселів, а  $\Delta_x$  та  $\Delta_y$  – відстані між центрами сусідніх пікселів вздовж осей  $OX$  та  $OY$  відповідно.

Формули (1) та (2), (3) свідчать про те, що електричний шум призводить як до похибок визначення координат центроїду  $[x_c, y_c]$ , так і до похибки визначення значень  $RMS_r(\Phi_k)$ . Дослідимо ці похибки.

**Похибки визначення координат центроїду**

Якщо у кожному пікселі сигнал  $U_{ij} = \bar{U}_{ij} + \delta U_{ij}$ , то тоді згідно (2) та (3):

$$x_c = \frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} X_i + \sum_{ij} \delta U_{ij} X_i}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} + \sum_{ij} \delta U_{ij}}, \quad (4) \quad y_c = \frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} Y_j + \sum_{ij} \delta U_{ij} Y_j}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} + \sum_{ij} \delta U_{ij}} \quad (5).$$

Знаменник у виразах (4), (5) можна представити у вигляді:

$$\frac{1}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} + \sum_{ij} \delta U_{ij}} = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} (1 + \frac{\sum_{ij} \delta U_{ij}}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}})} \cong \frac{1}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} (1 - \frac{\sum_{ij} \delta U_{ij}}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}}) \quad (6)$$

на тій основі, що значення  $\frac{\sum_{ij} \delta U_{ij}}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} \ll 1$ . Після підстановки (6) у (4) отримуємо вираз:

$$x_c = \frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} X_i}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} + \frac{\sum_{ij} \delta U_{ij} X_i}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} - \frac{(\sum_{ij} \bar{U}_{ij} X_i)(\sum_{ij} (\delta U_{ij}))}{(\sum_{ij} \bar{U}_{ij})^2} - \frac{(\sum_{ij} \delta U_{ij} X_i)(\sum_{ij} (\delta U_{ij}))}{(\sum_{ij} \bar{U}_{ij})^2}.$$

У правій частині цього виразу перший доданок – середнє значення координати  $x_c$ , а сума інших додатків – випадкова складова значення цієї координати, тобто похибка її визначення. Проте третій та четвертий додатки за величиною є набагато менші ніж другий, а тому ними за ради спрощення виразу доцільно знехтувати. В результаті похибку визначення координати  $x_c$  можна розраховувати за формулою:

$$\delta x_c \cong \frac{\sum_{ij} \delta U_{ij} X_i}{\bar{U}_\Sigma}, \quad (7)$$

де  $\bar{U}_\Sigma = \sum_{ij} \bar{U}_{ij}$ . Аналогічно отримуємо формулу розрахунку похибки визначення координати  $y_c$

$$\delta y_c \cong \frac{\sum_{ij} \delta U_{ij} Y_j}{\bar{U}_\Sigma}. \quad (8)$$

#### Вплив похибок визначення координат центроїду на величину $RMS_r$

Якщо координати центроїду визначені з похибками  $\delta x_c$ ,  $\delta y_c$ , то згідно виразу (1)

$$RMS_r = \sqrt{\frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} [(x_i + \delta x_c)^2 + (y_j + \delta y_c)^2]}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}}} = \sqrt{\frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} (x_i^2 + y_j^2)}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} + 2\delta x_c \frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} x_i}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} + 2\delta y_c \frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} y_j}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} + \delta x_c^2 + \delta y_c^2}. \quad (9)$$

У зв'язку з тим, що у виразі (9)  $x_i$  та  $y_j$  координати пікселя з номером  $[i, j]$  відносно центроїда,

то суми  $\sum_{ij} \bar{U}_{ij} x_i = 0$  і  $\sum_{ij} \bar{U}_{ij} y_j = 0$ , а перший доданок  $\frac{\sum_{ij} \bar{U}_{ij} (x_i^2 + y_j^2)}{\sum_{ij} \bar{U}_{ij}} = \overline{RMS_r^2}$  – середнє

значення  $RMS_r$ , то у кінцевому результаті отримуємо:

$$RMS_r = \sqrt{\overline{RMS_r}^2 + \delta x_c^2 + \delta y_c^2} \quad (10)$$

Вираз (10) свідчить про те, що похибки визначення координат центроїду неодмінно збільшують значення  $RMS_r$  відносно його середнього значення.

**Дослідження впливу спеклів лазерного випромінювання на точність визначення світлового центру ваги мікроплями на фотоприймачі**

Як відомо на процес формування світлової мікроплями на фотоприймачі та визначення її світлового центру ваги значний негативний вплив чинять полиски від робочих поверхонь компонентів системи та спекли від використання когерентного джерела випромінювання – лазера. Важливою задачею є визначення впливу спеклів на формування мікроплями та визначення залежності її СКВ та RMS від спеклів, зумовлених використанням лазерного джерела випромінювання.

**Методика експерименту:**

Метод даного дослідження полягає в отриманні серії знімків світлової мікроплями (мікрофотометрії) з фотоприймача зображень з отриманням їх профілограф, за умови відсутності панкратичного елемента (варіолінзи) із застосуванням методу «руйнування» спеклів. Метод полягає в застосуванні додаткового елемента системи – плоско паралельної пластини, що обертається навколо своєї осі з певною швидкістю  $V$ . Пластина обертається за допомогою крокового двигуна з можливістю зміни швидкості обертання.

По результатам отриманих знімків методом статистичної обробки даних здійснюється визначення СКВ світлової мікроплями, визначається її RMS та положення центроїду.

Умови проведення експерименту.

- Розмір кадру: 800×600 пікселів
- Час накопичення сигналу: 5000мкс, 10000 мкс
- Максимальний рівень сигналу 250 одиниць з 255 можливих
- Вибірка 1, 10,20...100
- Поріг відсікання шумового сигналу 70.

В таблиці 1 приведено зовнішній вигляд знімків із застосуванням профілограми їх поперечного перетину.

Таблиця 1

| Час накоп. мкс | $U_{max}$ | $U_{\Sigma}$ | Обертання | Профіль кадру |
|----------------|-----------|--------------|-----------|---------------|
| 1              | 2         | 3            | 4         | 5             |
| 5000           | 216       | 382558       | Відсутнє  |               |
| 5000           | 96        | 130245       | Присутнє  |               |

| 1     | 2   | 3      | 4        | 5 |
|-------|-----|--------|----------|---|
| 10000 | 213 | 371019 | Відсутнє |   |
| 10000 | 96  | 111955 | Присутнє |   |

Отримані дані профілограм (див табл.1) свідчать про збільшення рівномірності поверхні гаусоїди освітленості в плямі від лазера, за умови використання в якості елемента руйнування обертаючої пластини. При збільшенні швидкості обертання – рівномірність кривої збільшується і відповідно збільшується середнє значення RMS.

#### Висновки

Отриманий графік СКВ показує його лінійну залежність від рівня освітленості фотоприймача, та нормальний розподіл шуму на фотоприймачі.

Точність визначення світлового центру координат мікроплями на фотоприймачі лежить в межах допустимої похибки визначення та суттєво не впливає на достовірність отриманих вихідних даних.

Показано, що значний вплив на точність визначення мінімум RMS чинить негативний вплив спеклів лазерного випромінювання та запропоновано метод їх руйнування. Застосування такого методу дає змогу зменшити вплив спеклів та підвищити точність вимірювання.

Проведені дослідження показують принципову можливість здійснення вимірювань довжини фокусної області ока та його первинних аберацій запропонованим методом та відповідним апаратним засобом.

Запропонований метод «руйнування» спеклів від лазерного випромінювання дає змогу отримати рівномірну освітленість фотоприймача та підвищити точність визначення RMS світлової мікроплями.

#### Література

1. Сергиенко Н.М. Глубина фокуса в псевдофакических глазах / Н.М. Сергиенко, Ю.Н. Кондратенко, Н.Н. Тутченко // Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. -2008. - №11. – С.1623-1627.
2. Чиж І.Г. Метод і пристрій для аналізу фокусної області ока людини / І.Г. Чиж, О.О. Голембовський // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2013. – № 2. – С. 140-146.
3. Пат. України на корисну модель № 74751 Офтальмологічний рефрактометр. Чиж І.Г., Голембовський О.О., Шиша Т.О. Опуб. Бюл. № 1 від 26.11.2012. – 2012. – 5С.
4. Чиж І.Г. Метод визначення аметропії та довжини фокусної області ока людини / І.Г. Чиж, О.О. Голембовський // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2014. – № 1. – С. 93–99.

#### References

1. Sergienko N.M., Kondratenko Y.N., Tutchenko N.N. Glubina fokusa v psevdofakicheskikh glazah / N.M. Sergienko, Y.N. Kondratenko, N.N. Tutchenko // Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. -2008. - №11. – С.1623-1627.
2. Chizh I.G., Holembovskiy O.O. Metod i pristryi dlia analyzy fokusnoi oblasti oka lydunu, Naukovi visti NTUU "KPI". 2013. – № 2. – С. 140-146.
3. Chizh I.G., Holembovskiy O.O. Shisha T.O.. Oftalmologichniy refractometr // Patent Ukrainu na korusny model, № 74751, Опуб. Бюл. № 1 від 26.11.2012. – 2012. – 5С.
4. Chizh I.G., Holembovskiy O.O. Metod vuznacheniya ametropii ta dovjinu fokusnoi oblasti oka lydunu // Naukovi visti NTUU "KPI". 2014. – № 1. – С. 93–99.