

Тимків П. О., Демчук Л. Б., Забитівський В. П.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
Україна, Тернопіль

ЕЛЕКТРОРЕТИНОГРАФІЧНИЙ ФОТОСТИМУЛЯТОР: ПРОБЛЕМИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ, ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Розвиток елементної бази спонукає до розвитку і вдосконалення засобів для активних біомедичних дослідженнях (наприклад, у електроретинографії). Виникнення і широке розповсюдження світлодіодів призводить до проблеми адекватного застосування світлодіодних фотостимуляторів у електроретинографії. Згідно стандартів ISCEV, для електроретинографії застосовують фотостимулятори на основі газорозрядних ксенонових ламп. При використанні світлодіодів у електроретинографії в якості джерел світлового стимулу, необхідним є узгодження параметрів стимулу із стандарту ($\text{Кд} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$) з параметрами світлодіодів (лм, лк). Проведено співставлення та взаємне переведення параметрів фотостимуляторів на основі газорозрядних ламп та світлодіодів.

Ключові слова: електроретинографія, квантова електроретинографія фотостимулятор, стандарт ISCEV, Grass PS-22, Grass PS-33, світлодіод, LED.

Тымкив П.А., Демчук Л.Б., Забытивський В.П. Светодиодный фотостимулятор для электроретинографии: проблемы при применении, и пути их решения / Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Украина, Тернополь

Развитие элементной базы побуждает к развитию и совершенствованию средств для активных биомедицинских исследованиях (например, в электроретинографии). Возникновение и широкое распространение светодиодов приводит к проблеме адекватного применения светодиодных

фотостимуляторов в электроретинографии. Согласно стандартам ISCEV, для электроретинографии применяют фотостимуляторы на основе газоразрядных ксеноновых ламп. При использовании светодиодов в электроретинографии в качестве источников светового стимула, необходимо согласование параметров стимула из стандарта ($\text{Cd} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) с параметрами светодиодов (лм, лк). Проведено сопоставление и взаимное перевода параметров фотостимуляторов на основе газоразрядных ламп и светодиодов.

Ключевые слова: электроретинография, квантовая электроретинография фотостимулятор, стандарт ISCEV, Grass PS-22 Grass PS-33, светодиод, LED.

Tymkiv P.O., Demchuk L.B., Zabytivskyy V.P. LED phonics stimulator for electroretinography: problems in the application of, and solutions / Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuya, Ukraine, Ternopil

Development element base encourages the development and improvement of facilities for active biomedical research (eg, electroretinography). The emergence and widespread LED leads to the problem of adequate application of LED photonic stimulator in electroretinography. According to the standards ISCEV, used for electroretinography photostimulator based HID xenon lamps. When using LEDs in electroretinography as sources of light stimulus is necessary harmonization of the stimulus from the standard ($\text{Cd} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) with the parameters of LEDs (lumens, lux). A comparison and mutual translation parameter photostimulator based on gas discharge lamps and LEDs.

Keywords: electroretinography, quantum electroretinography photic stimulator, standard ISCEV, Grass PS-22 Grass PS-33, LED.

Вступ. Одним із негативних наслідків науково-технічного прогресу є вплив шкідливих речовин (токсинів) на здоров'я людини, при цьому особливо важливим є виявлення прихованої форми впливу токсинів. Тому виникає низка проблем щодо ідентифікації джерела інтоксикації, визначення міри заподіяної шкоди та наслідків впливу токсинів. [1].

На актуальність діагностики стану зорового аналізатора за відгуком сітківки ока людини на світловий спалах, вказували автори багатьох робіт

медичного спрямування, зокрема Шамшинова А.М., Волкова В.В., Богословський А.И., Бизов А.Л., Зіслина Н.Н., Миронова Е.М., Karpe G., Henkes H., Kato M., та ін. [2-6]. Також перспективним є використання електрофізіологічних методів (електроретинографії) при діагностуванні нейротоксикації [7]. Електроретинографія — це спосіб отримання електроретиносигналу, а електроретиносигнал (ЕРС) — зареєстрований, відібраний та опрацьований електричний потенціал сітківки ока, викликаний світловим подразненням, інтенсивність якого знаходиться в межах від $0,01 \text{ Кд} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ до $30 \text{ Кд} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ [8]. Розвиток елементної бази спонукає до розвитку і вдосконалення засобів для активних біомедичних дослідженнях (наприклад, у електроретинографії). Виникнення і широке розповсюдження світлодіодів призводить до проблеми адекватного застосування світлодіодних фотостимуляторів у електроретинографії. У стандартах ICSEV вказано параметри світлових стимулів для електроретинографічних досліджень. Проте, ці стандарти базуються на використанні газорозрядних ксенонових ламп (наприклад, Grass PS-22), тому і параметри світлового стимулу адаптовані під технічні особливості ламп. Оскільки світлодіоди використовувалися майже завжди для візуалізації, тому для співставлення параметрів світлового стимулу різних фотостимуляторів (стандартних, на основі газорозрядних ксенонових ламп, зокрема, для Grass PS-22, Grass PS-33, або ФС-03), та світлодіодних фотостимуляторів, необхідним є зведення їх до однакової системи світлотехнічних величини, наприклад, експозиції світлового стимулу ($\text{лк} \cdot \text{с}$).

Електроретинографію відносять до одного із найбільш ефективних та малоінвазивних методів діагностування стану організму людини і зорової системи зокрема [9]. Проте, даний метод не позбавлений і ряду недоліків, до яких відносять:

- 1) висока інтенсивність світлового подразнення, і як наслідок — більший час відновлення ока;
- 2) необхідність проведення декількох реєстрацій електроретинограм, що призводить до значної тривалості проведення процедури;

3) реєстрація залишкових потенціалів на сітківці, виникнення завад, шумів та артефактів спричинених специфікою проведення процедури.

З огляду на недоліки, в медичній практиці можливе застосування електроретинографії з наднизькою енергією світлового подразнення – квантової. Основними перевагами квантової електроретинографії є: рання діагностика зміни функціонального стану організму людини (зокрема при нейротоксикації), низька інтенсивність світлового подразнення (інтенсивність світлового спалаху знаходиться в межах від $10^{-3} \text{ Кд}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$ до $10^{-4} \text{ Кд}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$), і зменшення часу відновлення ока, що скорочує тривалість проведення процедури [10-12].

Для виникнення мінімальної реакції клітин сітківки (паличок) на світлове подразнення необхідно подіяти обмеженою кількістю квантів світла: від 54 до 148. Проте, як виявилось, самої сітківки досягає значно менше число квантів світла: від 5 до 14. Це пояснюється значними втратами при проходженні світла через оптичні середовища ока [11].

Для отримання ЕРС, а також квантового ЕРС (КЕРС), при зменшеній енергії світлового подразнення ока людини на світловий спалах, використовують електрод-присоску по типу присоски Ярбуса (Burian-Allen electrode). При визначенні світлового стимулу будемо враховувати те, що стандартний фотостимулятор (згідно стандарту ISCEV ксенонова газорозрядна лампа типу Grass PS-22, Grass PS-33, або фотостимулятор ФС-03) є джерелом ахроматичного випромінювання.

Також, і світлодіодний фотостимулятор не є джерелом монохроматичного випромінювання. Для оцінювання впливу стимулятора на сітківку потрібно визначити параметри світлового стимулу на рівні рогівки ока з достатньою точністю, тому, що світловий вплив стимулу залежить не від того, що випромінює стимулятор, а від світлового потоку, який досягає сітківки ока. Присоска рухається разом з оком, світловий стимул фіксовано відносно сітківки (розміщується на оптичній осі, тобто є колімованим) і попадає завжди в макулярну область. Таким чином забезпечується відтворення світлової

стимуляції одного і того ж місця сітківки з певним просторовим кутом 12° - 15° . Світлодіод створює світлові стимули, енергія (експозиція) яких регулюється амплітудою і тривалістю імпульсів струму.

Використання світлодіода в якості фото стимулятора має ряд особливостей. Основне призначення світлодіодів – це використання їх для візуального відображення інформації. Тому застосування їх в якості джерел світлового випромінювання є складною метрологічною проблемою. Важливою характеристикою світлодіода, як джерела світла, є характеристика яскравості

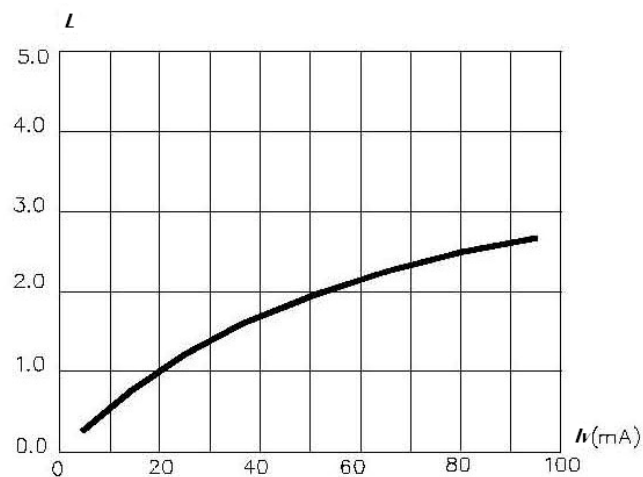


Рис.1. Характеристика світлодіода на прикладі LED SMD 3528 (white)

тут, L – яскравість, I_v – струм через світлодіод.

Під час дослідження та порівняння результатів виникає необхідність в об'єктивному оцінюванні параметрів світлового стимулу при подразненні обладнанням для стандартної електроретинографії (згідно стандарту ISCEV Grass PS-33, або ФС-03) та при подразненні для квантової електроретинографії – світлодіодних фотостимуляторів.

Для визначення світлових характеристик світлового стимулу була спроектована установка, що складається з наступних вузлів.

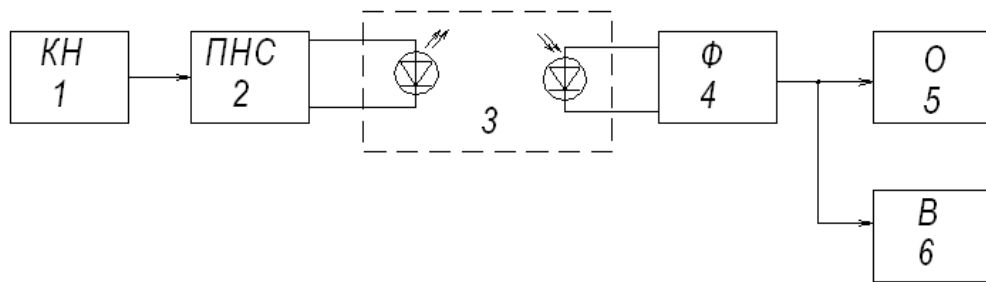


Рис. 2. Схема вимірювання фото величин: 1 – калібратор напруги В1-12, (КН); 2 – перетворювач «напруга-струм», (ПНС); 3 – оптопара з відкритим оптичним каналом; 4 – фотометр, (Ф); 5 – осцилограф, (О); 6 – цифровий вольтметр В7-34А (В) (зокрема, для статичних вимірювань)

Калібратор напруги дозволяє отримати калібровану напругу, що подається на вхід перетворювача «напруга-струм» (ПНС), де перетворюється у струм. Використання калібратора напруги дає можливість отримати повторюваність результатів вихідних напруг установки, оскільки прилад має дискретне регулювання вихідних напруг.

Перетворювач «напруга-струм» (ПНС) перетворює напругу, яка знімається з калібратора, в струм, пропорційний напрузі. Перетворювач має крутизну перетворення 1В/10мА. Оптопара з відкритим оптичним каналом призначена перетворювати світлове випромінювання світлодіода-стимулятора в електричний сигнал. Випромінювачем оптопари є світлодіод, встановлений в електроді-присосці, а приймачем – фотодіод.

Фотодіод розташовується конструктивно на відстані 8 мм по оптичній осі від світлодіода-стимулятора. Це, приблизно, рівне відстані від фотостимулятора до роگیлки при квантовій електроретинографії. В якості фотоприймача було використано фотодіод тому, що фотоелектронні системи на базі фотодіодів мають високу точність, широкий динамічний діапазон, велику швидкодію і високу стабільність параметрів.

Типова спектральна характеристика кремнієвого фотодіода має максимум в області 800...900 нм, тобто в інфрачервоній області. Вона не співпадає із спектральною характеристикою ока.

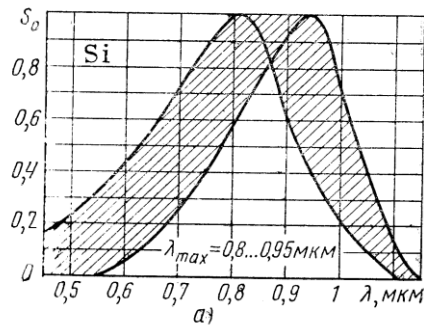


Рис.3. Спектральна характеристика кремнієвих фотодіодів

Тому необхідне коригування спектральної характеристики.

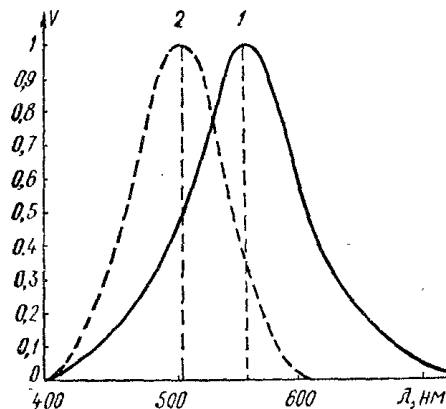


Рис.4. Крива спектральної чутливості ока людини [15]: 1 - для фотопічної системи ока; 2 - для скотопічної системи ока

При проведенні експерименту, фотодіод включений на вході фотометра в режимі короткого замикання. В цьому режимі роботи фотодіоди мають високу лінійність у широкому діапазоні (від 10^{-12} ... 10^{-6} лм), інерційність в цьому режимі становить (10^{-7} ... 10^{-6}) с, тобто швидкодії достатньо для вимірювання світлового стимулу тривалістю $15 \cdot 10^{-3}$ с.

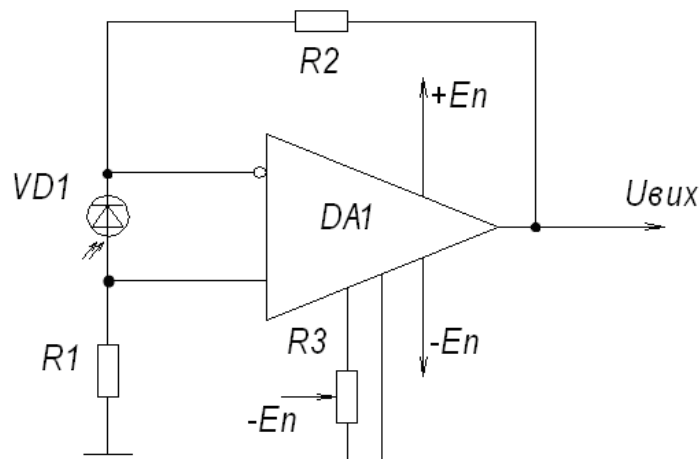


Рис. 5. Схема підключення фотодіода

На рис.5 представлена схема фотопідсилювача, в якій фотодіод VD1 працює в режимі короткого замикання (фотогальванічний режим). В цьому режимі через фотодіод проходить фотострум, що строго пропорційний світловому потоку.

$$I_{\phi} = S_{vd} \cdot \Phi, \quad (1)$$

де, I_{ϕ} – фотострум; S_{vd} – інтегральна чутливість по струму, мА/лм (коефіцієнт перетворення фотодіода); Φ – світловий потік, лм, падаючий на фотодіод.

Вимірювання проводились наступним чином. Фотостимулятор вставляється в гніздо оптопари з відкритим оптичним каналом і проводиться вимірювання вихідної напруги фотометра. Обчислення проводиться для декількох значень струму фотодіода. Після цього виконується розрахунок світлотехнічних даних за наведеними вище рівняннями. Маючи характеристики можна порівняти дані різних фотостимуляторів.

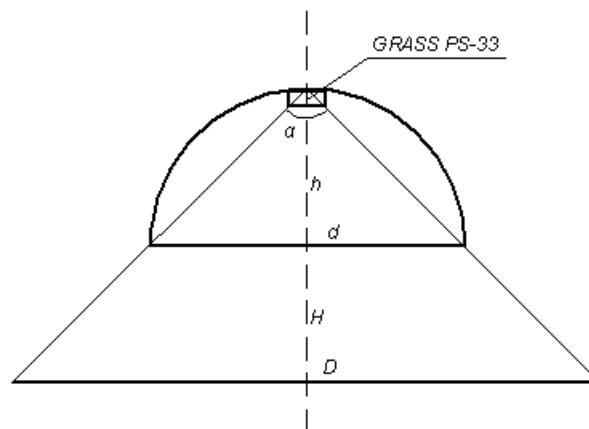


Рис.6. Схема розповсюдження світлового стимулу при використанні фотостимулятора Grass PS-33

Згідно паспортних даних, фото стимулятор GRASS PS-33 регулюється 5 позиціями енергії світлового спалаху (1,2,4,8,16), позиції 16 (max) відповідає 1,44 Дж, або $22 \frac{\text{лм} \cdot \text{с}}{\text{фут}^2}$ [16].

Оскільки 1 фут = 0.3048 м, то

$$22 \frac{\text{лм} \cdot \text{с}}{\text{фут}^2} = 236 \frac{\text{лм} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 236 \text{ лк} \cdot \text{с}, \text{ при відстані 1 м.}$$

Враховуючи геометричні параметри фотостимулятора (його діаметр та глибину розміщення ксенонової лампи), визначимо просторовий кут розсіювання світлового проміння:

$$\Omega = 2\pi\left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}}\right) \approx 2 \text{ ст.рад}$$

Цьому просторовому Ω , відповідає $\alpha = 95^\circ$.

Обчислимо відповідність освітленості інтегральній яскравості ($I, \text{Кд}$).

Оскільки $1 \text{ Кд} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ ст.рад}}$, то при куті $\Omega = 2 \text{ ст.рад}$,

$$236 \frac{\text{лм} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 118 \frac{\text{Кд} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \text{ (позиція max 16)}$$

$$30 \frac{\text{Кд} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \approx 59 \text{ лк} \cdot \text{с}$$

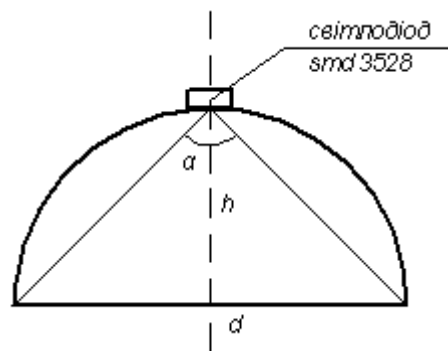


Рис. 7. Електрод-присоска по типу електроду Ярбруса (Burian-Allen electrode)

При застосуванні світлодіодного фотостимулятора, для зменшення енергії впливу (при подальшому використанні, наприклад, у квантовій електроретинографії (КЕРГ)), живлення світлодіода проводилось в режимі ШІМ-модуляції. Згідно паспорту для світлодіода властиві такі параметри: $I_k = 4 - 7 \text{ Кд}$, при $I_c = 20 \text{ мА}$. Типове значення згідно паспорту складає $I_{\text{тип}(5\text{Кд})} = 5 \text{ Кд}$, при $I_c = 20 \text{ мА}$ [17].

Залежність між силою світла та силою струму живлення світло діода згідно паспорту є лінійною, тому побудуємо таблицю для відповідності струму та сили світла (значення I_c отримано експериментально).

$$I_k = \frac{I_c}{I_{20\text{мА}}} \cdot I_{\text{тип}(5\text{Кд})}, \quad (19)$$

**Відповідність електричних та світлотехнічних параметрів світлодіода на
прикладі LED SMD 3528**

ШІМ модуляція LED	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_c (мА)	0,47	1,02	2,73	5,06	7,88	10,92	13,79	16,75	19,98	22,85	23,49
I_k (Кд)	0,12	0,26	0,69	1,27	1,97	2,73	3,44	4,18	4,99	5,71	5,87

За означенням $1_{лм} = 1Кд \cdot ст.рад$, тому для світлодіода SMD 3528 прикріпленого до електроду (див. рис.8), просторовий кут Ω буде визначатися так:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \frac{\alpha}{2}), \quad (20)$$

Тут, α – половина площинного кута біля вершини трикутника (див. рис.8.).
Для світло діода SMD 3528 вмонтованого в електрод, $\alpha = 100^\circ$, тому

$$\Omega_{100} = 2\pi(1 - \cos \frac{100}{2}) = 2,24 \text{ ст.рад}$$

Світловий потік Φ світло діода SMD 3528

$$\Phi = I_k \cdot \Omega, \quad (21)$$

Таблиця 2

Результати визначення світлового потоку LED SMD 3528

ШІМ модуляція LED	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_k (Кд)	0,12	0,26	0,69	1,27	1,97	2,73	3,44	4,18	4,99	5,71	5,87
Φ (лм)	0,27	0,58	1,54	2,84	4,41	6,11	7,70	9,36	11,17	12,79	13,14

Оскільки поле, яке освітлює світлодіод, складає діаметр електроду, то для обчислення освітленості використаємо площу поперечного перерізу електроду

$$S_{a\ddot{e}} = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (22)$$

Тут, d – діаметр поперечного перерізу електроду, $d = 20$ мм.

$$S_{ei} = \frac{\pi 20^2}{4} = 314 \text{ мм}^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Освітленість E світлової плями при використанні світлодіода визначається з формули:

$$E(\text{лк}) = \frac{\Phi(\text{лм})}{S(\text{м}^2)}, \quad (23)$$

Таблиця 3

Визначення освітленості при стимулюванні світло діодом LED SMD 3528

ШИМ модуляція LED	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Phi(\text{лм})$	0,27	0,58	1,54	2,84	4,41	6,11	7,70	9,36	11,17	12,79	13,14
$E(\text{лк})$	859	1847	4904	9044	14044	27276	24522	29808	35573	40732	41847

Визначаємо експозицію H ($\text{лк} \cdot \text{с}$) світлового стимулу. Оскільки живлення світлодіода, проводилось в режимі ШИМ-модуляції, тому енергія світлового стимулу буде відповідати часу протікання струму через світло діод, тому при визначенні експозиції, врахуємо шпаруватість ($D, \%$).

$$H = E \cdot t \cdot D, \quad (24)$$

Таблиця 4

Визначення експозиції світлового стимулу при застосуванні ШИМ-модуляції живлення

ШИМ модуляція LED	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E(\text{лк})$	859	1847	4904	9044	14044	27276	24522	29808	35573	40732	41847
$t_i(\text{мс})$	—	2,83	5,03	6,93	—	10,6	—	—	—	—	16,60
$D, \%$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	97
$H(\text{лк} \cdot \text{с})$	—	0,522	4,933	18,802	—	144,56	—	—	—	—	673,82

Висновки. Наведенні дослідження дають змогу забезпечити порівняння та узгодження світлотехнічних характеристик класичних фотостимуляторів (ксенонові газорозрядні лампи) та фотостимуляторів побудованих на основі світлодіодів, і привести показники енергії світлового стимулу до величини експозиції $\text{лк} \cdot \text{с}$. Це, в свою чергу, уможливило використання різні фото

стимуляторів, проведення порівняння і співставлення отриманих результатів електроретинографічних досліджень.

Для зменшення світлового подразнення у квантовій електроретинографії, створено дослідний макет для ШІМ-модуляції живлення сітлодіодного фотостимулятора. Це дало змогу знизити рівень світлового подразнення до $0,522 \text{ лк} \cdot \text{с}$, в порівнянні з стандартним подразнення електроретинографії (Grass PS-33) – $59 \text{ лк} \cdot \text{с}$.

Література:

1. Ткачук Р.А. Оптимізація ретинографічної системи для виявлення прихованого біологічного впливу на організм людини / Р.А. Ткачук // Принципові концепції та структурування різних рівнів освіти з оптико-електронних інформаційно-енергетичних технологій. – 2009. – С. 145 – 152.

2. Бызов А.Л. Электрофизиологические исследования сетчатки / А.Л. Бызов – М.: Наука, 1966 – 194 с.

3. Богословский А.И. Приборы для электрофизиологических исследований зрительного анализатора / А.И. Богословский, В. Жданов. – М.: Машиностроение, 1971. – 37с.

4. Волков В.В. Функциональные методы исследования в офтальмологии / В.В. Волков, А.М. Шамшинова. – М.: Медицина, 1999. – 416 с.

5. Зислина Н.Н. Физиологические основы и возможности использования зрительных вызванных потенциалов в дифференциальной диагностике глазных болезней / Н.Н. Зислина, А.М. Шамшинова // Клиническая физиология зрения: сб. науч. тр. – М.: Русомед. 1993. – С. 146-157.

6. Шамшинова А.М. Функциональные методы исследование в офтальмологии / А.М. Шамшинова, В.В. Волков. – М.: Медицина, 1999. – 416с.

7. Environmental Health Criteria 223. Neurotoxicity Risk Assessment For Human Health: Principles And Approaches [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: – <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc223.htm>

8. ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography [Текст]: [міжнародний стандарт: офіц.текст: за станом на 24 жовтня 2008 року]. – Springer-Verlag, 2008. – 9 с. – DOI 10.1007/s10633-008-9155-4.

9. Ткачук Р. А. Метод побудови оптимальної обробки електроретиносигналу та оцінювання вірогідності її результату / Р.А. Ткачук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – 156 – 162.

10. Ткачук Р. А. Устройство возбуждения сетчатки глаза для фотонной электроретинографии / Р.А.Ткачук, Б.И. Яворский // 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — 2010. – С. 128 – 133.

11. Hecht S. Energy, Quanta and Vision / S. Hecht // Journal of General Physiology. – 1942, July 20. P. 819 – 840.

12. D. Finkelstein. Human electroretinogram near the absolute threshold of vision / Finkelstein D., Gouras P., Hoff M. – Investigative Ophthalmology. – 1963, April. – Volume 7. – Number 2.– P. 214-218.

13. Visual stimulator [Електронний ресурс]. – Режим доступу: – <http://www.grasstechnologies.com/products/stimulators/stimps33plusfilter.html>

14. Фотостимулятор ФС-03 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: – <http://mmt-zp.prom.ua/p27651178-fotostimulyator.html>

15. Гурьев Д.С. Справочник по фотографии (светотехника и материалы) / Д.С. Гурьев. – К.: Техніка, 1986. – 368 с.

16. Harding Graham F.A. Photosensitive Epilepsy / Graham F.A. Harding, Peter M. Jeavons. – Cambridge University Press, 1994. – 182 p.

17. 3528 SMD LED [Електронний ресурс]. – Режим доступу: – <http://www.wayjun.com/Datasheet/Led/3528%20SMD%20LED.pdf>

References:

1. Tkachuk, R. Optimizatsija retynohrafichnoyi system dlja identifikatsii pryhovanoho biologichnoho vplyvu na organism ljydy (Optimization of retinography system to identify hidden biological effects on the human body)/ R.A.

Tkachuk // Fundamental concepts and structuring the different educational levels of optoelectronic information and energy technologies. - 2009. - S. 145 - 152.

2. Byzov A.L. Electrophysiologicheskie issledovania setchatky (Electrophysiological studies of retina)/ A.L. Byzov – Moscow: Nauka, 1966 – 194p.

3. Bohoslovskiy A.I. Pribory dlja electrophiziologicheskikh issledovaniy zritelnoho analizatora (Of research instrumentation for electrophysiological visual analyzer) / A.I Bohoslovskiy, V. Zhdanov. - Moscow: Mashinostroenie, 1971. - 37C .

4. Volkov V.V. Funktsionalnie metody issledovaniya v ophtalmologii (Functional methods in the study ophthalmology)/ V. Volkov, A.N. Shamshynova. – Moscow: Medicine , 1999. – 416 p.

5. Zyslyna N.N. Fiziologicheskie osnovy i vozmozhnosti ispolzovania zritelnyh vyzvanuh potentsialov v differentsialnoy diahnostike hlaznyh bolezney (Physiology bases and abilities using visual evoked potential in diagnosis diseases) / N. Zyslyna, A.M. Shymshynova / / Clinical physiology of view : Sat. scientific. tr. - Moscow: Rusomed. , 1993. - P. 146-157 .

6. Shamshynova A.M. Funktsionalnye metody issledovaniya v ophthalmologii (Functional Methods in Exploration ophthalmology) / A. Shamshynova, V. Wolves. – Moscow: Medicine , 1999. – 416p.

7. Environmental Health Criteria 223. Neurotoxicity Risk Assessment For Human Health: Principles And Approaches [Electron. resource]. – Mode of access: – <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc223.htm>

8. ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography [Text] [International Standard ofits.tekst: as of October 24, 2008]. – Springer-Verlag, 2008. – 9 p. – DOI 10.1007/s10633-008-9155-4.

9. Tkachuk R.A. Metod pobudovy optymalnoi obrobky elektoretinosygnaly ta otsinnyvannja virogidnosti ii rezultatu (Method of constructing optimal processing electroretinosignal and estimate of its results)/ R.A. Tkachuk // Measuring and computing in industrial processes. – 2008. - № 2. – P.156 - 162.

10. Tkachuk R.A. Ustroistvo vzbuzhdenia setchatki hlaza dlja fotonnoy electrpretinografyy (Device excitation retina eye for photon electroretinography) /

R.A.Tkachuk, B.I. Yavorsky // 20-th International Conference "Microwave Technology and telekommunikatsionnyye technology." – 2010. – P.128 - 133.

11. Hecht S. Energy, Quanta and Vision / S. Hecht // Journal of General Physiology. - 1942, July 20. P. 819- 840.

12. D. Finkelstein. Human electroretinogram near the absolute threshold of vision/ Finkelstein D., Gouras P., Hoff M. - Investigative Ophthalmology. - 1963 , April. - Volume 7. - Number 2. - P. 214-218.

13. Visual stimulator [electronic resource]. - Mode of access: - <http://www.grasstechnologies.com/products/stimulators/stimps33plusfilter.html>

14. Fotostymulyator FS-03 [electronic resource]. - Mode of access: - <http://mmt-zp.prom.ua/p27651178-fotostimulyator.html>

15. Hurlev D.S. Spravochnik po fotografiy (svetotehnyka i materialy)(Handbook Photos (light equipment and materials)) / D.S. Hurlev. – K. : Technology, 1986. – 368 p.

16. Harding Graham F.A. Photosensitive Epilepsy / Graham F.A. Harding, Peter M. Jeavons. - Cambridge University Press, 1994. - 182 p.

17. 3528 SMD LED [electronic resource]. – Mode of access: – [http://www.wayjun.com/Datasheet/Led/3528% 20SMD% 20LED.pdf](http://www.wayjun.com/Datasheet/Led/3528%20SMD%20LED.pdf)