

УДК 53.05, 617.735

Роман Ткачук, Богдан Яворський

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
м. Тернопіль, Україна*

КОНТРОЛЬ ЕНЕРГІЇ ТЕСТОВОГО ПОДРАЗНЕННЯ ПРИ КВАНТОВІЙ РЕТИНОГРАФІЇ

Застосування тестового подразнення сітківки ока експозицією світлом інтенсивністю I значно нижчою за стандартну (квантовою інтенсивністю) забезпечує кращу роздільну здатність електроретиносигналу (ЕРС), менший рівень інвазивності подразнення та більшу швидкодію ретинографічного дослідження [1-4]. Оскільки світлова хвиля U (електромагнітне випромінювання, ЕМВ) поширюється від джерела світла (ДС) через середовища ока (рогівки, передню камеру, кришталик, скловидне тіло), то за такої інтенсивності прояви дифракції, значне зменшення відношення енергії ЕРС до енергії шумів відбору його та іншого походження спричиняють необхідність контролю величини енергії $|U|^2$ світла на сітківці ока для виявлення наявності ЕРС у відібраній суміші його з шумами та доцільності оптимальної обробки цієї суміші, порівняння нових результатів ретинографії з результатами стандартними тощо.

При розробленні методу контролю величини енергії світла, яке попадає на сітківку при наднизькій інтенсивності тестового подразнення, поширення хвилі від ДС на основі принципу Гюйгенса-Френеля представлено інтерференцією хвиль від вторинних джерел — розв'язком феноменологічного хвильового рівняння (інтегралом Кірхгофа) як результат дифракції монохроматичної хвилі з частотою $\omega = 2\pi c/\lambda$ при поширенні її через зіницю з радіусом a на сітківці ока (на відстані r). На основі застосування теореми Гріна отримано вираз напруженості електричної складової поля в точці з координатою r

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{i}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \left([\vec{k}, [\vec{n}, \vec{E}_0]] - k\vec{E}_0 \right) \oint e^{-i(\vec{k}\vec{r}')} dS' = -\frac{i}{2\pi} \frac{\omega}{c} \vec{E}_0 \frac{e^{ikr}}{r} \oint e^{-i(\vec{k}\vec{r}')} dS', \quad (1)$$

де $\vec{k} = k\vec{r}/r$ — хвильовий вектор, \vec{E} — напруженість електричного поля, \vec{E}_0 — напруженість електричного поля ДС, S' — поверхня сітківки ока, $[\vec{n}, \vec{E}_0]$ — тангенціальна складова вектора \vec{E}_0 . З урахуванням граничних умов формула (1) набула вигляду

$$\vec{E} = -\frac{i}{2\pi} \frac{\omega}{c} \vec{E}_0 a^2 \frac{J_1(ak \sin \theta) e^{ikr}}{ak \sin \theta}, \quad (2)$$

де J_1 — функція Бесселя, $\left(\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \right)^m \{ x^{n+1} J_n(x) \} = x^{(n-m)+1} J_{n-m}(x)$.

Функцію U визначено методом ейконалу. Поле вважалось суперпозицією монохроматичних полів осциляторів Герца і припущено, що кут, під якими опромінюється зіниця ока, є малим (джерело ЕМВ вважалось диполем з моментом із залежними від часу величиною й орієнтацією). Представлення через інтеграл Фур'є формули (2) набула вигляду

$$\vec{E}_\omega = \text{Re} \left\{ \frac{\omega^2}{c^2 r} |q(\omega)| \vec{r}_0 (\vec{\rho}_0(\omega) \vec{r}_0) e^{i[\delta(\omega) - \omega(t-r/c)]} \right\}, \quad (3)$$

де $\vec{r}_0, \vec{\rho}_0(\omega)$ —одиничні радіальний та осьовий вектори.

Із використанням формули Кірхгофа інтегруванням (3) визначено інтенсивність кожної компоненти векторів \vec{H}, \vec{E} в декартовій системі координат усередненням по часу вектора Пойтінга методом Борна-Йордана. В результаті отримано лінійне наближення залежності інтенсивності тестового подразнення сітківки ока від параметрів поля ДС

$$I(X, Y, Z) = C |U_{\omega_0}(X, Y, Z)|^2, \quad (4)$$

де постійну C у подальшому визначено через технічні характеристики ДС та геометричні й біофізичні параметри ока.

Джерелом світла використано світлодіод, який живиться послідовністю імпульсів струму шпаруватості $D = t_p/T$, де T — період повторення імпульсів, t_p — їх ширина [5]. Цим отримано зменшення в D разів значення середнього струму через діод. Для врахування інерційності ока $T \leq 40$ мсек; тривалість пачки імпульсів визначає час експозиції (до 5 мсек в стандартній ретинографії). Величина струму від джерела струму рівна паспортному значенню прямого струму I_F світлодіода.

Енергія E_ϕ фотона світла, яке випромінює світлодіод, пов'язана з енергією E_z забороненої зони напругою U_n порогу забороненої зони: $E_\phi = E_z = eU_n$, де e — заряд електрона зі струму I_F/D через світлодіод. Енергія кожного фотона $E_\phi = hf_\phi$, де $f_\phi = c/\lambda_\phi$, визначається кожним електронем і складає енергію E_c світла яке випромінює світлодіод. Таким чином, кількість фотонів $n = E_c/E_\phi$. Енергія E_c світла що випромінюється залежить також від оптичної ефективності світлодіода η_d [Лм/Вт], інтенсивності (сили) світла I_V [Кд] групи даного типу світлодіодів, спектральної характеристики і діаграми спрямованості випромінювання, а також віддалі до поверхні ока і часу експозиції. Кількість фотонів визначалася за формулою

$$n = E_c \lambda_\phi / hc. \quad (5)$$

З врахуванням спектральної характеристики світлодіода сила світла

$$I_V = 683 \int_0^\infty \bar{y}(\lambda) I(\lambda) d\lambda, \quad \text{де } I_V - \text{інтенсивність (сила) світла в канделах (Кд), } I(\lambda) —$$

спектральна інтенсивність випромінювання у ватах на стерadian (Вт/ср), $\bar{y}(\lambda)$ — стандартна функція спектральної чутливості ока. При врахуванні діаграми спрямованості

$$E_c = 683 \left[\frac{I_V}{I_{V, \max}} \right] \int_{\Theta} I_{V, \max}(\theta) d\theta, \quad (6)$$

де Θ — апертура, а в квадратних дужках — паспортне значення відношення значення інтенсивності до інтенсивності при заданому струмі. Для малої апертури, монохроматичного світла формула для визначення кількості фотонів

$$\tilde{n} = 683 \frac{1}{L} \left[\frac{I_v}{I_{v,ma}} \right] I_{v,ma} t_e \frac{\lambda_\phi}{hc}, \quad (7)$$

де t_e — час експозиції, L — віддаль до ока, $l=2a$ — діаметр зіниці ока, (1-5) мм.

Отримані вирази та використані припущення разом з відомими стандартними результатами електроретинографії покладено в основу методу контролю величини енергії світла на сітківці ока при тестовому подразненні сітківки з наднизькою інтенсивністю його. Отримано змогу пониження інтенсивності світлодіодного випромінювання на порядок нижче від стандартної мінімальної інтенсивності (до $0.003 \text{ Кд} \cong \text{сек/м}^2$) та змогу оцінювання ЕРС. Подальше зменшення інтенсивності викликало утруднення через відсутність світлодіодів широкого вжитку з достатньо малими нормованими інтенсивностями.

Дослідження виконано за планом фундаментальних НДР, номер дежреєстрації 0111U002593.

1. Р. Ткачук, Б. Яворський, Вісник Тернопільського державного технічного університету **3**, 102 (2009).
2. M.F. Marmor *et al*, Doc Ophtalmol **118**, 69 (2009).
3. S. Hecht *et al*, Journal of General Physiology July 20 P. 819-840 (1942).
4. Detection of weak optical signals by human visual system http://home.etu.unige.ch/~alvarra0/Roberto_ALVAREZs_Personal_Page/About_Me_files/Eye_project.pdf.
5. Р.А. Ткачук, Б.И. Яворский, in: *20th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”* CriMiCo'2010 (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2010), 1127.