

## ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 681.784

Т.О. Шиша, І.Г. Чиж

### МОДЕЛЮВАННЯ АБЕРАЦІЙ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОКА. Ч.2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОХИБКИ ДВОЛІНЗОВОЇ АБЕРАЦІЙНОЇ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ОКА

#### Вступ

Розвиток новітніх технологій виправлення аберацийних вад зору людини призвів до створення офтальмологічних аберометрів. Головна функція цих приладів полягає у виявленні аберацийних спотворень світлового фронту в оці людини та у вимірюванні з високою точністю параметрів цих спотворень. Для підвищення точності вимірювань виконують тестування аберометра, тобто контролюють його похибки, використовуючи для цього попередню аберометрію фізичної моделі ока, яка має наперед відомі параметри аберації. З порівняння результатів аберометрії з параметрами аберацийної моделі роблять висновки відносно точності аберометра, після чого вживають відповідні заходи для зменшення похибок вимірювача.

У першій частині [1] проведено порівняльний аналіз існуючих на цей час фізичних аберацийних моделей ока. Запропоновано модель, вільну від недоліків прототипів. Показано, що вона здатна відтворювати аберацийні спотворення світлового фронту, адекватні аберацийним спотворенням в оці людини, причому як за величиною, так і за модальним складом очних абераций. Але відкритим залишається питання щодо технологічної можливості виготовлення такої моделі з погляду на забезпечення потрібної точності моделювання очних абераций. Складною і нерозв'язаною задачею також є моделювання аберацийних мод високих ступеневих порядків, які мають амплітуди на рівні десятих і сотих часток мікрметра.

#### Постановка задачі

Хвильова аберация ока, яку моделює абератор, повинна мати еталонну точність. При цьому потрібно, щоб похибки абератора були в кілька раз меншими порівняно з допустимими похибками аберометра, що підлягає тестуванню. З потреб клінічної практики допустимими можна вважати ті похибки аберометра, що не призводять до похибок визначення локальної

рефракції у вимірювальних точках зіниці більш ніж в  $\pm(0,25-0,1)$  діоптрій.

Похибки відтворення абератором хвильової аберации великою мірою залежать від похибок його конструктивних параметрів, тобто від точності виготовлення оптичних елементів абератора, точності їх взаємного розміщення, точності переміщення лінзи-кришталіка та імітатора сітківки. Тому головною задачею даної статті є дослідження впливу похибок конструктивних параметрів абератора на похибки відтворених ним аберацийних мод – складових хвильової аберации. Кінцевим результатом досліджень повинно стати виявлення технологічної можливості створення абератора, який досить точно відтворює аберацийні моди ока до шостого ступеневого порядку.

Обґрунтування умов, при яких модель ока може забезпечувати достатню точність моделювання хвильової аберации ока, є метою статті.

#### Метод дослідження

Дослідження технологічних похибок абератора здійснювалося з використанням розрахункового рейтресингу (променевого трасування) оптичної системи абератора великою кількістю променів, які перетинають зіницю абератора в більш ніж 4000 точках. Для кожної з них визначалася хвильова аберация оптичної системи абератора з наступною апроксимацією функції хвильової аберации в зіничних координатах поліномами Церніке. Для апроксимації (пошуку апроксимаційних коефіцієнтів – амплітуд церніковських аберацийних мод) використовувався метод найменших квадратів. Всі перелічені процедури з надзвичайно високою точністю виконувалися в автоматизованому режимі програмою ZEMAX – широко відомою комп'ютерною програмою аналізу оптичних систем. Зміни амплітуд, пов'язаних із варіаціями конструктивних параметрів абератора, визначалися і використовувалися для знаходження коефіцієнтів впливу вказаних параметрів. За допомогою коефіцієнтів впливу обчислювалися похибки амплітуд аберацийних мод абератора, викликані реальними технологічними похибками конструктивних параметрів. З цього робилися висновки відносно технологічної можливості створення абератора, який здатен фізично моделювати хвильову аберацию ока у всьому діапазоні її можливих станів із достатньою для практики точністю. Більш детальний опис дослідження викладено нижче.

Функція хвильової аберації в поліномах Церніке має такий математичний вираз [2–4]:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} [C_n^m \cos(m\varphi) - C_n^{-m} \sin(m\varphi)] N_n^m R_n^{|m|}(\rho), \quad (1)$$

де  $R_n^{|m|}(\rho)$  – поліноми Церніке;  $n, m$  – цілі числа;  $n$  – степінь поліномів Церніке (степеневий порядок абераційної моди);  $m$  – кутова азимутальна частота функції  $W(\rho, \varphi)$ ;  $[\rho, \varphi]$  – полярні координати в площині вихідної або вхідної зіниці ока, причому координата  $\rho$  є нормованою:  $0 \leq \rho \leq 1$ ;  $N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta(m)}}$  – нормувальні коефіцієнти згідно із стандартом OSA [5];  $\delta(m)$  – дельта-функція Кронекера, яка дорівнює 1, якщо  $m = 0$ , і 0, якщо  $m \neq 0$ ;  $C_n^m$  і  $C_n^{-m}$  – нормовані амплітуди церніковських абераційних мод, які, залежно від комбінації чисел  $n$  і  $m$ , математично (через поліноми Церніке) і кількісно є окремими типами і степеневими порядками аберацій ока.

При аберометрії ока амплітуди мод знаходять з апроксимації функції хвильової аберації поліномами Церніке, використовуючи для цього результати здійснених аберометром фізичних вимірювань хвильової аберації ока в різних точках його зіниці.

Амплітуди  $C_n^{\pm m}$  залежать від стану оптичної системи абератора і визначаються її конструктивними параметрами – радіусами поверхонь лінз 2 і 3 (див. рис. 1 у першій частині статті [1] журналу № 5), осьових товщин цих лінз, відстанями між ними, децентруваннями поверхонь лінз абератора, а також децентруваннями лінзи 3 відносно лінзи 2, показниками заломлення матеріалу лінз і води, що є в абераторі. Тому випадкові відхилення конструктивних параметрів від номінальних значень, що є неминучим при виготовленні оптичних елементів абератора і при дії механізмів пересування лінзи 3, призводять до випадкових відхилень величин  $C_n^{\pm m}$  від їх номінальних значень.

З огляду на той факт, що виробництво оптичного скла, механічна обробка оптичних поверхонь (шліфування та полірування), центрування поверхонь, виготовлення і складання оптичних та механічних деталей абератора – це істотно різні технологічні процеси, похибки

конструктивних параметрів оптичної системи абератора можна вважати некорельованими, тому відхилення (похибка) амплітуд абераційних мод  $\delta C_n^{\pm m} = \delta C_t$  можна записати формулою

$$\delta C_t = \pm \sqrt{\sum_{q=1}^{13} K_{tq}^2 \delta P_q^2}, \quad (2)$$

де  $t$  – номер абераційної моди, що визначається числами  $n, m$ ;  $q$  – номер конструктивного параметра оптичної системи абератора (див. рис. 1 в [1]). У нашому дослідженні кількість конструктивних параметрів, які є випадковими, дорівнює тринадцяти. Це – чотири радіуси поверхонь лінзи-рогівки ( $r_1, r_2$ ) та лінзи-кришталіка ( $r_3, r_4$ ); два показники заломлення матеріалу лінзи-рогівки –  $n_1$  та лінзи-кришталіка –  $n_2$ ; дві осьові товщини –  $d_1$  і  $d_3$  вказаних лінз та відстань між лінзами –  $d_2$ ; похибка позиціонування лінзи-кришталіка вздовж осі  $OX$  –  $\Delta_X$ ; похибка центрування другої поверхні лінзи-рогівки відносно її першої поверхні –  $\Delta_{C_2}$  та першої поверхні лінзи-кришталіка відносно її другої поверхні  $\Delta_{C_3}$  – вздовж осі  $OY$ , похибка кутового повороту лінзи-кришталіка навколо осі  $OY$  –  $\Delta_\varphi$ ;  $K_{tq}$  – коефіцієнт впливу конструктивного параметра з номером  $q$  на амплітуду моди з номером  $t$ , який є частинною похідною  $K_{tq} = \frac{\partial C_t}{\partial P_q}$ , де  $P_q$  – конструктивний параметр з номером  $q$ ;  $\delta P_q$  – технологічна похибка конструктивного параметра з номером  $q$ .

Функціональні залежності між величинами  $C_t$  і параметрами  $P_q$  неможливо подати в аналітичному вигляді. Тому коефіцієнти  $K_{tq}$  обчислюють числовими методами. Для цього було використано комп'ютерну програму ZEMAX. Вона дала можливість знайти приріст амплітуд  $C_t$  абераційних мод абератора, пов'язаний з малою зміною конструктивних параметрів  $P_q$  його оптичної системи. Значення коефіцієнтів впливу  $K_{tq}$  було знайдено з розрахунку відношення приросту амплітуди  $C_t$  до приросту конструктивного параметра  $P_q$ .

Попередній аналіз показав, що майже всі коефіцієнти впливу  $K_{iq}$  мають тенденцію до монотонного зростання при збільшенні величини децентрування і кутового нахилу лінзи 3 (див. рис. 1 з [1]) відносно лінзи-рогівки. До того ж залежність  $K_{iq}$  від децентрування лінзи 3 є набагато більшою, ніж від кутового нахилу цієї лінзи до оптичної осі.

З метою виявлення діапазонів, в яких змінюються величини  $K_{iq}$ , вони були обчислені при двох крайніх станах абераатора. У першому стані – лінзи абераатора розміщені співвісно (центровано), у другому – лінза 3 була конструктивно максимально (на 2 мм) децентрована відносно оптичної осі лінзи 2 у напрямку осі  $OX$  і повернута навколо осі  $OY$  на кут  $6^\circ$ . У діапазоні вказаних положень лінзи 3 абераатор відтворює хвильову аберацію, яка за величиною та спектральним складом є наближеною до аберації ока людини (див. ч.1 даної статті).

Результати розрахунків коефіцієнтів впливу  $K_{iq}$  наведені в табл. 1. Коефіцієнти обчислювалися при діаметрі зони сканування зіниці абераатора 6 мм та при  $\lambda = 0,65$  мкм – довжині хвилі випромінювання лазерного діода, що використовується в очних абераметрах. Числа, які виділені сірим фоном, відповідають першому стану абераатора, без фону – другому стану. В тих рядках, де значення коефіцієнтів  $K_{iq}$  відповідають тільки другому стану, коефіцієнти першого стану абераатора мають нульові значення і тому вони не наведені.

Дані табл. 1 дають можливість зробити кількісну оцінку величин  $\delta C_n^{\pm m} = \delta C_t$ . У разі “м’яких” допусків на технологічні похибки, які виникають при скловарінні, виготовленні лінз і деталей кріплення лінз та при функціонуванні механізмів переміщення лінзи-кришталіка, вони становлять:

$\delta P_1 = \Delta r_1 = \pm 6$  мкм (три кільця Ньютона під еталонною оптичною поверхнею пробного скла в зоні контролю діаметром 8 мм);

$\delta P_2 = \Delta r_2 = \pm 6$  мкм (три кільця Ньютона в зоні контролю діаметром 8 мм);

$\delta P_3 = \Delta r_3 = \pm 39$  мкм (три кільця Ньютона в зоні контролю діаметром 5 мм);

$\delta P_4 = \Delta r_4 = \pm 17$  мкм (три кільця Ньютона в зоні контролю діаметром 5 мм);

$\delta P_5 = \Delta n_1 = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ ;

$\delta P_6 = \Delta n_2 = \pm 5 \cdot 10^{-4}$  (3-я категорія граничного відхилення показника заломлення, ГОСТ 23136);

$\delta P_7 = \Delta d_1 = \pm 30$  мкм;

$\delta P_8 = \Delta d_2 = \pm 100$  мкм;

$\delta P_9 = \Delta d_3 = \pm 10$  мкм;

$\delta P_{10} = \Delta x = \pm 10$  мкм;

$\delta P_{11} = \Delta \varphi = \pm 6$  кут.хв;

$\delta P_{12} = \Delta C_2 = 100$  мкм;

$\delta P_{13} = \Delta C_3 = 100$  мкм.

Похибка  $\Delta r_i$  радіуса оптичної поверхні та кількість кілець Ньютона  $N$  у разі прикладання до неї еталонної поверхні пробного скла обчислюється за формулою [6]

$$\Delta r_i = \frac{\lambda N}{2 - \sqrt{4 - D_i^2 r_i^{-2}}},$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі (в розрахунках  $\lambda = 0,65$  мкм);  $D_i$  – діаметр зони контролю пробним склом оптичної поверхні;  $r_i$  – радіус еталонної сферичної оптичної поверхні пробного скла.

Абсолютні похибки  $C_t$ , обчислені за формулою (2) з використанням даних табл. 1 при наведених похибках конструктивних параметрів, подані в табл. 2 в стовпцях 4 і 6. У стовпцях 5 і 7 показані відносні похибки  $C_t$ . Там, де номінальні значення коефіцієнтів  $C_t$  є нульовими, відносна похибка відсутня.

З аналізу похибок, наведених у стовпцях 4–7, можна зробити такі висновки:

- похибка дефокуса  $\delta C_2^0 = 0,29$  мкм, еквівалентна похибці визначення аметропії в 0,22 дптр, знаходиться в межах допустимої, але вона може бути виправленою практично повністю (до нуля) компенсаційним переміщенням імітатора сітківки вздовж оптичної осі, що передбачено конструкцією абераатора;

- при центрованому розміщенні лінз (перший стан абераатора) похибки відтворення амплітуд абераційних мод сферичної аберації  $C_4^0$  і  $C_6^0$  мають еквівалент 0,0044 і 0,0012 дптр аметропії і є набагато меншими за допустимі;

- у другому стані абераатора відносні похибки відтворення амплітуд всіх мод за винятком моди дефокуса знаходяться в діапазоні (1,16–8,1) %, які також є цілком допустимими.

Таблиця 1. Коефіцієнти впливу  $K_{tq}$

t	Конструктивні елементи													$\Delta \varphi$ , КМ/КУТ.ХВ
	$r_1$	$r_2$	$\Delta C_2$	$\Delta C_3$	$r_3$	$r_4$	$n_1$ , МКМ	$n_2$ , МКМ	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$\Delta X$	13	
$C_2^0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
2	-0,0133	0,0041	-2,6·10 <sup>-5</sup>	1,1·10 <sup>-6</sup>	-0,0012	0,0031	17,57	140,3	0,0043	0,0021	0,0031	7,5·10 <sup>-5</sup>	-1,1·10 <sup>-5</sup>	
	-0,0133	0,0041	-3,7·10 <sup>-5</sup>	-7,2·10 <sup>-6</sup>	-0,0014	0,0031	17,21	155,2	0,004	0,0019	0,0031	0,00376	-0,00256	
$C_2^2$	3	2,5·10 <sup>-5</sup>	1,6·10 <sup>-5</sup>	2,8·10 <sup>-7</sup>	-2,5·10 <sup>-4</sup>	-8,5·10 <sup>-4</sup>	-0,219	15,76	-2·10 <sup>-4</sup>	-1·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	0,000533	5,1·10 <sup>-6</sup>	
			1,2·10 <sup>-5</sup>	-3,5·10 <sup>-6</sup>								0,00233	-0,0026	
$C_3^1$	4	0,0001	-4,3·10 <sup>-5</sup>	3,9·10 <sup>-6</sup>	2,0·10 <sup>-4</sup>	-7,5·10 <sup>-4</sup>	0,263	-15,38	2,1·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>	6,5·10 <sup>-5</sup>	-7,6·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	
												-0,0015	0,00167	
$C_3^3$	5	1,5·10 <sup>-6</sup>	-1,6·10 <sup>-6</sup>	6,5·10 <sup>-7</sup>	2,8·10 <sup>-5</sup>	-1,0·10 <sup>-4</sup>	0,034	-1,58	1,9·10 <sup>-5</sup>	1,4·10 <sup>-5</sup>	-3·10 <sup>-6</sup>	-2·10 <sup>-7</sup>	0	
												-0,0003	0,00024	
$C_4^0$	6	-0,0004	0,0001	-1,1·10 <sup>-6</sup>	1,1·10 <sup>-7</sup>	0,00012	0,2962	4,477	1,3·10 <sup>-5</sup>	-2,1·10 <sup>-5</sup>	-9·10 <sup>-6</sup>	4,5·10 <sup>-6</sup>	-7·10 <sup>-5</sup>	
							0,254	6,8	-2·10 <sup>-5</sup>	-5·10 <sup>-5</sup>	-1·10 <sup>-5</sup>	0,00032	-0,0003	
$C_4^2$	7	-1,2·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	6,2·10 <sup>-7</sup>	-3,0·10 <sup>-5</sup>	1,1·10 <sup>-4</sup>	-0,036	1,82	-3·10 <sup>-5</sup>	-2·10 <sup>-5</sup>	-3·10 <sup>-6</sup>	3,7·10 <sup>-6</sup>	3,9·10 <sup>-7</sup>	
												0,00024	-0,0002	
$C_4^4$	8	3,7·10 <sup>-7</sup>	3,9·10 <sup>-8</sup>	2,7·10 <sup>-8</sup>	-3,7·10 <sup>-6</sup>	1,3·10 <sup>-5</sup>	-1·10 <sup>-5</sup>	0,187	-3·10 <sup>-5</sup>	-2·10 <sup>-5</sup>	-1,8·10 <sup>-7</sup>	9,8·10 <sup>-10</sup>	0	
												3,6·10 <sup>-5</sup>	-3·10 <sup>-5</sup>	
$C_5^1$	9	2,1·10 <sup>-5</sup>	-7,1·10 <sup>-6</sup>	5,2·10 <sup>-7</sup>	2,1·10 <sup>-5</sup>	-8,0·10 <sup>-5</sup>	0,0207	-1,41	2,1·10 <sup>-5</sup>	1,7·10 <sup>-5</sup>	7,9·10 <sup>-6</sup>	-4,2·10 <sup>-5</sup>	5,4·10 <sup>-5</sup>	
												-0,00014	0,00014	
$C_5^3$	10	5,0·10 <sup>-7</sup>	-3,4·10 <sup>-7</sup>	3,9·10 <sup>-9</sup>	4,3·10 <sup>-6</sup>	-1,6·10 <sup>-5</sup>	0,0061	0,229	3,7·10 <sup>-6</sup>	2,7·10 <sup>-6</sup>	5,1·10 <sup>-7</sup>	-1,8·10 <sup>-8</sup>	-3,2·10 <sup>-9</sup>	
												-4·10 <sup>-5</sup>	3,4·10 <sup>-5</sup>	
$C_5^5$	11	-1·10 <sup>-7</sup>	1,1·10 <sup>-8</sup>	-1,2·10 <sup>-7</sup>	4,9·10 <sup>-7</sup>	-1,8·10 <sup>-6</sup>	7,6·10 <sup>-4</sup>	-0,0234	3,9·10 <sup>-7</sup>	2,7·10 <sup>-7</sup>	-5·10 <sup>-9</sup>	2,4·10 <sup>-9</sup>	-3,3·10 <sup>-9</sup>	
												-5·10 <sup>-6</sup>	4,2·10 <sup>-6</sup>	
$C_6^0$	12	-2,3·10 <sup>-5</sup>	5,3·10 <sup>-6</sup>	6,2·10 <sup>-8</sup>	-1,3·10 <sup>-6</sup>	7,8·10 <sup>-6</sup>	0,0137	0,2452	-1·10 <sup>-7</sup>	-1,6·10 <sup>-6</sup>	-9,5·10 <sup>-5</sup>	3,9·10 <sup>-9</sup>	-9,4·10 <sup>-7</sup>	
							8,3·10 <sup>-3</sup>	0,506	5·10 <sup>-6</sup>	-5·10 <sup>-6</sup>	-3·10 <sup>-6</sup>	3,3·10 <sup>-5</sup>	-3·10 <sup>-5</sup>	
$C_6^2$	13	-2·10 <sup>-6</sup>	6,4·10 <sup>-7</sup>	3,3·10 <sup>-8</sup>	-3,6·10 <sup>-6</sup>	1,4·10 <sup>-5</sup>	-4,8·10 <sup>-3</sup>	0,207	4·10 <sup>-6</sup>	-3·10 <sup>-6</sup>	-1·10 <sup>-6</sup>	2,9·10 <sup>-7</sup>	3·10 <sup>-8</sup>	
												2,7·10 <sup>-5</sup>	-3·10 <sup>-5</sup>	
$C_6^4$	14	4,2·10 <sup>-8</sup>	1,4·10 <sup>-8</sup>	5,5·10 <sup>-9</sup>	-6,0·10 <sup>-7</sup>	2,2·10 <sup>-6</sup>	-1,0·10 <sup>-3</sup>	-1·10 <sup>-5</sup>	-5·10 <sup>-7</sup>	-4·10 <sup>-7</sup>	-8·10 <sup>-8</sup>	6,5·10 <sup>-11</sup>	0	
								0,030				5,5·10 <sup>-6</sup>	-5·10 <sup>-6</sup>	
$C_6^6$	15	2,7·10 <sup>-8</sup>	-6·10 <sup>-9</sup>	5,9·10 <sup>-10</sup>	-5,0·10 <sup>-8</sup>	1,8·10 <sup>-7</sup>	-8,0·10 <sup>-5</sup>	0,002	-4·10 <sup>-8</sup>	-2,0·10 <sup>-8</sup>	6,5·10 <sup>-9</sup>	-9·10 <sup>-10</sup>	0	
												6·10 <sup>-7</sup>	-4·10 <sup>-7</sup>	

**Таблиця 2.** Похибки  $\delta C_n^m$  відтворення амплітуд черніковських абераційних мод при наявності технологічних похибок конструктивних параметрів оптичної системи абератора

Номінальні величини $C_n^m$ , в мкм			М'які допуски на конструктивні параметри				Жорсткі допуски на конструктивні параметри			
$C_n^m$	1-й стан абератора	2-й стан абератора	1-й стан абератора		2-й стан абератора		1-й стан абератора		2-й стан абератора	
			Абсолютна похибка, мкм	Відносна похибка, %	Абсолютна похибка, мкм	Відносна похибка, %	Абсолютна похибка, мкм	Відносна похибка, %	Абсолютна похибка, мкм	Відносна похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$C_2^0$	0	2,823	0,288	—	0,2914	10,3	0,0731	—	0,0764	2,71
$C_2^2$	0	1,415	0,0056	—	0,0314	2,22	0,0019	—	0,0080	0,56
$C_3^1$	0	-1,474	0,0102	—	0,0289	1,96	0,0026	—	0,0069	0,47
$C_3^3$	0	-0,110	0,0002	—	0,0040	3,63	$4,4 \cdot 10^{-5}$	—	0,0010	0,86
$C_4^0$	0,7121	0,902	0,0045	6,26	0,0105	1,16	0,0014	0,19	0,0027	0,30
$C_4^2$	0	0,130	0,0004	—	0,0038	2,93	0,0001	—	0,0009	0,72
$C_4^4$	0	0,011	$1,2 \cdot 10^{-5}$	—	0,0005	4,55	$2,4 \cdot 10^{-6}$	—	0,0001	1,10
$C_5^1$	0	-0,102	0,0006	—	0,0029	2,82	0,0001	—	0,0007	0,67
$C_5^3$	0	-0,013	0,0004	—	0,0006	4,28	$7,9 \cdot 10^{-5}$	—	0,0001	1,03
$C_5^5$	0	-0,001	$4,6 \cdot 10^{-5}$	—	$6,4 \cdot 10^{-5}$	5,75	$1 \cdot 10^{-5}$	—	$1,6 \cdot 10^{-5}$	1,39
$C_6^0$	0,0269	0,044	0,0010	3,72	0,0009	2,11	0,0009	3,54	0,0002	0,53
$C_6^2$	0	0,012	$3,51 \cdot 10^{-5}$	—	0,0005	4,15	$7,8 \cdot 10^{-6}$	—	0,0001	0,97
$C_6^4$	0	0,001	$1,61 \cdot 10^{-6}$	—	$7,9 \cdot 10^{-5}$	5,48	$3,2 \cdot 10^{-7}$	—	$1,9 \cdot 10^{-5}$	1,30
$C_6^6$	0	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	—	$6,5 \cdot 10^{-6}$	8,10	$1,6 \cdot 10^{-8}$	—	$1,6 \cdot 10^{-6}$	1,98

Отже, виявляється, що звичайні для сучасного оптичного виробництва допуски на конструктивні параметри не призводять до виходу похибок амплітуд абераційних мод абератора за межі допустимого.

У тих окремих випадках, коли амплітуди абераційних мод треба моделювати з підвищеною точністю, необхідно збільшувати вимоги до точності виготовлення оптичної та механічної систем абератора. З цією метою всі допуски на конструктивні параметри можна зробити більш жорсткими і зменшити до величин, які при існуючому стані розвитку оптичного виробництва та вимірювальної техніки ще можуть бути забезпеченими технологічно. При цьому вони мають такі значення:

$\delta P_1 = \Delta r_1 = \pm 2$  мкм (одне кільце Ньютона під еталонною оптичною поверхнею пробного скла в зоні контролю діаметром 8 мм);

$\delta P_2 = \Delta r_2 = \pm 2$  мкм (одне кільце Ньютона – в зоні контролю діаметром 8 мм);

$\delta P_3 = \Delta r_3 = \pm 13$  мкм (одне кільце Ньютона – в зоні контролю діаметром 5 мм);

$\delta P_4 = \Delta r_4 = \pm 5$  мкм (одне кільце Ньютона – в зоні контролю діаметром 5 мм);

$\delta P_5 = \Delta n_1 = \pm 2 \cdot 10^{-4}$  (1-а категорія граничного відхилення показника заломлення, ГОСТ 23136);

$\delta P_6 = \Delta n_2 = \pm 2 \cdot 10^{-4}$  (1-а категорія граничного відхилення показника заломлення, ГОСТ 23136);

$$\delta P_7 = \Delta d_1 = \pm 2 \text{ мкм};$$

$$\delta P_8 = \Delta d_2 = \pm 10 \text{ мкм};$$

$$\delta P_9 = \Delta d_3 = \pm 2 \text{ мкм};$$

$$\delta P_{10} = \Delta X = \pm 2 \text{ мкм};$$

$$\delta P_{11} = \Delta \varphi = \pm 2 \text{ кут.хв};$$

$$\delta P_{12} = \Delta C_2 = 30 \text{ мкм};$$

$$\delta P_{13} = \Delta C_3 = 30 \text{ мкм}.$$

При вказаних допусках на конструктивні параметри  $\delta C_i$  мають значення, наведені в табл. 2 в стовпцях 8–11. Вони демонструють істотне зменшення відносних похибок відтворення амплітуд абераційних мод як у першому, так і у другому стані абератора. Похибки дають можливість стверджувати, що запропонований абератор може відтворювати абераційні моди в межах класів точності 0,5–2,0. Проте отриманий результат досягається істотним ускладненням технології виготовлення оптичних елементів і конструкції абератора.

Оптимальним, на наш погляд, є інший спосіб досягнення високої точності моделювання хвильової аберації ока. Він полягає в тому, що оптичні деталі виготовляються з тими допусками, які є технологічними, після чого

точними інтерферометричними вимірюваннями визначаються параметри, форма і взаємне розміщення оптичних поверхонь лінз абератора. Саме ці параметри використовуються при розрахунках хвильової аберації абератора для визначення реальних амплітуд модельованих абераційних мод і можливих похибок їх моделювання. Кінцевим етапом має бути контрольне вимірювання амплітуд абераційних мод абератора з використанням для цього зразкового вимірювального засобу, наприклад спеціалізованого інтерферометра, похибки якого становлять десяті і навіть соті частки довжини світлової хвилі. Тестований у такий спосіб абератор може вважатися еталонною моделлю хвильової аберації ока і використовуватися для контролю точності офтальмологічних аберометрів.

Практичне значення мають дані про внесок похибок кожного з конструктивних параметрів абератора в похибки амплітуд модельованих ним абераційних мод. Ці дані дадуть змогу під час проектування та виготовлення абератора найбільш точно забезпечувати ті конструктивні параметри, від похибок яких найбільшою мірою залежать похибки амплітуд абераційних мод.

З цієї метою нами були обчислені відносні значення дисперсії амплітуд абераційних

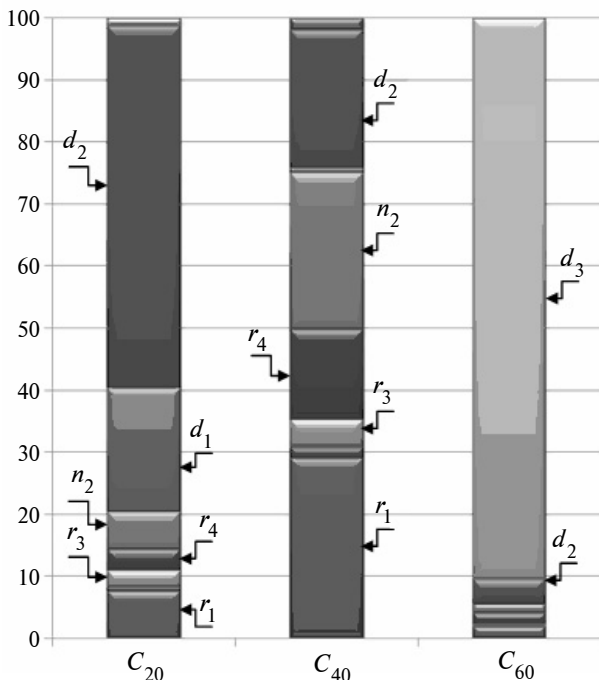


Рис. 1. Діаграма відносних (у процентах) складових дисперсії амплітуд  $C_2^0$ ,  $C_4^0$ ,  $C_6^0$ , зумовлених похибками вказаних на діаграмі конструктивних параметрів (1-й стан абератора)

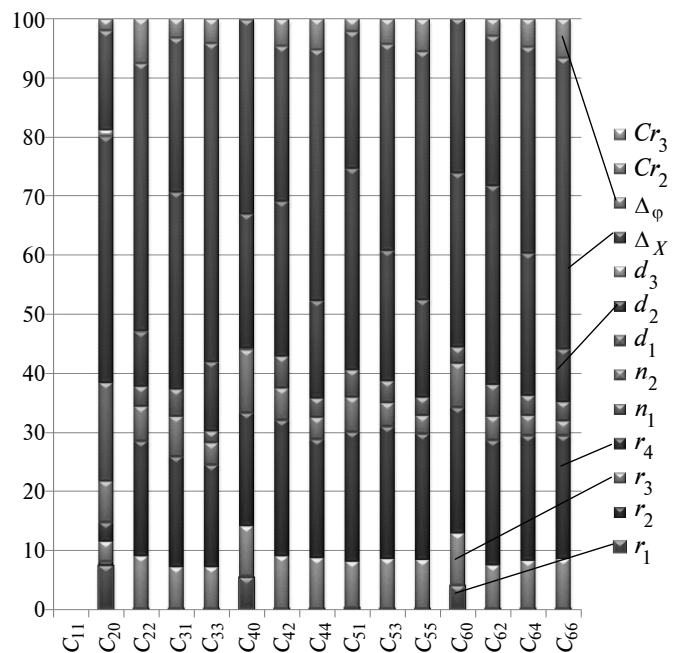


Рис. 2. Діаграма відносних (у процентах) складових дисперсії амплітуд  $C_n^m$ , зумовлених похибками вказаних на діаграмі конструктивних параметрів (2-й стан абератора)

мод як функцій похибок конструктивних параметрів абератора. Результати розрахунків для випадку "м'яких" допусків наведені на діаграмах рис. 1 і 2.

З рис. 1 видно, що коли лінзи абератора співвісно розміщені, на похибки моделювання дефокуса ( $C_2^0$ ) найбільший вплив мають похибки параметрів  $r_1$ ,  $d_1$ ,  $n_2$  і  $d_2$ , на похибки моделювання поперечної сферичної аберації третього степеневого порядку ( $C_4^0$ ) – похибки параметрів  $r_1$ ,  $r_4$ ,  $n_2$ ,  $d_2$ . Похибка амплітуди моделюваної сферичної поперечної аберації п'ятого степеневого порядку ( $C_6^0$ ) головним чином залежить від похибки  $d_3$  – товщини лінзи-кришталіка. Аналогічні висновки можна зробити з аналізу діаграми, наведеної на рис. 2. Видно, що на похибки амплітуд всіх (за винятком дефокуса) абераційних мод абератора в другому стані найбільший вплив мають похибки радіусів сферичних поверхонь лінзи-кришталіка –  $r_3$ ,  $r_4$ , відстані між лінзами –  $d_2$  та похибки децентрування лінзи-кришталіка відносно лінзи-рогівки –  $\Delta_X$ .

Абератор, досліджений у даній статті, був виготовлений та апробований при складанні та юстуванні офтальмологічного аберометра, а також при дослідженнях похибок цього аберометра. Випробування абератора підтвердили ефективність його використання та дали можливість отримати цінну інформацію, потрібну не тільки для вдосконалення аберометра, а й

для подальшого вдосконалення системи і конструкції самого абератора.

### Висновки

Запропонована абераційна модель оптичної системи ока здатна забезпечити достатню для практичних потреб точність моделювання хвильової аберації ока, якщо відхилення радіусів сферичних оптичних поверхонь знаходяться в межах трьох кілець Ньютона, а відстань між оптичними поверхнями – в межах 9-го квалітету допусків на лінійні розміри. Ці умови є звичайними в сучасному оптичному виробництві і не викликають проблем технологічного характеру.

Показано, що величина впливу похибок конструктивних параметрів абератора на точність його функціонування залежить від робочого положення лінзи-кришталіка, до того ж ці похибки мають істотно різний вплив на точність відтворення абераційних мод. Отримані дані про цей вплив дають змогу обґрунтовано визначати вимоги до технологічних похибок виготовлення елементів і механізмів абератора ще на стадії його проектування, а також використовувати їх при складанні та юстуванні абератора.

Аналіз похибок запропонованої абераційної моделі ока можна вважати достатнім лише після вивчення впливу факторів зміни температури та зміни атмосферного тиску, від яких залежать оптичні параметри оптичних елементів абератора, що повинно бути задачею наступних досліджень.

Т.А. Шиша, И.Г. Чиж

МОДЕЛИРОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛАЗА. Ч.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ДВУХЛИНЗОВОЙ АБЕРРАЦИОННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЛАЗА

Исследовано влияние технологических ошибок конструктивных параметров оптической системы глаза на ошибки моделируемой ею волновой аберации. Доказана технологическая возможность изготовления модели с той точностью моделирования волновой аберации глаза, которая достаточна для тестирования офтальмологических аберрометров.

T.A. Shysha, I.G. Chyzh

SIMULATION OF ABERRATIONS OF AN OPTICAL SYSTEM OF THE HUMAN EYE CHAPTER 2. TECHNOLOGICAL ERRORS OF A DOUBLET PHYSICAL EYE MODEL WITH ABERRATIONS

The present study considers the influence of technological errors of construction parameters of the optical system of the human eye model on errors of simulated wave aberration. We verify the technological possibility of manufacturing the model with accuracy of wave aberration simulation, sufficient for examining ophthalmic aberrometers.

1. *Шиша Т.О., Чиж І.Г.* Модування абераций оптичної системи ока. Ч. 1. Огляд і порівняльний аналіз фізичних аберацийних моделей ока // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 5. – С. 104–111.
2. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
3. *Сокольский М.Н.* Допуски и качество оптических изображений. – Л.: Машиностроение, 1989. – 220 с.
4. *Чиж І.Г.* Монохроматичні аберации оптичної системи ока // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2002. – № 1. – С. 98–110.
5. *Thibos L.N., Applegate R.A., Schwiegerling J.T., Webb R.* Standards for reporting the optical aberrations of eyes // OSA Trends in Optics and Photonics Series. – 2000. – 35. – P. 232–244.
6. *Мальцев М.Д.* Расчет допусков на оптические детали. – М.: Машиностроение, 1974. – 166 с.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
23 квітня 2009 року