

УДК 621.757

Т. І. Гураль, М. Є. Кирилюк, М. І. Овчар, В. М. Настіч

ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗІДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЗЕРКАЛА КІЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА З П'ЄЗОКОРЕКТОРОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕРФЕРОМЕТРА БІЛОГО СВІТЛА «РЕЛЬСФ»

Анотація: Дзеркало мембранної конструкції кільцевого лазера зазнає кутових та лінійних зміщень відбивальної поверхні, а сама поверхня змінює свою форму, що впливає на стабільність частоти лазера. За допомогою інтерферометра білого світла були виміряні динамічні характеристики дзеркала, результати вимірювання параметрів дослідних зразків показали, що тип конструкції дзеркала має значний вплив на його динамічні характеристики.

Ключові слова: лазерні дзеркала, кільцевий лазер, інтерферометр білого світла.

Вступ

При застосуванні He-Ne лазерів для метрологічних цілей (спектроскопія, інтерферометрія, голографія, датчики кутової швидкості) важлива стабільність частоти F їх вихідного випромінювання, яка прямо пропорційна стабільності периметра резонатора L : $\Delta F/F = \Delta L/L$ [1]. Для зменшення впливу зовнішніх факторів на периметр лазера, резонатор виготовляється з матеріалу з малим коефіцієнтом термічного розширення (ситал СО-115М або Zerrodur). Підстроювання периметра в діапазоні 2...3 мкм здійснюється переміщенням відбивальної поверхні одного або двох дзеркал, що утворюють резонатор. Для цього використовується дзеркало спеціальної мембранної конструкції. На таке дзеркало встановлюється п'єзопривід біморфного типу, який шляхом силового тиску на мембрану дзеркала викликає її переміщення, що дозволяє регулювати периметр резонатора. Нарівні з перевагами такої конструкції дзеркала (компактність, жорсткість, стабільність, суміщення дзеркального покриття з елементом регулювання периметра) в ній присутній ефект динамічного кутового зміщення дзеркальної поверхні. Кутове зміщення дзеркала може призводити до роз'юстування резонатора, що в низці застосувань негативно відбивається на метрологічних характеристиках лазера.

Метою даної роботи є дослідження динамічних характеристик дзеркал мембранної конструкції, а саме: кутових та лінійних зміщень відбивальної поверхні та зміни її форми. Дані характеристики дозволяють провести об'єктивний аналіз різноманітних варіантів побудови мембранного дзеркала та оптимізувати його конструкцію. До цього часу подібні вимірювання виконувались тільки непрямими методами, наприклад, шляхом оцінки зміни добротності кільцевого лазера.

Нами були проведені дослідження двох типів конструкцій дзеркал: одно-

мембранного та двомембранного. Зразки були виготовлені у відповідності з технологічним процесом виготовлення зразків серійного виробництва, а експеримент проводився в тих же умовах, в яких зазвичай працюють кільцеві лазери.

Експериментальні зразки

Було виготовлено два макетних зразка дзеркал. Для проведення досліджень макетні зразки ставились на оптичний контакт на ситаловий блок так, щоб відбивальна поверхня дзеркала і частина його посадкової поверхні залишались відкритими в межах поля зору інтерферометра білого світла. Для цього в блоці зроблено два отвори. П'єзопривід закріплювався на ситаловий блок з його нижньої сторони. В процесі дослідження на п'єзопривід подавалася напруга в діапазоні від -200 В до $+200$ В від універсального блоку живлення. Загальний вигляд конструкції дзеркала двомембранного типу закріпленої на ситаловому блоці показаний на рис. 1.

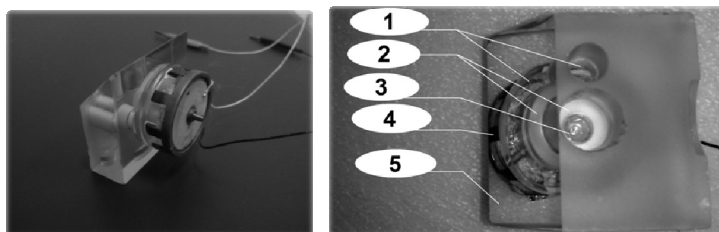


Рис. 1. – Загальний вигляд конструкції сферичного дзеркала двомембранного типу, закріпленої на ситаловому блоці:

1 – посадкова поверхня дзеркала; 2 – мембрана; 3 – сферична відбивальна поверхня дзеркала; 4 – кріплення п'єзоприводу; 5 – ситаловий блок

Інтерферометр білого світла та його програмне забезпечення

В процесі досліджень нами був використаний інтерферометр білого світла «Рельєф» власної розробки (рис. 2). Окрім можливості контролювати форму та взаємне розташування відбивальної та посадкової поверхонь дзеркала з високою точністю, визначальним фактором є можливість проведення безконтактних вимірювань. Інтерферометр білого світла має поле зору 12×13 мм і роздільну здатність у площині зображення 11 мкм та по висоті до 1 нм.



Рис. 2. – Інтерферометр білого світла «Рельєф»

Інтерферометр був спеціально розроблений для контролю форми лазерних дзеркал і його програмне забезпечення дозволяє вимірювати такі характеристики дзеркал, як радіус кривизни, його відхилення від заданого значення і локальну похибку виго-

товлення та оцінювати параметри еліптичності форми поверхні. Окрім того, програмне забезпечення приладу має широкий набір інструментів для обробки даних, аналізу зображень і розрахунку характеристик топології поверхонь, що контролюються.

Для розрахунку, обробки та аналізу результатів використовувалось програмне забезпечення Surface та програмний пакет Mathcad. Під час розрахунку відбивальна та посадкова поверхні задавалися моделлю площини, побудованою за трьома рівновіддаленими від центра точками. Пізніше було вирішено задати поверхні моделлю найближчої площини. Нові дані були опрацьовані і результати розрахунку за другою моделлю виявилися більш коректними. Для кращої точності дані були перераховані у вужчому полі зору (500 мкм). В процесі досліджень макетні зразки по черзі закріплювались на предметному столику інтерферометра і виконувалось сканування поверхонь у межах його поля зору у вертикальному напрямі при заданій напрузі живлення п'єзоприводу. Тривимірний вигляд зображення сферичної відбивальної поверхні та частини плоскої посадкової поверхні (в межах технологічного отвору) макета показаний на рис. 3. З рисунків видно, що поверхні мають деяку різновисотність і взаємний нахил.

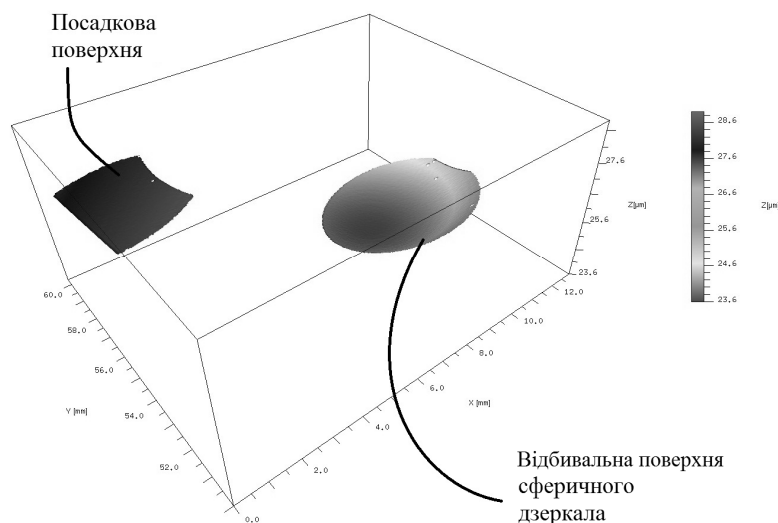
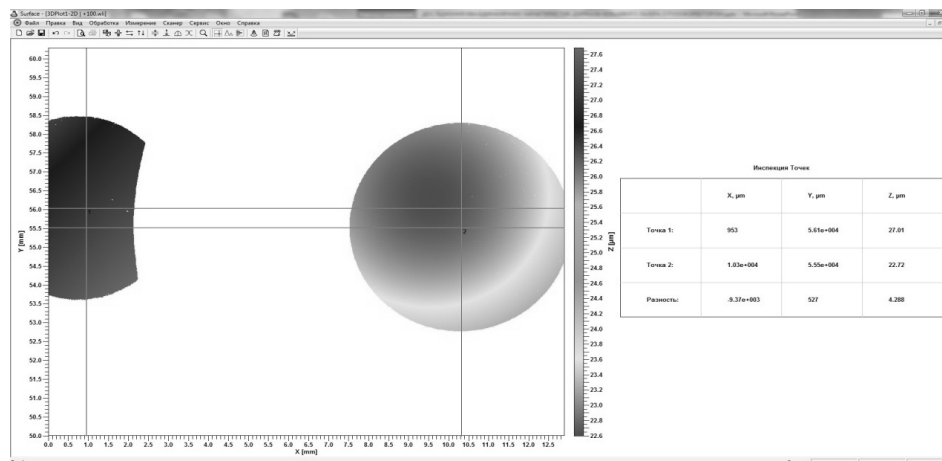


Рис. 3. – Вигляд розрахованого зображення сферичної відбивальної поверхні дзеркала та частини плоскої посадкової поверхні

Результати досліджень

Результати вимірювань параметрів дослідних зразків сферичних дзеркал мембранного типу з радіусом кривизни $R = 4000$ мм показали, що відбивальна поверхня зазнає лінійних та кутових зміщень, а також змінює радіус своєї кривизни. Для відбивальної поверхні двомембранного дзеркала одержали діапазони лінійних та кутових переміщень 1,2 мкм та 14 кут. сек. відповідно і діапазон зміни радіуса її кривизни 140 мм (рис. 4).

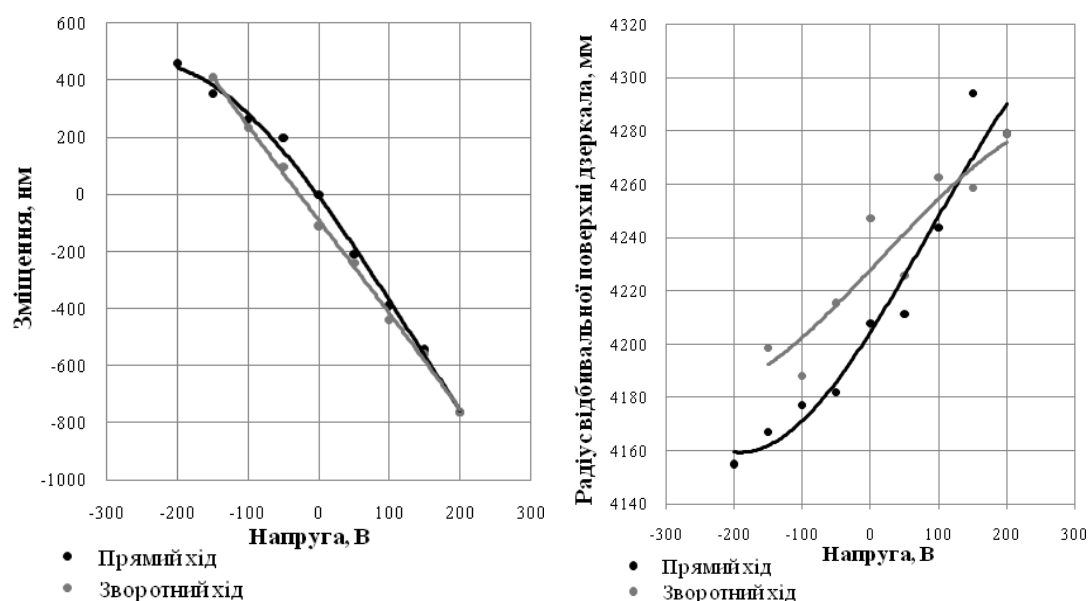


Рис. 4. – Залежність зміщення відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність середнього радіуса кривизни відбивальної поверхні дзеркала від напруги (праворуч) для випадку двомембранного дзеркала

Крім того поверхня дзеркала зазнає такої деформації як нахил відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні з одночасним її поворотом відносно осі дзеркала (рис. 5).

Результати для одномембранного дзеркала наведені на рис. 6. Діапазон лінійного зміщення сягає 290 нм, а діапазон кутового нахилу сягає 121 кут. сек. Дзеркало одномембранної конструкції має лише одну поверхню кріплення, тоді як дзеркало двомембранної конструкції має їх дві, чим і забезпечується вища стабільність положення дзеркала в процесі руху. Радіус кривизни змінюється в діапазоні майже 220 мм.

Поворот відбивальної поверхні навколо осі має дещо хаотичний характер, проте діапазон значень кута повороту відбивальної поверхні для двомембранного дзеркала не перевищує 20 градусів, а для одномембранного – 55 градусів (рис. 7).

Якщо порівняти результати вимірювань радіусу кривизни відбивальної поверхні у випадках одномембранного та двомембранного дзеркал, можна переконалися, що для першого сферична форма відбивальної поверхні дзеркала фактично не змінюється (сферичність зберігається, змінюється лише сам радіус кривизни), тоді як

для другого окрім зміни радіуса кривизни порушується сферичність і спостерігається еліптичність. Такі висновки можна зробити, прослідкувавши, як змінюються максимальний та мінімальний радіуси кривизни відносно напруги в обох випадках (рис. 8). Зміна радіуса кривизни зумовлена тиском на поверхню дзеркала. Чим більший тиск (прикладається вища напруга живлення до п'єзоприводу), тим поверхня дзеркала більше вирівнюється, тобто, радіус кривизни стає більший.

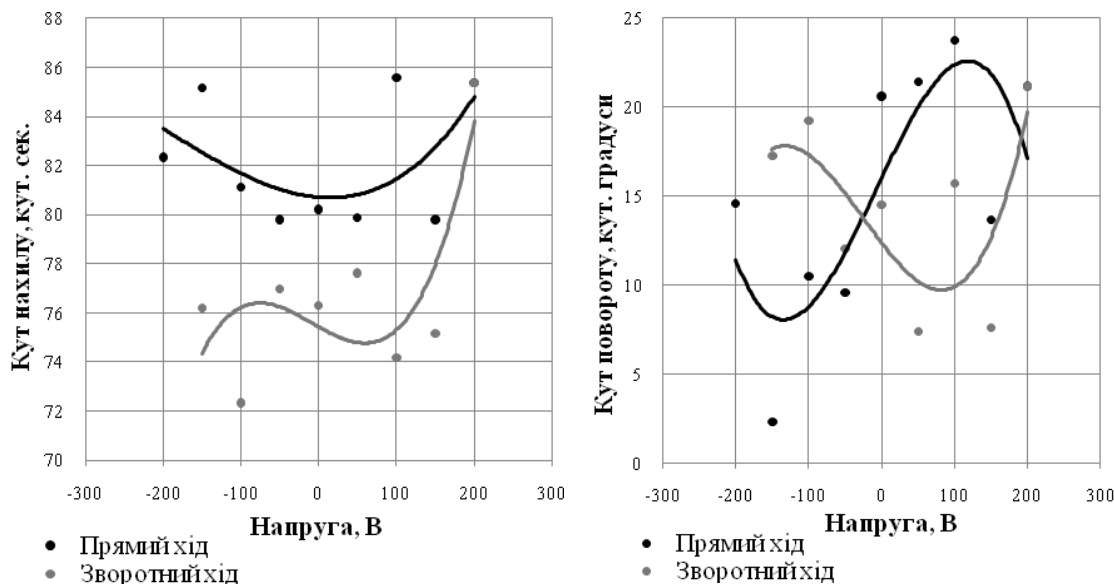


Рис. 5. – Залежність кута нахилу відбивальної поверхні до посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність кута повороту проекції нормалі відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (праворуч) для випадку двомембранного дзеркала

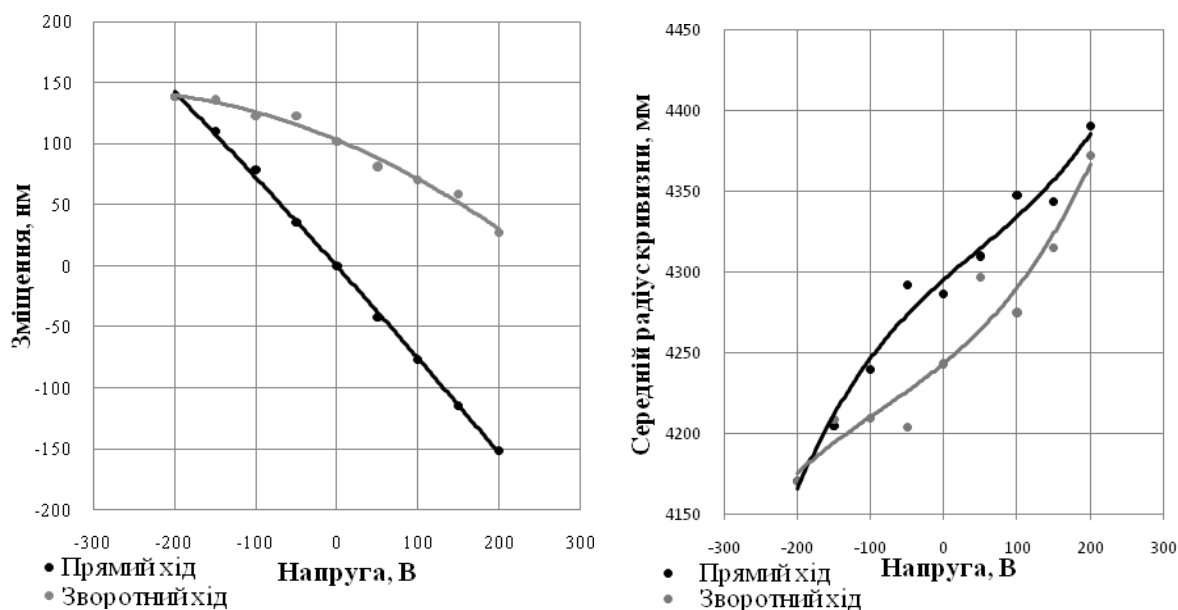


Рис. 6. – Залежність зміщення відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність середнього радіуса кривизни відбивальної поверхні дзеркала від напруги (праворуч) для випадку одномембранного дзеркала

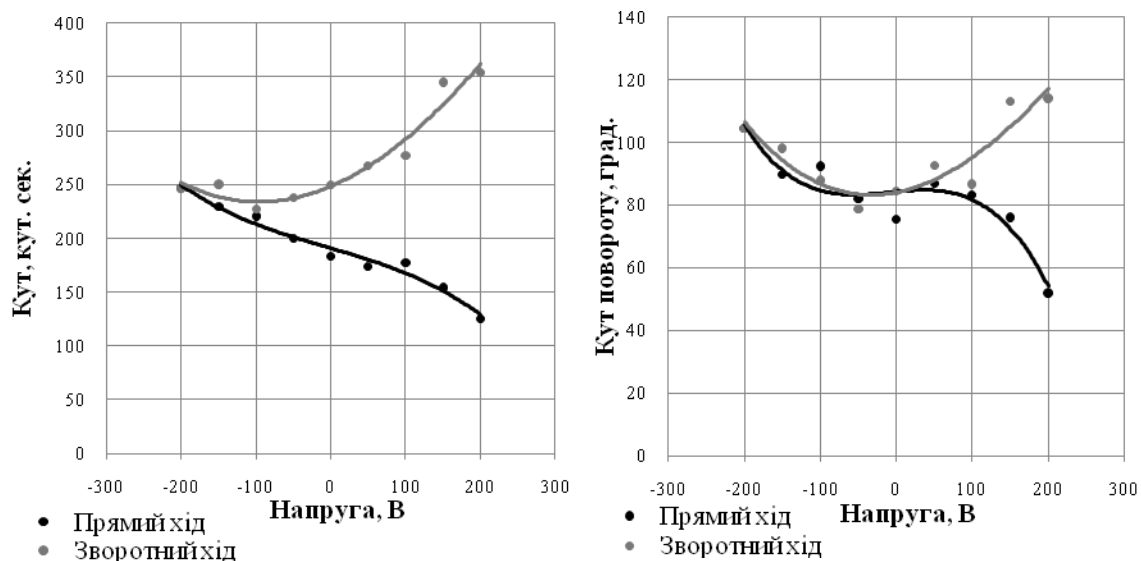


Рис. 7. – Залежність кута нахилу відбивальної поверхні до посадкової поверхні від напруги (ліворуч) та залежність кута повороту проекції нормалі відбивальної поверхні відносно посадкової поверхні від напруги (праворуч) для випадку одномембранного дзеркала

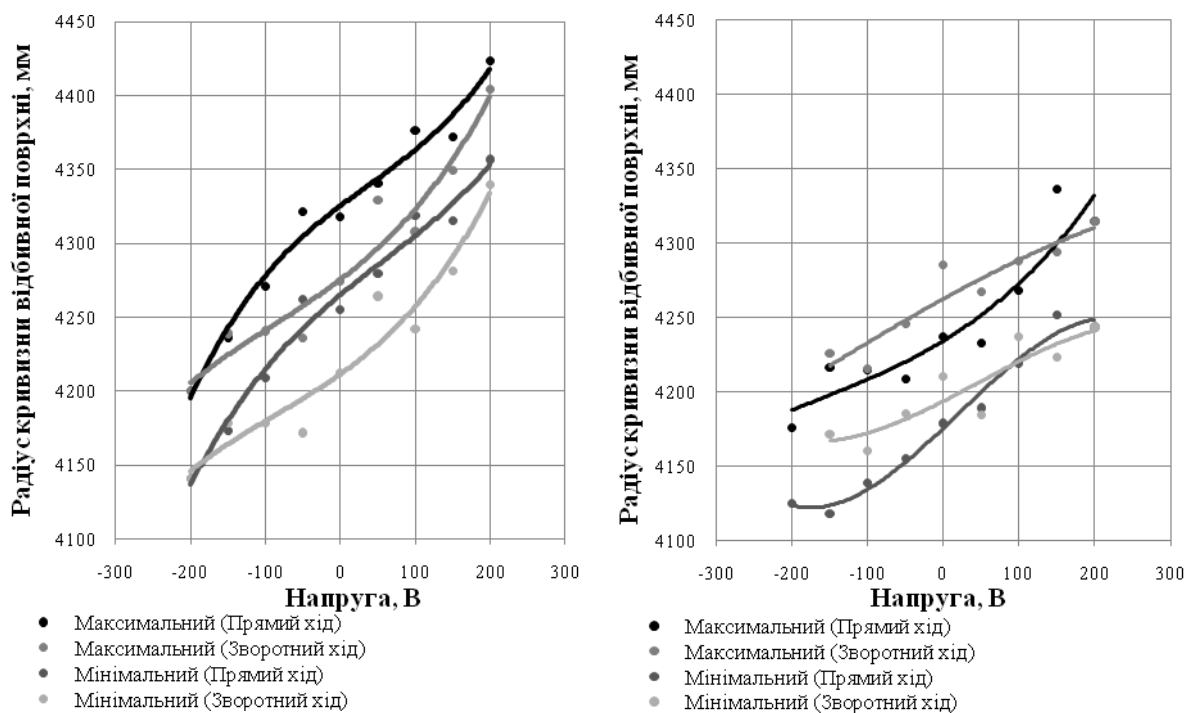


Рис. 8. – Залежності максимального та мінімального радіусу кривизни від напруги у випадках одномембранного (ліворуч) та двомембранного (праворуч) дзеркал

Діапазон зміни максимального радіусу кривизни для одномембранного дзеркала сягає майже 224 мм, мінімального – 216 мм. Незначна різниця говорить про збереження поверхнею сферичності. Для двомембранного дзеркала діапазон зміни максимального та мінімального радіусів кривизни виявився відповідно 160 мм та 134 мм. Порівняно з дзеркалом одномембранного типу радіуси криви-

зни двомембранного дзеркала мають менший діапазон, але більшу різницю між максимальним і мінімальним радіусом, що пояснюється виникненням еліптичності поверхні, яка в свою чергу може бути пояснена жорсткішою конструкцією дзеркала (має місце більша кількість контактів п'єзодвигуна з поверхнею мембранного дзеркала).

В той же час різниця радіусів кривизни для прямого та зворотного ходів за одного значення напруги у випадку одномембранного дзеркала становить 20 мм для максимального радіусу та 17 мм для мінімального. Незначна відмінність значень також говорить про збереження сферичності. Для двомембранного ж дзеркала різниця максимальних радіусів кривизни для прямого та зворотного ходів за того ж значення напруги становить 10 мм, а різниця мінімальних радіусів – 54 мм, що також говорить про виникнення еліптичності поверхні.

Ті ж висновки можна зробити дослідивши та порівнявши ексцентриситети поверхні обох типів конструкції дзеркал в залежності від прикладеної напруги (рис. 9).

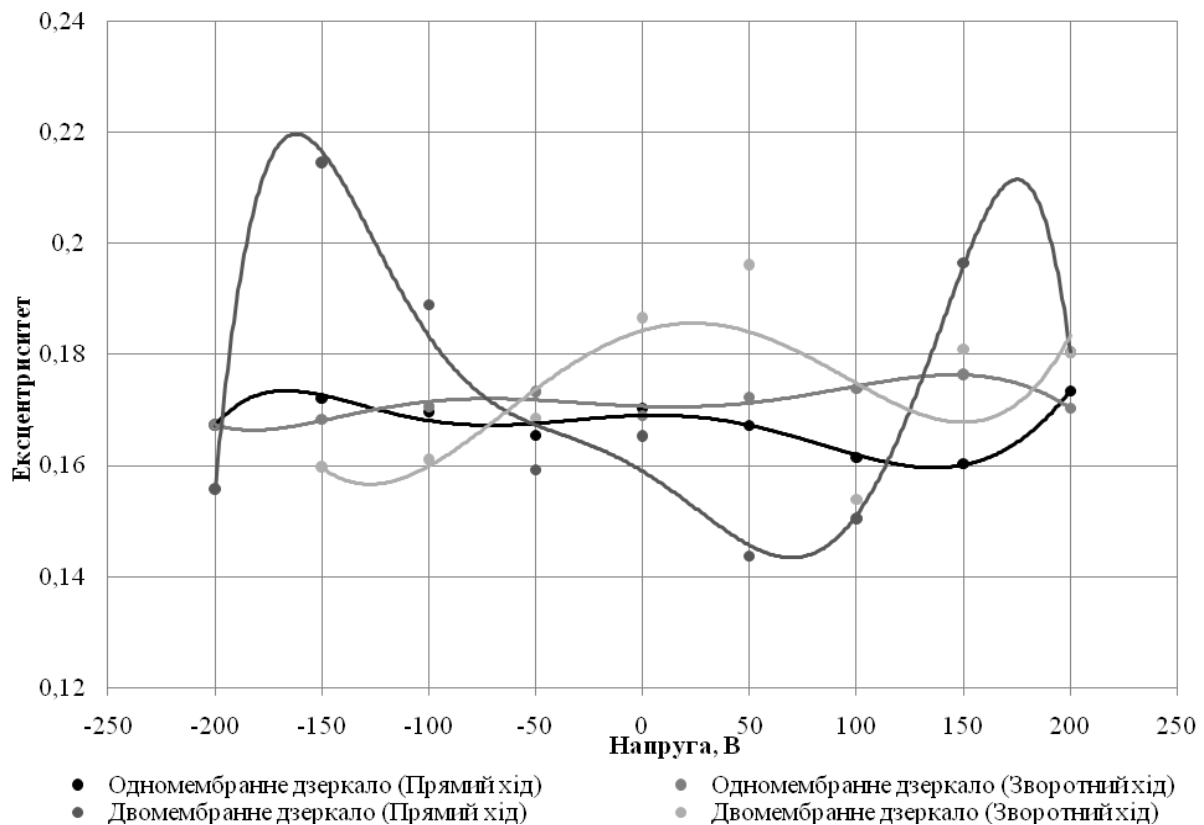


Рис. 9. – Порівняльний графік залежності ексцентриситету поверхні дзеркала обох типів конструкції від напруги

Ексцентриситет – числова характеристика, що показує ступінь відхилення поверхні кінцевого перерізу від сферичності. Для сфери ексцентриситет наближається до нуля, а для еліпса – більше нуля, але менше одиниці. На рис. 9 видно, що значення ексцентриситету поверхні одномембранного дзеркала майже не змінюється на відміну від двомембранного. Таким чином, форма поверхні

одномембранного дзеркала зберігається на відміну від двомембранного, форма якого в залежності від прикладеної напруги витягується в еліпс у більшій чи меншій мірі.

Отже, двомембранна конструкція забезпечує значно вищу стабільність положення нормалі дзеркала. Особливістю одномембранної конструкції виявився великий діапазон переміщення, обумовлений її меншою жорсткістю, а також збереження сферичності відбивальної поверхні дзеркала.

Висновки

Виготовлені експериментальні зразки лазерних мембранних дзеркал, на прикладі яких зручно досліджувати їх характеристики. Вперше були проведені вимірювання квазідинамічних характеристик мембранних дзеркал прямим методом. Дані були оброблені, проаналізовані та обговорені.

Були запропоновані та перевірені різні моделі розрахунку поверхонь дзеркала.

В процесі переміщення дзеркало зазнає деформації поверхні – змінюється радіус кривизни поверхні і виникає нахил відбивальної поверхні дзеркала відносно посадкової поверхні з одночасним її поворотом відносно осі дзеркала.

Аналогічні характеристики були отримані і для одномембранної конструкції дзеркала. Проте двомембранна конструкція забезпечує значно вищу стабільність положення нормалі дзеркала – до 15 кут. сек порівняно з одномембранною, яка в тому ж діапазоні зміщень дає нахил нормалі дзеркала до 2 кут. мінут.

В подальших дослідженнях планується дослідити вплив ефектів вібрації на динамічні характеристики дзеркал та їх поверхонь. А також заплановано дослідити прямими методами вимірювання зміну стабільності частоти кільцевого лазера в процесі руху дзеркала.

Список використаних джерел

1. Галутва Г.В., Рязанцев А.И. (под ред. М.Ф. Стельмаха) Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов / «Связь», Москва, 1972.