

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.353417>

УДК 535.317.9

І.Г. Чиж^{1*}, <https://orcid.org/0009-0000-3738-4835>

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, <https://for.org/00syn5v21>

*Відповідальний автор: i.g.chizh@gmail.com

ВАРІОЛІНЗИ ЯК НЕРУХОМІ ЕЛЕМЕНТИ ZOOM-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Проблематика. Запропоновано модернізацію та структурне удосконалення zoom-оптичних систем шляхом застосування в них нерухомих електрично чи механічно керованих варіолінз.

Мета дослідження. Провести огляд і проаналізувати досягнення у сфері розробок та удосконалень адаптивних варіолінз із зовнішньо керованою оптичною силою, призначених для використання в зум-оптичних системах як нерухомих компонентів. З'ясувати причини, що можуть призводити до нестабільності положення кардинальних точок оптичної системи варіолінз.

Методика реалізації. Проаналізовано фізичні основи дії сучасних зовнішньо керованих варіолінз з розглядом умов, що забезпечують зміну оптичної сили варіолінз. Використано загальні положення теорії оптичних систем для оцінювання впливу зміни геометричної форми і положення поверхні поділу робочих оптичних середовищ варіолінз на значення їх оптичної сили. Проаналізовано і систематизовано дані, представлені на сайтах виробників та у відкритих інформаційних джерелах і публікаціях розробників варіолінз, що стосуються властивостей конструкції їх реальних моделей.

Результати дослідження. Аналітичний огляд процесів, що обумовлюють зміну оптичної сили мембранних та електрозмочуваних варіолінз, показав, що варіації значень їх оптичної сили забезпечуються як змінами радіуса кривизни поверхні, що розділяє робочі оптичні середовища, так і зміною положення вказаної поверхні уздовж оптичної осі. Наслідком цього є зсув уздовж оптичної осі варіолінзи кардинальних (головних і вузлових) точок варіолінз і відповідний зсув їх точок фокусів.

Висновки. У розглянутих мембранних та електрозмочуваних варіолінзах зміна геометричних форм простору, який заповнюють робочі оптичні середовища, впливає не тільки на оптичну силу, але і на положення кардинальних точок варіолінз. Тому в zoom-оптичних системах варіолінзи не можна вважати нерухомими оптичними компонентами, хоча положення їх корпусів у конструкції систем фактично є фіксованими. Фактор зсуву кардинальних точок варіолінз потребує детального подальшого дослідження і визначення функціональної залежності між вказаним зсувом і значеннями оптичної сили варіолінзи. Практичне використання результатів цих досліджень дозволить вдосконалити алгоритм параметричного синтезу zoom-оптичних систем із вбудованими в них варіолінзами, а також дозволить мати теоретичне підґрунтя для більш точного програмування рівня керуючих електричних сигналів, які подаються від мікроконтролерів на варіолінзи. Це сприятиме запобіганню під час функціонування zoom-оптичних систем шкідливих осьових зсувів сформованих ними зображень (дефокусування зображень) і порушення абераційної корекції системи.

Ключові слова: мембранні варіолінзи; електрозмочувані варіолінзи; кардинальні точки варіолінз; зсуви кардинальних точок варіолінз.

Вступ

Поперечне, кутове і поздовжнє збільшення зображень, сформованих оптичними системами, є їх важливими функціональними параметрами. У випадку систем візуальних оптичних приладів до вказаних параметрів ще додають видиме збільшення. Усі вони характеризують співвідношення між лінійними чи між кутовими розміра-

ми предметів та їх зображеннями, що сформовані оптичними системами.

Вказані параметри відносять до типу параксіальних, а тому їх визначають на основі гаусівської оптики та головних формалізованих положень теорії ідеальної оптичної системи – рівнянь Ньютона і Гауса, з яких випливає, що значення вищевказаних параметрів залежать від фокусної відстані оптичної системи і дистанції до площини об'єктів.

Пропозиція для цитування цієї статті: І.Г. Чиж, «Варіолінзи як нерухомі елементи zoom-оптичних систем», *Наукові вісті КПП*, № 1, с. 50–59, 2026. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.353417>

Offer a citation for this article: I.G. Chyzh, "Vario-lines as fixed elements of zoom optical systems", *KPI Science News*, No. 1, pp. 50–59, 2026. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2026.1.353417>

У переважній більшості оптичних систем їх фокусна відстань є величиною незмінною. Утім, існує потреба в оптичних системах, в яких за фіксованої відстані до об'єктів спостережень фокусна відстань повинна дискретно, або безперервно змінюватися в потрібному діапазоні значень, чим досягають відповідної зміни масштабу зображень. Відповідно, при цьому змінюються і розміри поля зору таких систем. В сучасній термінології такі оптичні системи називають zoom-системами.

Якщо zoom-система побудована з використанням оптичних елементів чи компонентів з незмінними конструктивними параметрами, бо їх виготовляють із твердих оптично однорідних матеріалів, то для досягнення zoom-ефекту потрібна зміна їх взаємного розміщення вздовж оптичної осі. У цих випадках використовують механізми і приводи, які дозволяють пересувати ці елементи відповідно до встановлених для них функціональних залежностей. Цим забезпечують потрібну зміну фокусної відстані і збільшення сформованих оптичних зображень. Зрозуміло, що механізми і приводи зазвичай суттєво ускладнюють конструкцію оптичної системи, збільшують її габарити і собівартість, іноді не дозволяють мати потрібну швидкодію.

Природно, що вищевказані недоліки таких zoom-систем мотивували до пошуків і винаходів адаптивних оптичних елементів, які були б здатні майже миттєво змінювати свою фокусну відстань (чи оптичну силу як величину, зворотну фокусній відстані), при цьому залишаючись у системі нерухомими.

Використання адаптивних оптичних елементів, безумовно, сприяє суттєвому спрощенню конструкції системи, зменшенню її габаритів і збільшенню швидкодії адаптації, чому суттєво сприяє електронне керування варіокомпонентами, та їх комп'ютерне інтегрування.

Останнім часом спостерігається помітне зростання застосування адаптивних оптичних елементів, особливо в таких пристроях, як камери мобільних телефонів, вебкамери, міні-проектори, технічний зір, окуляри, 3D-дисплеї та інше. Найширшого використання і найбільшого розвитку серед них отримали варіолінзи [1, 2, 3, 4]. Ознайомлення широкого кола спеціалістів зі світовими досягненнями у сфері розробки нової елементної бази zoom-оптичних систем, до якої входять електрично керовані варіолінзи, а також аналіз стабільності положення їх кардинальних оптичних елементів зі зміною оптичної сили є метою цієї роботи.

Постановка задачі

Завданням цієї роботи є здійснення огляду досягнень у сфері розробок та удосконалень адаптивних варіолінз із зовнішньо керованою оптичною силою, призначених для використання в zoom-оптичних системах як нерухомих компонентів, з виявленням причин, що можуть призводити до нестабільності кардинальних елементів оптичної системи варіолінз.

Огляд адаптивних варіолінз

Пошук принципів дії лінз, здатних під зовнішнім електричним керуванням змінювати свою оптичну силу, залишаючись при цьому просторово нерухомими, привів до появи декількох типів варіолінз, в яких для їх функціонування використовують різні фізичні ефекти. До таких лінз відносять [1]:

- мембранні варіолінзи;
- варіолінзи на основі ефекту електрозмочування;
- діелектрофоретичні варіолінзи;
- рідкокристалічні варіолінзи.

Принцип дії, який є загальним до всіх цих лінз, полягає у зовнішньо керованій зміні конструктивних параметрів їх оптичних середовищ. До них належать радіус поверхні, що розділяє робочі оптичні середовища лінзи, та його осьове положення, показники заломлення оптичних середовищ.

Зміна значень цих параметрів не тільки викликає зміну оптичної сили, а також може приводити до руху їх кардинальних точок. Це явище обумовлене фізичними ефектами, покладеними в основу їх функціонування, тому під час аналізу положення кардинальних точок варіолінз треба враховувати їх конструктивні властивості і способи керування оптичними силами варіолінз.

Оскільки діелектрофоретичні та рідкокристалічні варіолінзи ще перебувають на стадії наукових досліджень, й до того ж вони за потенційними можливостями більш придатні для використання як мікролінзових растрових систем, то основну увагу в цій роботі присвячено огляду й аналізу мембранних та електрозмочуваних варіолінз.

Мембранні варіолінзи

З точки зору складності технічної реалізації порівняно простішими є мембранні варіолінзи,

через що їх розвиток почався раніше з-поміж усіх інших типів варіолінз. Головним, ключовим елементом мембранних варіолінз є еластична плівка, здатна до розтягування під зовнішнім тиском. У лінзі мембрана розділяє два прозорих оптично однорідних середовища (рис. 1).

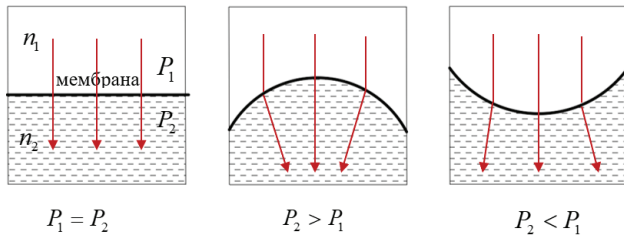


Рис. 1. Принцип дії мембранної варіолінзи: n_1, n_2 – показники заломлення оптичних середовищ над мембраною і під нею; P_1, P_2 – тиск над і під мембраною відповідно

Такими оптичними середовищами можуть бути повітря й вода або дві рідини з різними показниками заломлення, але з якомога більш близькими значеннями питомої ваги. Останнє сприяє суттєвому зменшенню впливу на форму еластичної мембрани гравітаційної сили при різних положеннях лінзи відносно горизонтальної площини.

Еластична мембрана повинна мати такі властивості:

1. Високу і рівномірну по її поверхні здатність пропускати крізь себе електромагнітні хвилі потрібного спектрального діапазону. Поверхня мембрани має бути дуже гладкою як у розслабленому, так і в розтягнутому стані.

2. Поверхня мембрани повинна розтягуватися і випинатися значною мірою без будь-яких локальних спотворень форми та пошкоджень. Після зняття сили розтяжка мембрана повинна добре відновлювати початкову форму.

3. Мембрана не повинна хімічно взаємодіяти з робочою рідиною.

4. Матеріал мембрани повинен мати високу температуру плавлення, зберігати механічні властивості в широкому діапазоні температур, не набухати в умовах підвищеної вологості, не руйнуватися під впливом ультрафіолетового випромінювання, мати достатній термін служби.

Найкращим матеріалом для створення мембрани, що відповідає зазначеним вище вимогам, є полідиметилсилоксан (PDMS) [1].

Форма еластичної мембрани – пласка, опукла чи увігнута – залежить від різниці значень тиску P_1 і P_2 . Радіус кривизни вигнутої мембрани R знаходять за формулою [1]

$$R = \frac{2T}{P_2 - P_1}, \quad (1)$$

де T – пружна константа матеріалу мембрани.

Форму поверхні мембрани описують твірною функцією [1]

$$Z(x) = \frac{P_2 - P_1}{4T}(a^2 - x^2), \quad (2)$$

яка свідчить про те, що форма поверхні є параболоїдною, тобто асферичною (рис. 2).

З виразів (1) та (2) незалежно від асферичності фокусну відстань мембранної варіолінзи як параксильний параметр знаходять за формулою

$$f' = \frac{n_2}{n_2 - n_1} R = \frac{2n_2 T}{(n_2 - n_1)(P_2 - P_1)}, \quad (3)$$

при цьому оптична сила лінзи в діоптріях

$$\Phi [\text{дптр}] = \frac{500(n_2 - n_1)(P_2 - P_1)}{n_2 T}. \quad (4)$$

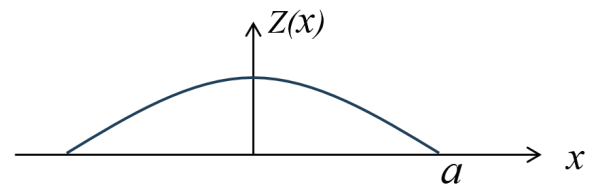


Рис. 2. Графік твірної функції поверхні мембрани ($2a$ – діаметр мембрани)

З формул (3), (4) видно, що для збільшення діапазону зміни оптичної сили лінзи потрібно збільшувати різницю між показниками заломлення робочих середовищ, діапазон різниці значень тиску, що діють на мембрану з обох її сторін, і мати менші значення пружної константи матеріалу мембрани.

Щоб забезпечити потрібні значення $(P_2 - P_1)$, використовують актуатори (механічні та електричні приводи) різних конструкцій. Перший патент щодо мембранної лінзи зі змінною фокусною відстанню був виданий ще у 1968 р. [5]. Відтоді для деформації форми поверхні лінзи було запропоновано різні конструкції актуаторів, такі як шприц [6, 7, 8, 9], серводвигун [10, 11], п'єзоелектричний [12, 13, 14], штучний м'яз [15] і звуковий котушковий привід (VCA) [16, 17]. Усі ці конструкції можна умовно поділити на дві групи за такою ознакою – поєднаними чи розділеними є камери лінзи і резервуар, де міститься рідина, яку під тиском подає актуатор у камеру лінзи. На рис. 3 показано схему пред-

ставника першої групи мембранних варіолінз, в якому актуатор працює як шприцевий насос.

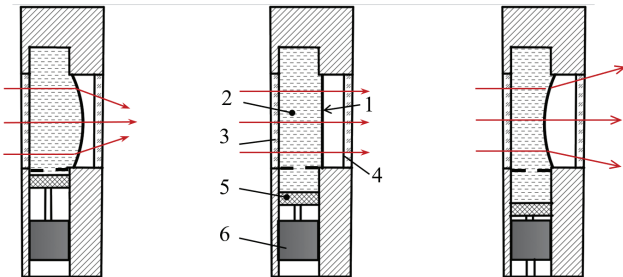


Рис. 3. Мембранна двокамерна варіолінза: 1 – мембрана; 2 – рідина; 3, 4 – вхідне і вихідне скляні вікна; 5 – поршень; 6 – сервопривід

Камера лінзи (верхня частина схеми) і камера резервуара (нижня частина схеми), де міститься надлишок рідини, розділені діафрагмою з невеликим отвором або спеціальним трубопроводом. У камері резервуара міститься поршень, який пересувається за допомогою сервоприводу, втягуючи чи виштовхуючи рідину, що потрапляє в камеру лінзи, змінюючи тим самим форму мембрани. Сервопривід має електроніку керування, яка через зсув поршня програмовано встановлює й утримує потрібну оптичну силу варіолінзи. Як привод поршня може бути також використаний програмно керований лінійний кроковий мікродвигун.

На рис. 4 зображено спрощену схему другого типу мембранної варіолінзи, в якій камера лінзи і резервуар поєднані. Вплив на форму еластичної мембрани 1 здійснює актуатор 6 у вигляді пластин або диску, зсув, або вигін яких переміщує рідину в камеру лінзи через отвори 5 у скляній пластині 4. Пластини 2 й 4 слугують вікнами варіолінзи.

Актуатором слугує двошарова п'єзоелектрична пластина, яка вигинається при подачі напруги окремо до її шарів, різної за величи-

ною і полярністю. При цьому через зменшення об'єму простору між мембраною 6 і скляною пластиною 4 форма еластичної мембрани стає опуклою, і лінза отримує оптичну силу із знаком плюс (рис. 4, б). Навпаки, збільшення об'єму вказаного простору витягує рідину з камери лінзи, чим викликає увігнутість форми еластичної мембрани, лінза отримує оптичну силу із знаком мінус (рис. 4, в).

В описах до останніх моделей мембранних варіолінз згадується актуатор Bobbin with voice coil, що діє за принципом звукової котушки [16, 17]. Він не потребує високої напруги, як у п'єзоактуаторах. Це мініатюрний, з малим споживанням електроенергії лінійний двигун, який до цього був рекомендований для використання в оптичних системах мобільних телефонів і вебкамер для переміщень і фіксації положення зом-мікрооб'єктивів у процесі їх автоматичного фокусування. Такий актуатор за допомогою комп'ютерно керованого драйвера за струму в котушці до 250 мА здатний пересувати, а потім фіксувати мембрану 6 у потрібному положенні, забезпечуючи тим самим варіолінзі потрібне значення оптичної сили.

На рис. 5 [18] показано відомі на цей час комерційні моделі мембранних варіолінз. Перші три мають безпосереднє електричне керування. Їх швидкодія становить декілька мілісекунд. Модель ML-20-37 має механічне керування з використанням зовнішнього зубчастого колеса. Його кутове обертання в діапазоні від нуля до 20° дозволяє змінювати оптичну силу в діапазоні ± 18 дптр з похибкою відтворення $\pm 0,1$ дптр. Для налаштування оптичної сили цієї варіолінзи потрібний обертальний кроковий двигун із зубчастим на валу колесом, котре складає кінематичну пару із зубчастим колесом варіолінзи, тому ця варіолінза також має автоматичне електричне керування від драйвера крокового двигуна.

З-поміж відомих на цей час типів електрично керованих варіолінз безперечно перева-

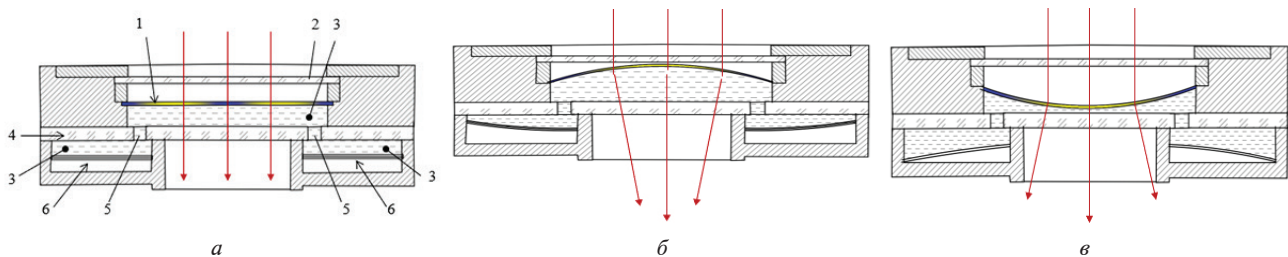


Рис. 4. Мембранна однокамерна варіолінза: 1 – мембрана; 2 – вхідне скляне вікно; 3 – рідина варіолінзи; 4 – скло з отворами; 5 – отвори в деталі 4; 6 – металева мембрана



Рис. 5. Моделі мембранних варіолінз швейцарської компанії Optotune

гу мають мембранні – у випадках, коли у варіолінзи треба мати якомога більший діаметр апертури.

Варіолінзи, що працюють на ефекті електрозмочування

На відміну від лінз з еластичною мембраною варіолінзи, що працюють на використанні ефекту електрозмочування, є більш привабливими завдяки прямому електричному (не механічному) впливу на форму оптичної поверхні, яка забезпечує потрібну оптичну силу.

Коли невелика кількість рідини (крапля) потрапляє на тверду поверхню іншого матеріалу, то вона отримує форму, яка залежить від співвідношення між когезійною та адгезійною силами. Когезійною називають силу між молекулами однієї і тієї самої речовини. Силу притягання між молекулами різних речовин називають адгезійною силою. На рис. 6 показано векторну діаграму сил натягу, що діють на каплю рідини, у місцях її контакту з поверхнею іншого твердого матеріалу [1].

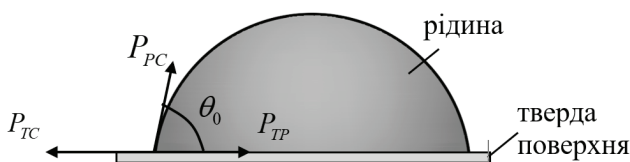


Рис. 6. Векторна діаграма сил натягу: P_{TP} – сила натягу на межі твердої речовини й рідини; P_{TC} – сила натягу на межі твердої речовини і середовища навколо краплі рідини; P_{PC} – сила натягу на поверхні краплі рідини, що контактує із середовищем навколо краплі рідини; θ_0 – кут контакту

Взаємодію вказаних сил описують рівнянням [19]

$$P_{TC} = P_{TP} + P_{PC} \cdot \cos \theta_0, \quad (5)$$

з якого кут контакту θ_0 є результатом поверхневого напруження (вільної енергії поверхні) між рідиною і твердим тілом, оточеним парою рідини або іншою речовиною:

$$\cos \theta_0 = \frac{P_{TC} - P_{TP}}{P_{PC}}. \quad (6)$$

На рис. 7 показано можливі форми краплі рідини, обумовлені співвідношеннями між силами натягу P_{TP} , P_{TC} , P_{PC} . Так, згідно з (5) за $P_{TP} = 0$ $\theta_0 = 0^\circ$. Це означає, що крапля фактично розтікається по поверхні. Коли $P_{TC} = P_{TP}$, то $\theta_0 = 90^\circ$, і крапля набуває форми півсфери. За $P_{TC} = 0$ та $P_{TP} = P_{TC}$ крапля може набувати навіть сферичної форми, $\theta_0 = 180^\circ$, не розтікаючись по поверхні.

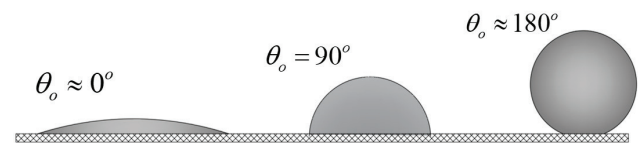


Рис. 7. Можливі форми краплі рідини на твердій поверхні

Якщо рідина і середовище, що оточує краплю рідини, мають різні показники заломлення, то ця крапля отримує властивості лінзи. Оптична сила такої лінзи залежить від форми її поверхні, яка визначається кутом контакту θ_0 , тому штучне регулювання кута θ_0 зовнішніми засобами дозволяє створювати лінзу із змінною оптичною силою, тобто варіолінзу.

З формул (5), (6) видно, що на значення кута θ_0 можна впливати, змінюючи хоча б одну

із сил натягу P_{TP} , P_{TC} , P_{PC} . Перший крок у цьому напрямку зробив фізик М. Ліппман, який ще у 1875 р. опублікував роботу «Зв'язок між електричними і капілярними явищами», де було показано, що на силу натягу P_{TP} можна впливати і тим самим змінювати форму краплі. Як контактуючу рідину було обрано електролітний розчин води і рідку ртуть, розміщені в капілярі. Із двох сторін ртуті містився електролітичний розчин. При прикладанні до електроліту із двох сторін краплі електричної напруги крапля ртуті починала рухатись у капілярі, тому що форма краплі ртуті у капілярі зліва і справа ставала різною. Це викликало різну силу натягу P_{TP} на лівій і правій сторонах краплі, яка і призводила до руху краплі ртуті у капілярі. Відкриття цього електрокапілярного явища спричинило появу таких винаходів – чутливого електрометра, оптичного перемикача, обертового рідкого мікромотора і мікропосола.

Водночас виявилось, що під час використання у цих пристроях як однієї з рідин води з розчином у ній електролітом, пропускання через неї електричного струму спричиняє електролітичний розклад цієї води. Щоб запобігти цьому, було запропоновано використовувати тонку діелектричну плівку – ізолятор для відокремлення електролітної рідини від металевого електрода [20, 21, 22].

На рис. 8 показано схему, якою пояснюється вплив напруги V на форму краплі. Чим більша напруга, тим меншим стає значення кута θ_0 . Крапля сильніше розтікається по поверхні ізолятора, тому цей ефект отримав назву електрозмочування.

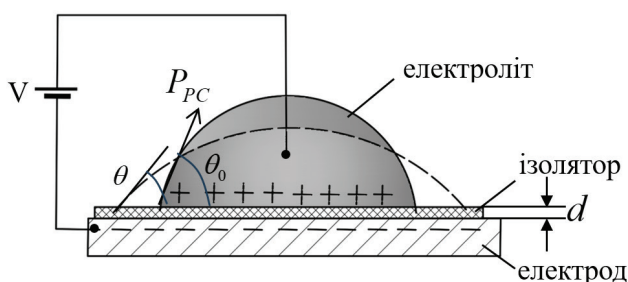


Рис. 8. Вплив прикладеної напруги V на форму краплі (штрихова лінія)

Під час подавання напруги між рідким електролітом та електродом позитивні заряди накопичуються на верхній поверхні ізолятора, а негативні – на його нижній поверхні. Накопичені заряди змінюють поверхневий на-

тяг краплі, через що змінюється кут контакту θ , крапля розтікається по ізолятору (штрихова лінія на рис. 8) і тому змінює свою форму та оптичну силу.

Кут контакту згідно з посиланнями [23, 24, 25]:

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2d P_{PC}} V^2, \quad (7)$$

де θ_0 – кут контакту за $V = 0$;

ε_0 – діелектрична проникність вільного простору ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{J} \cdot \text{m}$);

ε – діелектрична константа ізолятора;

d – товщина діелектричного ізолятора.

З рівняння (7) випливає, що кут контакту θ пропорційний V^2 . Товщина діелектричного шару d і діелектрична проникність використаного матеріалу визначають ту робочу напругу V , за якої форма краплі забезпечує їй потрібну оптичну силу. Рівняння (7) є теоретичною основою явища електрозмочування на діелектриках.

Крапля рідини, показана на рис. 8, попри всі зміни її форми все ж може мати тільки позитивну оптичну силу, якщо показник заломлення рідини є більшим, ніж показник заломлення середовища оточуючого простору. Утім, практичні потреби вимагають від варіолінзи забезпечувати більш широкий діапазон зміни оптичної сили від позитивних до негативних значень. У цьому діапазоні треба мати і нульове значення оптичної сили. Потреба у таких варіолінзах привела до винаходу конструкції, яку показано на рис. 9. У цій конструкції вже використовують дві рідини, які:

- не мають змішуватися;
- повинні мати різні показники заломлення;
- їхня питома вага має бути наближеною одна до одної;
- одна рідина має бути електропровідною, а інша – ізолюючою;
- обидві рідини мають бути прозорими для світла;
- обидві рідини не повинні вступати в хімічну реакцію під впливом світла, тепла або будь-яких інших факторів.

Як електропровідну рідину використано електролітний розчин – електропровідну воду. У ролі діелектричної рідини застосовано оптичну олію.

Лінзова комірка на рис. 9 складається з циліндричної камери, в якій міститься незмішувана діелектрична олія та електропровідна вода. Ця вода по внутрішній зоні циліндра перебуває у прямому контакті з нижнім електродом, який

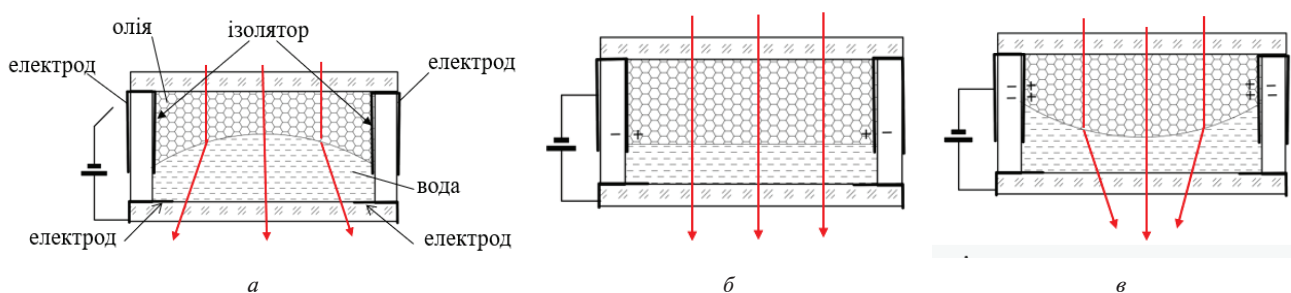


Рис. 9. Комірка варіолінзи із двома рідинами, що здатна забезпечувати негативне (а), нульове (б) і позитивне (в) значення оптичної сили

нагадує шайбу. Верхній електрод своєю поверхнею всередині циліндра в зоні, яка контактує з олією та водою, покритий діелектричною плівкою – ізолятором. Висота цього циліндричного електрода з ізолятором має бути такою, щоб за всіх напруг, які подаються на обидва електроди, межа розділення олії та води завжди була у зоні дії цього електрода (рис. 9). Між верхнім циліндричним і нижнім електродами зазор має бути достатнім. У верхнього електрода внутрішня і зовнішня бічні частини на поверхні циліндра перебувають в електричному контакті. Для отримання великого кута контакту поверхня ізолятора всередині циліндра покрита тонким гідрофобним матеріалом.

Якщо до електродів напругу не прикладають, то поверхня води через більшу силу поверхневого натягу має опуклу форму (рис. 9, а). Оскільки показник заломлення олії більший ніж показник заломлення провідної води, то лінза поводить себе як розсіювальна, тобто має негативну оптичну силу, тому промені, паралельні на вході лінзи, будуть розходитися на виході з лінзи.

Коли на електроди подають напругу, на внутрішній і зовнішній поверхнях ізолятора накопичуються протилежні заряди. При цьому через збільшення поверхневого натягу на гідрофобній поверхні вода більше змочує цю поверхню. Через це форма краплі змінюється. Зростання напруги дозволяє межу поділу двох рідин зробити плоскою (рис. 9, б). При цьому лінза отримує нульове значення оптичної сили – безкінечне значення фокусної відстані, а тому промені проходять крізь неї не заломлюючись.

Якщо напругу збільшувати й далі, вода ще більше змочує гідрофобну поверхню, тому межа, що розділяє олію та воду, набуває увігнутої форми, а лінза отримує позитивне значення оптичної сили і промені збігаються (рис. 9, в).

Нижче, на рис. 10, показано зовнішній вигляд і діапазони значень оптичної сили електрозмочуваних лінз, які виготовляє компанія Corning® Varioptic® [26]. Також наведено діаметри апертур цих лінз, які свідчать про те, що вони поступаються за цим важливим параметром мембранним варіолінзам компанії Optotune.

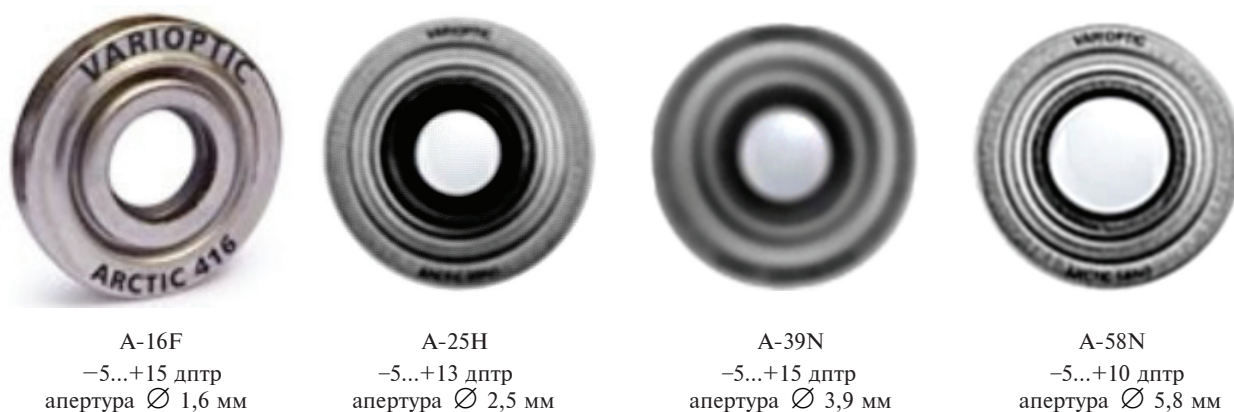


Рис. 10. Моделі електрозмочуваних лінз

Моделі електрозмочуваних лінз компанії Corning® Varioptic® [26] зображено на рис. 10.

На рис. 11 показано конструкцію комерційних моделей електрозмочуваних лінз.

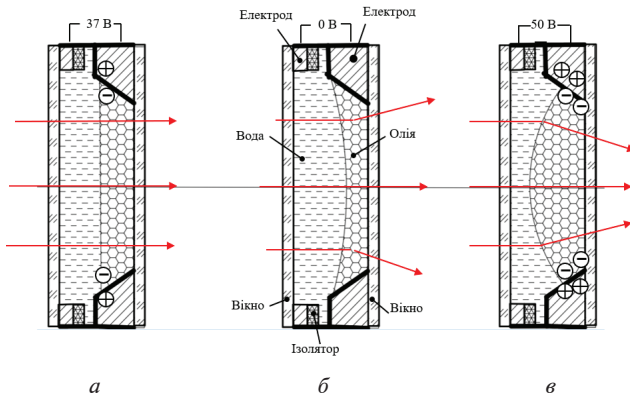


Рис. 11. Конструкція електрозмочуваних лінз компанії Corning® Varioptic®: *a* – напруги на електродах немає, лінза має найбільше негативне значення оптичної сили; *b* – напруга 37 В, яка забезпечує варіолінзі нульове значення оптичної сили; *v* – напруга 50 В, що забезпечує варіолінзі найбільше позитивне значення оптичної сили

Типовий графік залежності оптичної сили електрозмочуваних лінз подано на рис. 12 (дані взято з відкритої рекламної інформації компанії Corning® Varioptic® [27]). Пунктирні-

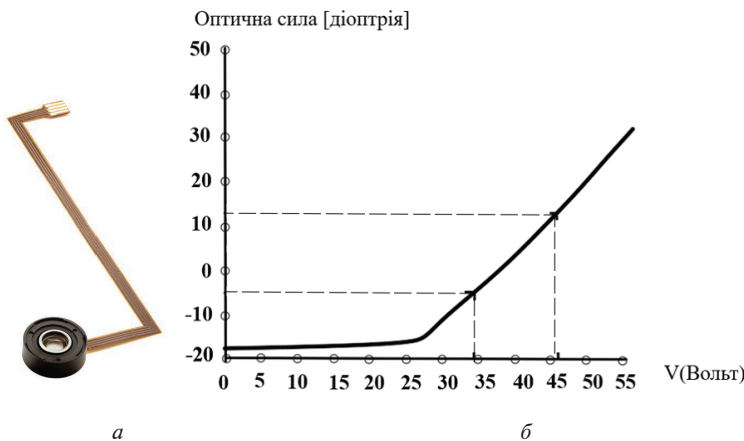


Рис. 12. Модель електрозмочуваної лінзи компанії Corning® Varioptic®: *a* – варіолінза A-39N0 в оправі з кабелем підключення до драйвера; *b* – типовий графік залежності оптичної сили електрозмочуваної лінзи від значення напруги на її електродах [27]

ми лініями виділено ділянку графіка, де він є фактично лінійним. Саме на цей лінійний діапазон зміни оптичної сили вказано на рис. 10. Як видно із графіка, фактичний діапазон зміни оптичної сили цих варіолінз лежить у межах від -15 до $+30$ діоптрій. Утім, використання всього діапазону зміни оптичної сили потребує врахувати деяку нелінійність, яка спостерігається за межами діапазону лінійності.

Висновки

1. Огляд електрозмочуваних і мембранних варіолінз, фактичного робочого діапазону зміни їх оптичної сили і реальних діаметрів їх апертур показав, що вони не можуть мати великої світлосили чи відносного отвору, а для отримання інших меж діапазону їх оптичної сили потрібно у парі з варіолінзами використовувати адаптивні лінзи з фіксованими значеннями оптичної сили.

2. Зміна оптичної сили розглянутих варіолінз неодмінно супроводжується осьовим зсувом поверхні розділу робочих середовищ через зміну різниці тиску по обидві сторони мембрани у мембранних лінзах, або через зміну умов змочування у електрозмочуваних варіолінзах.

3. Оскільки положення кардинальних точок варіолінз залежить від положення розділу робочих середовищ, то варіолінзи обох розглянутих типів при параметричному синтезі зом-оптичних систем, в яких передбачено їх використання, все ж потрібно розглядати як рухомі оптичні компоненти, хоча їх корпуси в конструкції зом-оптичних систем є нерухомими.

4. Кількісна оцінка зсувів кардинальних точок у варіолінзах, пов'язаних зі зміною їх оптичних сил, та отримання функціональної залежності цих зсувів від значень оптичної сили, має бути завданням попереднього дослідження моделей варіолінз, які плануються до інтегрування в оптичну зом-систему. Це потрібно не тільки для усунення можливих похибок фокусування зображень, а також для коректного програмування мікроконтролерів, що формують електричні керуючі сигнали до варіолінз.

References

- [1] Hongwen Ren and Shin-Tson Wu, "Introduction to Adaptive Lenses", A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2012, 274 p. Available: <https://doi.org/10.1002/9781118270080>
- [2] Yutao Huang *et al.*, "42 mm large aperture variable-focus lens based on the liquid-membrane-liquid structure", *Optics Express*, 2024, Vol. 32, pp. 44706–44720. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.539941>
- [3] Shibiao Li *et al.*, "Adaptive Varifocal Lenses Based on Dielectric Elastomer Actuator", *Photonics*, 2025, No. 12 (3), pp. 227. Available: <https://doi.org/10.3390/photonics12030227>
- [4] Lei Li *et al.*, "Adaptive liquid iris based on electrowetting", *Optics Letters*, 2013, Vol. 38, pp. 2336–2338. Available: <https://doi.org/10.1364/OL.38.002336>
- [5] B.M. Wright, "Improvements in or relating to variable focus lenses", English patent 1,209,234 (1968). Available: <https://patents.google.com/patent/US3598479A/en>
- [6] N. Sugiura and S. Morita "Variable-focus liquid-filled optics lens", *Appl. Opt.*, Vol. 32, pp. 4181–4186 (1993). Available: <https://doi.org/10.1364/AO.32.004181>
- [7] D.-Y. Zhang *et al.*, "Fluidic adaptive lens with high focal length tenability", *Appl. Phys.*, Vol. 82 pp. 3171–3172 (2003). Available: <https://doi.org/10.1063/1.1573337>
- [8] D.-Y. Zhang *et al.*, "Fluid adaptive lens of transformable lens type", *Appl. Phys.*, 2004, Vol. 84, pp. 4194–4196. Available: <https://doi.org/10.1063/1.1756679>
- [9] L. Pang *et al.*, "Set of two orthogonal adaptive cylindrical lenses in a monolith elastomer device", *Opt. Express*, 2005, Vol. 13, pp. 9003–9013. Available: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.009003>
- [10] S. Calixto *et al.*, "Pressure measurements through image analysis", *Opt. Express*, 2009, Vol. 17, pp. 17996–18002. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.17.017996>
- [11] H. Ren *et al.*, "Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor", *Opt. Express*, 2006, Vol. 14, pp. 8031–8036. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.14.008031>
- [12] H. Oku *et al.*, "Variable-focus lens with 1-kHz bandwidth", *Opt. Express*, 2004, Vol. 12, pp. 2138–2149. Available: <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.002138>
- [13] H. Ren and S.T. Wu, "Variable-focus liquid lens", *Opt. Express*, 2007, Vol. 15, pp. 5931–5936. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.15.005931>
- [14] F. Schneider *et al.*, "Optimization of an adaptive PDMS-membrane lens with an integrated actuator", *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, No. 154, pp. 316–321. Available: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.07.006>
- [15] S. Xu *et al.*, "Adaptive liquid lens actuated by photo-polymer", *Opt. Express*, 2009, Vol. 17, pp. 17590–17595. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.17.017590>
- [16] C.S. Liu and P.D. Lin, "Miniaturized auto-focusing VCM actuator with zero holding Current", *Opt. Express*, 2009, Vol. 17, pp. 9754–9763. Available: <https://doi.org/10.1364/OE.17.009754>
- [17] C.S. Liu *et al.*, "Design and characterization of miniature auto-focusing VCM actuator for cell phone camera applications", *IEEE Trans. Magnetics*, 2009, No. 45, pp. 155–159. Available: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2006564>
- [18] Tunable lenses – Optotune. Available: <https://www.optotune.com/tunable-lenses>
- [19] T. Young, "An essay on the cohesion of fluids", *Philos. Trans. R. Soc.*, London, 1805, No. 95, pp. 65–87.
- [20] B. Berge, "Electrocapillarité et mouillage de films isolants par leau", *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1993, No. 317, pp. 157–163.
- [21] M. Vallet *et al.*, "Electrowetting of water and aqueous solutions on poly (ethylene terephthalate) insulating films", *Polymer*, 1996, No. 37, pp. 2465–2470. Available: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)85360-2](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)85360-2)
- [22] J. Lee *et al.*, "Electrowetting and electrowetting on dielectric for microscale liquid handling", *Sensors Actuators A*, 2002, No. 95, pp. 259–268. Available: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00734-8](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00734-8)
- [23] L.Y. Yeo and H.C. Chang, "Static and spontaneous electrowetting", *Modern Phys. Lett. B*, 2005, No. 19, pp. 549–569. Available: <https://doi.org/10.1142/S0217984905008542>
- [24] C. Quilliet and B. Berge, "Electrowetting: A recent outbreak, Current Opinion in Colloid", *Interface Sci*, 2001, No. 6, pp. 34–39. Available: [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(00\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(00)00085-6)
- [25] B. Berge and J. Peseux, "Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting", *Eur. Phys. J. E.*, 2000, No. 3, pp. 159–163.
- [26] Corning® Varioptic® Lenses Market-leading adjustable lens solutions for industrial applications. Available: https://www.corning.com/media/worldwide/Innovation/documents/FINAL%20for%20Print_CorningVariopticLenses_productbrochure_Oct.18.18.pdf
- [27] Catalog "Edmund Optics" Corning® Varioptic® Variable Focus Liquid Lenses. Available: <https://www.edmundoptics.com/f/corning-varioptric-variable-focus-liquid-lenses/15042/?srsltid=AfmBOoqovbVCvEoajBZwHECPSpjOmraoyjgZC3fkJ3-TXY-UQum7xLV->

I.G. Chyzh

VARIO LENSES AS FIXED ELEMENTS OF ZOOM OPTICAL SYSTEMS

Background. The modernisation and structural improvement of zoom optical systems by utilising fixed vario lenses that are either electrically or mechanically controlled.

Objective. An evaluation of the accomplishments in the advancement and enhancement of adaptive vario lenses featuring externally regulated optical power, intended for integration into zoom optical systems as permanent elements. An analysis of the factors that could result in the instability of the cardinal points within the optical system of vario lenses.

Methods. An examination of the physical principles governing contemporary externally controlled vario lenses, with a focus on the conditions that facilitate alterations in their optical power. Application of the fundamental tenets of optical system theory to evaluate how variations in the geometric configuration and placement of the interface between the operational optical media of vario lenses influence their optical power. A thorough analysis and organization of information available on manufacturers' websites, as well as in public information sources and publications from varifocal lens developers, regarding the design characteristics of their existing models.

Results. A comprehensive analysis of the mechanisms responsible for alterations in the optical power of membrane and electrically wetted vario lenses revealed that fluctuations in their optical power result from modifications in the radius of curvature of the surface separating the working optical media, as well as by changes in the position of this surface along the optical axis. This leads to a shift along the optical axis of the vario lens of the cardinal (principal and nodal) points of the vario lens and a corresponding shift of their focal points.

Conclusions. In the examined membrane and electrowetting vario lenses, alterations in the geometric shapes of the space occupied by the working optical media affects not only the optical power, but also the position of the cardinal points of the vario lenses. Therefore, in zoom-optical systems, vario lenses cannot be regarded as fixed optical components despite the fact that their physical locations within the system design are actually fixed. The shift factor of the cardinal points of the vario lenses requires comprehensive further investigation and determination of the functional dependence between the specified shift and the values of the optical power of the vario lens. The practical application of the findings from these investigations will allow improving the algorithm of parametric synthesis of zoom-optical systems with vario lenses built into them, and will also provide a theoretical foundation for more accurate programming of the level of control electrical signals supplied from microcontrollers to the vario lenses. This will aid in averting detrimental axial shifts of the images formed by them (image defocusing) and disruption of the aberration correction of the system during the operation of zoom optical systems.

Keywords: membrane vario lenses; electrowetting vario lenses; cardinal points of vario lenses; shifts of cardinal points of vario lenses.

Рекомендована Радою
факультету робототехніки та приладобудування
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
11 грудня 2025 року

Прийнята до публікації
09 березня 2026 року

Опубліковано
30 березня 2026 року