

УДК 621.316.543.2; 681.7.072.24

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7\(48\)-1826-1843](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-1826-1843)

**Рябцов Олександр Васильович** кандидат технічних наук, доцент, кафедра електрообладнання і автоматики суден, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, тел.: (050) 333-82-82, <https://orcid.org/0000-0001-8259-7266>

**Онищенко Олег Анатолійович** доктор технічних наук, професор, кафедра управління судном, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, тел.: (048) 733-23-34, <https://orcid.org/0000-0002-3766-3188>

**Сандлер Альберт Кирилович** кандидат технічних наук, доцент, кафедра теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, тел.: (048) 733-23-34, <https://orcid.org/0000-0002-0709-0542>

## **ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ОПТИЧНИХ КОМУТАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СУДНОВИХ СИСТЕМАХ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ**

**Анотація.** Стаття присвячена важливій проблемі підвищення рівня функціональної якості та експлуатаційної надійності комутаційних пристроїв, які призначені для роботи у складі систем передачі інформації на судах, обладнаних системами динамічного позиціонування. В статті наголошується, що вдосконалення суднових інтегрованих систем керування, до яких відносяться системи динамічного позиціонування суден, завжди є важливою та актуальною темою наукових досліджень. Зазначено, що одним з напрямків, що швидко розвивається є впровадження суднових оптичних систем передачі даних. Також відмічено, що впровадження суднових оптичних систем все ще гальмується відсутністю надійних оптичних комутаційних пристроїв, на базі яких можливо створення розгалуженої суднової оптичної мережі, використання якої багаторазово прискорить швидкість передачі та обсяг даних, що дозволить значно збільшити швидкодію системи передачі інформації суднової системи динамічного позиціонування в цілком. В статті проаналізовано сучасний стан оптичної комутаційної техніки, розглянуто основні види оптичних комутаторів (ОЕО

та ООО), підкреслено переваги повністю оптичних комутаторів, наведено огляд конструкцій комутаторів, які вже розроблені. Звертається увага на технологічні особливості та недоліки відомих конструкцій, пропонуються нові рішення для покращення окремих конструктивних елементів, які дозволять підвищити загальну експлуатаційну надійність, стабільність та довговічність повністю оптичних комутаторів.

В статті розглядаються теоретичні питання та наводяться експериментальні дані, пов'язані з вивченням процесу коливань п'єзоелектричних вібраторів, які використовуються в якості приводних актуаторів елементів оптичних комутаторів.

Пропонується шляхи підвищення гнучкості шарнірних кріплень п'єзоактуаторів, що підвищує загальну ефективність оптичних комутаторів.

За рахунок впровадження нових типів кріплень актуаторів автори пропонують покращити експлуатаційну стабільність та довговічність комутаторів для систем передачі інформації суднових систем динамічного позиціонування.

**Ключові слова.** Суднові системи ДП, Система передачі інформації, Надійність та стабільність, Оптична комутація сигналів, П'єзоелектричні елементи, Елементи кріплення.

**Ryabtsov Oleksandr Vasiliyovych** PhD, Associate Professor, Electrical Equipment and Ship Automation Department, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, tel.: (050) 333-82-82, <https://orcid.org/0000-0001-8259-7266>.

**Onishchenko Oleg Anatoliovvch** Sc.D., Professor, Ship Management Department, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, tel.: (048) 733-23-34. <https://orcid.org/0000-0002-3766-3188>.

**Sandler Albert Kirilovich** PhD, Associate Professor, of Automatic Control Theory and Computational Technology Department, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, tel.: (094)793-24-75, <https://orcid.org/0000-0002-0709-0542>.

## INCREASING OPERATIONAL RELIABILITY OF OPTICAL SWITCHES FOR INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS IN SHIP DYNAMIC POSITIONING SYSTEMS

**Abstract.** The article refers to the important problem of increasing the level of functional quality and operational reliability of switching devices that are

designed to work as part of information transmission systems on ships equipped with dynamic positioning systems.

The article emphasizes that the improvement of ship integrated control systems, which may include ship dynamic positioning systems, is always an important and relevant topic of scientific research. It is noted that one of the rapidly developing areas is the implementation of ship optical data transmission systems.

It is also noted that the usage of optical systems onboard ships is still hampered by the lack of reliable optical switching devices, on the basis of which it is possible to create an extensive ship optical information network, the use of which will significantly accelerate the transmission speed and volume of data exchange, which will allow significantly increasing the speed of the data exchange system of the ship's dynamic positioning system as a whole.

The article analyses the current state of optical switching technology, considers main types of optical switches (OEO and OOO), emphasizes the advantages of fully optical switches, and provides an overview of switch designs that have already been developed.

Attention is drawn to the technological features and disadvantages of known designs, and new solutions are proposed to improve individual structural elements that will increase the overall operational reliability, stability and durability of fully optical switches.

The article considers theoretical issues and presents experimental data related to the study of the process of oscillations of piezoelectric vibrators, which are used as drive actuators of optical switch elements. Ways are proposed to increase the flexibility of hinged mounts of piezoelectric actuators, which increases the overall efficiency of optical switches. By introducing new types of actuator mounts, the authors propose to improve the operational stability and durability of switches for information transmission systems of ship dynamic positioning systems.

**Keywords.** Ship dynamic positioning systems, Information transmission systems, Optical signal switching, Piezoelectric elements, Mounting elements, Reliability, Stability, Durability.

**Вступ.** Нині спостерігається стрімкий розвиток суднових автоматизованих систем управління. Перші засоби автоматизації з'явилися на судах як спосіб полегшення важких рутинних операцій для машинної команди і як допомога судноводіям у прийнятті навігаційних рішень.

Але судова автоматика швидко пройшла величезний шлях розвитку від найпростіших вузькоспеціалізованих електромеханічних пристроїв до сучасних програмно-керованих універсальних комплексів.

Шляхом поступового вдосконалення обладнання і розширення кола розв'язуваних ним завдань суднові технічні засоби впритул наблизилися до межі, за якою знаходиться повна автоматизація управління судном.

Від абстрактної ідеї суден-автоматів морська галузь вже перейшла до практичного впровадження автономних суден, що функціонують без екіпажів.

Одним із різновидів сучасних суднових систем керування є системи динамічного позиціонування (СДП) [1]. Такі системи уже застосовуються на багатьох типах суден і з кожним роком кількість таких систем активно збільшується.

Особливістю всіх суднових інтегрованих систем управління є величезний обсяг інформації, який необхідно передавати каналами зв'язку, обробляти та візуалізувати з метою отримання необхідних даних для відстеження тенденцій та аналізу стану судна. Найбільше це стосується СДП, які, в основному, призначені для підтримки розташування судна у заданій позиції.

Для утримання стабільної позиції від СДП потрібне отримання та обробка інформації про місцезнаходження судна, що надходить від супутникових систем GPS, GLONASS або BD; використання додаткової інформації від служб диференціальної корекції OmniSTAR, Starfix або берегової системи IALA; визначення з високою точністю напрямку поздовжньої осі судна та його тимчасової девіації за допомогою комбінації суднових інерційних (Gyroscompass) та геоцентричних систем відліку (GCI); визначення величини та напрямки швидко мінливих факторів впливу морського середовища (вітру, течій та хвиль), що впливають на дрейф судна; збирання великого обсягу інформації від різних гідроакустичних, інклінометричних, оптичних, мікрохвильових та інших датчиків відносного положення судна (Reference System).

Одночасно з визначенням сумарного вектору зовнішніх впливів, що обурюють, на судно, в СДП виробляються командні сигнали управління судновими рушіями (Propulsion System), штовхаючі зусилля яких з високою точністю компенсують впливи зовнішніх факторів, що дозволяє при появі дрейфу повернути судно в задану позицію. Крім того, у процесі утримання позиції СДП автоматично керує судновою енергетичною установкою, забезпечуючи резерв потужності, необхідний для утримання позиції. Для підвищення надійності в більшості СДП застосовується подвійне гаряче резервування суднових механізмів, систем управління ними та систем передачі інформації. Таким чином, системи ДП безперечно лідирують за кількістю інформації, що збирається, передається та обробляється порівняно з іншими судновими інтегрованими системами.

**Постановка проблеми.** Для передачі інформації в СДП все ще широко застосовується традиційна технологія Ethernet, яка дозволяє легко встановлювати з'єднання між пристроями суднової локальної мережі. Але за останні десятиліття енергоозброєність судів багаторазово зросла, що призвело до зростання рівня електромагнітних перешкод і знизило завадостійкість судових інформаційних мереж.

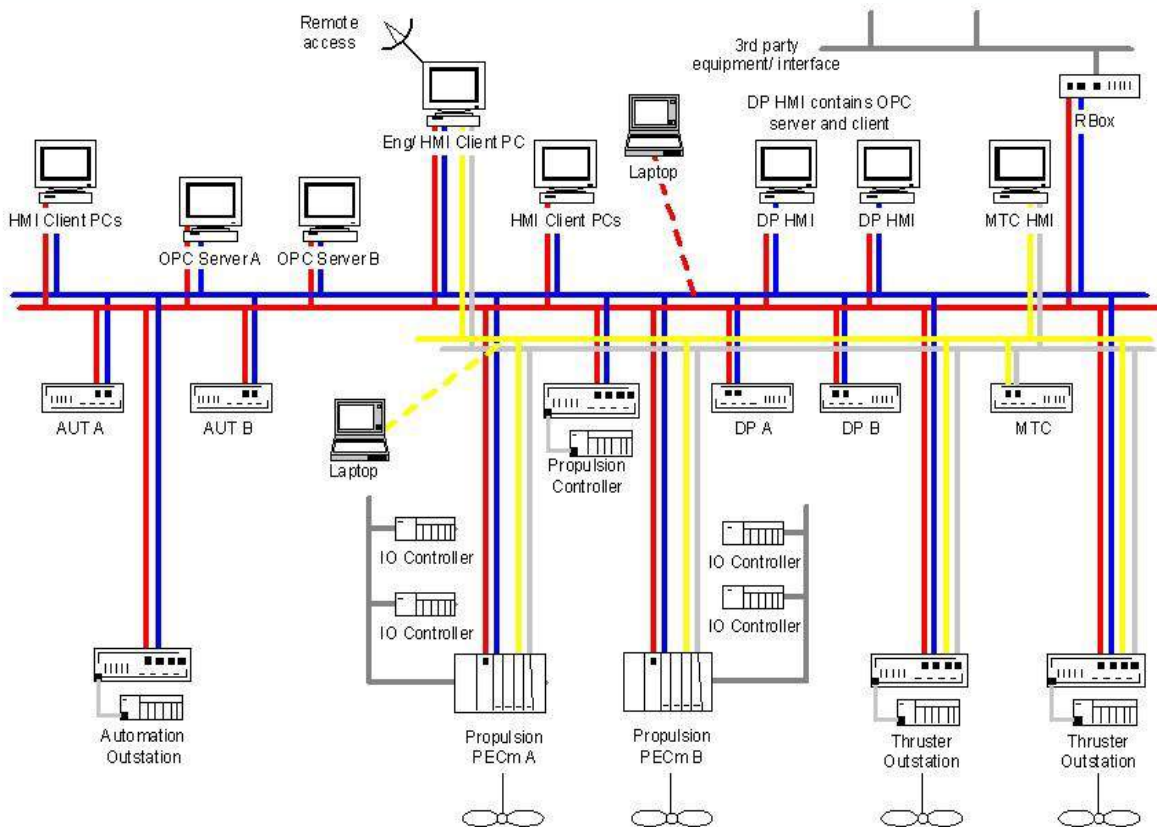


Рис. 1 - Спрощена структурна схема комп'ютерної мережі СДП

Частковим вирішенням цієї проблеми стало впровадження магістральних оптоволоконних каналів між командним містком і машинним відділенням, що дозволило значно підвищити стійкість мережевого обладнання СДП до електромагнітних перешкод.

Однак проблема досі повністю не вирішена, оскільки через відсутність надійних швидкодіючих оптичних комутаторів не вдається створити розгалужену повністю оптичну інформаційну мережу, в якій всі вузли мережі з'єднуються лише оптоволоконними лініями, що, як очікується, дозволить досягти теоретично прогнозованої К. Шенноном [2] швидкості передачі порядку сотень петабіт/с.

Підйом швидкості передачі на принципово новий рівень дозволить запровадити в СДП додаткові швидкодіючі коригувальні контури по кожному з параметрів, що забезпечить суттєве збільшення точності та стабільності позиціонування судна.

Для створення розгалуженої системи багатоканального оптичного зв'язку потрібно вирішити складне завдання забезпечення адресної комутації оптичних сигналів, що передаються мережею СДП.

Оптичний комутатор у загальному сенсі - це пристрій, що дозволяє швидко, з мінімальними спотвореннями і без втрати потужності передати інформаційний сигнал у вигляді оптичного випромінювання, з одного серед кількох входів комутатора на один із кількох його виходів відповідно до заданого алгоритму перемикання.

Технологічна простота, надійність та вартість оптичних комутаторів, що управляють переміщенням потоків даних по розгалуженій мережі – одні з найважливіших показників, що визначають конкурентоспроможність сучасних ієрархічних оптичних систем передачі даних.

Усі провідні фірми-виробники мережного устаткування активно ведуть розробки різних типів оптичних комутаторів.

Актуальність досліджень у цій галузі підтверджується числом публікацій, що щорічно зростає.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

В останні роки у світі було розроблено велику кількість оптичних комутаторів, принцип роботи яких ґрунтується на різних фізичних явищах [3,4].

Але досі жоден із них не відповідає повною мірою всім необхідним вимогам через наявні схемні обмеження або конструктивні особливості.



Рис.2. Мережевий ОЕО-коммутатор

В роботі [5] зазначалося, що всі відомі комутатори оптичних сигналів можна умовно розділити на дві групи, які принципово відрізняються наявністю чи відсутністю перетворення оптичних сигналів в електричні.

Перша група позначається як ОЕО-комутатори, або «Оптико-Електро-Оптичні» [6], в яких вхідний оптичний сигнал перетворюється на вході комутатора в електричний сигнал, який комутується за допомогою

традиційних електронних схем, наприклад, транзисторних ключів, і потім знову перетворюється в оптичне випромінювання.



Рис.3. Мережевий ООО-коммутатор

Перевагою таких пристроїв, що забезпечили їх широке поширення, є висока надійність за рахунок застосування добре відпрацьованих високотехнологічних процесів виготовлення електронних схем.

Але по швидкодії, споживаній потужності, перехресним перешкодам, спотворенням сигналу та багатьом іншим параметрам ОЕО-комутатори значно поступаються другій групі, до якої входять так звані ООО-комутатори, або «Оптико-Оптико-Оптичні». Комутатори цієї другої групи частіше називають "Повністю оптичними комутаторами (ПОК)" або "All-Optical (AO Switch)" [7]. Незважаючи на досить довгу історію їх розвитку, остаточна термінологія в цій галузі поки що не встановилася.

Всі комутаційні пристрої другої групи поєднують те, що їхнє функціонування не вимагає подвійного перетворення оптичних сигналів в електричні і навпаки, що значно підвищує їхню швидкодію в порівнянні з ОЕО-комутаторами. Оптичні інформаційні сигнали, що надходять оптичним лініям зв'язку у вхідний канал комутатора перенаправляються без будь-якого перетворення в потрібний вихідний оптичний канал за рахунок зміни внутрішнього стану комутатора або перебудови структури комутаційного поля.

Серед фізичних принципів, на яких ґрунтуються комутаційні властивості відомих ПОК можна назвати модуляцію світла за допомогою електромеханічних, електростатичних, рідкокристалічних, магнітооптичних та інших перетворювачів. Одними з перших були розроблені оптичні комутатори на основі ефекту Поккельса [8, 9, 10], які, незважаючи на хороші параметри, не знайшли широкого застосування в інформаційній техніці через необхідність використання високої напруги, що перевищує 1000 В. Широко відомі комутатори на основі інтерферометрів Майкельсона та Фабрі-Перо [11,12,13]. Досліджувалися оптичні модулятори, що ґрунтуються на зміні коефіцієнта заломлення кільцевих

структур кремнію під дією плазмової дисперсії. Широко розвинена також комутаційна технологія на основі пристроїв дискретної оптики, наприклад, дифракційних ґрат AWG (Arrayed Waveguide Grating), CG (Concave Grating) або WDM (wavelength-division multiplexing) [14,15,16]. Основним недоліком усіх згаданих пристроїв є висока технологічна складність та необхідність точного налаштування, внаслідок чого висока вартість такого обладнання робить економічно невиправданим його масовий випуск. У зв'язку з цим продовжуються дослідження, спрямовані на створення найпростіших і надійних конструкцій ПОК.

Значне місце серед розробок ПОК займають конструкції на основі поворотних дзеркал, що рухаються п'єзоелектричними (ПЕ) актуаторами. Їхня простота, дешевизна та надійність вигідно виділяють такі конструкції серед інших оптичних комутаторів різної фізичної природи, розглянутих у роботі [17].

У роботі [18] запропоновано використовувати диференціальні біморфні п'єзоелектричні елементи (ПЕ) в якості актуаторів для оптичних комутаторів, та були розглянуті конструкції таких біморфних елементів. У роботі [19] розглянуто конструкції ПЕ актуаторів, що дозволяють вдвічі збільшити кут відхилення оптичного променя. Основною перевагою біморфних актуаторів є невеликі розміри та дуже мала споживана потужність, що дозволяє нарощувати розрядність комутатора із збереженням прийнятної значення витрат на експлуатацію. На основі даних розробок серійно випускаються китайські ПОК типу 1x2 та 2x2 [20]. Цей тип комутаторів - один з небагатьох, який отримав промислове впровадження крім OEO та DWDM модуляторів.

У більшості розроблених на цей час дзеркальних ПОК на основі ПЕ застосовуються три види конструкцій актуаторів:

- на основі консольно закріплених плоских біморфних ПЕ пластин (з однією точкою закріплення) [18],

- на основі плоских біморфних ПЕ пластин з двоопорним закріпленням (закріплених з двох кінців по довгій стороні пластини) [5],

- на основі монолітних трубчастих ПЕ з розділеними диференціальними електродами [21]. Застосування актуаторів першого виду обумовлено максимальною дешевизною, простотою та надійністю конструкцій, що є вирішальним фактором при масовому виробництві. Актуатори другого виду мають значно більшу вібробостійкість, що важливо для оптичних систем, встановлених на рухомих об'єктах. Актуатори третього виду, які ще нещодавно випускалися в промислових масштабах, зараз практично не застосовуються у сучасних ПОК через технологічні складнощі процесу виготовлення якісних малогабаритних трубчастих ПЕ

елементів, але при цьому широко застосовуються для мікроманіпуляторів у біологічних дослідженнях та в тунельній мікроскопії.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Відомі два способи надати біморфній ПЕ пластини необхідний вигин: статичний та динамічний. При статичному способі електроди пластини подають постійну напругу  $U_{\text{упр}}$ .

Внаслідок зворотного п'єзоефекту, під дією прикладеної напруги один елемент ПЕ біморфа скорочується, а інший подовжується, при цьому пластина згинається відповідно до прикладеної полярності. Вигин у динамічному режимі забезпечується подачею на електроди пластини змінної синусоїдальної або імпульсної напруги, перша гармоніка якої повинна збігатися з основною резонансною частотою п'єзоелектричної пластини. Плоско паралельна ПЕ пластина, що має три лінійні розміри  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (або довжину  $x = l_1$ , ширину  $y = l_2$  і товщину  $z = l_3$ ) може розглядатися як кристал з трьома резонансними частотами, відповідно  $f_1$ ,  $f_2$  і  $f_3$  [22].

Очевидно, що серед розглянутих типів актуаторів на основі ПЕ для ПОК, призначених для організації комутації між оптичними мережевими пристроями суднових систем динамічного позиціонування, найбільш відповідними за критеріями вартості, габаритів, надійності та простоти конструкції є двохопорні актуатори. Спрощена конструкція такого ПОК наведена на рис.4.

Роль елемента комутації виконує мініатюрне дзеркало 1, закріплене в центрі плоскої біморфної ПЕ пластини актуатора 2, який під дією прикладеної синусоїдальної напруги здійснює коливальні рухи. На рисунку 4 зображено момент входження актуатора в резонанс, коли по довжині пластини встановлюється хвиля стоячи на другій моді коливань. При цьому дзеркало здійснює коливання, повертаючись навколо своєї центральної осьової лінії. Синхронізуючи частоту коливань актуатора з дзеркальним відбивачем із частотою подачі вхідних оптичних сигналів у кожен такт коливання можна здійснити комутацію будь-яких двох оптичних каналів ПОК між собою. Вхідні оптичні сигнали, що передаються по мережі СДП у вигляді модульованого світлового потоку, в якому закодовані інформаційні повідомлення, надходять у вхідний світловод ПОК і, залежно від положення дзеркала, яке воно займає в даний момент, світловий сигнал, що падає на нього, відбивається від

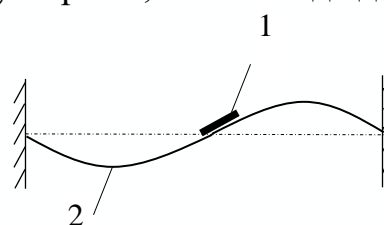


Рис.4. Конструкція двохопорного закріплення актуатора:

- 1- дзеркальний відбивач,
- 2- біморфний актуатор

дзеркала в потрібному напрямку у відповідний вихідний світловод ПОК, як показано на рис.5.

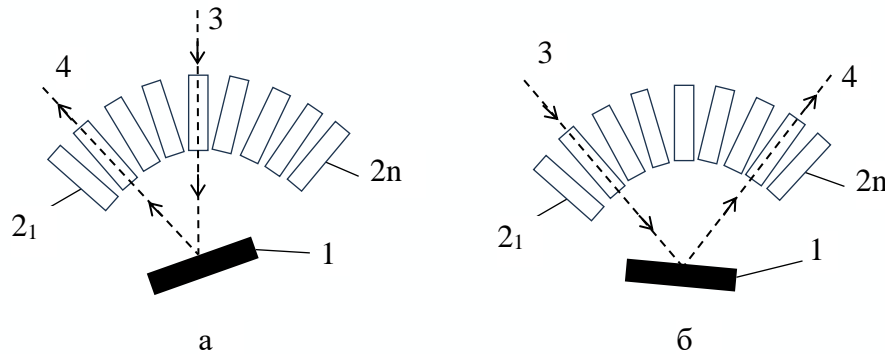


Рис.5 Положення дзеркала, яке рухається актуатором відбиває вхідний промінь відповідно до комутації каналів:

а)  $2_5 \rightarrow 2_2$ ; б)  $2_2 \rightarrow 2_8$ ;

- 1 – дзеркальний відбивач,
- 2 –  $n$  волоконно-оптичних каналів,
- 3 – вхідний оптичний промінь,
- 4 – вихідний оптичний промінь

Основна функція пружної біморфної ПЕ пластини забезпечити за рахунок прогину поворот дзеркала 1 на певний кут. Для цього вибирають пластини з максимальним коефіцієнтом електромеханічного зв'язку  $k_E$ , який зв'язує напругу, прикладене до електродів п'єзоелементів з деформацією, яку воно викликає, і визначає ефективність перетворення механічної енергії в електричну при прямому п'єзо ефекті, та електричної енергії в механічну при зворотному.

$$k_E^2 = \frac{W_M^{\text{вих}}}{W_E^{\text{вх}}} = \frac{W_E^{\text{вих}}}{W_M^{\text{вх}}}$$

де  $W_M$  і  $W_E$  – механічна та електрична енергія, що впливають на біморфний п'єзоелемент.

Індекс «вх» в цьому виразі означає повну вхідну (або запасену в ПЕ) пружну механічну або вхідну електричну енергію, індекс «вих» - перетворену енергію [23].

У загальному вигляді стан п'єзоелектричного середовища описується рівняннями тензорної форми, які досліджуються методами матричного аналізу. У тензорних позначеннях коефіцієнт зв'язку виражається як

$$k_E^2 = \frac{1}{1 + \frac{2W_E^{BX}}{C^D S^2}} = 1 - \frac{2W_M^{BX}}{C^D S^2}$$

де  $C^D = \partial T / \partial S$  – механічна постійна пружності,  $T$  і  $S$  – тензори механічної пружної напруги та пружної деформації в ПЕ елементі [23].

Детальний аналіз розподілу величини вигину ПЕ пластини по її площі вимагає застосування громіздкого та складного математичного апарату та залежить від великої кількості задалегідь невідомих параметрів, таких як неоднакове зусилля стиснення защемленого кінця пластини; технологічні похибки виготовлення ПЕ елементів: мінливість товщини (клиновидності) пластини ( $l_3 \neq \text{const}$ ) за її довжиною, не паралельності сторін пластини ( $l_{2\text{поч}} \neq l_{2\text{кін}}$ ), зміни напруженості поля поляризації площею пластини, тощо. З достатньою для практичних розрахунків точністю можна визначити величину вигину  $\Delta$  (тобто відхилення незакріпленого кінця ПЕ пластини від вихідного положення при  $U_{\text{упр}} = 0$ ) можна за допомогою виразу [5]:

$$\Delta = (0,8 \div 1,2) \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\varepsilon^2 \cdot l_1 \cdot E_p \cdot B}{E_y \cdot l_3}$$

де  $\Delta$  – величина вигину біморфної ПЕ пластини,  $l_1$  та  $l_3$  – розміри п'єзоелементів,  $\varepsilon$  – діелектрична стала п'єзоматеріалу,  $E_y$  – модуль пружності,  $E_p$  – напруженість поля залишкової поляризації. Відносно величини легко визначити величину кута повороту дзеркала 1 і, відповідно, кут вихідної траєкторії оптичного променя в комутаторі.

Комутатори, засновані на застосуванні консольно закріплених ПЕ біморфних елементів, досить докладно розглянуті в літературі. Розглянемо динамічний спосіб управління ПЕ актуатором як альтернативний спосіб зміни кута відхилення оптичного променя в мережевому оптичному комутаторі суднової системи динамічного позиціонування.

**Виклад матеріалу дослідження.** Величина  $k_E$  є мірою інтенсивності п'єзоєфекту, показником якості п'єзоматеріалів і залежить від ступеня поляризації п'єзокерамічних елементів, від їх геометричних розмірів, від пружних, діелектричних і п'єзоелектричних констант, від коливань, симетрії п'єзопластин та ін. параметрів. Очевидно, що коефіцієнт  $k_E$  і, відповідно, вигин  $\Delta$  біморфної пластини, збільшуються при зменшенні її товщини, тому в актуаторах комутаторів, які не несуть великого механічного навантаження, застосовуються пластини, що задовольняють умові  $l_1 \gg l_3$ . З метою спрощення розрахунків коливань ПЕ актуаторів оптичних комутаторів судових мереж замість рівнянь, що описують коливання пластин, що мають

фізичну товщину, доцільно розглянути коливання плоских мембран, що справедливо при прагненні нуля величини  $l_3$ .

У техніці прийнято описувати вільні власні коливальні в плоских прямокутних пружних мембранах класичними рівняннями математичної фізики в координатах  $(x, y)$ . Найчастіше застосовуються лінійні диференціальні рівняння у приватних похідних другого порядку з нульовою правою частиною. Але оскільки коливання в актуаторах є не власними, а вимушеними, оскільки з'являються під дією напруги  $U_{\text{упр}}$ , необхідно додати зовнішній вплив.

Тоді рівняння коливань ПЕ актуатора в загальному вигляді має бути подане у вигляді:

$$D, S, T, E \left( \Delta, x, y, \frac{\partial \Delta}{\partial x}, \frac{\partial \Delta}{\partial y}, \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 \Delta}{\partial y^2}, \frac{\partial^4 \Delta}{\partial x^4}, \frac{\partial^4 \Delta}{\partial x^2 \partial y^2}, \frac{\partial^4 \Delta}{\partial y^4} \right) = f(U, \omega, t),$$

де  $D, E, T, S$  – вже згадані тензори (пружні механічні жорсткість і деформація, п'єзоелектрична індукція (зміщення) і напруженість поля поляризації),  $\Delta$  - величина вигину,  $U$  і  $\omega$  - величина напруги і кругова частота першої гармоніки прикладеної синусоїдальної напруги,  $t$  – час як умова динамічного процесу.

Дане рівняння є спрощеною формою запису системи як мінімум 6 диференціальних рівнянь у тензорній формі. Рішення цього рівняння методами матричного аналізу є цікавим лише з погляду математики. Для інженерних розрахунків воно малоприматне і застосовується лише при постановці завдання опису динамічного стану біморфних ПЕ пластин актуатора. Для практичного застосування використовуються спрощені методи розрахунків, що містять декілька емпіричних припущень та умов.

У теорії Кірхгофа-Лява жорсткість при згинанні пластини визначається як [24]:

$$C^D = \frac{E \cdot H^3}{12(1 - \nu^2)}$$

де  $E$  - модуль Юнга,  $H$  - товщина пластини (в даному випадку  $l_3$ ), - коефіцієнт Пуассона.

Слід звернути увагу, що товщина  $l_3$  повинна лише прагнути нуля в межах допустимої міцності пластини, але не повинна дорівнювати нулю. В іншому випадку пружні коливання перетворюються на непружну деформацію.

Для визначення величини вигину біморфного ПЕ вібратора доцільно використовувати відоме рівняння руху оболонки під дією розподіленого навантаження.

$$a_{11} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + 2a_{12} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x \partial y} + a_{22} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial y^2} + b_1 \frac{\partial \Delta}{\partial x} + b_2 \frac{\partial \Delta}{\partial y} + c\Delta = f(U, \omega, t)$$

де  $\Delta$  розглядається як безперервна функція на прямокутній площині  $x$ - $y$  (або  $l_1 \cdot l_2$  за умови  $l_3 \rightarrow 0$ ).

У літературі існує безліч різноманітних варіантів розв'язання цього рівняння методами гармонійного аналізу. У науковій літературі переважно використовуються точні методи, засновані на безпосередньому рішенні цього рівняння. У прикладній техніці перевагу надають наближеним методам рішення, заснованим на законі збереження енергії.

У точних методах рішення рівняння коливань часто має вигляд [25]:

$$\Delta(x, y, t) = A(x, y) \cdot e^{j\omega t},$$

за граничних умов  $\Delta = 0$  при  $x = 0$ ; и  $\frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} = 0$  при  $x = l_1$   
рішення має вигляд

$$\Delta(x, y, t) = A(x, y) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

де  $A(x, y)$  – базова функція,  $i$  та  $j$  – число напівхвиль коливань, що укладаються по довжині та ширині пластини.

$$A(x, y) = A_{ij} \sin\left(\frac{i\pi x}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{j\pi y}{l_2}\right)$$

У наближених методах Релея-Рітца, Бубнова-Галеркіна та інших рішення існує у вигляді ряду

$$\Delta(x, y) = \sum_{i,j=1}^n A(i, j) \cdot \Delta_{ij}(x, y)$$

В результаті перетворень шукана амплітуда коливань у кожній точці пластини, що має поточні координати  $(x, y)$ , знаходиться з виразу:

$$\Delta_i(x) = \sin k_i x + A_i \cos k_i x + B_i \operatorname{sh} k_i x + C_i \operatorname{ch} k_i x,$$

где  $k_i = \lambda_i \cdot l_1$  и  $k_j = \lambda_j \cdot l_2$

Наприклад, можна розрахувати, що для другої гармоніки коливань біморфа, виготовленого з п'єзопластин матеріалу ЦТС-22 з розмірами 75x12x0,5 мм амплітуда пучності складатиме близько 10 мм. Але на практиці ця амплітуда не перевищує 3-5 мм. Це пояснюється тим, що коефіцієнти  $A$ ,  $B$  і  $C$  визначаються з граничних умов закріплення вібратора. У найпростіших випадках їх можна вважати постійними, хоча при складних формах коливань вони мають векторний характер.

Очевидно, що максимальної амплітуди коливань актуатора  $\Delta$  на рис.4 можна домогтися лише в режимі резонансних коливань, коли напруга, що подається на електроди ПЕ актуатора відповідає другій гармоніці власних коливань пластини, тобто коли довжина пластини дорівнює довжини хвилі, що поширюється в біморфному п'єзоелементі актуатора. Власна кутова частота коливань пластини  $\omega_i$  визначається виразом:

$$\omega_i = \frac{\alpha_i}{l_1} \sqrt{\frac{c^D}{(m_{\text{п}} + m_{\text{дз}})}}$$

де  $\alpha_i$  - коефіцієнт, що залежить від способу закріплення кінців пластини,  $m_{\text{п}}$  та  $m_{\text{дз}}$  – маса пластини ПЕ актуатора та закріпленого на ньому дзеркала 1.

Для біморфа вказаних розмірів резонансна частота коливань в цьому режимі складає 270-294 Гц при додатковій вазі віддзеркалюючого елемента менш ніж 0,5г.

Основна проблема при виробництві простих і надійних актуаторів для створення мережних оптичних комутаторів для суднових систем полягає в тому, що через велику кількість параметрів, які погано піддаються визначенню шляхом прямих обчислень, багато параметрів доводиться визначати експериментальним шляхом, що при масовому виробництві призводить до деякого розкиду параметрів.

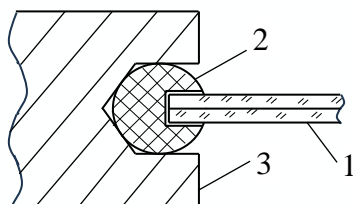


Рис.6 Конструкція шарнірного кріплення актуатора ПЕК

- 1- шарнір,
- 2- актуатор,
- 3- кріплення.

Якщо відхилення параметрів вихідних п'єзоелементів, які виготовляються в єдиному технологічному процесі, не перевищує 1%, то сумарна похибка пристрою в зборці може перевищувати 2-3%, що викликає необхідність додаткового регулювання. Помічено, що основною причиною є спосіб фіксації країв п'єзоелектричних пластин, що впливає на граничні умови розрахунків..

Проведені дослідження показали, що найбільш стабільні результати дає спосіб закріплення, показаний на рис. 6.

На цьому рисунку показано, що опорні кінці актуатора 1, який коливається на резонансній частоті, зафіксовано в прорізі в круглому капролоновому стрижні 2. Стрижень 2 не може здвигатися в шарнірному кріпленні, ані в вертикальному, ані в горизонтальному напрямку, але легко повертається навколо своєї поздовжньої осі.

Площа контакту шарніра 2 з кріпленням 3, від якої залежить сила тертя, і, відповідно, зменшення амплітуда коливань, складає не всю циліндричну поверхню, а обмежується лише трьома лініями торкання. Для зменшення тертя клиноподібний паз механічного кріплення 3 додатково заповнений густим силіконовим мастилом.

**Висновки.** Помічено, що при використанні такого типу кріплення значно зменшився відносний середній розкид амплітуд та частот коливань актуаторів при однакових розмірах та інших параметрах, помітно збільшилась стабільність та довговічність біморфних ПЕ актуаторів.

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити висновок, що подальше вдосконалення конструкцій актуаторів, зокрема технологічних методів їх виготовлення та закріплення, збільшує загальну надійність ПОК для суднових інформаційних мереж систем ДП.

#### *Література:*

1. Kongsberg Maritime. Dynamic Positioning Control Systems. URL: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/positioning-and-manoevring/dynamic-positioning/> (date of access 21.05.2025).
2. Shannon C. A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal. Vol. XXVII. No. 3. Published IEEE: July 1948. DOI:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x/
3. Akhilesh S. P. Khope et al. Review of Integrated Photonic Elastic WDM Switches for Data Centers. Optics Express. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2105.14934.
4. Stepanovsky M. A Comparative Review of MEMS-Based Optical Cross-Connects for All-Optical Networks. 2019. IEEE Communications Surveys. № 3. p. 2928-2946. DOI:10.1109/comst.2019.2895817.
5. Рябцов О.В. Комутатори оптичних сигналів /Г.С. Гайворонська, О.В. Рябцов // Науково технічний журнал «Холодильна техніка і технологія». - 2009. - №2 (118). – С.55-59. ISSN 0453-8307.
6. Mukherjee Piyali. Optical Switching Device Technology and Applications in Networks. Chapter 10 (Wiley, 2022). DOI:10.1002/9781119819264.ch10.
7. Vukovic A. & Savoie M. Comparative performance assessment of switching options. Proceedings of SPIE, Vol. 5579, Part 2, pp. 614–619, 2004. ISSN:0277-786X.
8. Rhodes, M. A. et al. Plasma Pockels Cell Based Optical Switch for the National Ignition Facility. Lawrence Livermore NL, 1997. URL: <https://aries.pppl.gov/lib/meetings/9710-sofe97/abs/rhodes.html>.
9. Yu Li, et al. Towards High-Performance Pockels Effect-Based Modulators: Review and Projections. Micromachines, 15(7), 865. 2024. DOI: 10.3390/mi15070865.
10. Andriy V. Kityk et al. Dynamic Kerr and Pockels electro-optics of liquid crystals in nanopores for active photonic metamaterials. Nanoscale. 2021. 13, p.18714–18725. DOI: 10.1039/D1NR04282C.
11. You, S., et al. Novel all-optical switch based on Fabry-Perot cavity. Proceedings of SPIE, Vol. 5280, Materials, Active Devices, and Optical Amplifiers, pp. 382–387, 12 May 2004. DOI: 10.1117/12.52300. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of->

spie/5280/0000/A-novel-all-optical-switch-based-on-Fabry-Perot-cavity/10.1117/12.523001.full.

12. Rakib-Uddin, et al. All-optical 1×2 switch using Fabry-Perot laser diodes, in Optical Transmission Systems, Switching, and Subsystems VIII. 2010. Proc. SPIE 7988, 19. DOI: 10.1117/12.888329.

13. Pérez A. et al. Dynamic Mach-Zehnder interferometer based on a Michelson configuration and a cube beam splitter system, Optical Review, 26, pp. 231–240, April 2019. DOI: 10.1007/s10043-019-00493-8.

14. Shukla P., Jain A., Srivastava R. Design of an arrayed waveguide grating based optical packet switch, Optical Switching and Networking, 7. 2010. pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.osn.2010.01.002.

15. Segawa T., et al. All-optical wavelength-routing switch with monolithically integrated filter-free tuneable wavelength converters and an AWG, Optics Express, 2010. 18(5), pp. 4340–4345. DOI:10.1364/OE.18.004340.

16. Mao Y., Zhu J., Du B., Hou X. Design and analysis of concave diffraction grating with one-dimensional photonic bandgap structure”, Optical and Quantum Electronics, 2017. № 49, article 263. DOI: 10.1007/s11082-017-1098-0.

17. Рябцов О.В. Методи і засоби комутації оптичних сигналів в інформаційних мережах / Г.С. Гайворонська, О.В. Рябцов // Науково технічний журнал «Холодильна техніка і технологія». - 2010. - №2 (124). – С.74-82. ISSN 0453-8307.

18. Рябцов О.В. Застосування п'єзоелектричних актуаторів в якості прогибних дефлекторів для оптичних комутаційних пристроїв // Науково технічний журнал «Холодильна техніка і технологія». - 2012. - №6 (140). – С.78-80. ISSN 0453-8307.

19. Рябцов О.В. Метод підвищення швидкодії оптичних комутаторів в інформаційних мережах / Г.С. Гайворонська, О.В. Рябцов // Науково технічний журнал «Холодильна техніка і технологія». - 2010. - №2 (124). – С.70-72. ISSN 0453-8307.

20. Shenzhen Daco Technology. Каталог продукції. Промислове устаткування та компоненти. 1x2 Оптико-механічний двонаправлений оптоволоконний комутатор. Сайт. (Дата звернення 10.05.2025). URK: [https://made-in-china.com/co\\_sinoda-tech/product\\_1X2-Opto-Mechanical-Bi-Directional-Fiber-Optic-Switch\\_ysihsnerng.html](https://made-in-china.com/co_sinoda-tech/product_1X2-Opto-Mechanical-Bi-Directional-Fiber-Optic-Switch_ysihsnerng.html).

21. Рябцов О. В. Application of Optical Switches in ship's data transfer systems. Automation of ship technical facilities Vol. 26 Iss.1. 2020. p. 72-84. <http://dx.doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-72-84>.

22. Reddy J.N. Theory and analysis of elastic plates and shells. Second Edition. Taylor & Francis CRC Press. 2016. Texas, USA 77843—3123. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780849384165> <https://mechanics.tamu.edu/wp-content/uploads/2016/08/11-Theory-and-Analysis-of-Elastic-Plates.pdf>

23. Cady W. Piezoelectricity: Volume One: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals. Dover Books.Reprint. 2018. 448p. ISBN 978-048828602. <https://www.arXiv.com/Piezoelectricity-Introduction-Applications-Electromechanical-Engineering/dp/0486828603#>.

24. Love A.E. H. On the small free vibrations and deformations of elastic shells. IEEE. 2011.(Reprint Philosophical trans. of the Royal Society. London,1888, Vol. Ser. A, № 17). p. 491–549. <https://shellbuckling.com/papers/1888love/>

25. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. Second edition. McGraw-Hill classic textbook reissue series. 1989. ISBN 0-07-064779-8.<https://bayanbox.ir/view/1449796995868305459/theory-of-plates-and-shells-Timoshenko-small-size.pdf>

**References:**

1. Kongsberg Maritime (2025). Dynamic Positioning Control Systems. Retrieved from site: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/positioning-and-manoeuvring/dynamic-positioning/>
2. Shannon C. A (1948). Mathematical Theory of Communication. Published IEEE: July 1948. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
3. Akhilesh S. P. Khope et al. (2021). “Review of Integrated Photonic Elastic WDM Switches for Data Centers” <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.14934>.
4. Stepanovsky M. (2019). A Comparative Review of MEMS-Based Optical Cross-Connects for All-Optical Networks., IEEE Communications Surveys, № 3, p. 2928-2946. <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2895817>.
5. Ryabtsov O.V. (2009). Komutatory optychnykh syhnaliv /H.S. Haivoronska, O.V. Ryabtsov // Naukovo tekhnichniy zhurnal «Kholodylna tekhnika i tekhnolohiia». 2009. №2 (118). S.55-59. ISSN 0453-8307.
6. Mukherjee Piyali. (2022). Optical Switching Device Technology and Applications in Networks. Chapter 10 (Wiley, July 2022). <https://doi.org/10.1002/9781119819264.ch10>.
7. Vukovic A. & Savoie M. (2024). Comparative performance assessment of switching options. Proceedings of SPIE, Vol. 5579, Part 2, pp. 614–619, 2004. ISSN:0277-786X.
8. Rhodes, M. A. et al. (1997). Plasma Pockels Cell Based Optical Switch for the National Ignition Facility. Lawrence Livermore NL, 1997. URL: <https://aries.pppl.gov/lib/meetings/9710-sofe97/abs/rhodes.html>
9. Yu Li, et al. (2024). Towards High-Performance Pockels Effect-Based Modulators: Review and Projections. Micromachines, 2024. №15 (7). <https://doi.org/10.3390/mi15070865>
10. Andriy V. Kityk et al. (2021). Dynamic Kerr and Pockels electro-optics of liquid crystals in nanopores for active photonic metamaterials. Nanoscale. 2021. 13, p.18714–18725.<https://doi.org/10.1039/D1NR04282C>
11. You, S., et al. (2004). Novel all-optical switch based on Fabry-Perot cavity. Proceedings of SPIE, Vol. 5280, Materials, Active Devices, and Optical Amplifiers, pp. 382–387, 12 May 2004. DOI: 10.1117/12.52300. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5280/0000/A-novel-all-optical-switch-based-on-Fabry-Perot-cavity/10.1117/12.523001.full>.
12. Rakib-Uddin, et al. (2010). All-optical 1×2 switch using Fabry-Perot laser diodes, in Optical Transmission Systems, Switching, and Subsystems VIII. 2010. Proc. SPIE 7988, 19. <https://doi.org/10.1117/12.888329>.
13. Pérez A. et al. (2019). Dynamic Mach–Zehnder interferometer based on a Michelson configuration and a cube beam splitter system, Optical Review, 26, pp. 231–240, April 2019. <https://doi.org/10.1007/s10043-019-00493-8>.
14. Shukla P., Jain A., Srivastava R. (2010). Design of an arrayed waveguide grating based optical packet switch, Optical Switching and Networking, 7. 2010. pp.75–84. DOI:10.1016/j.osn.2010.01.002. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/joc-2018-0160/html>.
15. Segawa T., et al. (2010). All-optical wavelength-routing switch with monolithically integrated filter-free tunable wavelength converters and an AWG, Optics Express, 2010. 18 (5), pp. 4340–4345. <https://doi.org/10.1364/OE.18.004340>.
16. Mao Y., Zhu J., Du B., Hou X. (2017) Design and analysis of concave diffraction grating with one-dimensional photonic bandgap structure”, Optical and Quantum Electronics,

2017. № 49, article 263. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1098-0>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-017-1098-0>

17. Ryabtsov O.V. (2010). Metody i zasoby komutatsii optychnykh syhnaliv v informatsiinykh merezhakh/ H.S. Haivoronska, O.V. Ryabtsov // Naukovo tekhnichnyi zhurnal «Kholodylna tekhnika i tekhnolohiia». - 2010. - №2 (124). – S.74-82. ISSN 0453-8307.

18. Ryabtsov O.V. (2012). Zastosuvannia piezoelektrychnykh aktuatoriv v yakosti prohybnykh deflektoriv dlia optychnykh komutatsiinykh prystroiv // Naukovo tekhnichnyi zhurnal «Kholodylna tekhnika i tekhnolohiia». - 2012. - №6 (140). – S.78-80. ISSN 0453-8307ю

19. Ryabtsov O.V. (2010). Metod pidvyshennia shvidkosti optychnykh komutatoriv v informatsiinykh merezhakh /H.S. Haivoronska, O.V. Ryabtsov // Naukovo tekhnichnyi zhurnal «Kholodylna tekhnika i tekhnolohiia». - 2010. - №2 (124). – S.74-82. ISSN 0453-8307.

20. Shenzhen Daco Technology. (2025). Kataloh produktsii. Promyslove ustatkuvannia ta Komponenty. 1kh2 Opto-mekhanichnyi dvonapravlennyi optovolokonnyi komutator. Sait. (Data zvernennia 10.05.2025). [https://ru.made-in-china.com/co\\_sinoda-tech/product\\_1X2-Opto-Mechanical-Bi-Directional-Fiber-Optic-Switch\\_ysihsnerng.html](https://ru.made-in-china.com/co_sinoda-tech/product_1X2-Opto-Mechanical-Bi-Directional-Fiber-Optic-Switch_ysihsnerng.html).

21. Ryabtsov O.V. (2020). Application of Optical Switches in ship's data transfer systems. Automation of ship technical facilities Vol. 26 Is.1. 2020. p. 72-84. <http://dx.doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-72-84>

22. J.N. Reddy (2006). Theory and analysis of elastic plates and shells. Second Edition. Taylor & Francis CRC Press. Texas, USA 77843—3123. <https://doi.org/10.1201/9780849384165>.<https://mechanics.tamu.edu/wp-content/uploads/2016/08/11-Theory-and-Analysis-of-Elastic-Plates.pdf>

23. Cady W. (2018). Piezoelectricity: Volume One: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals. IEEE. 2018. (Reprint Dover Books. 1949). 448p. ISBN 978-048828602. <https://www.arXiv.com/Piezoelectricity-Introduction-Applications-Electromechanical-Engineering/dp/0486828603#>.  
<https://archive.org/details/piezoelectricity0000cady/page/n455/mode/2up>.

24. Love A.E. H. (2011). On the small free vibrations and deformations of elastic shells. IEEE 2011. (Reprint Philosophical trans. of the Royal Society (London), 1888, Vol. Ser. A, № 17). p. 491–549. <https://shellbuckling.com/papers/1888love/>

25. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. (1989). Theory of plates and shells. Second edition. McGraw-Hill classic textbook reissue series. ISBN 0-07-064779-8<https://bayanbox.ir/view/1449796995868305459/theory-of-plates-and-shells-Timoshenko-small-size.pdf>