

7. Новый тип оружия: беспилотник-камикадзе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2012/07/12/496176>. – 12.07.2012. – Заг. с экрана.
8. Karachun, V. V. Elastic Stress State of a Floating-Tube Suspension in the Acoustic Field. Deviation of Spin Axis [Text] / V. V. Karachun, V. N. Mel'nick // Strength of Materials. Springer Science Business Media New York, November. – 2012. – Vol. 44, № 6. – P. 125–136.
9. Karachun, V. V. Influence of Diffraction Effects of the Inertial Sensors of a Gyroscopically Stabilized Platform: Three – Dimensional Problem [Текст] / V. V. Karachun, V. N. Mel'nick // International Applied Mechanics. – 2012. – Vol. 48, № 4. – P. 458–464.
10. Запуск космического корабля Orion состоится в 2014 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2013/11/11/549147>. - 25.11.2013 г. – Заг. с экрана.
11. Косова, В. П. Надзвуковий політ і похибки поплавоквого гіроскопа [Текст] : матеріали VIII між. науч.-практ. конф. / В. П. Косова // Достижения высшей школы. – София «Бял Град - БТ», 2012. – С. 30–32.
12. Илляшенко, Н. Н. Представление сверхзвукового пограничного слоя РН [Текст] ; XV міжн. науч.-практ. конф. / Н. Н. Илляшенко, В. П. Косова // Людина і космос. – Дніпропетровськ, 2013. – 284 с.

*Проведено математическое моделирование и численный расчет вынужденных резонансных колебаний составной электромеханической трехэлементной системы «металлическая пластина – пьезокерамические цилиндрические панели» с учетом рассеяния энергии под воздействием внешнего переменного электрического поля. Построены амплитудно-частотные характеристики колебаний системы в диапазоне частот, включающем первые две резонансные частоты. Исследовано напряженно-деформированное состояние системы на частоте основного резонанса*

*Ключевые слова: моделирование колебаний, металлическая пластина, пьезокерамические цилиндрические панели, рассеяние энергии, напряженно-деформированное состояние*

*Проведено математичне моделювання та чисельний розрахунок вимушених резонансних коливань складеної електромеханічної триелементної системи «металева пластина – п'єзокерамічні циліндричні панелі» з урахуванням розсіювання енергії під дією зовнішнього змінного електричного поля. Побудовано амплітудно-частотні характеристики коливань системи у діапазоні частот, що включає перші дві резонансні частоти. Досліджено напружено-деформований стан системи на частоті основного резонансу*

*Ключові слова: моделювання коливань, металева пластина, п'єзокерамічні циліндричні панелі, розсіювання енергії, напружено-деформований стан*

УДК 517.958.534.1

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВИМУШЕНИХ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ СКЛА- ДЕНОЇ ЕЛЕКТРО- МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

І. О. Ластівка

Доктор технічних наук, доцент,  
завідувач кафедриКафедра вищої математики  
Національний авіаційний університет  
пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ,  
Україна, 03680

E-mail: iola@nau.edu.ua

## 1. Вступ

У сучасних технічних пристроях і різного роду електроакустичних системах [1] все більш широке застосування знаходять п'єзокерамічні перетворювачі енергії, робота яких базується на використанні явища п'єзоелектричного ефекту [2, 3].

П'єзокерамічні випромінювачі та прийомники звуку з успіхом використовуються у пристроях виявлення дефектів, мікрофонах, гідрофонах, побутовій техніці, у системах управління зі зворотнім зв'язком, в телебаченні, у пристроях медичної діагностики тощо. Широке використання п'єзокерамічних перетворювачів енергії, зокрема, для експериментальних діагно-

стичних досліджень властивостей Світового океану таких, як явище рефракції, внутрішніх хвиль, макро-неоднорідностей морського дна, крупномасштабних вихорових рухів вод, а також для акустичної розвідки корисних копалин у морському ґрунті тощо, обумовлює ряд технічних вимог до п'єзоперетворювачів. До переліку цих вимог необхідно віднести необхідність ефективного випромінювання в області достатньо низьких частот при мінімально можливих габаритах і масах перетворювачів. Реалізація низьких частот в п'єзокерамічних випромінювачах та прийомників енергії традиційних типів – стержневих і циліндричних [1, 4, 5] – перетворюють їх у складні, громіздкі і важкі пристрої, стає проблематичним як виготовлення

так і використання п'єзоперетворювачів у реальних електромеханічних системах. У зв'язку з цим останнім часом намітилась тенденція створення більш компактних і легких низькочастотних перетворювачів енергії, до числа яких можна віднести нетрадиційні п'єзоперетворювачі енергії аروحного та поздовжньо-згинального типів [6 – 8]. Робота цих фактично однотипних за конструкцією перетворювачів базується на явищі п'єзоефекту – на коловому (тангенціальному) п'єзоефекті у випадку аروحного перетворювача і на поздовжньому – у випадку поздовжньо-згинального.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

У зв'язку зі складністю коливальної системи аروحного і поздовжньо-згинального типів і, мабуть, у зв'язку з закритим характером робіт, присвячених їх дослідженню, у зарубіжній відкритій науково-технічній літературі існує обмежена кількість публікацій по цій тематиці і носять вони, зазвичай, загальний характер. У дослідженнях використовуються два підходи – експериментальний і теоретичний.

Автор даної статті тривалий час присвятив дослідженню напружено-деформованого стану та механічної міцності однотипного за конструкцією з аروحним п'єзокерамічного перетворювача енергії поздовжньо-згинального типу [9 – 13], у якого, на відміну від досліджуваного п'єзоперетворювача, циліндричні панелі виконані з металу, а активним елементом є пластина, виготовлена з секційованої поздовжньо-поляризованої п'єзокераміки.

У роботах [14 – 16] досліджено низькочастотний поздовжньо-згинальний гідроакустичний п'єзокерамічний перетворювач енергії, активним елементом якого, на відміну від досліджуваного у даній статті п'єзоперетворювача, є стержень (порожнистий циліндр), склеєний з п'єзокерамічних шайб. У цих роботах приведено результати експериментальних досліджень щодо деяких електроакустичних характеристик перетворювача.

Серед обмеженої кількості відкритих публікацій, присвячених дослідженням п'єзокерамічних перетворювачів аروحного типу (активними елементами є п'єзокерамічні циліндричні панелі), слід відзначити роботу Shuyu Lin [17]. У ній розглянуто поздовжньо-згинальні коливання п'єзоелектричного ультразвукового аروحного перетворювача композитного типу, досліджено взаємодію елементів системи в залежності від їх геометричних параметрів та вплив на частоти коливань. У роботах Л. С. Старова [18, 19], Л. С. Старова, Я. Г. Гловацької [20, 21], Л. С. Старова, М. М. Голосницької, М. І. Карновського [22] для моделі п'єзокерамічного перетворювача аروحного типу у вигляді арки, жорстко закріпленої або шарнірно опертої на нерухомі опори, розв'язуючи диференціальне рівняння електрпружних гармонічних згинальних коливань арки, що записане в одномірному наближенні, знайдено частоти і власні форми коливань. Розв'язано деякі задачі з використанням методу електромеханічних аналогій [23]. Задача визначення частот власних коливань кругової арки неодноразово розглядалася в літературі. Однак у більшості робіт задача розв'язувалась у припущенні про нерозтяжність осі арки [24]. При цьому модель ко-

ливальної системи вибиралася з розрахунку, що торці арки з'єднані з нерозтяжною основою або шарнірно, або за допомогою жорсткого закріплення. У цьому випадку вдавалося отримати відносно простий розв'язок рівняння коливань. Урахування розтягування осі арки дає істотні поправки до власних частот і форм коливань вигнутих пластин-арок. Як показано у роботах [25, 26] резонансні частоти коливань арки, що представляють для нас найбільший інтерес, як раз і обумовлені розтягуванням осі.

У даній статті розглядається динамічна поведінка п'єзокерамічного перетворювача енергії аروحного типу. Ставиться задача математичного моделювання вимушених резонансних коливань системи, дослідження її амплітудно-частотних характеристик в певному робочому діапазоні частот та оцінки напружено-деформованого стану на основній резонансній частоті коливань з урахуванням розсівання енергії.

## 3. Математичне моделювання коливань: система диференціальних рівнянь, граничні умови

Перетворювач енергії аروحного типу являє собою складену електромеханічну триелементну систему, яка складається з пасивної прямокутної металевої пластини 1 і двох активних п'єзокерамічних циліндричних панелей (арок) 2, розмішених симетрично відносно пластини і пружно зв'язаних з нею (загальний вигляд аروحного п'єзоперетворювача енергії та його розрахункова схема представлені відповідно на рис. 1, а та рис. 1, б). Конструктивно циліндричні панелі склеєні з окремих п'єзокерамічних сегментів (призм), на поверхнях склеювання яких нанесені електроди і які попередньо поляризовані в тангенціальному напрямі. Тангенціально-радіальні коливання панелей здійснюються під дією гармонічної електричної напруги, підведеної до паралельно з'єднаних між собою електризованих призм панелей.

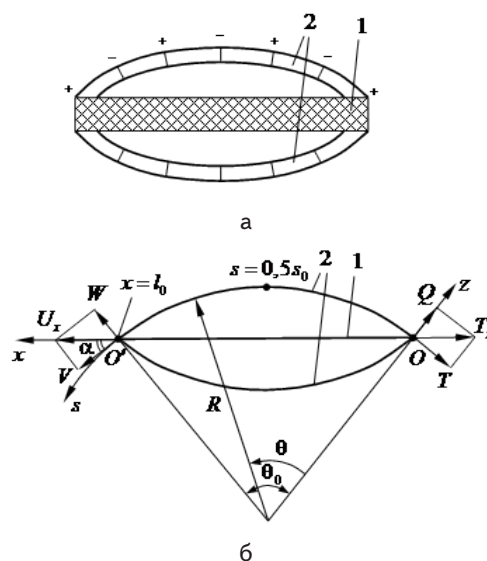


Рис. 1. П'єзокерамічний перетворювач енергії аروحного типу (1 – металева пластина, 2 – п'єзокерамічні циліндричні панелі): а – загальний вигляд; б – розрахункова схема

Максимально ефективно п'єзокерамічний перетворювач аروحного типу працює на резонансній частоті тоді, коли металева пластина (опорна основа) абсолютно жорстка, тобто така, яка не розтягується. Тоді вся енергія збудження електричного поля (не враховуючи розсіювання в матеріалі) трансформується в енергію механічних радіальних коливань панелей. Однак, на практиці реалізувати пластину-основу абсолютно жорсткою неможливо: торці п'єзокерамічних циліндричних панелей збуджують незначні поздовжні коливання металевої пластини. Розміри і матеріал пластини вибираються за умови, щоб її жорсткість була більшою за жорсткість панелей у 3–4 рази.

При моделюванні резонансних коливань необхідно враховувати розсіювання енергії системи [27, 28]. Механічні коливання будь-якої системи, яка підлягає динамічному деформуванню, супроводжуються розсіюванням енергії, частина якої переходить в теплову енергію деформованих елементів системи, а частина безпосередньо розсіюється в навколишнє середовище.

Причини, які викликають розсіювання енергії, можуть бути поділені на дві основні групи – зовнішні і внутрішні.

До зовнішніх причин відноситься тертя коливальної системи з середовищем, в якому відбувається коливання (повітря, газ, вода, масло тощо). Задача врахування розсіювання енергії, викликаного зовнішніми причинами, в даній статті не розглядається.

Внутрішнє розсіювання можна об'єднати у три основні групи: резонансні, релаксаційні і гістерезисні. При періодичному деформуванні твердого тіла діють всі три механізми, але зміст їх в загальне розсіювання різний. Кожний із цих механізмів залежить також від експлуатаційних умов (діапазонів частот, амплітуд, температур). До внутрішнього розсіювання можна віднести також і конструкційне розсіювання, обумовлене тертям в з'єднаннях окремих елементів системи (нежорстких вузлах, в місцях болтових з'єднань), тертя в збірних пакетах пластин, стержнів тощо.

Задача врахування механічного розсіювання конструктивних елементів складених систем, таких як п'єзокерамічний перетворювач енергії, ускладнюється ще й тим, що їх конструкції складені із деталей різних конфігурацій, виготовлених, в свою чергу, із різнорідних матеріалів (п'єзокераміки, металів, полімерів, клейових з'єднань, неполяризованої кераміки).

Аналіз розсіювання енергії у самому п'єзокерамічному матеріалі є непростою задачею. При періодичних процесах непружні складові деформації і обумовлені ними механічне розсіювання енергії можуть бути враховані, якщо звичайні модулі пружності (Юнга) замінити комплексними

$$\bar{E}_{ю} = E_{ю}^0 + i\omega E_{ю}^1, \tag{1}$$

у яких дійсна частина є власне модуль пружності, а уявна враховує розсіювання енергії (у формулі (1)  $i$  – уявна одиниця,  $\omega$  – кругова частота). Крім цього, необхідно враховувати також діелектричні і п'єзоке-рамічні втрати.

Кількісний опис механічного розсіювання енергії за наявності різних механізмів втрат, які проявляються при резонансних коливаннях перетворювача енергії аروحного типу, є складною задачею. З цієї причини

для отримання фактичної кількісної інформації про напружено-деформований стан при резонансних коливаннях аروحного перетворювача енергії в першому наближенні приймемо гіпотезу, що сили затухання пропорційні першому степеню швидкості [29].

Коливання циліндричних п'єзокерамічних панелей по теорії типу С. П. Тимошенка [30, 31, 12] описуються рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial s} + \frac{Q}{R} &= \rho h \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \alpha_v h \frac{\partial V}{\partial t}; \\ \frac{\partial Q}{\partial s} - \frac{T}{R} &= \rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \alpha_w h \frac{\partial W}{\partial t}; \\ \frac{\partial M}{\partial s} - Q &= \frac{h^2}{12} \left( \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \alpha_\psi \frac{\partial \psi}{\partial t} \right). \end{aligned} \tag{2}$$

тут  $T, Q$  – узагальнені сили,  $M$  – згинальний момент:

$$\begin{aligned} T &= \frac{h}{s_{33}^E (1 - \nu_{13} \nu_{31})} \left[ \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{W}{R} - (d_{33} + \nu_{13} d_{31}) E_s^{(1)} \right]; \\ Q &= \frac{5}{6} \frac{h}{s_{44}^E} \left( \psi + \frac{\partial W}{\partial s} - \frac{V}{R} \right); \\ M &= \frac{h^3}{12 s_{33}^E (1 - \nu_{13} \nu_{31})} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial s} - (d_{33} + \nu_{13} d_{31}) E_s^{(2)} \right], \end{aligned} \tag{3}$$

де  $V, W, \psi$  – переміщення і кут повороту нормалі до поверхні панелі;  $h, R$  – товщина панелі і радіус її середньої поверхні;  $s$  – дугова координата;  $t$  – час;  $\rho$  – густина п'єзокераміки;  $\alpha_v, \alpha_w, \alpha_\psi$  – коефіцієнти розсіювання енергії в панелі;  $S_{ij}$  – пружні податливості п'єзокераміки;  $d_{ij}$  – п'єзоелектричні постійні;  $\nu_{ij}$  – коефіцієнти Пуассона;  $E_s$  – напруженість електричного поля.

Поздовжні коливання металевої пластини описуються рівнянням

$$\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} = \frac{\rho_x}{E_n^*} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\alpha_u}{E_n^*} \frac{\partial U}{\partial t}, \tag{4}$$

де  $U_x$  – поздовжні переміщення,  $\rho_n, E_n^* = E/(1-\nu^2)$ , – механічні параметри пластини,  $\alpha_u$  – коефіцієнт розсіювання енергії в пластині.

Систему рівнянь (2) – (4) необхідно доповнити граничними умовами – кінематичними і динамічними умовами з'єднання панелей з пластинною, які в правому  $x = s = 0$  і лівому  $x = l_0, s = s_0$  вузлах однакові:

$$\begin{aligned} U_x(l_0) &= V(s_0) \cos \varphi + W(s_0) \sin \varphi; \\ V(s_0) \sin \varphi - W(s_0) \cos \varphi &= 0, \quad \psi(s_0) = 0; \\ 0,5 h_n \sigma_x(l_0) + T(s_0) \cos \varphi + Q(s_0) \sin \varphi &= 0, \end{aligned} \tag{5}$$

де  $\sigma_x$  – механічні напруження;  $\theta$  – кут розкриття панелі;  $s_0$  і  $l_0$  – довжини панелі і пластини;  $h_n$  – товщина пластини.

#### 4. Розв'язання крайової задачі та аналіз результатів

Розв'язання системи рівнянь (2) – (4) зводиться до інтегрування тільки системи (2), (3) для циліндричної

панелі, оскільки при гармонічному режимі коливань рівняння (4) має точний розв'язок.

$$U_x = A \sin k_n \left( x - \frac{l_0}{2} \right). \quad (6)$$

Тут  $A$  – амплітуда переміщення,  $k_n$  – коефіцієнт, що містить механічні параметри пластини та її кругову частоту коливань.

З урахуванням (6) граничні умови (5) можна звести до трьох лінійних рівнянь, які зв'язують між собою  $V(s_0)$ ,  $W(s_0)$ ,  $\psi(s_0)$ ,  $T(s_0)$ ,  $Q(s_0)$ .

Інтегрування системи (2), (3) з урахуванням симетрії проводилось на проміжку  $[0, 5s_0, s_0]$  за умови  $V = \psi = Q = 0$  у точці  $s = 0,5s_0$ .

П'єзокерамічні панелі і металева пластина, виготовлені із п'єзокераміки ЦТБС-3 і сталі 29 НК відповідно, мають наступні параметри:

$$l_0 = 3,52h_n; \quad s_0 = 14,24h; \quad R = 14,82h; \quad \theta = 0,96.$$

Розсіювання енергії в пластині не враховувалось  $\alpha_n = 0$ . Експериментально на частоті основного резонансу було визначено коефіцієнти розсіювання енергії п'єзокерамічних панелей:

$$\alpha_w = 0,07; \quad \alpha_v = 0,0035; \quad \alpha_\psi = 0,0011.$$

Суттєва відмінність значень коефіцієнтів  $\alpha_w$ ,  $\alpha_v$ ,  $\alpha_\psi$  пояснюється тим, що значення максимальних радіальних переміщень  $W$  на порядок відрізняють від відповідних значень переміщень  $V$  і  $\psi$ .

У результаті дослідження вимушених резонансних коливань п'єзокерамічного перетворювача енергії аروحного типу було побудовано амплітудно-частотну характеристику коливань на прикладі центральної точки циліндричної панелі  $s = 0,5s_0$  і торцевої точки пластини  $x = l_0$ , знайдено залежності радіальних переміщень панелі і поздовжніх переміщень пластини від частот збудження електричного поля в діапазоні частот  $\tilde{\omega} = 0,113 - 0,5345$  ( $\tilde{\omega}$  – безрозмірна частота). Цей частотний діапазон містить перші дві резонансні робочі частоти перетворювача  $\tilde{\omega}_1 = 0,2266$  і  $\tilde{\omega}_2 = 0,5848$ .

Крім цього, відповідні резонансні частоти  $\tilde{\omega}_1^* = 0,2233$ ,  $\tilde{\omega}_2^* = 0,5719$  були знайдені за допомогою віброметричної апаратури експериментальним шляхом. Як бачимо, значення збігаються з достатньо великою точністю.

Як уже наголошувалось, важливим фактором при дослідженні резонансних коливань перетворювача енергії аروحного типу, а також його напружено-деформованого стану є оптимальний вибір коефіцієнтів розсіювання енергії. Він оснований на експериментальних даних, отриманих у результаті вимірів амплітуд переміщень робочих поверхонь на деяких зразках однотипних перетворювачів. Вибравши коефіцієнти  $\alpha_w$ ,  $\alpha_v$ ,  $\alpha_\psi$ ,  $\alpha_n$  таким чином, щоб експериментальні і розрахункові значення амплітудно-частотних характеристик на резонансних частотах співпали, можна робити розрахунок напружено-деформованого стану цілої партії перетворювачів даного типу, не проводячи кожного разу відповідних експериментальних досліджень. Користуючись цим експериментально-теоретичним методом у результаті інтегрування системи

рівнянь (2), (3) з урахуванням (5), (6), були отримані значення функцій  $\tilde{V}$ ,  $\tilde{W}$ ,  $\tilde{\psi}$  (табл. 1), а також був проведений розрахунок динамічних напружень, які виникають в перетворювачі енергії аروحного типу при його коливаннях у режимі резонансу.

Таблиця 1

Розрахункові значення амплітуд переміщень точок поверхонь панелей

	Переміщення		Точки
	$\tilde{V}$	$\tilde{\psi}$	
-0,18	-0,347	0	$0s_0$
-0,063	-0,582	0,648	$0,05s_0$
-0,804	-0,792	1,27	$0,1s_0$
-1,99	-0,954	1,8	$0,15s_0$
-3,52	-1,05	2,16	$0,2s_0$
-5,25	-1,06	2,3	$0,25s_0$
-7,0	-0,984	2,22	$0,3s_0$
-8,59	-0,825	1,9	$0,35s_0$
-9,86	-0,594	1,39	$0,4s_0$
-10,7	-0,311	0,733	$0,45s_0$
-11,0	0	0	$0,5s_0$

Найбільш ефективною робота досліджуваного п'єзоперетворювача реалізується на першій резонансній частоті, де максимальне переміщення робочої частини панелей майже в 3 рази більше, ніж на другому резонансі.

Із табл. 1 видно, що значення максимальних радіальних переміщень  $\tilde{W}$  в точці  $s = 0,5s_0$  майже на порядок перевищують значення переміщень  $\tilde{V}$ ,  $\tilde{\psi}$ . Порівнюючи максимальну амплітуду радіального переміщення  $\tilde{W} = 11,0$  точки  $s = 0,5s_0$  панелі з відповідним максимальним значенням амплітуди поздовжнього переміщення  $U_x = 2,1$  точки  $x = l_0$  пластини, можна зробити висновок про менш суттєву їх відмінність (приблизно в 5 разів).

## 5. Висновки

У результаті дослідження вимушених коливань нетрадиційного п'єзокерамічного перетворювача енергії аروحного типу на основі уточненої теорії типу С. П. Тимошенка записано систему диференціальних рівнянь коливань з урахуванням розсіювання енергії. Для замикання системи рівнянь сформульовано та записано граничні умови – кінематичні та динамічні умови з'єднання циліндричних п'єзокерамічних панелей з металевою пластинною.

Проведено інтегрування повної системи диференціальних рівнянь коливань, знайдено залежності радіальних переміщень панелей і поздовжніх переміщень пластини від частот коливань у діапазоні, що включає перші дві робочі резонансні частоти.

Побудовано амплітудно-частотні характеристики коливань на прикладі центральної точки панелі (максимальні радіальні переміщення) і торцевої точки пластини (максимальні поздовжні переміщення). Проведено оцінку напружено-деформованого стану досліджуваної електромеханічної системи на частоті



основного резонансу з урахуванням розсіювання енергії.

Максимальні амплітуди радіальних переміщень реалізуються в центральній точці панелі на першій резонансній частоті. Механічні напруження п'єзо-керамічної панелі, як найбільш слабкої ланки пере-

творювача арочного типу, характеризуються значною нерівномірністю і змінюються вздовж панелі як за величиною, так і за знаком. Максимальні значення напружень  $\bar{\sigma}_s$  мають місце у точках  $s=0,5s_0$  ( $\bar{\sigma}_s = 1,35$ ), а також у точці з'єднання панелей з пластиною  $s=0$  ( $\bar{\sigma}_s = -0,35$ ).

### Література

1. Богородский, В. В. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование: справочник [Текст] / В. В. Богородский, Л. А. Зубарев, Е. А. Корепин, В. И. Якушев. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
2. Curie, J. Contractions et dilatations produits par des tensions electriques dans les cristaux hemiedres a faces inclinees [Text] / J. Curie, P. Curie // Compt. Rend. – 1981. – № 93. – 1137 p.
3. Мэзон, У. Физическая акустика [Текст] / под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1968. – Т. 1, Часть. А. – 592 с.
4. Ганопольський, В. В. П'єзокерамічні преобразователи: справочник [Текст] / В. В. Ганопольський, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша и др. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
5. Судзуки, Т. Основные типы электрических преобразователей [Текст] / Т. Судзуки, Е. Кикучи. – Ультразвуковые преобразователи. – М.: Мир, 1972. – С. 219–280.
6. Toulis, W. J. Acoustic-backing Techniques for Transducers and Radiators [Text] / W. J. Toulis // J. Acoust. Soc. Am. – 1965. – Vol. 37, №6. – P. 250–256.
7. Patent № 3274537 Flexural-extensional electro-mechanical transducer [Text] / Toulis, W. J. – declared 17.10.1963; publication 20.09.1966. – 4 p.
8. Kenzo, Sato Free flexural vibrations of an elliptical ring in its plane [Text] / Sato Kenzo // J. Acoust. Soc. Amer. – 1975. – Vol. 57, № 1. – P. 113–115.
9. Ластивка, И. А. Напряженно-деформированное состояние трехстержневой системы при колебаниях в жидкости [Текст]: IV Респуб. конф.; Часть. 2 / И. А. Ластивка // Тезисы докладов по прикладной гидромеханике. – Киев, 1987. – С. 145–146.
10. Ластивка, И. А. О динамическом состоянии преобразователя продольно-изгибного типа [Текст] / И. А. Ластивка, В. Г. Савин, Н. А. Шульга // Научно-технический сборник «Судостроительная промышленность». – 1987. – Вып. 18. – С. 15–23.
11. Голованенко, А. И. Об определении максимальных циклических напряжений в пьезокерамических преобразователях [Текст] / А. И. Голованенко, И. А. Ластивка, Г. Г. Писаренко, В. Н. Решетинский // Научно-технический журнал «Проблемы прочности». – 1988. – № 11. – С. 54–57.
12. Шульга, Н. А. Напряженно-деформированное состояние преобразователя продольно-изгибного типа при резонансных колебаниях [Текст] / Н. А. Шульга, С. И. Рудницкий, И. А. Ластивка // Научно-технический журнал «Проблемы прочности». – 1989. – № 6. – С. 81–84.
13. Шульга, Н. А. Напряженно-деформированное состояние и кратковременная механическая прочность пьезокерамического преобразователя при резонансных колебаниях [Текст]: Матер. докл. IV симпоз. / Н. А. Шульга, И. А. Ластивка // Теоретические вопросы магнито-упругости. – Ереван, 1989. – С. 206–211.
14. Патент №81104 на полезную модель Российская Федерация. МПК 7 В06В 1/06, Н04К17/00 [Текст] / Андреев М. Я., Артельный В. В., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. // Низкочастотный продольно-изгибный гидроакустический пьезокерамический преобразователь. Заявитель или патентообладатель ОАО «Концерн «Океанприбор». – №2008142503/22, заявл. 27.10.2008; опубликовано 10.03.2009, бюл. №7. – 1 с.
15. Андреев, М. Я. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь [Текст] / М. Я. Андреев, Б. Н. Боголюбов, В. В. Ключин и др. // Датчики и системы. – 2010. – № 12. – С. 51–55.
16. Андреев, М. Я. Экспериментальные исследования параметров продольно-изгибных преобразователей буксируемой излучающей антенны [Текст] / М. Я. Андреев, Б. Н. Боголюбов, В. В. Ключин и др. // Гидроакустика. – 2012. – Вып. 15 (1). – С. 109–114.
17. Shuyu, Lin. Study on the Langevin piezoelectric ceramic ultrasonic transducer of longitudinal-flexural composite vibrational mode [Text] / Lin Shuyu // Ultrasonics – 2006. – Vol. 44, № 1. – P. 109–114.
18. Старов, Л. С. Об эквивалентных параметрах арочных пьезокерамических преобразователей [Текст] / Л. С. Старов // Вопросы судостроения. Серия: акустика. – 1974. – Вып. 1. – С. 168–181.
19. Старов, Л. С. О параметрах арочного пьезокерамического преобразователя с заземленной колебательной системой [Текст] / Л. С. Старов // Акустика и ультразвуковая техника. – 1976. – Вып. 2. – С. 34–41.
20. Старов, Л. С. Расчет поля излучения арочного преобразователя [Текст] / Л. С. Старов, Я. Г. Гловацкая // Вопросы судостроения. Серия: акустика. – 1976. – Вып. 7. – С. 78–84.
21. Старов, Л. С. Об оптимальных геометрических соотношениях колебательной системы арочного преобразователя [Текст] / Л. С. Старов, Я. Г. Гловацкая // Прикладная акустика. – 1976. – Вып. 3. – С. 65–70.

22. Старов, Л. С. О механических напряжениях, создаваемых гидростатическим давлением в арочном преобразователе [Текст] / Л. С. Старов, Н. Н. Голосницкая, М. И. Карновский // Вестник Киевского политехнического института. Серия: радиотехника и электроакустика. – 1976. – Вып. 13. – С. 80–82.
23. Wollett, R. S. Effective coupling factor of single-degree-of-freedom transducers [Text] / R. S. Wollett // J. Acoust. Soc. Amer. – 1963. – Vol. 35, № 12. – P. 1837–1838.
24. Старов, Л. С. Частоты и формы собственных колебаний арочных преобразователей [Текст] / Л. С. Старов // Вопросы судостроения. Серия: акустика. – 1974. – Вып. 1. – С. 155–167.
25. Federhofer, K. Berechnung der niedrigsten eigenschwingungszahl des radialbelasteten Kreislogens [Text] / K. Federhofer // Ing. Archiv. – 1933. – № 3. – P. 118–124.
26. Walking, F. W. Schwingungszahlen und schwingung stormen von kreisbogentragerb [Text] / F. W. Walking // Ing. Archiv. – 1934. – Bd. 5, № 6. – P. 429–449.
27. Holland, R. Representation of dielectric, elastic and piezoelectric losses by complex coefficients [Text] / R. Holland // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1967. – VP. SU-14, №4. – P. 18–20.
28. Land, C. E. Dependence of small-signal parameters of ferroelectric ceramic resonators upon state of polarization [Text] / C. E. Land, G. W. Smith, C. R. Westgate. // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1964. – Vol. SU-2. – P. 8–19.
29. Филиппов, А. П. Колебания упругих систем [Текст] / А. П. Филиппов. – Киев : АН УССР, 1956. – 322 с.
30. Вольмир, А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек [Текст] / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1972. – 432 с.
31. Шульга, Н. А. Колебания пьезокерамических тел [Текст] / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев. – Киев. : Наукова думка, 1990. – 228 с.

*У статті розглянуті динамічні силові перехідні процеси в канатопроводі однобарабанного і двохбарабанного підйомників з урахуванням дисипації канатів і демпфуючих пристроїв. Коливальні процеси в канатах підйомників описані диференціальними рівняннями в моментах сил пружності з постійними коефіцієнтами і графічно показані на осцилограмах. Визначені динамічні параметри канатів підйомників при варіюванні коефіцієнтами дисипації демпфуючих пристроїв*

*Ключові слова: підйомники, динамічні навантаження, демпфуючі пристрої в канатах, коефіцієнт дисипації, коефіцієнт динамічності*

*В статье рассмотрены динамические силовые переходные процессы в канатопроводе однобарабанного и двухбарабанного подъемников с учетом диссипации канатов и демпфирующих устройств. Колебательные процессы в канатах подъемников описаны дифференциальными уравнениями в моментах сил упругости с постоянными коэффициентами и графически показаны на осциллограммах. Определены динамические параметры канатов подъемников при варьировании коэффициентами диссипации демпфирующих устройств*

*Ключевые слова: подъемники, динамические нагрузки, демпфирующие устройства в канатах, коэффициент диссипации, коэффициент динамичности*

УДК 621.863.2:534.11

# УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В КАНАТАХ БАРАБАНЫХ ПОДЪЕМНИКОВ

**Т. Н. Осипова**

Ассистент\*

E-mail: tanya\_338@mail.ru

**А. П. Нестеров**

Доктор технических наук, профессор\*

\*Кафедра металлорежущего  
оборудования и транспортных систем  
Украинская инженерно-педагогическая  
академия  
ул. Университетская, 16, г. Харьков,  
Украина, 61003

## 1. Введение

В процессе эксплуатации барабанных подъемников возникают максимальные динамические нагрузки в канатах колебательного характера, как при эксплуатационных режимах работы, так и при предохранительном торможении. Эти колебания вызывают увеличение нагрузок в канатах по сравнению со стационарными значениями и, следовательно, уменьшается запас прочности подъемного каната, а

в клетевых подъемниках происходит нарушение вестибулярного аппарата рабочих. Поэтому актуальной является необходимость уменьшить колебания подъемных сосудов на канатах. В настоящей работе для уменьшения динамических нагрузок в канатах подъемников предлагается применять демпфирующие устройства, устанавливаемые в прицепном звене подъемных сосудов, что позволит улучшить эксплуатационные характеристики подъемников в целом.