

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**Клітної Володимир Вікторович**

УДК 539.37+621.31

**АКТИВНЕ ГАСІННЯ ВІБРАЦІЙ В ПЛАСТИНЧАСТИХ ЕЛЕМЕН-  
ТАХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ОРТОТРОПНОГО МАТЕРІАЛУ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2009

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі «Динаміка та міцність машин» Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Львов Геннадій Іванович**,  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри динаміки та  
міцності машин, м. Харків.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Воробйов Юрій Сергійович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
завідувач відділу нестационарних механічних  
процесів, м. Харків;

кандидат технічних наук  
**Овчаренко Віталій Володимирович**,  
АТ "Українська промислова енергетична  
компанія", керівник групи інженерних  
розрахунків, м. Харків.

Захист відбудеться “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 р. о \_\_\_ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.10

Сукіасов В.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Системи активного гасіння вібрацій знаходять застосування в різних областях техніки (машинобудування, авіабудування, будівництво, ракетно-космічні комплекси). Вивчаються можливості активного гасіння шумів, проводяться дослідження з активного усунення вібрацій елементів конструкцій літальних апаратів. Ведуться роботи з активного гасіння вібрацій в автомобільних і корабельних двигунах. Цікаві напрацювання з контролю вібрацій в системах управління авіаційних та ракетно-космічних апаратів. Можливість стабілізації роботи електронного устаткування за допомогою гасіння вібрацій в друкованих вузлах відкриває величезні перспективи для підвищення надійності роботи систем управління.

У зв'язку з вище наведеним має місце певний інтерес до розгляду адаптивних конструкцій, які характеризуються інтегрованими сенсорами і актуаторами, зв'язаними між собою завдяки управляючому блоку (контролеру). За допомогою сенсорів отримується інформація про стан конструкції, яка надає далі передається на контролер, котрий її обробляє і формує сигнал відгуку, що надходить на актуатори. Самі ж актуатори забезпечують безпосередню механічну дію на конструкцію. Вони перетворюють вхідний сигнал (електричний, гідравлічний, пневматичний, термічний і т. п.) в механічний (сили, переміщення).

Висока інтегрованість п'єзоелектричних елементів та їх властивість щодо забезпечення широкого частотного діапазону дозволяють активно використовувати останні в якості сенсорів або актуаторів в активно керованих структурах.

Існуючі розробки по темі дисертаційної роботи переважно присвячені побудові аналітичних моделей схем активного гасіння вібрацій на балках, на пластинах і оболонках. Проте, практично всі відомі дослідження вирішують дану задачу для ізотропного матеріалу. Тому, створення ефективних аналітичних моделей схем активного гасіння вібрацій на пластинчастих елементах конструкцій, виконаних з ортотропного матеріалу, має важливе теоретичне значення і є практично важливим для сучасного машинобудування, яке все більше використовує передові технології матеріалознавства на базі композитних складових, та визначає напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках держбюджетної науково-дослідної теми МОН України «Розробка математичних моделей та методів розрахунку нелінійного деформування і пошкоджуваності елементів конструкцій при інтенсивних навантаженнях»

(№ ДР 0106U001473), де здобувач був виконавцем розділів, пов'язаних з дослідженням процесів активного гасіння вібрацій у композиційних пластинах.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення проблеми зменшення динамічних вібрацій пластинчастих елементів конструкцій за рахунок активної взаємодії п'єзоелектричних компонентів з ортотропною структурою.

Відповідно до мети досліджень вирішені наступні задачі:

- запропонувати математичну модель, що описує реакцію ортотропної пластини на дію п'єзоелектричних плівкових актуаторів;
- розробити методіку розрахунку процесу активного гасіння вібрацій в ортотропних пластинах за допомогою інтегрованих п'єзоелектричних сенсорів і актуаторів;
- здійснити заміну дії п'єзоелектричного плівкового актуатора на ортотропну пластину механічними моментами, що діють на гранях елемента;
- виконати чисельні дослідження в області гасіння вібрацій бортових плат;
- провести експериментальні дослідження ефективності гасіння коливань в ортотропних пластинах за допомогою адаптивної системи контролю вібрацій, побудованої на базі плівкових п'єзокерамічних елементів.

*Об'єкт дослідження* – стаціонарні і нестаціонарні коливання систем, що визначаються ортотропними властивостями матеріалу.

*Предмет дослідження* – ортотропна пластинка з закріпленими на ній п'єзоелектричними компонентами, що працює в адаптивній схемі активного гасіння вібрацій.

**Методи дослідження.** Основними методами досліджень були: методи теорії пружності, теорії пластин і оболонок, теорії коливань, які застосовувалися для побудови математичної моделі ортотропної пластини, методи теорії п'єзоелектрики, за допомогою яких розроблялися математичні моделі адаптивних елементів, методи активного контролю вібрацій, впровадження яких дозволило побудувати ефективну схему активного гасіння вібрацій, побудовану на базі плівкових п'єзоелектричних елементів, метод скінчених елементів, який використовувався для скінчено-елементного моделювання. Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень, виконаних із застосуванням теорії вимірювань і теорії похибок, та практикою промислового впровадження.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому що:

- створено математичну модель, яка описує реакцію ортотропної пластини на дію п'єзоелектричних плівкових актуаторів. Проведено аналіз сил і моментів, викликаних дією пари симетрично розташованих і працюючих у протифазі п'єзоелектричних елементів;

- здійснено математичне моделювання дії п'єзоелектричного актуатора на ортотропну пластину на основі заміни її механічними моментами, отримано результати для трьох варіантів такої заміни, що дозволяє значно спростити взаємозв'язок між різними скінченими елементами при скінчено-елементному моделюванні;

- запропонована схема активного гасіння вібрацій в ортотропних пластинах за допомогою плівкових п'єзокерамічних елементів;

- проведені експериментальні дослідження активного гасіння коливань композитної пластини, результати яких дозволили ствердити доцільність промислового впровадження запропонованої адаптивної системи, для гасіння вібрацій в пластинчатих елементах конструкцій машинобудівної, літакобудівної та ін. галузей промисловості.

**Практичне значення одержаних результатів** для машинобудівної промисловості полягає в створенні ефективної системи активного гасіння вібрацій, виконаної на базі плівкових п'єзокерамічних елементів, яка може використовуватись в якості елемента системи керування вібраціями в автомобільних, авіаційних та ракетно-космічних апаратах.

Розробці методик математичного і скінчено-елементного моделювання, які становлять нову базу для проектування друкованих вузлів систем управління з інтегрованими в їх структуру адаптивними плівковими елементами у схемі методу контролю зі зворотнім зв'язком за швидкістю переміщень.

Результати роботи впроваджені: у проектно-конструкторські роботи СП ЗАО «ХЕМЗ – ІРЕС» (м. Харків), що дозволило зменшити негативні динамічні вібрації елементів випробувального обладнання відцентрованих насосів, підвищити надійність його роботи; у НДІ ПФМ ХАІ (м. Харків) при дослідному проектуванні безпілотних літальних апаратів, для зниження негативних динамічних вібрацій крила, а також підвищення надійності роботи досліджуваного БПЛА за рахунок зменшення загальної ваги конструкції.

**Особистий внесок здобувача.** До числа основних напрямків роботи, виконаних одноосібно здобувачем, необхідно віднести:

- математичні моделі коливань ортотропної пластини з закріпленими на ній п'єзоелектричними елементами;

- розробку концепції, принципів побудови і розвиток наукових основ проектування адаптивної системи активного гасіння вібрацій;

- результати теоретичних та чисельних досліджень заміни дії п'єзоелектричного актуатора на пластину механічними моментами;

- методика і програмні модулі розрахунку та проектування друкованої плати з інтегрованими в її структуру п'єзоелектричними плівковими елементами у адаптивній схемі методу контролю.

Формулювання проблеми і задач досліджень здійснювалися разом з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й одержали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних конференціях: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2005, 2006 р.); «Гідроаеромеханіка у інженерній практиці» (м. Луганськ, 2007 р.), на щорічних наукових семінарах кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП» (2004-2007 р.р.), були представлені на III обласному конкурсі «Найкращий молодий науковець Харківщини» (2008 р.)

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 наукових праць, з яких 7 у фахових виданнях ВАК України.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 155 сторінок, з них 56 ілюстрацій по тексту, 8 ілюстрацій на 4 сторінках, 9 таблиць по тексту, 2 додатка на 2-х сторінках, 110 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** здобувачем викладено стан наукової проблеми, що розглядається в дисертаційній роботі, її актуальність і значимість. Формулюються мета та задачі дослідження. Визначені наукова новизна та практична цінність роботи. Наведені відомості про апробацію результатів досліджень та структуру роботи.

**У першому розділі** проаналізована наростаюча тенденція до необхідності використання адаптивних систем в активних схемах гасіння вібрацій стосовно різних областей техніки. Вирішення проблеми активного гасіння вібрацій в друкованих платах відкриває широкі можливості стабілізації роботи електронного устаткування, розширює перспективи підвищення надійності роботи систем управління. При цьому в якості досліджуваної моделі необхідно розглядати пластину прямокутної форми з яскраво вираженими ортотропними властивостями, залежними від напрямку армуючих волокон матеріалу і способу формування друкованої плати.

Проведено докладний аналіз особливостей існуючих адаптивних матеріалів, використовуваних при створенні сенсорів і актуаторів для систем активного гасіння вібрацій. Серед великого класу адаптивних матеріалів (електрострікційні матеріали, полімерні матеріали, сплави з пам'яттю форми,

монокристали та ін.) найбільш затребуваною на сьогоднішній день являється п'єзоелектрична кераміка.

Представлено огляд існуючих підходів в описі п'єзоелектричних елементів і адаптивних пластинчастих конструкцій, зокрема що характеризуються ортотропними властивостями. Виконано широкий аналіз існуючих методів активного контролю вібрацій.

Питанням фізики п'єзокристалів і їх практичному застосуванню присвячена ціла низка статей і книг, серед них найповнішими і найзмістовнішими є роботи Кеді У., Аронова Б.С., Джагупова Р.Г. Смажевської Є.Г., Глозмана І.А. та ін.

Проблеми, пов'язані з вирішенням динамічних задач для пластин, досить добре висвітлені в сучасній літературі, зокрема слід зазначити визначних науковців: Тимошенко С.П., Філіппов О.П., Бабаков І.М., Огібалов П.М. й ін. Наближена теорія вигину анізотропних пластинок розроблена, в основному, завдяки роботам Губера М.Т. Значний розвиток теорії анізотропних пластинок був здійснений в роботі Лехніцького С.Г.

В результаті всебічного аналізу наукової літератури найбільш перспективним з усіх методів активного контролю вібрацій виглядає метод контролю зі зворотнім зв'язком, суть якого полягає в тому, що вихідний сигнал від системи подається на контролер і далі після перетворення знову подається на саму систему.

Практичним застосуванням схем активного гасіння вібрацій почали займатися в середині 80-х років двадцятого століття. Bailey T. і Hubbard J.E. вперше використали п'єзоелектричні актуатори в схемі активного контролю вібрацій на прикладі моделі консольної балки. Ці дослідження викликали величезний інтерес до використання п'єзоелектричних сенсорів і актуаторів в адаптивних системах і знайшли свій подальший розвиток в роботах наступних науковців: Crawley E.F., Luis J., Hagood N.W., Clark R.L., Fuller C.R., Lester H.C., Lefebvre S., Овчаренко В.В., Pae S., Preumont A., Herold S. та ін.

Розглядаючи різноманітні аналітичні моделі схем активного гасіння вібрацій на балках, пластинах і оболонках, зазначимо, що практично всі відомі дослідження вирішують дану задачу для ізотропного матеріалу. Аналізуючи питання моделювання дії п'єзоелектричного актуатора на ортотропну пластину механічними моментами, що діють на гранях п'єзоелементу, визначимо, що подібні дослідження проводилися раніше в основному для стрижньових систем, набагато рідше для пластин і оболонок, але виключно для моделей з ізотропних матеріалів. Практично відсутні наукові роботи з питань досягнення стабільності роботи електронного устаткування шляхом використання схем активного гасіння вібрацій безпосередньо в друкованих вузлах.

**Другий розділ** присвячено розробці концепції побудови теорії та методики активного гасіння коливань в ортотропних пластинах з використанням адаптивних схем, виконаних на базі плівкових п'єзоелектричних елементів.

Важливим етапом при проектуванні систем активного гасіння вібрацій є розробка електромеханічної моделі адаптивних елементів. При побудові такої моделі необхідно використовувати лінійну теорію п'єзоэффекту зі спрощеннями, що виникають при переході від тривимірної системи до двовимірної, яка описує стан плівкового п'єзоелектричного тіла (рис. 1).

Рис.1. Плівковий п'єзоелектричний елемент і система позначень

Рівняння стану п'єзоелектричного середовища в матричній формі будуть мати такий вид:

$$\begin{aligned} \sigma &= \mathbf{C}\varepsilon - \mathbf{e}\mathbf{E} & \varepsilon &= \mathbf{S}\sigma + \mathbf{d}^T\mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{e}^T\varepsilon + \epsilon^e\mathbf{E}' & \mathbf{D} &= \mathbf{d}\sigma + \epsilon^\sigma\mathbf{E}' \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\sigma$  – тензор механічної напруги;  $\mathbf{C}$  – тензор коефіцієнтів жорсткості;  $\varepsilon$  – тензор механічних деформацій;  $\mathbf{e}$  – тензор п'єзоелектричних сталих;  $\mathbf{E}$  – вектор напруженості електричного поля;  $\mathbf{D}$  – вектор електричної індукції;  $\mathbf{S}$  – тензор коефіцієнтів пружності;  $\epsilon^\sigma$ ,  $\epsilon^e$  – тензора коефіцієнтів абсолютної діелектричної проникності;  $\mathbf{d}$  – тензор п'єзоелектричних коефіцієнтів.

При побудові електромеханічної моделі плівкового п'єзокерамічного елемента важливо враховувати функцію, яку він виконує – сенситивну, або актуативну.

Залежність компонентів вектора напруженості  $\mathbf{E}$  від електричної напруги  $U_{ex}$ , що прикладається до елемента, в актуаторі може бути представлена в наступному вигляді

$$\mathbf{E} = \left[ 0 \quad 0 \quad \frac{U_{ex}}{h_p} \right]^T. \quad (2)$$

Залежності між електричною напругою, яка прикладається, і деформаціями незакріпленого п'єзокерамічного актуатора записуються у вигляді

$$\varepsilon = \mathbf{d}^T\mathbf{E}. \quad (3)$$

Рівняння стану плівкового п'єзокерамічного сенсора можна спростити

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}\sigma. \quad (4)$$

Вираз для електричної напруги, що виникає у сенсорі внаслідок деформації, представляється в наступному вигляді

$$U_{\text{вих}} = \frac{1}{C_{II}} \iint_A \mathbf{D} dA, \quad (5)$$

де  $C_{II}$  – ємність сенсора,  $A$  – площа поверхні п'єзоелемента.

Фізична модель ортотропної пластини із закріпленими на ній п'єзоелементами представлена на рис. 2.

Рис.2

Для проведення аналізу фізичної моделі дана конструкція розбивається на дві частини. Одна частина – це пластина із закріпленими на ній п'єзоелектричними елементами, а інша – пластина без п'єзокераміки.

Вирази механічних моментів, які діють по граням двох виділених ділянок, записуються в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} M_1 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{11} x_3 dx_3 = - \left( D_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1^2} + D_3 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_2^2} \right); & M_1^p &= - \left( D_1^p \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1^2} + D_3^p \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_2^2} \right) + K_1^p U_{\text{вих}}; \\ M_2 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{22} x_3 dx_3 = - \left( D_3 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1^2} + D_2 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_2^2} \right); & M_2^p &= - \left( D_3^p \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1^2} + D_2^p \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_2^2} \right) + K_2^p U_{\text{вих}}; \\ & & M_{12}^p &= 2 \cdot D_{12}^p \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ M_{12} &= - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_{12} x_3 dx_3 = 2D_{12} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1 \partial x_2}; \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} D_1^p &= D_1 - A_1 \left( \frac{1}{2} h^2 h_p + h_p^2 h + \frac{2}{3} h_p^3 \right); & K_1 &= \left( \frac{C_{13} e_{33}}{C_{33}} - e_{13} \right) \frac{1}{h_p}; \\ D_2^p &= D_2 - A_2 \left( \frac{1}{2} h^2 h_p + h_p^2 h + \frac{2}{3} h_p^3 \right); & K_2 &= \left( \frac{C_{23} e_{33}}{C_{33}} - e_{13} \right) \frac{1}{h_p}; \\ D_3^p &= D_3 - A_{12} \left( \frac{1}{2} h^2 h_p + h_p^2 h + \frac{2}{3} h_p^3 \right); & K_1^p &= K_1 (h_p^2 + h h_p); \\ D_{12}^p &= D_{12} - C_{66} \left( \frac{1}{2} h^2 h_p + h_p^2 h + \frac{2}{3} h_p^3 \right); & K_2^p &= K_2 (h_p^2 + h h_p); \end{aligned}$$

У роботі отримані диференціальні рівняння руху, що можуть бути використані для аналітичних рішень і для загального аналізу поведінки пластини:

$$\begin{aligned} \frac{g}{h\gamma_1} \left( D_1 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_1^4} + 2(D_3 + 2D_{12}) \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_2 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_2^4} \right) + \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{g}{h\gamma_2} \left( D_1^P \frac{\partial^4 w_2}{\partial x_1^4} + 2(D_3^P + 2D_{12}^P) \frac{\partial^4 w_2}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_2^P \frac{\partial^4 w_2}{\partial x_2^4} \right) + \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для вирішення рівнянь руху (7), вводяться умови сполучення:

$$\begin{aligned} w_1 &= w_2; & K_1^P U_{ex} &= \left( D_1^P \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1^2} + D_3^P \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_2^2} \right) - \left( D_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1^2} + D_3 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_2^2} \right); \\ \frac{\partial w_1}{\partial x_1} &= \frac{\partial w_2}{\partial x_1}; & 0 &= 2 \left( D_{12} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1 \partial x_2} - D_{12}^P \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1 \partial x_2} \right), \\ w_1 &= w_2; & K_2^P U_{ex} &= \left( D_3^P \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1^2} + D_2^P \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_2^2} \right) - \left( D_3 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1^2} + D_2 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_2^2} \right); \\ \frac{\partial w_1}{\partial x_2} &= \frac{\partial w_2}{\partial x_2}; & 0 &= 2 \left( D_{12} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1 \partial x_2} - D_{12}^P \frac{\partial^2 w_2}{\partial x_1 \partial x_2} \right). \end{aligned}$$

Отримана система рівнянь, доповнена граничними і початковими умовами, повністю описує поведінку ортотропної пластини із закріпленими на ній плівковими п'єзокерамічними елементами.

Взаємозв'язок між роботою сенсорів і актуаторів може бути здійснений на основі використання методу контролю зі зворотнім зв'язком за швидкістю переміщень. Якщо припустити, що при сталих коливаннях стан системи і компенсатора описується за гармонійним законом, то в такому разі сигнал з контролера системи може бути представлений в наступному вигляді

$$u = u_0 e^{i\omega t} = \left[ \frac{-Gi\varpi\omega_c^4}{(\omega_c^2 - \omega^2) + 2i\zeta_c\omega_c\omega} \right] x_0 e^{i\omega t}, \quad (8)$$

де  $u_0$  – амплітуда коливань контролюючого сигналу, діючого на актуатор;  $G$  – коефіцієнт зворотного зв'язку;  $\varpi$  – частота коливань конструкції;  $\omega_c$  – власна частота коливань компенсатора;  $\zeta_c$  – коефіцієнт демпфування компенсатора;  $x_0$  – амплітуда коливань в системі.

Здійснено інтегральне моделювання заміни дії п'єзоелектричного актуатора на ортотропну пластину моментами, що діють на гранях елемента, та запропоновано три варіанти такої заміни. Необхідність досліджень можливостей таких замін з'являється через складнощі що виникають у взаємодіях між різними кінцевими елементами при математичному моделюванні реальних задач.

При першому варіанті заміни (вар. А) враховано, що на п'єзоелектричні елементи не подається електрична напруга, а також припускається, що на гранях елемента прикладені механічні моменти. Порівнюючи отримані вирази умов сполучення, можемо зробити висновок про те, що частина рівнянь, пов'язана з електричною напругою, відповідає за напруженість конструкції, і при такій постановці задачі ця частина дорівнює механічним моментам:

$$\begin{aligned} K_1^p U_{ex} &= M_1^p; \\ K_2^p U_{ex} &= M_2^p. \end{aligned} \quad (9)$$

При другому варіанті заміни (вар. Б), було прийнято припущення про постійність кривизни зігнутої середньої поверхні пластини  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  по всій поверхні п'єзоактуаторів. Виходячи з рівності згинаючих моментів в місці сполучення п'єзоелемента і пластини, є можливість визначити невідомі кривизни. В результаті чого обчислюються згинаючі моменти:

$$\begin{aligned} M_1^p &= -D_1(\chi_1 + \nu_1 \chi_2); \\ M_2^p &= -D_2(\chi_2 + \nu_2 \chi_1). \end{aligned} \quad (10)$$

При третьому варіанті заміни (вар. В) приймається припущення про те, що жорсткість пластини значно вища за жорсткість актуатора. Враховуючи це, рівняння електромеханічного стану значно спростяться після чого можуть бути отримані вирази для компонентів вектора механічної напруги, на основі яких визначаються моменти, створювані п'єзокерамічним актуатором

$$M_p = M_1^p = M_2^p = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+h_p} \frac{E_p d_{31} U_{ex}}{(1-\nu_p) h_p} x_3 dx_3. \quad (11)$$

**У третьому розділі** проведено аналіз інтегральної моделі п'єзоелектричної дії. Виконано розрахунки тестових задач по визначенню АЧХ коливань прямокутної ортотропної пластини, викликаних дією пари симетрично розташованих і працюючих в протифазі п'єзоелектричних плів-

кових актуаторів. В подальшому були виконані аналогічні розрахунки тестової моделі для варіанту навантаження, котре моделює п'єзоелектричну дію механічними моментами. Розглянуто три різні варіанти такої заміни. Для отримання більш повного спектру аналізованих розрахункових значень, вивчалися три варіанти закріплення пластини: жорстке закладення її по довгій стороні; жорстке закладення її по короткій стороні; жорстке закладення всіх сторін пластини. Проведено порівняння результатів розрахунків.

Узагальнюючи отримані результати досліджень, є всі підстави стверджувати, що інтегральне моделювання п'єзоелектричної дії є цілком виправданим. Так, для перших двох варіантів заміни максимальна відносна різниця для всіх ситуацій, що вивчалися, складає 8,9%. Для третього випадку моделювання спостерігається добротний збіг результатів в діапазонах першої і другої власних частот (7,2% та 7,5% відповідно частотам), лише біля третьої частоти спостерігаються вагомші відмінності (до 13,1%).

(a)

(б)

(в)

Рис.3. Бортовий вузол ВU-65572і: (а) Фотографічний знімок; (б) геометрична модель; (в) скінчено-елементна модель

Базуючись на отриманих результатах теоретичних досліджень було проведено чисельне дослідження реального бортового друкованого вузла ВU-65572і (рис. 3), що використовується як для наземних робіт (тестування бортової системи MIL-STD-1553), так і для роботи в умовах реального польоту (збору даних).

Діапазон частот коливань, в якому працює бортова електронна апаратура літаків всіх типів, складає від 3 до 500 Гц. У даний діапазон потрапили перші дві власні частоти даного бортового вузла ( $P_1=153,4$  Гц.,  $P_2=344,6$  Гц.)

Розглядалися гармонійні коливання, що виникають під впливом зовнішнього навантаження. Для описання зовнішніх чинників були використані середньостатистичні значення віброперевантаження в умовах реального польоту. Віброперевантаженням називається відношення віброприскорення до

прискорення вільного падіння  $n_g = \frac{a_g}{g}$ .

Проведено аналіз коливань бортового друкарського вузла в схемі управління зі зворотнім зв'язком за швидкістю переміщень в діапазонах перших двох власних частот. Схема управління моделювалася наступним чином. На пару симетрично розташованих актуаторів, що працювали в проти-

фазі, подавалась управляюча напруга  $u_0$ , спочатку невідома, але залежна від величини переміщень плати в місці вимірів сенсора  $x_0$ .

Для визначення управляючої напруги  $u_0$  заздалегідь був проведений стаціонарний аналіз, результати якого включалися в структуру створеного програмного модуля. Частота і навантаження, що задавалися в процесі числового дослідження, фіксувалися. На першому кроці управляюча напруга  $u_0$  задавалась випадково, після чого проводився стаціонарний розрахунок і визначалася величина переміщень плати  $x_0$ . З урахуванням величини переміщень обчислювалась управляюча напруга  $u_k$  значення якої порівнювалось з тією, що задавалась в стаціонарному аналізі  $u_0$ . Процес продовжувався доти, поки різниця між  $u_0$  і  $u_k$  не виявлялася рівною нулю, або в аналітичному вигляді  $f(u_0) = u_0 - u_k = 0$ . Корінь функції  $f(u_0) = 0$  являє собою контрольну напругу, що задовольняє схемі активного контролю. Корінь обчислювався з використанням методу Мюллера, узагальнюючого метод січних для знаходження коренів поліномів з використанням квадратичної триточкової інтерполяції.

Для досягнення кращих результатів гасіння амплітуд коливань, в ході досліджень була використана одна із запропонованих раніше інтегральних моделей п'єзоелектричної дії (вар. А).

Розглянуті результати дії ударного навантаження на бортовий вузол. При цьому використано таку характеристику, як ударне перевантаження

$$n_{\text{уд}} = \frac{a_{\text{уд max}}}{g}.$$

Форма закону зміни ударного імпульсу приймалася прямокут-

ною, а тривалість ударного імпульсу – рівною  $\tau = 0.01$  с.

Був проведений перехідний аналіз, при цьому зроблено припущення про те, що на контролер на кожному кроці обчислення поступав усталений сигнал. При аналізі перехідного процесу враховувалось, що після припинення ударної дії на кожному подальшому кроці обчислювалась величина переміщень плати в місці виміру сенсора, за якою визначалася контрольна напруга що прикладається до пари актуаторів.

Отримані результати проведених досліджень (рис. 4) свідчать про наступне: – використання схеми активного гасіння гармонійних коливань сприяє значному зменшенню максимальних значень амплітуд як біля першої власної частоти (78% знижень), так і біля другої (67%); – використання інтегральної моделі значною мірою спрощує процес моделювання схем активного гасіння вібрацій; – аналіз результатів гасіння ударних коливань підтверджує значне зниження (практично в три рази) часу загасання коливань. Також слід зазначити зниження на порядок максимальних амплітуд відхилень

бортового вузла. Все це свідчить про ефективність використання схем активного гасіння гармонійних і ударних навантажень в бортових друкованих вузлах.

(а) (б)  
(в)

Рис.4. Результати дослідження бортового друкарського вузла: (а), (б) АЧХ коливань друкарського вузла, працюючого в схемі активного гасіння вібрацій в діапазоні другої власної частоти, без та з оптимізацією відповідно; (в) Залежності амплітуд коливань друкарського вузла від часу під дією ударного навантаження

У четвертому розділі описані експериментальні дослідження, які проводилися особисто здобувачем в технічному університеті Отто-фон-Геріке (м. Магдебург, Германія) на кафедрі механіки, в ході яких вивчалась можливість використання п'єзоелектричної кераміки в якості сенсорів і актуаторів. Було перевірено достовірність ряду припущень прийнятих при обчисленні сигналу сенсора і при побудові інтегральної моделі. Описана побудова ефективно експериментальної установки активного гасіння вібрацій в орторопній пластині.

В ході проведення експериментальних досліджень роботи п'єзокерамічних елементів в якості актуаторів та сенсорів при статичних і динамічних режимах роботи на моделі вузької пластини було зроблено висновки про ефективність використання п'єзокераміки. Підтверджено припущення про достовірність запропонованого раніше способу обчислення вихідної напруги, що виникає на сенсорі в результаті дії зовнішніх механічних навантажень на дослідний зразок. Доведена правомірність заміни п'єзоелектричної дії механічними вигинаючими моментами. Для однорізного завдання така заміна дає можливість отримання достатньо точних розрахункових параметрів, котрі добре узгоджуються з експериментом.

Активне гасіння вібрацій пластини здійснювалося на основі використання схеми управління зі зворотнім зв'язком за швидкістю переміщень. Принципова схема експериментальної установки моделюючої систему активного контролю вібрацій, а також її фотографічні знімки представлені на рис. 5.

Рис. 5

В ході проведення експерименту п'єзоелемент Р2 працював як збудник коливань, а елемент Р1 – як гаситель (рис. 5). В контрольних точках фіксувалися свідчення про стан системи за допомогою сенсора. Вибір точок для вимірів був здійснений з урахуванням чисельно отриманих раніше власних форм коливань конструкції. В якості датчика було вибрано серійний

п'єзоелектричний акселерометр ENDEVCO 2224C. Для збудження коливань необхідної частоти використовувався функціональний генератор SRS DS340, сигнал з якого надходив на низьковольтний підсилювач PI E-663. В подальшому сигнал подавався на п'єзоелемент P2, який працював як збудник вібрацій. Сигнал з акселерометра, який відповідав прискоренню точки пластини, перетворювався у сигнал, пропорційний похідній за часом від прогину пластини, а потім посилювався за рахунок підвищення чутливості датчика за допомогою формувача сигналу ENDEVCO 109-102, що включає в свою структуру блок живлення та перетворювач сигналу. В подальшому сигнал надходив на управляючий прилад ERAS, виконуючий функції амплітудного і фазового регулятора, за допомогою якого змінювалась фаза сигналу, та здійснювався контроль значень коефіцієнтів зворотного зв'язку. В остаточному вигляді перетворений сигнал подавався через підсилювач PI E-663 на п'єзоелемент P1 з метою гасіння створюваних в пластині вібрацій. Візуалізація процесу здійснювалась за допомогою двоканального багатофункціонального приладу FLUKE 123. При цьому один канал використовувався для представлення коливань в системі, а другий фіксував сигнал, що поступає з приладу ERAS.

Рис. 6

Результати вимірювань представлені на рис. 6 у вигляді графіків АЧХ коливань пластини для різних значень коефіцієнтів зворотного зв'язку в діапазонах першої та другої власних частот. Отримані результати свідчать про ефективність активного управління вібраціями, оскільки при цьому відбувається гасіння максимальних амплітуд коливань на першій власній частоті на 37% на другій – на 41%. Подальше збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку приводить до дисбалансу в системі. Одним з головних пояснень такої поведінки системи є не ідеальність використовуваних в експерименті зв'язків між сенсорами і актуаторами.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі зменшення динамічних вібрацій пластинчастих елементів конструкцій за рахунок активної взаємодії п'єзоелектричних компонентів з ортотропною структурою. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи містять наступне:

- Створено математичну модель, що описує реакцію ортотропної пластини на дію п'єзоелектричних плівкових актуаторів, яка може бути застосована для аналізу поведінки пластини з п'єзокерамікою і подальших досліджень в області активного контролю вібрацій.

- Побудована теорія і розроблена методика активного гасіння коливань в ортотропних пластинах з використанням адаптивних схем, побудованих на базі плівкових п'єзоелектричних сенсорів і актуаторів. В процесі теоретичних доробок отримані залежності для обчислення сигналу п'єзоелектричного сенсору, представлена одна з найбільш затребуваних схем активного гасіння вібрацій. Використаний в роботі загальний підхід може бути застосований до розробки теорій для більш складних задач. Наприклад, для випадку анізотропних або композитних пластин складної форми, побудови активних схем оптимального управління.

- Запропоновано математичне моделювання дії п'єзоелектричного актуатора на ортотропну пластину механічними моментами, котрі діють на гранях елемента. При проведенні чисельних перевірок трьох різних запропонованих варіантів такого моделювання, встановлена максимальна відносна різниця контрольних результатів до 8,9%, що свідчить про достовірність такої заміни.

- Проведено чисельне дослідження варіанту активного гасіння вимушених гармонійних коливань, а також коливань, викликаних ударним навантаженням в конкретному друкованому вузлі бортової апаратури літального апарату. Встановлено істотне зниження амплітуд коливань до 70%.

- В ході теоретико-експериментальних досліджень побудована ефективна схема активного гасіння вібрацій, виконана на базі плівкових п'єзокерамічних елементів. Були отримані результати гасіння амплітуд коливань пластини з максимальним зниженням їх на 41%.

- Результати роботи впроваджені в проектно-конструкторські роботи СП ЗАО «ХЄМЗ – ІРЕС», по розробці і впровадженню випробувального обладнання відцентрованих насосів. У НДІ ПФМ ХАІ результати роботи використовувалися при проектуванні крила безпілотної літального апарата.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Клитной В.В. Исследование напряженно деформируемого состояния тонких пластин в физической схеме активного гашения вибраций при помощи пьезоэлектриков / В.В. Клитной, Г.И. Львов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. № 19, – С. 103-110.

*Здобувач побудував математичну модель, що описує реакцію ортотропної пластини на дію п'єзоелектричних плівкових актуаторів.*

2. Клитной В.В. Теоретические и экспериментальные исследования работы пьезоэлектрических сенсоров в статическом режиме / В.В. Клитной // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. № 21, – С. 35-40.

3. Клитной В.В. Теоретические и экспериментальные исследования работы пьезоэлектрических актуаторов в статическом режиме / В.В. Клитной // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. № 39, – С. 99-106.

4. Клитной В.В. Численное исследование напряженно-деформируемого состояния балки нагруженной пьезоэлектрическим актуатором / В.В. Клитной // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 10. – С. 92-97.

5. Клитной В.В. Исследования динамики ортотропных пластин с пьезоэлектрическими актуаторами / В.В. Клитной // Вісник Східноукраїнського Національного Університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2007. – № 3(109), Ч2. – С. 75-79.

6. Клитной В.В. Численные исследования управления колебаний печатного узла бортовой аппаратуры / В.В. Клитной // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 37. – С. 56 – 63.

7. Клитной В.В. Исследование вибрационных свойств бортовых плат летательных аппаратов / В.В. Клитной // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 31. – С. 77 – 83.

8. Михеев С.И. Теоретические и экспериментальные исследования композитных пластин с пьезоэлектрическими актуаторами / С.И. Михеев, В.Ф. Горбач, В.В. Клитной, Ю.М. Тарасов // Труды 4-й международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». – М.: «Знание», 2006. – С. 178-184.

*Здобувач провів аналіз результатів експериментальних досліджень активного гасіння вібрацій в прямокутній ортотропній пластині.*

## АНОТАЦІЇ

***Клитной В.В. Активне гасіння вібрацій в пластинчастих елементах конструкцій із ортотропного матеріалу. – Рукопис.***

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

В ході роботи над дисертацією була побудована теорія і розроблена методика активного гасіння коливань в ортотропних пластинах на основі

адаптивних схем, побудованих на базі плівкових п'єзоелектричних сенсорів і актуаторів.

Здійснено математичне моделювання дії п'єзоелектричного актуатора на ортотропну пластину, на основі заміни її механічними моментами, діючими на гранях елемента.

Ідея доцільності застосування адаптивних систем активного гасіння вібрацій, побудованих на базі плівкових п'єзоелектричних елементів, підтверджена результатами розрахунків для реальної конструкції друкарського вузла бортової апаратури.

Експериментальні схеми активного гасіння вібрацій, побудовані на базі плівкових п'єзокерамічних елементів, підтвердили їх ефективність при використанні для гасіння коливань в прямокутних пластинах, виконаних з композитного матеріалу, який характеризується ортотропними властивостями.

*Ключові слова:* динамічні процеси, активне гасіння коливань, ортотропна пластина, адаптивна конструкція, плівкові п'єзокерамічні сенсори і актуатори, динамічні вібрації.

***Клитной В.В. Активное подавление вибраций в пластинчатых элементах конструкций из ортотропного материала. – Рукопись.***

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, 2009.

В диссертационной работе была построена теория и разработана методика активного подавления колебаний в ортотропных пластинах с использованием адаптивных схем, построенных на базе пленочных пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов. В процессе исследования была создана математическая модель, описывающая реакцию ортотропной пластины на воздействие пьезоэлектрических пленочных актуаторов, получены зависимости для вычисления сигнала пьезоэлектрического сенсора, представлена одна из наиболее востребованных методик активного подавления вибраций. Общий подход, представленный в работе, может быть успешно применен к разработке теорий другого класса различных задач.

Для обеспечения связи между электрическими и механическими параметрами системы в работе осуществлено математическое моделирование воздействия пьезоэлектрического актуатора на ортотропную пластину механическими моментами, действующими на гранях элемента.

Идея целесообразности применения адаптивных систем активного подавления вибраций, построенных на базе пленочных пьезоэлектрических элементов, подтверждена результатами расчетов для реальной конструкции печатного узла бортовой аппаратуры летательного аппарата.

Необходимость выполненных исследований вытекает из проблематики обеспечения безотказной работы электронного оборудования в жестких условиях эксплуатации, при интенсивном воздействии на аппаратуру, которое представляет собой определенное сочетание климатических, радиационных и механических факторов. Наиболее подвержена комплексному воздействию факторов бортовая электронная аппаратура, которая должна быть работоспособной в условиях негерметизированного пространства, больших вибраций и ударных нагрузок при взлетах и посадках. В комплекте бортовой аппаратуры одними из самых чувствительных элементов по воздействию вибраций являются печатные платы. Под действием механических нагрузок в печатных платах могут происходить обратимые и необратимые изменения, вызванные недопустимо большими деформациями, связанными с превышением предела прочности материала и возникающие в результате недостаточной жесткости платы. Деформации могут вызывать отказы электрического и механического характеров. К первым относятся изменения параметров электрических цепей, ко вторым – изменения геометрических размеров, перекосы, нарушения герметичности стыков. Также опасны поломки печатных узлов в результате усталости материала, в виду того, что они происходят при напряжениях значительно меньших допустимых в статических режимах нагружения.

При проведении численного исследования варианта активного подавления вынужденных гармонических колебаний, а также колебаний, вызванных ударной нагрузкой в конкретном печатном узле бортовой аппаратуры летательного аппарата, было установлено существенное снижение амплитуд колебаний (до 70%).

В ходе экспериментальных исследований подтверждено предположение о достоверности предложенного в диссертации способа вычисления выходного напряжения, возникающего на пьезоэлементе в результате воздействия внешних механических нагрузок на опытный образец. Анализ полученных результатов для ряда проведенных экспериментов подтвердил правомочность замены пьезоэлектрического воздействия механическими изгибающими моментами, вычисленными по одному из предложенных в работе способов.

Предложенные экспериментальные схемы активного подавления вибраций, построенные на базе пленочных пьезокерамических элементов, под-

твердили их эффективность при использовании для подавления колебаний в прямоугольных пластинах, выполненных из композитного материала.

*Ключевые слова:* динамические процессы, активное подавление колебаний, ортотропная пластина, адаптивная конструкция, пленочные пьезокерамические сенсоры и актуаторы, динамические вибрации.

***Klitnoy V.V. Active vibration suppression in lamellar construction unit of orthotropic material. – Manuscript.***

Thesis for competition of scientific degree of candidate of technical sciences on speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2009.

The theory and the method of active suppression vibrations in orthotropic plates with the application of adaptive schemes, built on the basis of piezoelectric sensors and actuators was created in the course of scientific research on the given thesis.

The mathematical modeling of piezoelectric actuators influence on the orthotropic plate by mechanical moments, operating on the element edges has been carried out in the given work.

The idea of expediency of application of adaptive systems of active vibrations suppression, built on the basis of piezoelectric elements, was confirmed by the results of calculations for real construction of aircraft printed board.

The experimental scheme offered for active vibrations suppression, built on the basis of film piezoelectric elements, confirmed their efficiency at the use for vibrations suppression in plates, made of composite material which is characterized by orthotropic properties.

*Keywords:* dynamic processes, active vibrations suppression, orthotropic plate, adaptive construction, film piezoelectric sensors and actuators, dynamic vibrations.

Відповідальний за випуск: к.т.н, доц. *А.Г. Андрєєв*

Підп. до друку 27.05.2009 р. Формат 60 x 90 1/16. Папір офісний. Riso-друк.  
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.  
Зам. №137. Безкоштовно.

---

Видавничий центр НТУ “ХП”.  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Друкарня НТУ “ХП”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21