

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ім.С.П. ТИМОШЕНКА

На правах рукопису

*ФРАНОВСЬКИЙ* *Анатолій Цезарович*

**КОЛИВАННЯ ТА ДИСИПАТИВНИЙ РОЗІГРІВ  
В'ЯЗКОПРУЖНИХ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ТІЛ  
ОБЕРТАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВОЇ  
ДЕПОЛЯРИЗАЦІЇ МАТЕРІАЛУ**

01.02.04 - Механіка деформівного твердого тіла

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Київ - 1996



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка

Національної академії наук України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук,  
професор Карнаухов Василь Гаврилович

Науковий консультант:

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент Михайленко Василь Васильович

Офіційні опоненти :

член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Шульга Микола Олександрович  
кандидат фізико-математичних наук,  
ст. п. с. Кучер Микола Кирилович

Провідна установа:

Київський національний університет  
ім. Т. Шевченка

Захист відбудеться "29" квітня 1997 р. оо 11<sup>30</sup> години  
на засіданні спеціалізованої вченої ради D 01.03.03  
при Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка Національної академії  
наук України за адресою:

252057, Київ, вул. Нестерова,3; факс (044) 446-03-19

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту  
механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України ( Київ, вул. Нестерова,3 )

Автореферат розіслано "28" березня 1997 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук, професор

І.С. Чернишенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота містить результати дослідження впливу теплової деполаризації п'єзо матеріалу на коливання і дисипативний розігрів в'язкопружних п'єзоелектричних тіл обертання при гармонічному за часом електричному навантаженні.

**Актуальність і ступінь дослідженості тематики дисертації.** Широке застосування в техніці п'єзоелектричних і, в тому числі, п'єзокерамічних матеріалів стало однією з причин інтенсивного розвитку в механіці деформівного твердого тіла нового наукового напрямку - механіки спряжених полів в матеріалах і елементах конструкцій, предметом якого є розробка моделей на основі методів механіки, електродинаміки і термодинаміки суцільних середовищ. У даний час досягнуто значний прогрес в побудові теорії п'єзоелектричних тіл із застосуванням найбільш простої механічної моделі, яка базується на припущенні про пружну поведінку матеріалу і не враховує в'язкості й пластичності. Основні результати, досягнуті в цій області, викладені в монографіях В.Т. Грінченка, А.І. Улітка, М.О. Шульги, Можена, В. Новацького, В.З. Партона, Б.О. Кудрявцева, М.О. Шульги, О.М. Болкисєва. Там же міститься достатньо повний перелік досліджень, що проведені в механіці п'єзоелектричних матеріалів в використанні пружної моделі іншими авторами.

Швидке розширення сфери застосувань в сучасній техніці п'єзоелектричних полімерів і композиційних матеріалів на їх основі стимулює побудову моделей в'язкопружної поведінки п'єзоелектричних тіл, які враховують взаємодію електричних та механічних полів в тепловими. Загальна теорія термоелектров'язкопружності п'єзоелектричних тіл розроблена В.Г. Карпауховим і викладена в ряді його монографій. Ця теорія дала можливість точніше і повніше описати поведінку п'єзоелектричних тіл при електромеханічних навантаженнях, встановити ряд критеріїв для практики нових ефектів дати оцінку меж застосування теорій,

в яких взаємодією електромеханічних і теплових полів нехтується.

Одним із основних режимів електромеханічного навантаження п'єзоелементів є моногармонічний, зокрема резонансний режим. Але резонансний режим коливань може бути досліджений лише при врахуванні дисипативних властивостей матеріалу. В залежності від амплітуди, частоти, тривалості навантаження, умов теплообміну резонансні коливання можуть супроводжуватись значним підвищенням температури дисипативного розігріву, що виникає в результаті розсіювання електромеханічної енергії в тепло. При досягненні температурою точки Кюрі п'єзоелемент губить своє функціональне призначення в зв'язку з тим, що матеріал перестає бути п'єзоактивним. Тому температура дисипативного розігріву є одним із основних критеріїв "руйнування" п'єзоелементів.

В останній час в роботах В.Г. Карнаухова, І.Ф. Киричка, В.І. Ковлова, І.К. Сенченкова, В.В. Михайленка та ін. отримані розв'язки цілого ряду задач термоелектров'язкопружності при гармонічному навантаженні. Вони дали можливість виявити основні ефекти, що породжуються взаємодією електромеханічних полів з тепловими і дати кількісну оцінку цим ефектам. Разом з тим, в цих роботах коливання п'єзоелектричних тіл досліджується, як правило, при відносно низьких температурах дисипативного розігріву, далеких від температур фазових переходів. Це пояснюється, з одного боку, відсутністю повної інформації про залежність властивостей п'єзоматеріалу від температури, близької до точки Кюрі, а з іншого боку, прагненням авторів цих робіт до моделювання поведінки п'єзоелементів в умовах їх розумного практичного використання. Разом з тим, досвід підтверджує, що ці умови досить часто не виконуються як із-за недостатнього охолодження п'єзоелементів, так і різного роду експлуатаційних перевантажень. В таких випадках температура вібророзігріву в деяких областях п'єзоелемента може досягти точки Кюрі і викликати часткову деполяризацію п'єзоматеріалу,

обмежуючи цим функціональні можливості п'єзоелемента при подальшому його використанні. Тому дослідження коливань п'єзоелементів в умовах вільного вібророзігріву і часткової деполяризації матеріалу мають важливе практичне значення. Разом з тим, результати цих досліджень мають принциповий науковий інтерес, бо вони дозволяють описати більш широке коло явищ, що відбуваються в п'єзоелектричних тілах в результаті фазових переходів, породжених досягненням температурою точки Кюрі.

Із сказаного слідує, що питання про дисипативний розігрів, як причину деполяризації п'єзоелектричного матеріалу, є актуальним. Але публікації з цього питання практично відсутні в сучасній літературі. Мабуть, чи не єдиною роботою, в якій зроблена спроба аналізу коливань п'єзоелемента з врахуванням теплової деполяризації п'єзоматеріалу, є робота В.Г. Карпаухова, В.І. Кошлова, В.В. Михайленка, С.В. Михайленка, в якій досліджуються планарні коливання п'єзокерамічної пластини із товщинною поляризацією.

#### **Мета роботи:**

- постановка зв'язаної задачі термоелектров'язкопружності, що дозволяє моделювати коливання п'єзоелектричних тіл з врахуванням дисипативного розігріву, та зумовленої ним часткової теплової деполяризації п'єзоматеріалу;
- розробка алгоритму розв'язання поставленої задачі і його скінченноелементна реалізація на випадок осесиметричних коливань п'єзоелементів у формі тіл обертання;
- аналіз наявних у літературі експериментальних даних по температурній залежності властивостей п'єзоматеріалу;
- дослідження на основі розробленого алгоритму стаціонарних коливань п'єзокерамічного порожнистого циліндра з врахуванням вібророзігріву та зумовленої ним часткової деполяризації п'єзоматеріалу;
- моделювання процесів теплової деполяризації п'єзокерамічних по-

рожнистого циліндра і кулі в отвором в режимах резонансних коливань із автопідстроюванням частоти;

- дослідження можливості виникнення і розвитку теплової деполяризації в залежності від рівня навантаження, умов теплообміну, геометрії п'єзоелемента тощо;

- оцінка впливу процесів теплової деполяризації на енергетичні характеристики коливань п'єзоелементів.

**Наукова новизна і значущість результатів роботи полягає:**

1) в постановці задач про коливання і дисипативний розігрів в'язкопружних п'єзоелектричних тіл обертання з врахуванням впливу теплової деполяризації матеріалу; 2) в розробці ефективного підходу до розв'язання цих задач; 3) в отриманні на основі розробленого підходу розв'язків ряду нових задач; 4) в проведеному якісному і кількісному аналізі явищ, що відбуваються в умовах сильного вібророзігріву п'єзоелементів та їх часткової деполяризації; 5) в оцінці впливу процесів деполяризації на основні функціональні характеристики п'єзоелементів.

**Достовірність** одержаних в роботі результатів та висновків забезпечується використанням обґрунтованої математичної моделі; строгістю реалізації скінченноелементного підходу; контрольованою точністю числових розрахунків; співставленням результатів розрахунків при відносно слабких температурних полях вібророзігріву з результатами, отриманими іншими авторами, і погодженістю результатів між собою; несуперечливістю встановлених закономірностей загальним міркуванням фізичної природи.

**Теоретичне значення та практична цінність** одержаних в роботі результатів полягає в розширенні кола питань механіки деформівних п'єзоелектричних тіл в зв'язку з врахуванням процесів, пов'язаних з фазовими переходами; в дослідженні можливості деполяризації п'єзоелектричного матеріалу в результаті дисипативного розігріву та її впливу на характеристики п'єзоелементів; в реалізації розробленого ал-

горитму у вигляді комплексу програм для персонального комп'ютера, що може бути використаний для розрахунків реальних процесів як в окремо взятих п'євослементах, так і в електромеханічних системах, в тому числі і для розрахунків резонансних режимів коливань в автопідстроюванням частоти і в врахуванням можливої деполяризації матеріалу.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах відділу термопружності Інституту механіки НАН України ( 1995, 1996рр. ), науковому семінарі по напрямку "Механіка зв'язаних полів в матеріалах і елементах конструкцій" при Інституті НАН України ( 1996р. ), на семінарі в проблем механіки механіко-математичного факультету Національного університету ім. Т. Шевченка ( 1996р. ), на науковому семінарі "Сипергетика, нелінійні явища та нові технології" при Житомирському інженерно-технологічному інституті ( 1996 р. ), на Укр. конф. Моделювання та дослідження стійкості систем, 20-24 травня 1996 р., на V Міжнарод. науков. конф. ім. акад. М. Кравчука, 16-18 травня 1996 р.

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 7 наукових праць. Основний зміст роботи відображено в публікаціях [1] - [7].

В працях, які написані в співавторстві з науковим керівником та науковим консультантом, доктору фіз.-мат. наук, професору В.Г. Карнаухову належить ідея проведення досліджень і теоретичні положення, що були покладені в основу постановки задачі; кандидатом фіз.-мат. наук В.В. Михайленком дана загальна постановка задачі в врахуванням теплової деполяризації матеріалу і автопідстроюванням частоти обудження; дисертант дав постановку задач про асиметричні коливання і дисипативний розігрів п'євоелектричних тіл обертання при мопогармонічних електромеханічних навантаженнях, розробив алгоритм розв'язання задачі, провів удосконалення комплексу програм, що реалізує цей алгоритм на основі методу скінченних елементів, провів всі розрахунки і аналіз результатів.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, трьох глав, висновків і списку літератури. Робота викладена на 87 сторінках, влючас 19 рисунків та 5 таблиць. Бібліографічний список налічує 108 назв.

## КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі подано огляд публікацій по темі дисертації, сформульована мета роботи і визначено її місце серед раніше проведених досліджень, обгрунтовано актуальність, новизну, теоретичне значення, практичну цінність роботи і достовірність результатів. Стисло наводиться виклад роботи по главах.

В першій главі викладені основні співвідношення геометрично лінійної теорії термоелектров'язкопружності, що відповідають слабким електропружним полям. Проведено спрощення цих співвідношень для випадку моногармонічного електропружного навантаження. Відмічені деякі особливості в описанні взаємодії повільних і осцилюючих складових електропружних полів в першому наближенні, які не виникають при описанні коливань чисто механічних систем. Обговорюються різні варіанти наближених постановок задачі термоелектров'язкопружності при моногармонічному навантаженні. За робочу вибрано постановку задачі основану на припущенні, що тривалістю перехідних процесів електропружних коливань в порівнянні з часом суттєвої зміни температури можна знехтувати. Крім того, в даній постановці нехтується коливаннями температури, що мають термопружну природу, а також зміною температури за період в результаті дисипації енергії. В термінах комплексних амплітуд електропружних змінних і усередненої за період коливань температури така постановка задачі влючас в себе: стаціонарну задачу електропружності:

$$\tilde{\sigma}_{ij,i} + \rho\omega^2\tilde{u}_j = 0, \quad \tilde{D}_{j,j} = 0, \quad (1)$$

$$\tilde{\mathcal{E}}_{ij} = \frac{1}{2}(\tilde{u}_{i,j} + \tilde{u}_{j,i}), \quad \tilde{E}_j = -\tilde{\varphi}_{,j}, \quad (2)$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \tilde{C}_{ijkl}^E \tilde{\mathcal{E}}_{kl} - \tilde{e}_{kij} \tilde{E}_k, \quad \tilde{D}_j = \tilde{e}_{jik} \tilde{E}_k + \tilde{\mu}_{ij}^E \tilde{E}_i; \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma}_{ji} n_i = \tilde{t}_j - \text{на } S_\sigma, \quad \tilde{u}_j = \tilde{u}_j - \text{на } S_u, \quad (4)$$

$$\tilde{D}_i n_i = -\tilde{\sigma}_{\text{пов.}} - \text{на } S_D, \quad \tilde{\varphi} = \tilde{\varphi} - \text{на } S_\varphi$$

і нестационарну задачу теплопровідності:

$$\rho C_T \dot{T} = (\lambda_{ij} T_{,j})_{,i} + \tilde{D}'_{\text{зм}} \quad (5)$$

$$\tilde{D}'_{\text{зм}} = \frac{\omega}{2} I_m(\tilde{\sigma}_{ij} \tilde{\mathcal{E}}_{ij} + \tilde{E}_j \tilde{D}_j), \quad (6)$$

$$-\lambda_{ij} T_{,j} n_i = \alpha_T (T - T^c) - \text{на } S \quad (7)$$

$$T = \overset{\circ}{T} \quad \text{при } t = 0. \quad (8)$$

Перехід від комплексних амплітуд електромеханічних величин

$$\tilde{p} = \{ \tilde{\sigma}_{ij}; \tilde{u}_j; \tilde{\mathcal{E}}_{ij}; \tilde{D}_j; \tilde{E}_j; \tilde{\varphi}; \tilde{t}_j; \tilde{u}_j; \tilde{\sigma}_{\text{пов.}}; \tilde{\varphi} \} = p' + \sqrt{-1} p'',$$

до дійсних величин одійснюється згідно формули

$$p = \text{Re}(\tilde{p} e^{i\omega t}) = p' \cos \omega t - p'' \sin \omega t. \quad (9)$$

В (6), (9):  $\tilde{(\cdot)}$  - комплексно-спряжена величина,  $\text{Im}(\cdot), \text{Re}(\cdot)$  - уявна та дійсна частина комплексного виразу  $(\cdot)$ .

Коефіцієнти  $\tilde{C}_{ijkl}^E, \tilde{e}_{kij}, \tilde{\mu}_{ij}^E$  у визначальних рівняннях (3) крім частоти  $\omega$  і температури  $T$  залежать від величин

$$\mathcal{E}'_{ij} \mathcal{E}'_{kl} + \mathcal{E}''_{ij} \mathcal{E}''_{kl}, \quad \mathcal{E}'_{ij} E'_k + \mathcal{E}''_{ij} e''_k, \quad E'_k E'_k + E''_k E''_k. \quad (10)$$

Можливість запису амплітудних визначальних рівнянь для загального випадку нелінійного матеріалу в комплексній формі (3) із залежними від величин (10) комплексними коефіцієнтами показана в роботах

[ 2 ], [ 7 ]. Розрахунки в дисертації проведені в припущенні, що

$$\tilde{C}_{ijkl}^E = \tilde{C}_{ijkl}^E(\omega, T), \quad \tilde{e}_{kij} = \tilde{e}_{kij}(\omega, T), \quad \tilde{\mu}_{ij}^\varepsilon = \tilde{\mu}_{ij}^\varepsilon(\omega, T). \quad (11)$$

Навіть у цьому випадку задача ( 1 ) - ( 8 ) є суттєво нелінійною. Нелінійність породжується залежністю властивостей матеріалу від температури і зв'язаністю полів. Характерним в проведеній постановці задачі є те, що вона дає змогу моделювати перехідний тепловий процес.

В другій главі описується алгоритм розв'язання задачі і його реалізація на основі методу скінчених елементів ( МСЕ ) для випадку осесиметричних коливань п'єзоелементів у формі тіл обертання. Слід зазначити, що вже сама постановка задачі визначає цей алгоритм, а саме, дисипативна функція ( 6 ) в процесі інтегрування рівняння теплопровідності ( 5 ) повинна в певні моменти часу уточнюватись за результатами розв'язків стаціонарних задач термодинаміки ( 1 ) - ( 4 ), тобто алгоритм має бути покроковим за часом. З врахуванням автопідстроювання частоти алгоритм зводиться до розв'язання задачі на  $n$ -му часовому кроці таких лінійних задач:

1) за температурою  $T^{n-1}$  знаходиться резонансна частота  $f_v^n$  ( $f_v^n = \omega_{v/2\pi}^n$ ) ( уточнюється резонансна частота  $f_v^n$ , що знайдена на попередньому кроці );

2) на частоті  $f_v^n$  і при температурі  $T^{n-1}$  знаходиться розподіл механічних та електричних полів;

3) за знайденим розподілом електромеханічних польових величин уточнюється дисипативна функція і знаходиться температура  $T^n$  шляхом розв'язання задачі теплопровідності в початковою температурою  $T^{n-1}$ .

За початкову вибирається температура  $T^0$ .

Лінійні задачі на кожному кроці за часом розв'язуються за допомогою методу скінчених елементів і тому формулюються в варіаційній постановці. Як базовий, використовується ізопараметричний чотири-

кутний елемент в квадратичною апроксимацією переміщень, електричного потенціалу та температури. Дискретизовані рівняння електромеханіки та теплопровідності мають вигляд

$$(\tilde{K} - \omega^2 M) \tilde{u} + \tilde{P} \tilde{\varphi} = \tilde{F}, \quad (12)$$

$$\tilde{P}^T \tilde{u} - \tilde{D} \tilde{\varphi} = 0, \quad (13)$$

$$HT + CT = q, \quad (14)$$

де  $\tilde{u}, \tilde{\varphi}$  - шукані вектори вузових значень переміщень і електричного потенціалу;  $(\tilde{\cdot})$  - як і раніше, комплексна величина;  $\tilde{K}, \tilde{P}, \tilde{D}$  - матриці механічної, "п'єзоелектричної" та "діелектричної" жорсткості;  $M$  - матриця мас;  $\tilde{F}$  - вектор сил збудження;  $H$  - матриця теплопровідності;  $T$  - вектор вузових температур;  $C$  - матриця теплоємності;  $q$  - вектор теплових джерел. Інтегрування рівняння ( 14 ) за часом проводиться з використанням неявної різницевої схеми першого порядку. В тепловому джерелі  $q$  враховуються всі типи внутрішніх втрат - механічні, діелектричні та п'єзоелектричні.

В зв'язку з тим, що втрати суттєво не впливають на резонансні та антирезонансні частоти коливань, вони знаходяться в результаті розв'язання задачі на вимушені коливання електропружного тіла ( в ( 1 ) - ( 4 ) або ( 12 ), ( 13 ) всі величини слід рахувати дійсними ), які збуджуються електричною напругою на електродах. При цьому використовується зміна знаку електричного заряду  $Q$  при переході через резонансні (  $Q = \infty$  ) та антирезонансні (  $Q = 0$  ) частоти.

В кінці глави наведені деякі інтегральні характеристики, які використовуються для аналізу коливань п'єзоелектричних тіл. Ефективність перетворення енергії п'єзоелементом оцінюється за величиною коефіцієнта електромеханічного зв'язку ( КЕМЗ ), який вираховується згідно енергетичного підходу А.Ф. Улітко в формі, запропонованій В.В. Михайленком

$$k_0^2 = \frac{k^2}{1+k^2}, \quad k^2 = \frac{|\tilde{Q}_0 - \tilde{C}_\epsilon \Delta \tilde{\varphi}|^2}{2U - C'_\epsilon |\Delta \tilde{\varphi}|^2} \cdot \frac{C'_\epsilon}{|\tilde{C}_\epsilon|^2}, \quad (15)$$

де

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma'_{ij} \mathcal{E}'_{ij} + \sigma''_{ij} \mathcal{E}''_{ij} + E'_j D'_j + E''_j D''_j) dV, \quad (16)$$

$\tilde{Q}_0, \Delta \tilde{\varphi}$  - комплексні амплітуди електричного заряду і напруги на електродах, причому

$$\tilde{Q}_0 \Delta \tilde{\varphi} = \int_V (\tilde{\mu}^c_{ij} \tilde{E}_i \tilde{E}_j + \tilde{e}_{ijk} \tilde{E}_i \tilde{\mathcal{E}}_j) dV. \quad (17)$$

$\tilde{C}_\epsilon = C'_\epsilon + iC''_\epsilon$  - комплексна ємність п'єзоелементу на нульових деформаціях, яка знаходиться із розв'язку електростатичної задачі при врахуванні діелектричних втрат. Для кількісної оцінки дисипативних властивостей затухання коливань використовується величина

$$\psi = 2\pi \frac{\int_V (\sigma''_{ij} \mathcal{E}'_{ij} - \sigma'_{ij} \mathcal{E}''_{ij} + E''_j D'_j + E'_j D''_j) dV}{\int_V (\sigma'_{ij} \mathcal{E}'_{ij} + \sigma''_{ij} \mathcal{E}''_{ij} + E'_j D'_j + E''_j D''_j) dV}, \quad (18)$$

яка характеризує відношення електромеханічної енергії, що розсіюється в об'ємі п'єзоелементу за період коливань до подвійного середнього, взагалі кажучи, наближеного значення енергії, що накопичується в об'ємі за період.

В третій главі проведено огляд експериментальних робіт по дослідженню залежності механічних, діелектричних та п'єзоелектричних властивостей п'єзоматеріалів від температури. В розрахунках використані результати експериментів, які отримані М.О. Шульгою та його співробітника в інтервалі температур  $20^0 - 180^0 C$ . Згідно з цими результатами в п'єзокераміці ЦТСТБС - 2 при  $160^0 - 180^0 C$  відбувається різке падіння п'єзомодулів, що свідчить про розвиток деполяризаційних процесів. Для розрахунків застосовується кусково-лінійна ап-

роксимація експериментальних кривих. За точку Кюрі приймається температура  $180^{\circ}\text{C}$ . Якщо в якій-небудь точці тіла температура досягає  $180^{\circ}\text{C}$ , п'єзомодулі в цій точці покладаються рівними нулеві і в подальших розрахунках не враховуються. В зв'язку з тим, що інформація про поведінку механічних та діелектричних характеристик матеріалу при температурах, що перевищують  $180^{\circ}\text{C}$ , відсутня, в розрахунках в цьому випадку використовуються ті ж значення вказаних характеристик, що і при  $180^{\circ}\text{C}$ .

Першими в умовах сильного вібророзігріву досліджувались стаціонарні коливання порожнистого п'єзокерамічного циліндра в околі резонансу синфазної моди. Коливання обуджувались електричною напругою  $\Delta\varphi\cos\omega t$  на електродах, що повністю покривають циліндричні поверхні. На рис. 1 показана залежність від частоти усталеної максимальної температури вібророзігріву циліндра при  $\Delta\varphi = 6,3\text{В}$ . Верхня частина рисунку відповідає коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_{\text{T}} = 50\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$ , нижня -  $\alpha_{\text{T}} = 5\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$ . Штрихова лінія побудована для випадку, коли температурною залежністю характеристик матеріалу нехтується. Кривими 2, 3 зображені фрагменти температурно-частотних характеристик (ТЧХ) відповідно при  $\Delta\varphi = 9\text{В}$ ,  $\Delta\varphi = 12\text{В}$ . Стрілки вказують на перехід параметрів процесу в одній вітці ТЧХ на іншу. Характерною особливістю зображеної ТЧХ, що відрізняє її від ТЧХ, побудованих іншими авторами при відносно низьких температурах, є наявність вітки IX - XII. Саме в цією віткою критичних теплових режимів, пов'язана можливість досягнення температурою точки Кюрі. Збільшення теплообміну приводить до неможливості реалізації теплових режимів коливань, що відповідають вказаній вітці. Для КЕМЗ  $k_{\text{e}}$  характерною є слабка зміна з частотою в межах однієї і тієї ж вітки ТЧХ. З точністю до двох знаків кожному вітку можна охарактеризувати своїм КЕМЗ. При переході на більш високий температурний режим КЕМЗ зменшується. Тільки в виходом на вітку IX - XII проявляється тепден-

ція КЕМЗ до зменшення в межах однієї і тієї ж вітки.

В процесі продовження розв'язку по параметру частоти стаціонарні коливання, що відповідають вітці критичних теплових режимів IX - XII, були досліджені аж до частоти 71,15 кГц включно. Починаючи з частоти 69,3 кГц ці коливання характеризуються наявністю в циліндрі деполаризованої зони. Кожне збільшення частоти приводило до чергового розширення цієї зони і зменшення КЕМЗ. Слід зазначити, що криві 1, 2, 3 із збільшенням частоти як в межах, так і за межами рис. 1 ніде не перетинають лінію  $T = T_{\text{Кюрі}}$  (розширення деполаризованої зони відбувається в процесі установаження температури, вищого якої вона може перевищувати температуру  $T_{\text{Кюрі}}$ ). На частоті 71,2 кГц коливання зриваються з вітки критичних режимів, що пояснюється зміною форми коливань циліндра, викликані значним розширенням деполаризованої зони. Еволюція з часом КЕМЗ на цій частоті (за початкову вибиралась усталена температура на частоті 71,15 кГц) зображена на рис. 2. Там же показані розміри деполаризованої зони половини меридіонального перерізу циліндра на початку та в кінці процесу зриву коливань.

Аналогічно ведуть себе амплітудно-частотні характеристики (АЧХ).

Основна увага в дисертації приділяється резонансним коливанням п'єзоелементів в формі порожнистих циліндра і кулі з отвором при автопідстроюванні частоти збудження, що реалізуються в умовах сильного вібророзігріву і часткової деполаризації матеріалу. Коливання збуджуються електричною напругою на електродах, що повністю покривають відповідно циліндричні та сферичні поверхні п'єзоелементів. На верхній частині рис. 3 зображені криві, що показують зміну за часом амплітуд колового (крива 1) і осьового (крива 2) напружень відповідно на внутрішній і зовнішній поверхнях циліндра в його центральній частині. Там же показано характер навантаження. Зміну за часом резонансної частоти і режим автопідстроювання характеризує крива 1 в нижній частині рис. 3. Криві 2, 2' відповідають еволюціям за часом максимальної

та середньої по об'єму температури вібророзігріву. Штрихові лінії характеризують поведінку КЕМЗ ( крива 1 ) і величину  $\psi$  ( 18 ). До штрихової вертикальної коливання реалізуються без деполяризації, після - в умовах появи та розширення за часом деполяризованої зони. Криві на рис. 3 відповідають коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_T = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ .

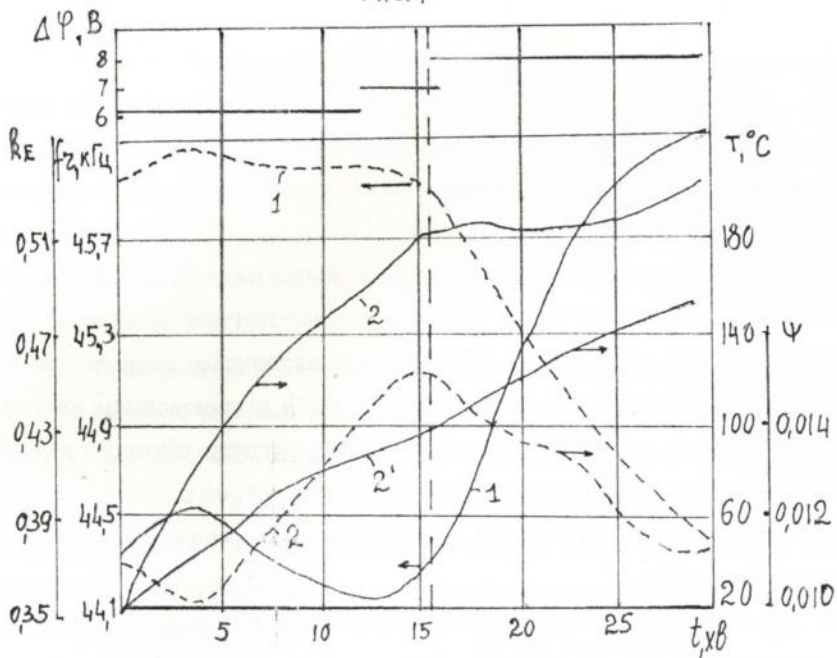
Для кулі з отвором аналогічні результати ( з тим же позначенням кривих ) показані і отримані при  $\alpha_T = 25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$  на внутрішній поверхні і поверхні отвору кулі і  $\alpha_T = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$  - на зовнішній поверхні. В табл. 1 приведені амплітуди максимальних напружень для деяких моментів часу із інтервалу на рис. 4, які мають місце на внутрішній поверхні кулі в її полюсі ( рис. 6 ).

При проведенні розрахунків поряд з механічними напруженнями постійно контролювалась величина електричної напруженості. В кінці глави проведено аналіз впливу деполяризації на деякі характеристики п'єзоелементів при їх повторному використанні. На рис. 5, 6 показано розміри деполяризованої зони, які реалізовувались в процесі коливань із автопідстроюванням частоти в залежності від тривалості цих коливань. Для цих розмірів вказані значення резонансної частоти і КЕМЗ п'єзоелемента. На відміну від частот приведених на рис. 5, 6, резонансні частоти при збудженні коливань генератором струму ( антирезонансні частоти ) із збільшенням розмірів деполяризованої зони спадають.

Для кулі з отвором розрахунки проведені при різних величинах кута отвору  $\Theta$ . Ці розрахунки показали, що зменшення  $\Theta$  (  $\Theta \leq 20^\circ$  ) приводить до локалізації підвищеного дисипативного розігріву і появи зони деполяризації не в полюсі, а в околі отвору кулі. Проте в цих випадках коливання характеризуються високими механічними напруженнями в околі отвору і існує небезпека механічного руйнування кулі раніше, ніж в ній можуть проявитись деполяризаційні процеси.

В заключенні дисертації стисло сформульовані основні наукові результати та висновки роботи.

Рис. 4



$t, \text{xb}$	0	8,5	13	15,5	16	17	19,5	24	29,5
$\Delta P, \text{B}$	6,3	6,3	7	7	8	8	8	8	8
$\sigma, \text{MПа}$	20,7	20,5	21,8	19,5	22,3	21,6	21,1	23,7	24,7

Табл. 1.

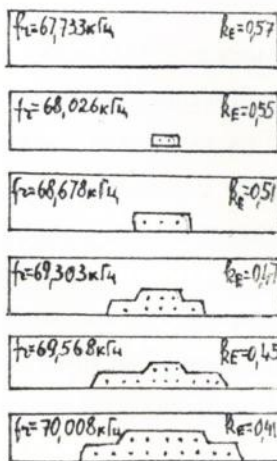


Рис. 5

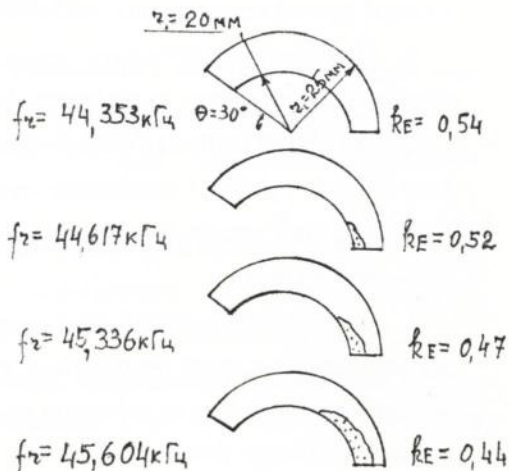


Рис. 6

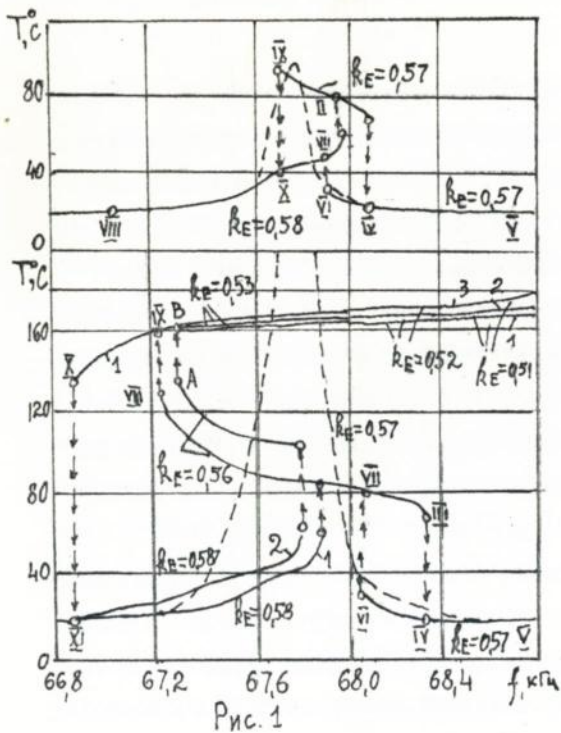


Рис. 1

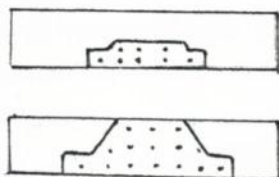
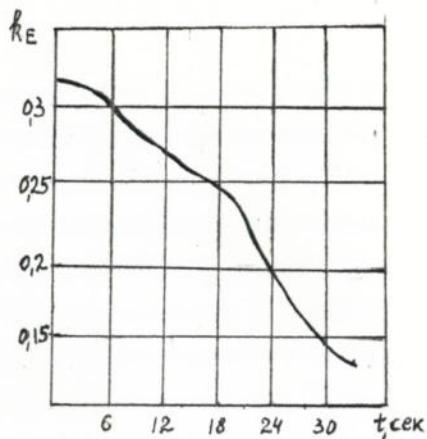


Рис. 2

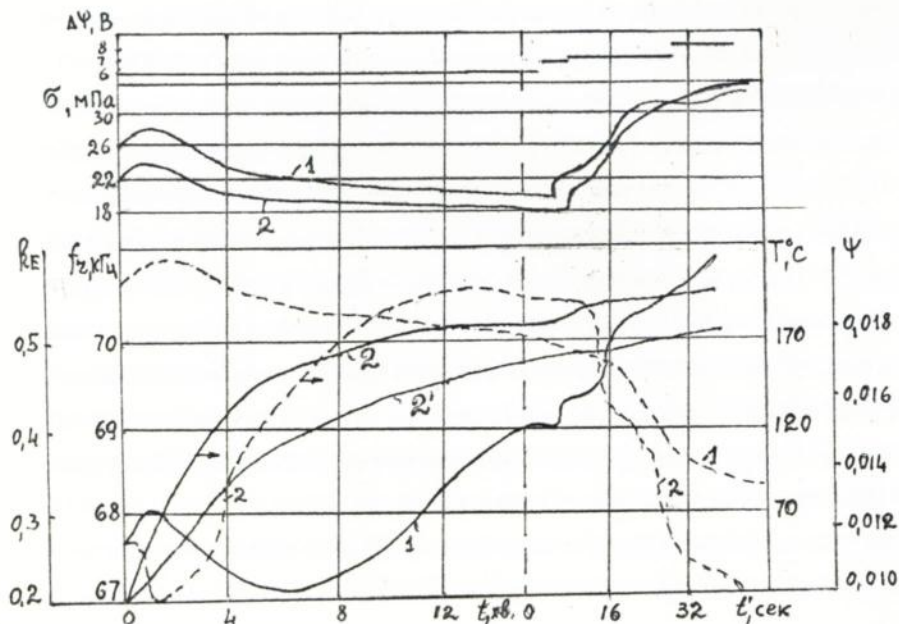


Рис. 3

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ.

1. Дано постановку задачі про електромеханічні коливання та дисипативний розігрів в'язкопружних п'єзоелектричних тіл з врахуванням теплової деполяризації матеріалу.

2. Розроблено алгоритм розв'язання вказаної задачі і проведено його реалізацію на основі МСЕ на випадок осесиметричних коливань п'єзоелектричних тіл обертання. Можливості алгоритму дозволяють моделювати резонансні режими коливань з автопідстроюванням частоти.

3. На основі розробленого скінченноелементного підходу одержані розв'язки нових задач про коливання та дисипативний розігрів п'єзокерамічних порожнистих циліндра і кулі з отвором в умовах теплової деполяризації матеріалу.

4. Дано характеристику стаціонарним тепловим режимам коливань п'єзокерамічного циліндра, які реалізуються в умовах сильного вібророзігріву, і режимам, що характеризуються появою та розвитком теплової деполяризації.

5. Проведено моделювання теплових деполяризаційних процесів при резонансних коливаннях п'єзокерамічних циліндра і кулі з отвором в режимі автопідстроювання частоти.

6. Досліджена можливість деполяризації в залежності від рівня навантаження, частоти, умов теплообміну, геометрії п'єзоелементу.

7. Дано оцінку впливу теплової деполяризації на коефіцієнт електромеханічного зв'язку і коефіцієнт електромеханічних коливань.

Проведений аналіз отриманих чисельних результатів дозволяє зробити такі висновки:

1. Можливість теплової деполяризації при стаціонарних коливаннях п'єзоелементів в околі резонансної частоти безпосередньо зв'язується з можливістю виходу температури дисипативного розігріву на вітку критичних теплових режимів ( рис. 1 ).

2. В режимі резонансних коливань п'єзоелементів з автопідстроюванням частоти і при відсутності примусового теплообміну деполаризація не виключається навіть при відносно низьких рівнях навантаження, при яких небезпека механічного чи електричного руйнування не вищас (циліндр, куля з отвором  $\Theta \leq 20^{\circ}$ , рис. 3, 4). В деяких випадках деполаризація може бути однією з причин механічного руйнування (верхня частина на рис. 1).

3. Розвиток деполаризації супроводжується різким зменшенням КЕМЗ і зсувом резонансної частоти в область вищих частот (при збудженні коливань генератором напруги) (рис. 2, 3, 4). При повторному використанні частково деполаризованих елементів резонансна частота і КЕМЗ в залежності від розмірів деполаризованої зони можуть суттєво відрізнятися від номінальних значень цих величин для недеполаризованих елементів (рис. 5, 6).

4. Зумовлене підвищенням температури початкове зростання коефіцієнта затухання електромеханічних коливань  $\psi$  з розвитком деполаризації змінюється на різкий спад (рис. 3, 4).

#### Основний зміст дисертаційної роботи викладено в таких працях:

1. Численное моделирование резонансных режимов колебаний ультразвуковой электромеханической системы с автоподстройкой частоты // Прикл. механика. - 1996. - 32, N 11. - с.54 - 59 (Співатор Михайленко В.В. )

2. Развитие теории определяющих уравнений физически нелинейных вязкоупругих тел при циклической деформации. // Там же - 1996. - 32, N 10. - с. 46-51. (Співатори Карнаухов В.Г., Михайленко В.В. )

3. О температурной деполаризации пьезоэлектрического слоя в условиях квазистатики // Докл. АН Украины. Сер. А. - 1996. - N 7. с. 51-55 (Співатор Михайленко В.В. )

4. Десполяризация пьезокерамического цилиндра в режиме резонансных колебаний с автоподстройкой частоты. Деп.в УКРИНТЕИ 29.10.1996 № 90. УК 96.

5. О температурной десполяризации пьезоэлементов в режиме квазистатических колебаний. Тез. V Междунар. науч. конф. им. акад. М. Кравчука. ( Киев, 16-18 мая 1996 г. ) - Киев. 1996г. с. ( Співавтор Михайленко В.В. )

6. О критических параметрах нагружения пьезоэлементов в режиме квазистатических колебаний. Тез. докл Укр. конф. Моделирование и исследование устойчивости систем, 20-24 мая 1996 г. / Киев, 1996. с. 125.

7. К теории определяющих уравнений физически нелинейных вязкоупругих и электровязкоупругих тел при циклических процессах. Тез. докл. Укр. конф. Моделирование и исследование устойчивости систем, 20-24 мая 1996 г. / Киев, 1996. с. 70 ( Співавтори Карнаухов В.Г., Михайленко В.В. )

## АННОТАЦИЯ

Фрашовский А.Ц. Колебания и диссипативный разогрев вязкоупругих пьезокерамических тел вращения с учётом тепловой десполяризации материала.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01. 02. 04. - механика деформируемого твёрдого тела, Институт механики им. С.П. Тимошенко Национальной академии наук Украины, Киев, 1996.

В диссертационной работе на основе соотношений теории термоэлектровязкоупругости и с использованием метода конечных элементов разработан алгоритм решения задачи об осесимметричных колебаниях

пьезоэлектрических тел вращения с учётом тепловой деполаризации материала, вызываемой диссипативным разогревом. Решены задачи о колебаниях пьезоэлектрических полых цилиндра и шара с отверстием в условиях сильного виброразогрева и частичной деполаризации материала. Исследованы как стационарные режимы колебаний, так и резонансные режимы колебаний с автоподстройкой частоты возбуждения. Изучена возможность возникновения деполаризации в зависимости от уровня нагружения, частоты, условий теплообмена, геометрии пьезоэлемента. Дана оценка влияния тепловой деполаризации на коэффициент электромеханической связи и коэффициент электромеханических колебаний.

## ABSTRACT

Franovsky A.C. Vibrations and dissipative heating of viscoelastic piezoceramic revolution bodies with due regard for thermal depolarization of material.

Dissertation for the candidate of Physical and Mathematical Sciences in Speciality 01.02.04 - mechanics of deformable solid, S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 1997.

In dissertation on the basis of equations of the electrothermoelasticity and the finite element method the algorithm is developed for solution of problems of vibrations of piezoelectric revolution bodies taking into account the thermal depolarization caused by dissipative heating. The problems of vibrations of piezoelectric hollow cylinder and sphere under intensive heating and partial depolarization are solved. The steady and resonance vibrations with automatic tuning of frequency of excitation are considered. The possibility of beginning of depolarization is studied depending on the level of excitation, frequency, conditions of heat exchange, geometric shape of body.

The influence of thermal depolarization on coefficient of electromechanical coupling and coefficient of damping investigated.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** деполяризація, дисипативний розігрів, автопідстроювання частоти, температурний режим, коефіцієнт електро-механічного зв'язку, вітка критичних теплових режимів.

435860

AB 37.393

The number of ...  
Group ...  
RUBEN ...