Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Цикл робіт на здобуття
премії Президента України
для молодих вчених 2021 р.

Розвиток методів забезпечення вібраційної надійності систем з конструктивною симетрією та їх складових

Автори:

САВЧЕНКО Кирило Валентинович – к.т.н., с.н.с. ІПМіц імені Г.С. Писаренка НАН України

КАБАННИК Сергій Миколайович – к.т.н., н.с. ІПМіц імені Г.С. Писаренка НАН України

ДЕРКАЧ Олег Леонідович – к.т.н., н.с. ІПМіц імені Г.С. Писаренка НАН України

Характеристика роботи

Мета роботи – розрахунково-експериментальне встановлення закономірностей впливу параметрів механічного зв’язку лопаток та засобів пасивного і активного демпфірування на формування коливань їх вінців як систем з циклічною симетрією, а також закономірностей зародження дозвукового флатеру в лопаткових вінцях осьових компресорів, які характерні для режимів їх експлуатації.

Для досягнення мети було визначено такі **задачі**:

- дослідження впливу умов взаємодії робочих лопаток з різним типом бандажного зв’язку на напружений стан та формування коливань їх вінців як систем з циклічною симетрією;
- розробка критеріальних залежностей впливу кута атаки та приведеної частоти коливань на формування границі стійкості лопаткових вінців компресорних ступеней АГТД до дозвукового флатеру та алгоритму і програмного забезпечення експрес-методу її прогнозування;
- встановлення закономірностей впливу параметрів пасивного і активного демпфірування коливань конструктивних елементів та їх композитної структури на зниження рівня вібронапруженості при дії нестаціонарних силових навантажень.

Об’єкти дослідження

Приклад механічної системи з циклічною симетрією

Робоче колесо

Пара лопаток

Ізольована лопатка

Джерела змушувальних сил

- Потоки пару та газу
- Поле відцентрових сил
- Нерівномірний нагрів деталей

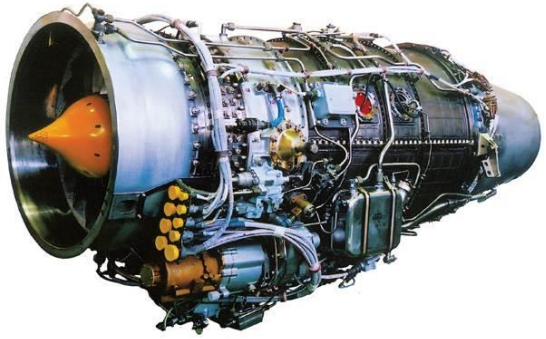
Джерела демпфірування

- Розсіювання енергії в матеріалі
- Тертя лопаток в з’єднаннях між собою і з диском
- Аеродинамічний опір набігаючому потоку

Реальні об’єкти дослідження

АГТД Д-18Т

АГТД АИ-222

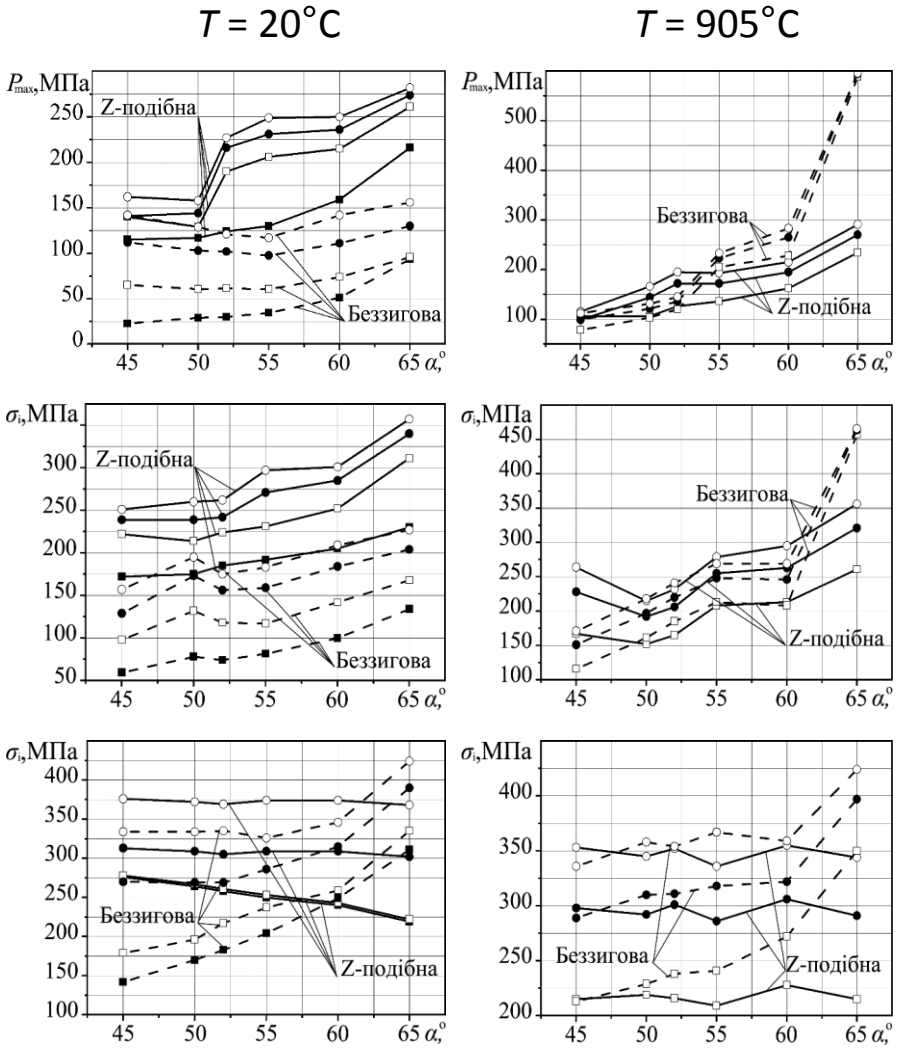


ВЭУ-0020

Вплив умов спряження робочих лопаток на напружений стан їх вінців

Висновки

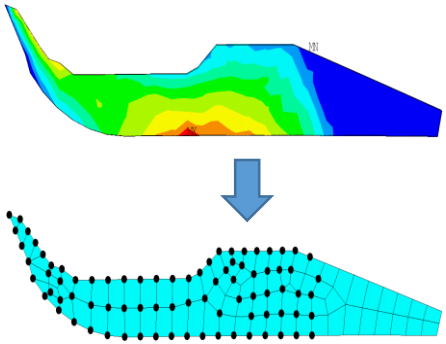
1. Незалежно від типу бандажного зв'язку та дії поля відцентрових сил і температури газового потоку максимальні значення контактного тиску і інтенсивності напружень в полицях зростають зі збільшенням кута нахилу їх контактних поверхонь. При цьому інтенсивність напружень в пері лопатки з беззиговою бандажною полицею зростає, а з Z-подібною – зменшується.
2. Дія поля відцентрових сил призводить до зростання максимальних значень характеристик статичного напруженого стану в усьому діапазоні зміни кута нахилу контактних поверхонь, що є результатом розкрутки пера лопаток.
3. Врахування температури газового потоку обумовлює підвищення значень характеристик статичного напруженого стану для беззигових бандажних полиць і знижує для Z-подібних, що можна пояснити зміною геометричних розмірів лопаток.



■ – v = 0 об/хв; □ - v = 3790 об/хв;
● - v = 5180 об/хв; ○ - v = 5850 об/хв

Дослідження спектру власних частот коливань лопаткових вінців

Моделювання контакту

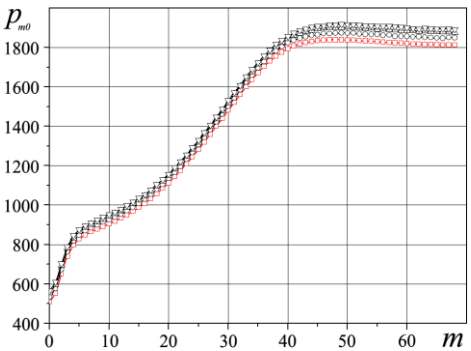


Висновки

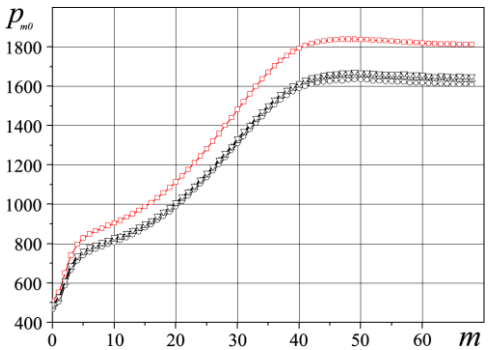
1. Лінеаризація контактної взаємодії лопаток через її моделювання за допомогою пружних елементів з двома ступенями свободи і накладення умов спільності переміщень в радіальному напрямку дозволяє більш точно описати пружні властивості лопаткових вінців і визначити спектр їх власних частот коливань.
2. Збільшення величини кута нахилу контактних поверхонь бандажних полиць незалежно від їх типу і дії температурно-силових факторів призводить до зростання власних частот коливань вінців.
3. Збільшення швидкості обертання робочого колеса призводить до підвищення, а температури – зниження власних частот коливань лопаткових вінців у всьому діапазоні зміни кута нахилу. При цьому характер розподілу частотних функцій не змінюється.

Частотні функції вінців з Z-подібними бандажними полицями

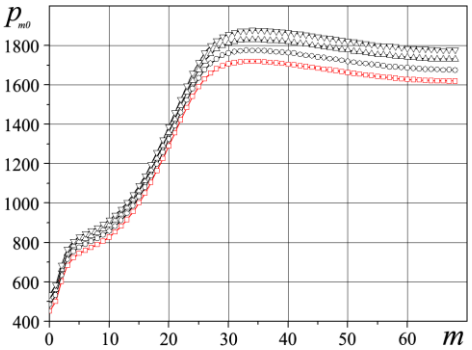
T = 20°C

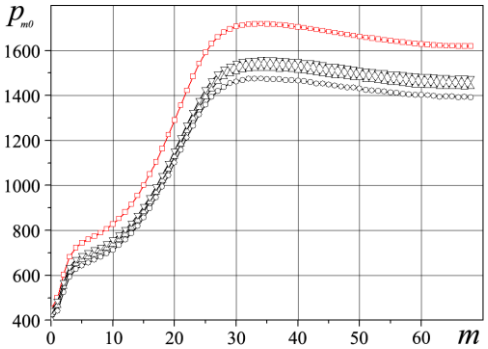


T = 905°C



Частотні функції вінців з беззиговими бандажними полицями

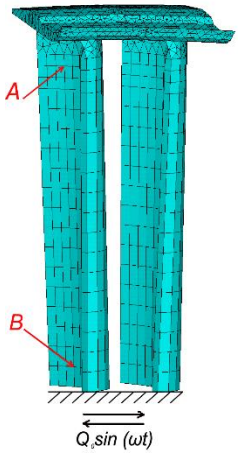




□ – v = 0 об/хв; ○ - v = 3790 об/хв;
Δ - v = 5180 об/хв; ∇ - v = 5850 об/хв

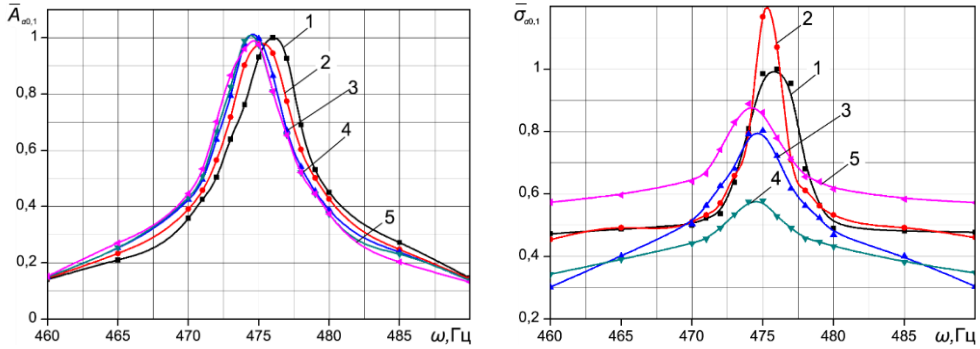
Вимушені коливання лопаткових вінців

Досліджувані моделі



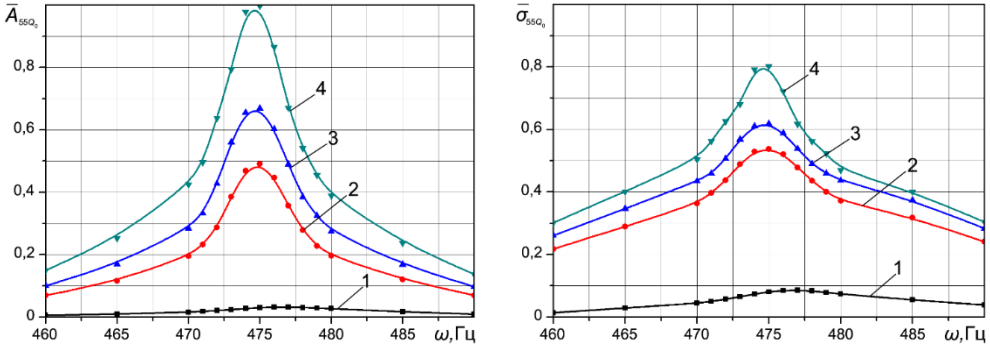
Амплітудно-частотні характеристики лопаток

Q_0 = 0,1 мм



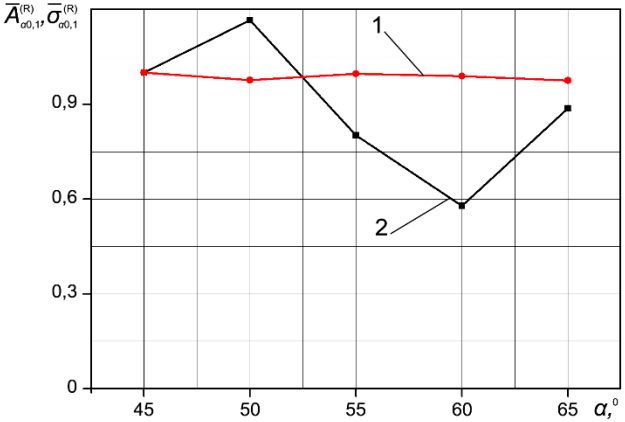
1 - α = 45°; 2 - α = 50°; 3 - α = 55°; 4 - α = 60°; 5 - α = 65°

α = 55°



1 - Q_0 = 0,01 мм; 2 - Q_0 = 0,05 мм; 3 - Q_0 = 0,07 мм; 4 - Q_0 = 0,1 мм

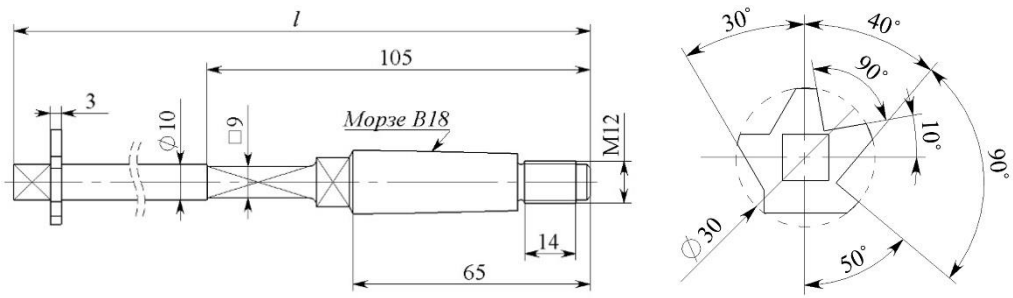
Відносні резонансні амплітуди



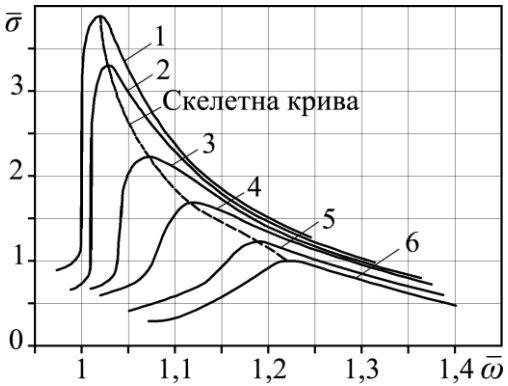
1 - переміщення;
2 - інтенсивність напружень

Вимушені коливання лопаткових вінців (2)

Експериментальний зразок



Амплітудно-частотні характеристики лопаток

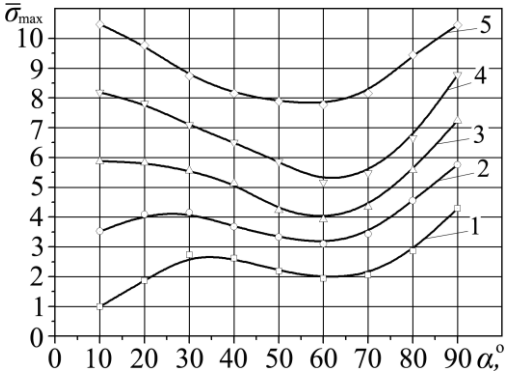


1 - K_g = 14,5;
2 - K_g = 13,3;
3 - K_g = 10,6;
4 - K_g = 8;
5 - K_g = 6,4;
5 - K_g = 5,5

Висновки

1. Зі збільшенням рівня збудження коливань зростають значення амплітуд відносних вібронапружень. При цьому їх максимум спостерігається при частоті, що наближається до власної частоти коливань робочої лопатки.
2. При збільшенні статичної сили взаємодії полиць відбувається зростання жорсткості пари лопаток і її частоти коливань, при якій спостерігаються максимальні значення вібронапружень. Також спостерігається екстремум, який відповідає мінімальному рівню амплітуд відносних максимальних вібронапружень.

Відносні амплітуди напружень



1 - P = 20 Н;
2 - P = 40 Н;
3 - P = 60 Н;
4 - P = 80 Н;
5 - P = 100 Н

Методика експериментального визначення нестаціонарних аеродинамічних навантажень

Схема стенду для вимірювання нестаціонарних аеродинамічних навантажень на лопаткових профілях

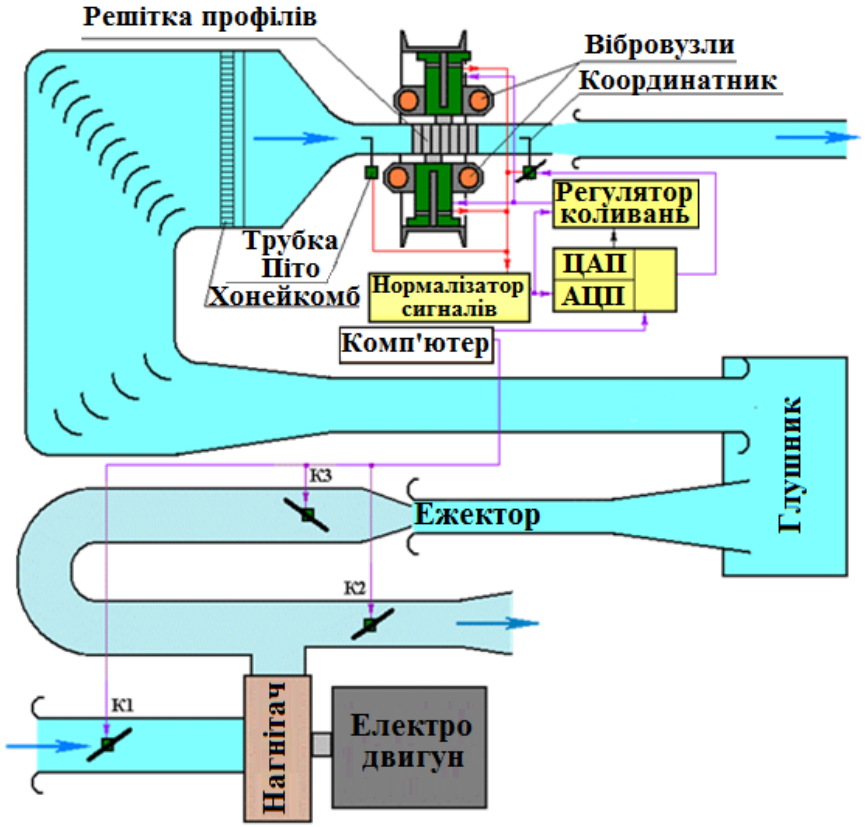
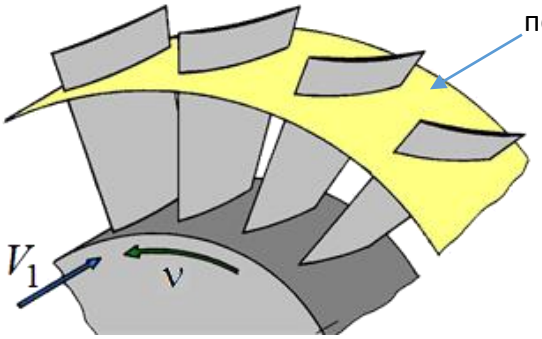
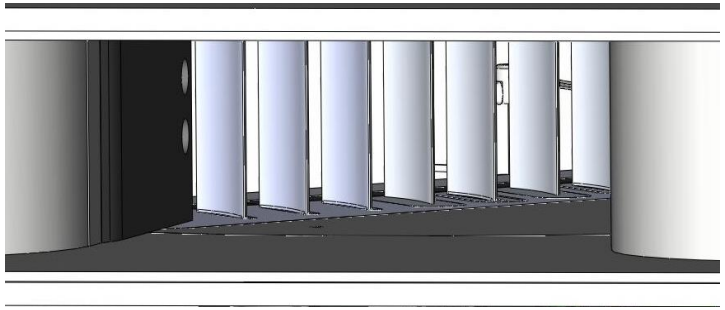
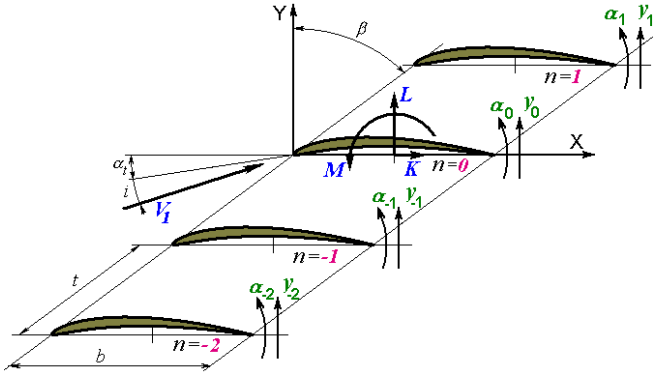


Схема створення решітки профілів

Найбільш навантажений переріз лопаткового вінця





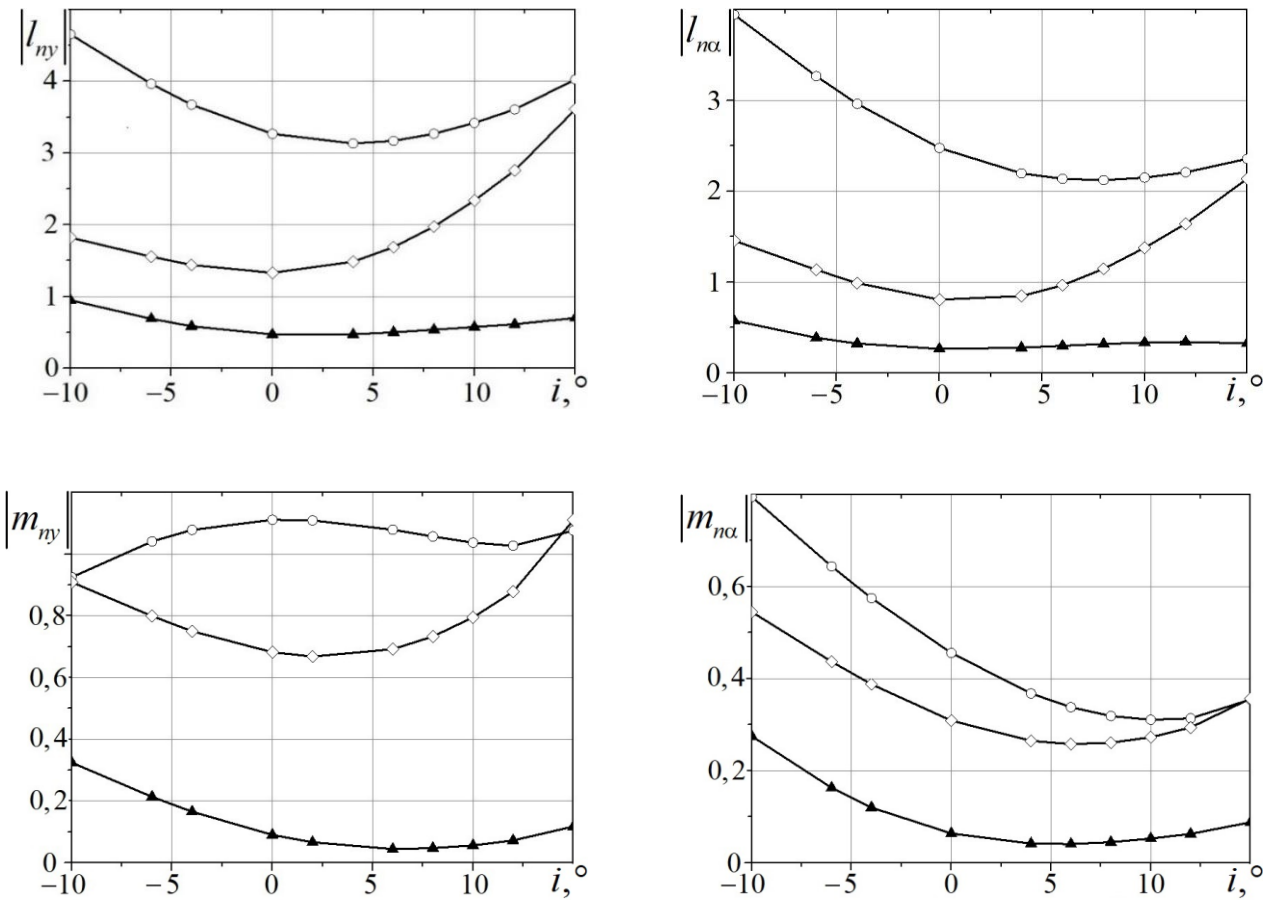


Експериментальне визначення нестаціонарних аеродинамічних навантажень

Залежність аеродинамічних коефіцієнтів впливу від кута атаки при впливі лопатки, що коливається (◊), вище (○) і нижче (▲) стоячих лопаток для приведеної частоти коливань St = 0,64

Висновки

Найбільшого впливу при коливаннях вихідного профілю зазнають АКВ вище розташованого (○) профілю решітки. При цьому на великих кутах атаки внаслідок розвиненого відриву потоку абсолютні величини АКВ вище розташованого лопаткового профілю перевищують такі для вихідного.



Основні положення методу експрес-оцінки стійкості лопаткового вінця до дозвукового флатеру

Критерій динамічної стійкості лопаткового вінця

$$St^{B} = \frac{\rho b}{V_1} \geq St_{cr}$$

p - кутова частота коливань;
b - хорда лопатки;
V_1 - швидкість набігаючого потоку

Функціонал, який визначає критичне значення приведеної частоти коливань

$$St_{кр} = St'_{кр}\left(i, \beta, \bar{t}, \tau\right) \cdot St\left(\theta, \bar{c}, \bar{x}_{\theta}, \bar{x}_{C_{\max}}\right) \cdot St_{Mh} \cdot St_{\rho} \cdot St_{\delta}$$

Система нормальних рівнянь

$$[St_{кр}]=[O][\Upsilon]$$

$$[O] = \begin{bmatrix} o_{01}\, o_{11} \ldots o_{G1} \\ o_{02}\, o_{12} \ldots o_{G2} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ o_{0\sigma}\, o_{1\sigma} \ldots o_{G\sigma} \end{bmatrix}; \quad [\Upsilon] = \begin{vmatrix} \Upsilon_0 \\ \Upsilon_1 \\ \ldots \\ \Upsilon_g \end{vmatrix} \quad [St_{кр}] = \begin{bmatrix} St_{кр\,0} \\ St_{кр\,1} \\ \ldots \\ St_{кр\,\Lambda} \end{bmatrix};$$

O - регресійна матриця, *o* - регресори;
Υ – вектор-стовпчик *G* невідомих коефіцієнтів регресії $\Upsilon_{\underline{g}}$;
$S_{кр}$ - вектор-стовпчик, побудований на основі бази даних *Λ* критичних значень $St_{кр}$ приведеної частоти коливань лопаток.

Програма визначення границі динамічної стійкості консольних лопаток компресорних ступеней АГТД

Відносний крок решітки	1,044
Кут виносу решітки	48,1
Коефіцієнт згино-крутильної зв'язаності	0,255

Режими роботи лопаткового вінця

	i	St	Прим.
Режим №1	9,19	0,5	o
Режим №2	9,19	0,475	×
Режим №3	12,4	0,55	ж
Режим №4	12,4	0,516	–
Режим №5	15,6	0,6	■
Режим №6	15,6	0,558	▲
Режим №7	10,2	0,58	□
Режим №8	10,2	0,548	Δ
Режим №9	14,9	0,64	+
Режим №10	14,9	0,6	◇

i	$St_{кр}$
-10	0,374
-8	0,302
-6	0,252
-4	0,222
-2	0,21
0	0,215
2	0,233
4	0,264
6	0,305
8	0,355
10	0,411
12	0,472
14	0,537
16	0,602
18	0,666
20	0,728

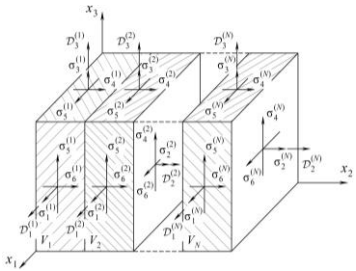
Діапазон можливих параметрів лопаткового вінця:

- Кут атаки -10° … 20°;
- Кут виносу решітки 0° … 65°;
- Відносний крок решітки 0,6 … 1,4;
- Коефіцієнт згинно-крутильної зв’язаності 0 … 0,5

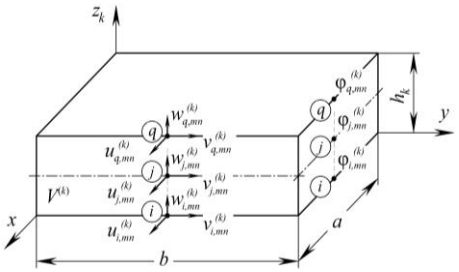
Активне і пасивне демпфірування коливань елементів конструкцій композитної структури

Моделювання п’єзокомпозитного матеріалу

Елемент одно-періодично п’єзокомпозитного матеріалу шаруватої структури

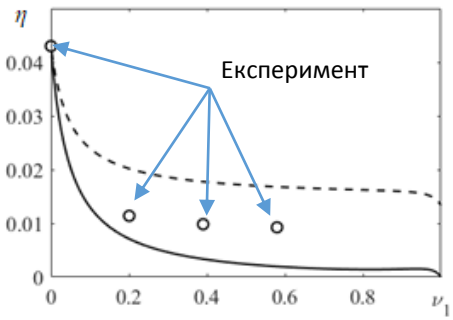


Умовний шар квазіоднорідного електров’язкопружного матеріалу пластини

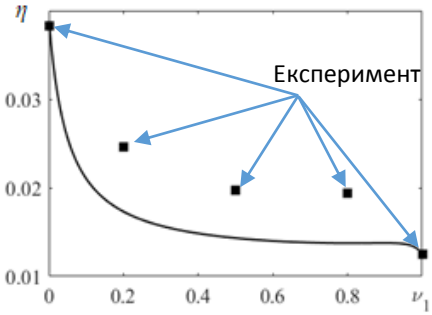


Залежність поглинання енергії від об’ємної концентрації шарів п’єзокераміки

FM73/PZT-5A



EPON828/PZT-188



Висновки

Розроблено наукові основи розрахунку та аналізу активного і пасивного демпфірування коливань композитних конструктивних елементів та їх систем, які полягають у побудові моделей розсіювання енергії у композиційних матеріалах з електров’язкопружними властивостями та проведення з їх використанням розрахунково-експериментальних досліджень зі встановлення закономірностей впливу параметрів композитної структури матеріалів та активного демпфірування коливань за допомогою п’єзоелектричних елементів на ефективність зменшення амплітуд нестаціонарних коливань складних структурно-неоднорідних систем.

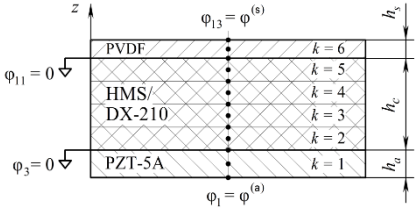
Власні частоти і коефіцієнти поглинання енергії коливань тришарової пластини

Модальні числа (m, n)	Точний розв'язок		Метод скінченних елементів		Даний напів-аналітичний метод	
	p_{mn}, Гц	η_{mn}	p_{mn}, Гц	η_{mn}	p_{mn}, Гц	η_{mn}
(1, 1)	60,2	0,190	57,4	0,176	60,2354	0,1901
(1, 2)	115,2	0,203	115,2	0,188	115,2232	0,2034
(2, 1)	130,2	0,199	130,2	0,188	130,5252	0,1992
(2, 2)	178,5	0,181	178,5	0,153	178,460	0,1806
(1, 3)	195,4	0,174	196,0	0,153	195,4210	0,1737

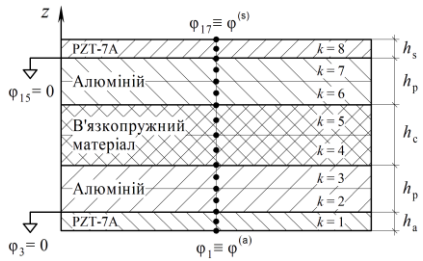
Вплив параметрів композитної структури та активного демпфірування на ефективність розсіювання енергії коливань

Ескіз пакету шарів пластини

Тришарова

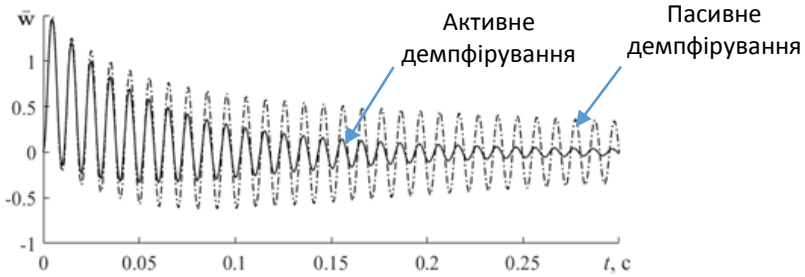


П’ятишарова

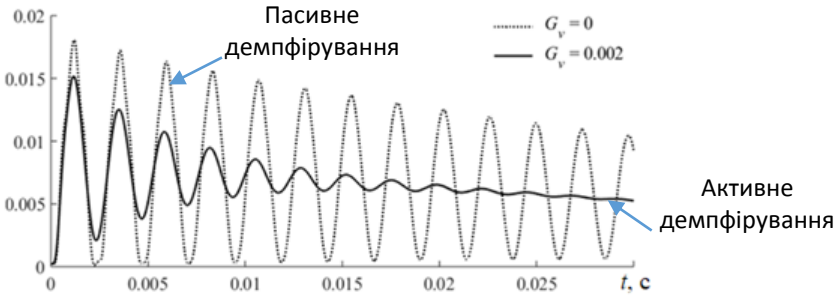


Залежність відносного прогину

Тришарова пластина



П’ятишарова пластина

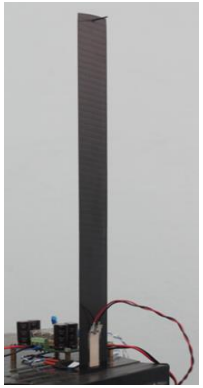


Висновки

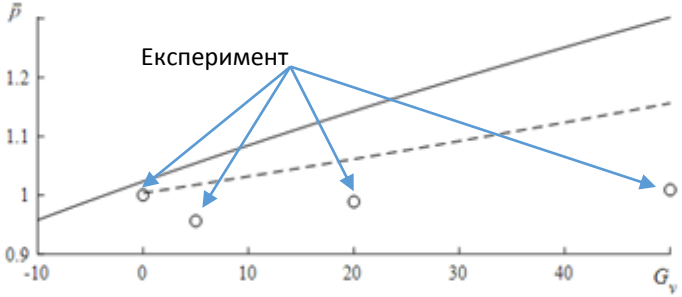
1. Встановлено закономірності впливу параметрів композитної структури шарнірно-закріплених багатошарових пластин на ефективність пасивного, активного і гібридного демпфірування їх нестаціонарних коливань за допомогою п’єзоелектричних актуаторів.
2. Показано, що за рахунок вибору оптимального кута армування шарів пластин і параметрів активного демпфірування можливо значно підвищити їх декремент коливань, а поєднання засобів активного і пасивного демпфірування забезпечує зменшення амплітуд нестаціонарних коливань конструктивних елементів у широкому діапазоні частот змушувальних сил.

Вплив параметрів активного демпфірування коливань композитних стержнів на їх модальні характеристики

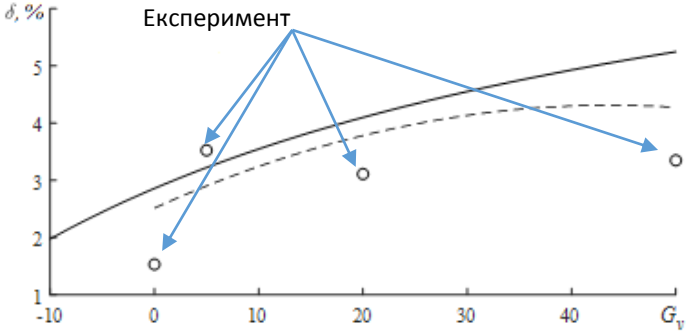
Експериментальний стенд і об’єкти дослідження



Залежність власної частоти коливань стержня



Залежність декременту коливань стержня

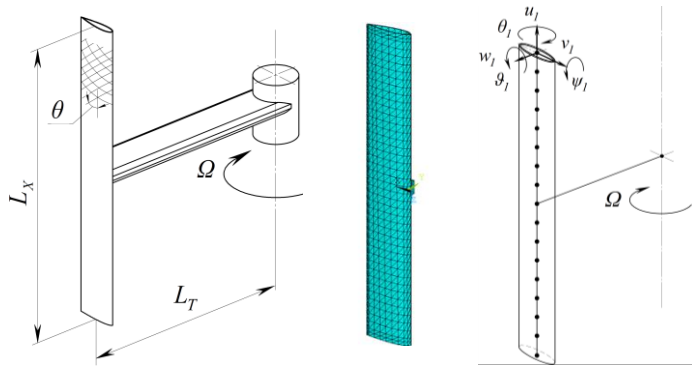


Висновки

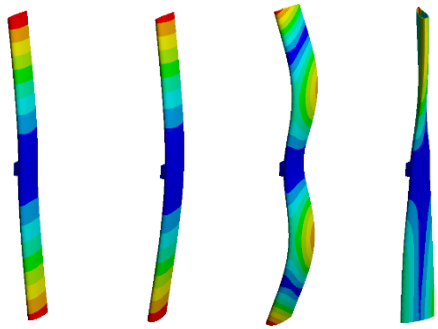
При збільшенні величини диференційної складової G_v регулятора декремент коливань збільшується, але у той же час значення власної частоти змінюється. Це явище для систем з циклічною симетрією може призвести до її порушення, що є причиною збільшення вібронапруженості таких конструктивних елементів.

Забезпечення функціональної роботоздатності композитних лопатей турбіни вітрогенератора

Моделювання об’єкту дослідження

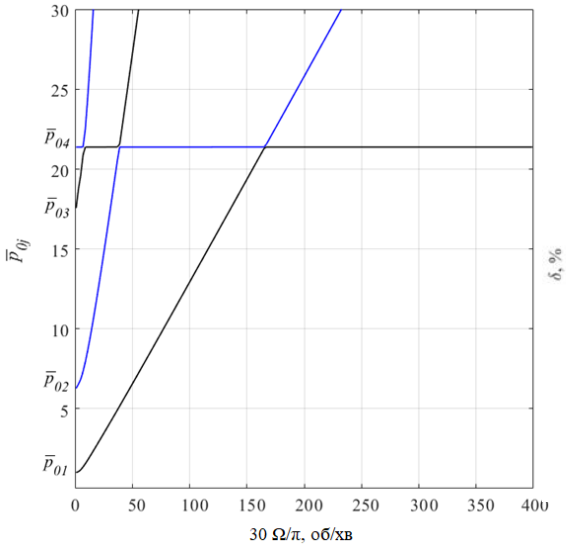


Власні форми коливань

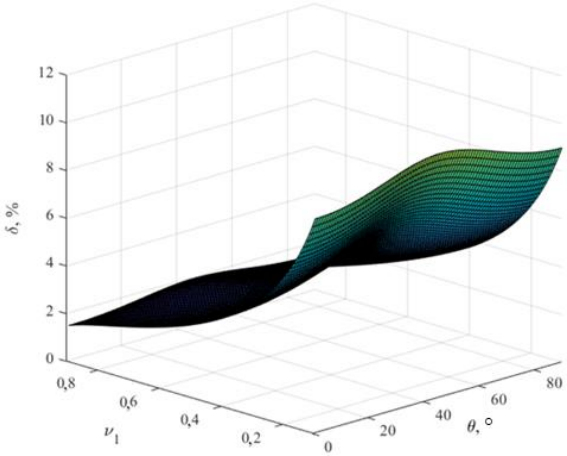


I II III IV

Частотна діаграма



Залежність декременту коливань від параметрів композиту



Висновки

Розроблено рекомендації щодо вибору проєктних параметрів композитної лопаті (товщина обшивки лопаті, коефіцієнт та кут армування її композитного матеріалу), які б забезпечили прогнозований рівень демпфірування коливань та вібраційної міцності ротора вертикально-осьової вітрогенераторної установки ВЭУ-0020.

Впровадження результатів

1. Отримані в роботі результати уточнюють особливості закономірностей впливу параметрів механічного зв’язку лопаток та засобів пасивного і активного демпфірування на формування коливань їх вінців як систем з циклічною симетрією, а також закономірностей зародження дозвукового флатеру в лопаткових вінцях осьових компресорів, які характерні для режимів їх експлуатації.
2. Враховуючи важливість і перспективність виконаних робіт, окремі представники авторського колективу у 2016 році були запрошені до участі у виконанні міжнародного проєкту AERO-UA рамкової програми Європейського Союзу з фінансування науки та інновацій «Horizon 2020», який профінансований у розмірі 1 мільйон Євро, разом з провідними організаціями ЄС, що працюють в галузі авіаційних досліджень, таких як: Intelligentsia Consultants (Luxembourg), Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation (Germany), Technology Partners (Poland), University of Manchester (UK).
3. За темою роботи було опубліковано 42 наукових праць, з яких 25 – у наукових фахових виданнях України та іноземних держав, 16 – в матеріалах і тезах міжнародних наукових конференцій, а також 1 – як розділ монографії. 8 з вказаних робіт опубліковано у виданнях, які індексуються в наукометричних базах Web of Science і Scopus.

Впровадження результатів (2)

4. Окремі результати виконаних досліджень знайшли своє використання при вивченні причин руйнування бандажованої робочої лопатки колеса другої ступені вільної турбіни маршового двигуна гелікоптера при проведенні тривалих випробувань на підприємстві АТ «МОТОР СІЧ» і розробці експрес - методу прогнозування динамічної стійкості лопаткових вінців осьових компресорів для ДП «Івченко-Прогрес». Також представлені результати використано ТОВ «П’єзосенсор» при розробці п’єзоелектричних датчиків вібрації та Інститутом транспортних систем і технологій «Трансмаг» НАН України при проєктуванні композитних лопатей вітрової турбіни.

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
АО «МОТОР СИЧ»
кандидат технических наук
П.Д. Жеманюк
«25» 2014г

СПРАВКА
об использовании результатов работы по теме
«Диагностика повреждений лопаточного аппарата газотурбинных двигателей на основе анализа спектра его собственных колебаний»,
выполненной Институтом проблем прочности
имени Г.С.Писаренко НАН Украины
(руководитель работы – д.т.н., проф. А.П.Зиньковский,)

В работе «Диагностика повреждений лопаточного аппарата газотурбинных двигателей на основе анализа спектра его собственных колебаний» представлены результаты исследований по установлению возможных причин повреждений лопаток рабочих колес турбин АГТД на основе анализа спектра собственных колебаний как отдельной лопатки, так и рабочего колеса, обладающего конструктивной поворотной симметрией.

Результаты исследований были использованы предприятием АО «МОТОР СИЧ» для объяснения причин разрушения бандажированной рабочей лопатки колеса 2-й ступени свободной турбины маршевого вертолетного двигателя при проведении длительных испытаний.

Предполагаемый экономически эффект от внедрения результатов работы составляет более 100 000 гривен.

Главный конструктор АО «МОТОР СИЧ »
С.И.Шанькин

Начальник отдела прочности УГК
И.Л. Гликсон

УТВЕРЖДАЮ
Директор предприятия
ГП «Ивченко-Прогресс»,
генеральный конструктор, д. т. н.
Н. Ф. Кравченко
«__» _____2018г

СПРАВКА
об использовании результатов работы по теме
«Разработка методики экспресс – оценки аэродинамической устойчивости консольных лопаток осевого компрессора к дозвуковому решеточному флаттеру на разных режимах работы ГТД»,
выполненной в Институте проблем прочности
имени Г.С.Писаренко НАН Украины
(руководитель работы – д. т. н., проф. А. П. Зиньковский,
ответственный исполнитель – к. т. н. А. Л. Стельмах)

На основе обобщения проведенных экспериментальных исследований по изучению аэродемпфирования колебаний лопаток компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) и условий зарождения дозвукового решеточного флаттера в широком диапазоне изменения определяющих характеристик: угла сдвига фаз изгибных, крутильных и изгибно-крутильных колебаний соседних профилей; угла атаки; приведенной частоты колебаний; геометрических параметров профиля и решетки; закона движения лопаточных профилей в Институте проблем прочности имени Г.С. Писаренко НАН Украины разработан экспресс-метод прогнозирования динамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру лопаточных венцов осевых компрессоров, также алгоритм и программа его реализации.

Эффективность практического применения разработанного метода показана на примерах оценки устойчивости изгибной формы колебаний лопаток осевых компрессоров современных авиационных газотурбинных двигателей.

Показано, что экспресс-метод позволяет на ранней стадии проектирования АГТД осуществлять оптимальный выбор значений приведенной частоты колебаний лопаток и их рабочих углов атаки для заданной геометрии периферийных сечений лопаточных венцов по условию возникновения дозвукового, решеточного флаттера.

Предложенный экспресс-метод прогнозирования динамической устойчивости к дозвуковому решеточному флаттеру лопаточных венцов осевых компрессоров может быть использован при проектировании и доводке современных авиационных газотурбинных двигателей.

Заместитель главного
конструктора, к.т.н
А. В. Шереметьев

П’ЄЗОСЕНСОР
УКРАЇНА, 14030, м. Чернігів, вул. Любецька 78, тел/факс (0462)644212
piezosensor@cg.ukrtel.net,
http://piezosensor.com.ua

ДОВІДКА
про потенційно можливе використання та впровадження результатів наукових досліджень

Видана асистенту кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій Чернігівського національного технологічного університету Деркачу Олегу Леонідовичу про те, що окремі результати наукових досліджень, виконані ним у рамках дисертаційної роботи "Демпфірування нестаціонарних коливань електров'язкопружних елементів композитних конструкцій", знайшли застосування при проектуванні дослідних зразків продукції підприємства, зокрема, п'єзоелектричних датчиків вібрації, та в подальшому можуть бути використані при розробці сучасних засобів виміру і аналізу параметрів вібрації.

Директор ТОВ «П'єзосенсор»,
кандидат технічних наук
Ю.Г. Задорожний