

РЕФЕРАТ

циклу наукових праць

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

авторського колективу у складі

кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника К.В. Савченка,
кандидата технічних наук, наукового співробітника С.М. Кабанника,
кандидата технічних наук, наукового співробітника О.Л. Деркача,
висунутого на здобуття премії Президента України
для молодих вчених за 2021 р.

Вступ. Виробництво турбомашин різного призначення, в першу чергу авіаційних газотурбінних двигунів, – одна з найбільш високотехнологічних та енергоємних галузей сучасного машинобудування. Необхідність зниження матеріаломісткості та покращення їх техніко-економічних показників висуває все більш жорсткі вимоги до робочих лопаток, які є одними з високонавантажених конструктивних елементів турбомашин, як на етапі проектування, так і в процесі довготривалої експлуатації. Якщо у першому випадку це пов'язано з підвищенням ресурсу двигуна, то в другому – із забезпеченням його функціональної роботоздатності в широкому діапазоні зміни режимів експлуатації, які, як правило, супроводжуються виникненням різних типів пошкоджень. На їх запобігання йде до 40% всіх витрат при розробці турбомашин. При цьому більшість дефектів, які виявляються в процесі роботи таких об'єктів машинобудування, мають вібраційне походження, а значна їх частина відноситься до лопаткових вінців робочих коліс, що обумовлює необхідність забезпечення вібраційної надійності робочих лопаток при їх проектуванні.

Одним з найбільш ефективних способів зниження вібраційної напруженості бандажованих лопаток, як відомо, є конструкційне демпфірування їх коливань. Основними його джерелами є взаємні переміщення контактних поверхонь бандажного та замкового з'єднань лопаток. Крім того, воно може зростати за рахунок наявності підплатформених демпферів, демпфуючих покриттів, композитних матеріалів та нових засобів пасивного і активного демпфірування коливань. Внаслідок таких джерел втрат енергії знижується чутливість лопаткових вінців до збудження небезпечних коливань.

Окрім цього, при розробці турбомашин обов'язковою умовою забезпечення надійності лопаткових вінців, поряд з газодинамічними та міцнісними розрахунками, є визначення критичних умов виникнення флатеру. Особливо це важливо для лопаток компресорів сучасних двигунів, виготовлених з більшим видовженням пера та беззамковим з'єднанням з диском робочого колеса, тобто при відсутності конструкційного демпфірування.

В таких випадках для оцінки напруженого стану лопаткових вінців широко застосовуються методи, які базуються на властивостях циклічної симетрії таких систем, при умові, що всі лопатки мають однакові геометричні та механічні характеристики.

З огляду на це, актуальною і важливою науково-технічною проблемою є вивчення впливу параметрів механічного зв'язку лопаток на формування коливань їх вінців, а також закономірності зародження дозвукового флатеру в лопаткових вінцях осьових компресорів, які характерні для режимів їх експлуатації. При цьому зростання робочих швидкостей турбомашин і впровадження в їх конструкцію нових композитних матеріалів обумовлює необхідність розвитку методів забезпечення їх вібраційної надійності шляхом зменшення вібранапруженості конструктивних елементів у тому числі засобами пасивного та активного демпфірування коливань за допомогою п'єзоелектричних елементів у вигляді накладок і шарів, що потребує розробки відповідних методів аналізу коливань, які базуються на реальних фізичних залежностях для матеріалів.

Запропонований цикл праць, що спрямований на розв'язання зазначених вище проблем, можна умовно розділити на 3 частини, що органічно поєднані між собою.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є 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 роботи були визначені 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 авіаційних двигунів 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 вібранапруженості при дії нестационарних силових навантажень.

Обґрунтування об'єднання в єдиний цикл. Дослідження К.В. Савченка, С.М. Кабанника та О.Л. Деркача тісно пов'язані між собою, оскільки стосуються розв'язання важливого науково-практичного завдання: забезпечення вібраційної надійності лопаткових вінців як систем з циклічною симетрією при їх проектуванні шляхом визначення оптимальних параметрів механічного та аеродинамічного зв'язку, а також пасивного і активного демпфірування робочих лопаток.

Отже, об'єднання праць в єдиний цикл можна обґрунтувати єдиними метою, об'єктами і методологією досліджень, а отримані результати та запропоновані науково-технічні рішення можуть бути використані при розробці нових і доводці вже існуючих авіаційних газотурбінних двигунів.

Наукова новизна циклу наукових праць полягає у такому:

- з використанням розроблених скінченноелементних моделей систем, що характеризуються циклічною симетрією, та їх однотипних елементів, а також сучасних експериментальних засобів встановлено закономірності впливу умов контактної взаємодії робочих лопаток і температурно-силових факторів на характеристики статичного напруженого стану, спектр власних частот і характеристики вимушених коливань їх вінців та пакетів;

- встановлено, на основі експериментально визначених з використанням прямої компресорної решітки лопаткових профілів, критеріальні залежності формування границі динамічної стійкості лопаткових вінців осьових компресорів до дозвукового флатеру в широкому діапазоні зміни кута атаки і приведеної частоти коливань та розроблено алгоритм і програмне забезпечення реалізації експрес-методу її прогнозування, які апробовані стосовно окремих типів сучасних авіаційних двигунів;

- розроблено наукові основи моделювання та аналізу демпфірування зв'язаних електромеханічних коливань композитних конструктивних елементів з в'язкопружних і електров'язкопружних матеріалів, які полягають у встановленні закономірностей впливу параметрів їх структурної неоднорідності на ефективність пасивного і активного демпфірування нестационарних коливань багатошарових стержнів і пластин за допомогою п'єзоелектричних актуаторів з урахуванням частотно-залежного розсіювання енергії в матеріалах.

Практична значимість. Роботи циклу виконувалися за планами бюджетних наукових тем Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, національних і міжнародних конкурсних проєктів, зокрема «Дослідження характеристик коливань та аеродинамічної стійкості руху механічних систем з урахуванням їх недосконалостей та впливу різних механізмів розсіювання енергії» (№ ДР 0112U002178), «Встановлення закономірностей впливу на вібраційні характеристики неконсервативних механічних систем початкових конструктивно-технологічних дефектів та локальних експлуатаційних пошкоджень з урахуванням дії зовнішніх факторів різної природи» (№ ДР 0117U002231), «Вплив параметрів контактної взаємодії та експлуатаційних пошкоджень на напружений стан лопаток турбомашин» (№ ДР 0117U003118), «Дослідження впливу параметрів решітки лопаткових профілів і умов її обтікання на динамічну стійкість до дозвукового флатеру» (№ ДР 0119U102346), «Дослідження характеристик коливань лопаток турбомашин в полі відцентрових сил», а також «Еволюційні методи оптимізації в задачах динаміки композитних конструкцій з в'язкопружних і електров'язкопружних матеріалів» (№ ДР 0113U000502).

Завдяки накопиченим знанням та досвіду в галузі досліджень коливань лопаток турбомашин, 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). В 2017 році один з авторів проходив стажування в Інституті проточних машин імені Роберта Шевальського ПАН згідно з Протоколом до Угоди про наукове співробітництво між Польською академією наук і Національною академією наук України щодо візитів українських вчених.

Поданий на конкурс цикл праць складається з **42** наукові праці, опублікованих з 2013 р. по 2019 р. включно. Серед них **25** статей, **1** розділ монографії та **16** матеріалів і тез міжнародних наукових конференцій. Зокрема, **8** статей опубліковані у міжнародних журналах і збірниках праць конференцій, які реферуються у базах Web of Science та Scopus. Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – 7/1, Scopus – 18/2, Google Scholar – 51/4.

Результати досліджень, що ввійшли до циклу праць, доповідались та обговорювались на 5 Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності в турбомашинобудуванні» (Київ, 2014); 18, 20 та 22 Міжнародних конгресах двигунобудівників (Рибаче, 2013 та Коблеве, 2015, 2017, 2019); 13, 14 та 17 Міжнародних науково-технічних конференціях «Вібрації в техніці та технологіях» (Львів, 2014, 2018 та Дніпро, 2015); 14 Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання» (Суми, 2014); 21 Міжнародній конференції «Engineering Mechanics 2015» (Свратка, Чеська Республіка, 2015); 15 Міжнародній конференції «Power system engineering, thermodynamics & fluid flow» (Плзень, Чеська Республіка, 2016); 23, 25 та 26 Міжнародних конгресах акустики та вібрації (Афіни, Грецька Республіка, 2016, Хіросіма, Японська держава, 2018 та Монреаль, Канада, 2019); Міжнародній конференції Multiphysics 2018 (Краків, Республіка Польща, 2018)

В рамках виконання зазначених робіт, автори захистили 3 дисертаційні роботи на здобуття ступеня кандидата технічних наук за темами:

1. «Вплив умов спряження бандажованих лопаток на коливання їх вінців як систем з циклічної симетрією» (К.В. Савченко, 2017 р.);
2. «Визначення границі стійкості лопаткових вінців осьових компресорів ГТД до дозвукового флатеру при великих кутах атаки» (С.М. Кабанник, 2018 р.).
3. «Демпфірування нестационарних коливань електров'язкопружних елементів композитних конструкцій» (О.Л. Деркач, 2019 р.).

Детально охарактеризуємо **найважливіші** здобутки циклу наукових праць «Розвиток методів забезпечення вібраційної надійності систем з конструктивною симетрією та їх складових»:

Дослідження впливу умов спряження бандажних полиць лопаток на статичний напружений стан і параметри коливань їх вінців як систем з циклічної симетрією.

К.В. Савченком запропоновано скінченноелементні моделі робочих лопаток та вінців і граничних умов з врахуванням конструктивних особливостей, які дозволяють з високою точністю оцінити їх напружений стан з врахуванням впливу конструктивно-технологічних факторів і умов експлуатації, характерних для основних режимів роботи двигуна.

Встановлено закономірності впливу кута нахилу контактних поверхонь полиць і температурно-силових факторів на контактний тиск та інтенсивність напружень в бандажній полиці і пері лопатки. Показано, що 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. 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. 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.

Показано, що лінеаризація контактної взаємодії досліджуваних 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 досліджуваних лопаткових вінців і визначити спектр їх власних частот коливань. При цьому збільшення величини кута нахилу контактних поверхонь бандажних полиць незалежно від їх типу і дії температурно-силових факторів призводить до зростання власних частот коливань вінців. Збільшення швидкості обертання робочого колеса призводить до підвищення, а температури – зниження власних частот коливань лопаткових вінців у всьому діапазоні зміни кута нахилу контактних поверхонь. При цьому характер розподілу частотних функцій не змінюється.

На підставі розрахунково-експериментальних досліджень вимушених коливань моделі пари лопаток визначено залежності амплітуд відносних вібронапружень лопаток від кута нахилу контактних поверхонь бандажних полиць в широкому діапазоні його зміни. Встановлено, що збільшення рівня збудження коливань призводить до зростання значень амплітуд відносних вібронапружень. При цьому їх максимум спостерігається при частоті, що наближається до власної частоти коливань робочої лопатки. 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.

Визначення границі стійкості лопаткових вінців до дозвукового флатеру.

С.М. Кабанником досліджено закономірності впливу кута атаки набігаючого дозвукового потоку та приведеної частоти коливань лопаток на динамічну стійкість лопаткових вінців осьових компресорів авіаційних двигунів до дозвукового флатеру.

За результатами проведеного комплексу експериментально-розрахункових досліджень з використанням прямої компресорної решітки лопаткових профілів було сформовано базу даних критичних значень приведеної частоти коливань консольних лопаток осьових компресорів авіаційних

двигунів в широкому діапазоні параметрів решітки, а саме: відносного кроку 0,7 ... 1,3, кута виносу 0 ... 60° і коефіцієнта згинно-крутильної зв'язаності лопаток 0 ... 0,5 для кутів атаки -10 ... 20°.

На основі отриманих даних розроблено алгоритм та програмне забезпечення реалізації експрес-методу прогнозування динамічної стійкості консольних лопаток компресорних ступеней авіаційних двигунів до дозвукового флатеру для першої згинної форми коливань лопаткових вінців в діапазоні кута атаки -10° ... 20°, який дозволяє на початковій стадії проектування здійснювати оптимальний вибір значень приведеної частоти коливань лопаток і їх робочих кутів атаки для заданої геометрії периферійних перерізів лопаткових вінців по умові виникнення дозвукового флатеру.

Достовірність встановлених критеріальних залежностей впливу кута атаки та приведеної частоти коливань на динамічну стійкість лопаткових вінців осьових компресорів, розроблених експрес-методу прогнозування її границі та науково-технічного продукту його реалізації підтверджена прикладами їх апробації стосовно окремих типів сучасних авіаційних двигунів та результатами порівняння з даними експериментально-розрахункових досліджень і натурних випробувань, що є підставою для рекомендації для практичного використання на початковій стадії проектування лопаткових вінців осьових компресорів.

Розробка методів активного і пасивного демпфірування коливань елементів конструкцій композитної структури.

О.Л. Деркач розробив моделі композитного матеріалу багатошарової структури за допомогою яких одержано визначальні рівняння квазіоднорідного електров'язкопружного середовища, яке характеризується ефективними пружними, п'єзоелектричними та діелектричними комплексними модулями, що відображають його частотно-залежне розсіювання енергії в матеріалі. З використанням розроблених моделей матеріалу було проведено аналіз демпфірування коливань конструктивних елементів з в'язкопружних і електров'язкопружних шаруватих композитів, які полягають у встановленні закономірностей впливу параметрів їх структури на ефективність пасивного і активного демпфірування нестационарних коливань багатошарових стержнів і пластин за допомогою п'єзоелектричних актуаторів при мінімальному рівні напруженості їх електричного поля. Так, показано, що за рахунок вибору оптимального кута армування середнього в'язкопружного шару пластини можливо підвищити її декремент коливань, а для тонкого композитного стержня з електров'язкопружною накладкою показано його монотонне зростання зі збільшенням напруженості електричного поля п'єзоелектричного актуатора, що підтверджено результатами експериментальних випробувань.

За результатами проведених досліджень гібридного демпфірування коливань багатошарових пластин, яке полягає у сумісному використанні активних п'єзоелектричних елементів і пасивних шарів в'язкопружного матеріалу з високими дисипативними властивостями, встановлено закономірності впливу параметрів активного демпфірування на характер частотно-залежного розсіювання енергії їх нестационарних коливань при дії імпульсного силового навантаження. Показано, що у випадку пасивного демпфірування залеж-

ність декременту коливань від частоти монотонна, тоді як при активному демпфіруванні коливань вона має екстремальні значення, величина яких залежить від напруженості електричного поля актуатора і швидкості його зміни, що визначається параметрами активного демпфірування. Так, встановлено, що пікові значення декременту коливань при збільшенні рівня активного демпфірування зміщуються в низькочастотний діапазон коливань. У той же час, ширина частотного діапазону коливань на якому забезпечується відносно високий рівень їх активного демпфірування при цьому зменшується. Встановлено закономірності впливу розсіювання енергії в п'єзоелектричних накладках і приєднаних до них електричних шунтах на зменшення амплітуд нестационарних коливань композитних стержнів при їх пасивному та активному демпфіруванні нестационарних коливань.

З використанням розроблених моделей і методів аналізу демпфірування коливань структурно-неоднорідних конструктивних елементів та їх систем було проведено розрахункове дослідження вільних коливань композитних лопатей ротора вітрогенератора у полі відцентрових сил за результатами яких було сформульовано рекомендації щодо величини проектних параметрів лопаті – товщини її обшивки та кута між волокнами перехресно армованого композиту, які б забезпечили прогнозований рівень розсіювання енергії коливань та вібраційну міцність вітрогенераторної установки.

Отримані у циклі праць результати відповідають сучасному рівню світових досягнень у галузі матеріалознавства та двигунобудування, що підтверджено публікаціями у провідних наукових журналах в Україні та за кордоном.

Розробки авторів пройшли апробацію в реальних умовах експлуатації. Зокрема, результати досліджень впливу параметрів контактної взаємодії робочих лопаток на напружений стан і вимушені коливання їх вінців використані при вивченні причин руйнування лопатки маршового вертолітного двигуна, що підтверджується відповідними документами (Довідка про використання результатів роботи № 56/543-8 від 23.11.2016).

Для потреб Державного підприємства «Івченко-Прогрес» Державного концерну Укроборонпром у відповідності до договорів про науково – технічне співробітництво (№ 8/2009 від 23.12.2009 р. і №33/19-НИО від 01.05.2019 р.) було прийнято участь у розробці експрес - методу прогнозування динамічної стійкості лопаткових вінців осьових компресорів (Довідка про використання результатів роботи № 56/315-8 від 19.07.2018).

Результати проведених досліджень пасивного і активного демпфірування коливань структурно-неоднорідних конструктивних елементів були використані при розробці рекомендацій для проектування і модернізації композитних лопатей турбіни вітрогенератора ВЭУ-0020 при виконанні робіт в рамках співпраці Чернігівського національного технологічного університету з Інститутом транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг» у 2016-2018 роках (Довідка № 202/08-1695 від 18.10.2018).

Висновки. Підсумовуючи результати роботи, можна стверджувати, що в циклі наукових праць «Розвиток методів забезпечення вібраційної надійності систем з конструктивною симетрією та їх складових» представлено ре-

зультати досліджень 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 для забезпечення вібраційної надійності робочих лопаток з метою подовження ресурсу їх експлуатації.

Претенденти:

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

К.В. Савченко

кандидат технічних наук,
науковий співробітник
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

С.М. Кабанник

кандидат технічних наук,
науковий співробітник
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

О.Л. Деркач