

18. Бобало, Ю. Я. Моніторинг об'єктів в умовах апріорної невизначеності джерел інформації. Теорія і практика [Текст] / Ю. Я. Бобало, Ю. Г. Даник, Л. О. Комарова, О. О. Лук'янов, В. М. Максимович, О. О. Писарчук, Ю. Б. Сторонський, Б. М. Стрихалюк. – Львів: Коло, 2014. – 252 с.
19. Yoo, W. Network Bandwidth Utilization Forecast Model on High Bandwidth Network [Text] / W. Yoo, A. Sim // 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). – Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2015. – P. 494–498. doi:10.1109/icnc.2015.7069393
20. Zaman, F. A recommender system architecture for predictive telecom network management [Text] / F. Zaman, G. Hogan, S. Der Meer, J. Keeney, S. Robitzsch, G. Muntean // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, № 1. – P. 286–293. doi:10.1109/mcom.2015.7010547
21. Mirza, M. A machine learning approach to TCP throughput prediction [Text] / M. Mirza, J. Sommers, P. Barford, X. Zhu // Proceedings of the 2007 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems – SIGMETRICS '07. – June 2007. – Vol. 35, № 1. – P. 97–108. doi:10.1145/1254882.1254894
22. Сажин, Ю. В. Анализ временных рядов и прогнозирование [Текст] / Ю. В. Сажин, А. В. Катынь, Ю. В. Сарайкин. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2013. – 192 с.
23. Четыркин, Е. М. Статистические методы прогнозирования [Текст] / Е. М. Четыркин. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
24. ITU-T Recommendation M.3010 Principles for a telecommunications management network [Text]. – Approved 2000-02-04. – Geneva: ITU, 2000. – 44 p.
25. Chapman, M. TB_MDC.018_1.0_94. Overall Concepts and Principles of TINA [Electronic resource] / M. Chapman, S. Montesi. – Telecommunications Information Networking Architecture Consortium, 17th Feb. 1995. – Available at: \www/URL: http://www.tinac.com/specifications/documents/overall.pdf

В даній статті представлена методика розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору, ґрунтуючись на методі гідрогазодинамічних аналогій, а також сформовано узагальнені залежностей розрахунку параметрів комплексного резонатору. Представлена методика дозволяє отримати взаємозв'язки параметрів комплексного акустичного резонатору. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні систем керування відривними течіями в лопаткових вінцях турбомашин

Ключові слова: ступінь осьового вентилятора, комплексний акустичний резонатор, коливальний контур, газодинамічні аналогії, відривні течії

В статтє представлена методика расчета параметров комплексного резонатора, основываясь на методе гидрогазодинамических аналогий, а также сформированы обобщенные зависимости расчета параметров комплексного резонатора. Представленная методика позволяет получить взаимосвязь между параметрами комплексного акустического резонатора. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем управления отрывными течениями в лопаточных венцах турбомашин

Ключевые слова: степень осевого вентилятора, комплексный акустический резонатор, колебательный контур, газодинамические аналогии, отрывные течения

УДК 629.735.03:621.43.031.3:681.84.086 (045)
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.46500

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСНОГО АКУСТИЧНОГО РЕЗОНАТОРУ

М. Ю. Богданов

Старший викладач*

E-mail: BogdanovNY@gmail.com

Ф. І. Кірчу

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: fkirchu@gmail.com

*Кафедра авіаційних двигунів
Національний авіаційний університет
пр. Космонавта Комарова, 1,
м. Київ, Україна, 03058

1. Вступ

Ефективність осьових вентиляторів та компресорів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) є однією з важливих умов, що визначають їх надійність та рівень безпеки польотів [1]. Нестійкість роботи ступеня осьового вентилятора (ОВ) в системі двигуна є при-

чиною зменшення ефективності останнього, а також є причиною інтенсивних коливань тиску робочого тіла в проточній частині ГТД.

Першоджерелом зменшення ефективності ступенів вентиляторів є відрив потоку в міжлопаткових каналах. В першу чергу відрив потоку локалізується на стінках аеродинамічного профілю та по мірі зміни

режиму роботи двигуна поступово збільшується, формуючи тим самим обширні зони вихроутворення [2].

Одним із шляхів аеродинамічного вдосконалення ступенів осьових вентиляторів (ОВ) у вирішенні загальної проблеми підвищення ефективності транспортних та стаціонарних ГТД є використання методів керування зривом потоку в лопаткових вінцях. Аналіз попередніх досліджень показав, що одним з основних напрямків аеродинамічного вдосконалення лопаткових машин є застосування методів активного та пасивного керування обтікання лопаткових вінців для усунення явища відриву потоку та зниження рівня втрат, що обумовлені не розрахунковим обтіканням лопаток і аеродинамічними слідами в проточній частині ступенів ОВ [3].

На даний час техніки пасивного керування відривними течіями в ОВ, що представлені у вигляді пористих матеріалів, абсорбуючих поверхонь та акустичних резонаторів, представляють значний науково-практичний інтерес [4]. Пористі матеріали та абсорбуючі поверхні, як правило, використовують для усунення коливань низькочастотного характеру [5]. Проте дослідження [6] показують, що при взаємодії відривних течій за робочим колесом (РК) та спрямляючим апаратом (СА) ступенів утворюється інтегральна відривна течія, що містить, як високочастотну так і низькочастотну складову коливань. Тому для запобігання явища відриву потоку в ступенях ОВ необхідно використовувати комплексний підхід, що з рівною ефективністю буде впливати на високочастотні та низькочастотні складові коливань [7].

Такий підхід може бути досягнений за рахунок застосування системи керування відривними течіями, що включає у свій склад комплексний акустичний резонатор.

Комплексний акустичний резонатор складається з двох послідовно з'єднаних акустичних порожнин, одна з яких налаштована на високочастотну складову, а інша на низькочастотну складову поля коливань.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Осьові вентилятори та осьові компресори (ОК) широко використовуються як в авіаційних газотурбінних двигунах, так і в стаціонарних газотурбінних установках відкритого і закритого циклів. Питання удосконалення їх характеристик було і залишається актуальним, адже його вирішення, посприє не тільки зменшенню витрат на виготовлення та підтримку працездатності вузлів, а й дозволить використовувати їх з максимальною ефективністю.

Техніки пасивного керування відривними течіями передбачають перерозподіл енергії в потоці без внесення додаткової енергії з інших джерел. Пасивні способи управління течією у лопатках ОВ та ОК, знаходять більш широке застосування в порівнянні з активними способами керування, оскільки не вимагають додаткових джерел енергії. Одним з методів пасивного впливу є використання дворядних лопаткових вінців, щільних пристроїв і поздовжніх канавок, турбулізаторів, пристроїв руйнування вихорів та генераторів вихорів [8].

Для покращення показників ефективної роботи ступеня ОК, поглиблено вивчаються та досліджують-

ся стратегії пасивного керування, що передбачають застосування щільних пристроїв [6, 9, 10]. Метою використання щільних пристроїв є перерозподіл градієнтів тиску далі від вхідної кромки робочої лопатки, зменшення інтенсивності вихроутворення та погашення оберткової нестабільності.

Дослідження по застосуванню вісесиметричних щільних показує хороші результати керування лінією відриву, але з погіршенням показників ефективності. Імпульс щільного пристрою обмежений незначним покращенням експлуатаційних характеристик, близько 6 %.

Метод пасивного керування з використанням поздовжніх канавок показує кращі результати стабільної роботи ступеня на 8 % без втрат ефективності. Недоліками даних робіт є їх частковість, тобто дослідники застосовують лише одну форму каналу або щільни, лише одне розміщення щільних пристроїв, по якому і проводять розрахунки та роблять висновки. Однак, складний та багатофакторний механізм інтерференції відривних потоків вимагає проведення комплексних досліджень, із застосуванням низки геометричних параметрів та варіації, а тому проведені дослідження потребують більшої деталізації та глибини вивчення.

Також, для запобігання відриву потоку, можна застосовувати метод «розрізних лопаток», що передбачає використання одного чи багатьох щільних каналів на лопатці ОВ [11]. Результатами застосування таких щільних є збільшення ККД. Недоліком проведеного дослідження є застосування обмеженої кількості геометричних параметрів для розрахунків. Детальний вплив щільних на потік в міжлопатковому каналі не досліджувався.

Турбулізатори являють собою спроектовані фізичні перешкоди для прискорення або зміни природи потоку та його трансформації. Така трансформація потоку можлива за допомогою розміщення, наприклад, плоских пластинок на поверхні [12]. Турбулізатори встановлюються перед лінією можливого зриву потоку для перешкодження його утворенню. Складність використання даного методу полягає у необхідності максимально уникати надмірної товщини примежового шару. Результати експериментальних та чисельних досліджень [13] показали зменшення зони відриву. Розрахунки проводилися при фіксованих одиничних значеннях чисел Рейнольдса. Застосування турбулізаторів на аеродинамічних поверхнях при низьких числах Рейнольдса дасть змогу покращити характеристики профілів, однак застосування даного методу для аеродинамічних поверхонь з низьким опором та низькими числами Рейнольдса є неефективним.

Пристрої руйнування вихроутворень, відомі як «LEBU», розроблені для руйнування значних вихроутворень, що формуються на краях турбулентних примежових зон. Зазвичай, такі пристрої мають вигляд скупчень невеликих аеродинамічних профілів [14] або плоских поверхонь [15]. За результатами чисельних досліджень встановлено механізм впливу «LEBU» на турбулентну течію. Зроблено висновок про значне зниження в'язкого тертя та послаблення турбулентних пульсацій, але позитивний результат спостерігається лише при малих числах Рейнольдса, що не є актуальним по відношенню до їх практичного застосування.

Однією з важливих умов покращення характеристик турбомашин є запобігання або розширення меж зриву потоку. Генератори вихорів, що є ще одним методом пасивного управління пограничним шаром, як і турбулізатори, встановлюються перед лінією можливого зриву потоку. Часто розміщуються парно та утворюють вихори, що обертаються в протилежних або однакових напрямках, внаслідок чого утворюється потік з високим обертним моментом, який взаємодіє з прилеглим шаром. Розрізняють механічні і струменеві генератори вихорів.

Проведені дослідження по вивченню впливу генераторів вихорів на характеристики ступенів [16, 17], дозволяють зробити висновки про те, що їх використання дозволяє збільшити ступінь підвищення тиску на 2%, ККД на 5–7%. Однак, такі результати досягаються при умові оптимального місця розташування генераторів вихорів на поверхні профілю. Визначення місця розташування, кількість та реальні геометричні параметри генератора вихорів доцільно розглянути в подальшому дослідженні.

Підсумовуючи результати аналізу методів управління примежовим шаром, можна зробити висновок про те, що застосування пасивних методів має безпосередній вплив на енергетичні параметри ступенів ГТД. Проте враховуючи загальну картину течії ступенів ОВ та ОК використання одного методу управління є недостатнім, оскільки характеризується обмеженим діапазоном ефективності, тому виникає необхідність у формуванні комплексного підходу усунення відричних течій.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної статті є формування методики розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору.

З поставленої мети витікають задачі дослідження, що зводяться до наступного:

- сформулювати узагальнені залежності розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору;
- визначити взаємозв'язок між параметрами комплексного акустичного резонатору.

4. Розробка узагальнених залежностей розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору

Для розробки узагальнених залежностей комплексного акустичного резонатору проведемо аналогію між акустичними та електричними елементами системи. Так, ґрунтуючись на методі газодинамічних аналогій для електричної та акустичної систем, можемо записати наступне [18]: сила струму i – аналогічна витраті в середовищі \dot{X} , електрорушійна сила ЕРС – аналогічна тиску P , електричний опір R_{eO} – аналогічний акустичному опору R_{aO} , індуктивність $L_{кат}$ – аналогічна

акустичній масі M_{aM} , акустична ємність C_{aE} – аналогічна електричній ємності C_{eE} .

Комплексний акустичний резонатор буде формуватись з послідовно з'єднаних рециркуляційних порожнин, одна з яких налаштована на високочастотні коливання, інша – на низькочастотні (рис. 1).

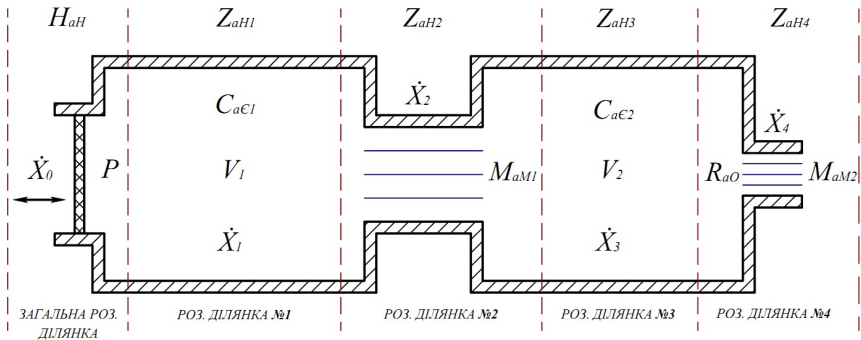


Рис. 1. Розрахункові ділянки комплексного акустичного резонатору

Відповідно до акустичної, електрична система буде формуватись у вигляді еквівалентного електричного коливального контуру (рис. 2, а). Частота власних коливань комплексного акустичного резонатору буде мати вигляд (рис. 2, б).

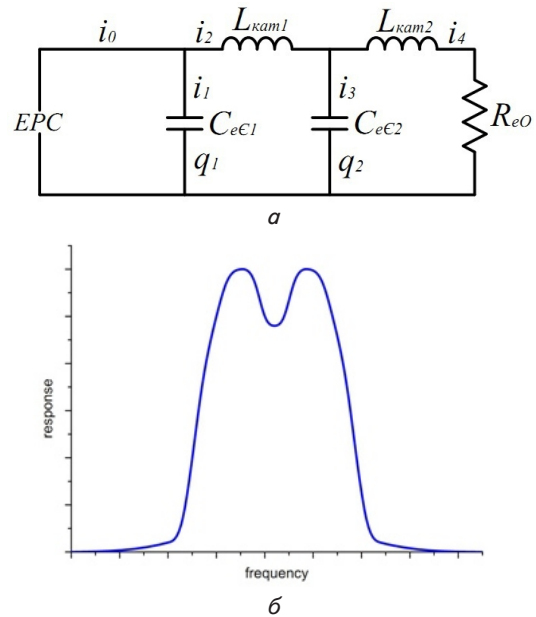


Рис. 2. Електричний контур комплексного резонатору: а – еквівалентний електричний контур; б – частота власних коливань резонатору

Для елементів системи зображених на (рис. 1, 2) аналогічними будуть: індуктивність $L_{кат1}$ до акустичної маси M_{aM1} , індуктивність $L_{кат2}$ до акустичної маси M_{aM2} , електрична ємність C_{eE1} до акустичної ємності C_{aE1} , електрична ємність C_{eE2} до акустичної ємності C_{aE2} та електричний опір R_{eO} до акустичного опору R_{aO} . Також, справедливим буде наступне: i_0, i_1, i_2, i_3 та i_4 , аналогічна до $\dot{X}_0, \dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3$ та \dot{X}_4 .

Наступним етапом буде послідовне формування розрахункових рівнянь ділянок комплексного акустичного резонатору.

тичного резонатору. Так, значення акустичного імпедансу першої ділянки комплексного акустичного резонатору (рис. 1) записується у вигляді [19].

$$Z_{aH1} = \frac{1}{j\omega C_{aC1}}. \quad (1)$$

Для другої розрахункової ділянки, значення акустичного імпедансу має вигляд

$$Z_{aH2} = j\omega M_{aM1}. \quad (2)$$

Для третьої розрахункової ділянки, акустичний імпеданс запишеться формулою

$$Z_{aH3} = \frac{1}{j\omega C_{aC2}}. \quad (3)$$

Для ділянки розміщення щільних пристроїв акустичний імпеданс прийматиме вигляд

$$Z_{aH4} = R_{aO} + j\omega M_{aM2}. \quad (4)$$

Загальний імпеданс комплексного акустичного резонатору відповідно до [20, 21] записується у вигляді

$$H_{aH} = Z_{aH1}Z_{aH3}Z_{aH4} + Z_{aH1}Z_{aH2}(Z_{aH3} + Z_{aH4}). \quad (5)$$

Значення витрати розрахункових ділянок комплексного акустичного резонатору (рис. 1), для першої розрахункової ділянки записується у вигляді

$$\dot{X}_1 = \frac{P[Z_{aH2}(Z_{aH3} + Z_{aH4}) + Z_{aH3}Z_{aH4}]}{H_{aH}}. \quad (6)$$

Витрата другої розрахункової ділянки записується рівнянням

$$\dot{X}_2 = \frac{PZ_{aH1}(Z_{aH3} + Z_{aH4})}{H_{aH}}. \quad (7)$$

Витрата третьої розрахункової ділянки приймає вигляд

$$\dot{X}_3 = \frac{PZ_{aH1}Z_{aH4}}{H_{aH}}. \quad (8)$$

Витрата четвертої ділянки розміщення щільних пристроїв записується рівнянням

$$\dot{X}_4 = \frac{PZ_{aH1}Z_{aH3}}{H_{aH}}. \quad (9)$$

Загальна витрата комплексного акустичного резонатору відповідно до рекомендацій [22] приймає вигляд

$$\dot{X}_0 = \frac{P[(Z_{aH1} + Z_{aH2})(Z_{aH3} + Z_{aH4})Z_{aH3}Z_{aH4}]}{H_{aH}}. \quad (10)$$

Наступним етапом формування узагальнених залежностей буде підстановка до рівнянь визначення імпедансів розрахункових ділянок (1)–(4), та до рівняння загального імпедансу комплексного акустичного резонатору (5) значень акустичної ємності C_{aC} , акустичної маси M_{aM} та акустичного опору R_{aO} [23].

Так, для першої розрахункової ділянки акустичний імпеданс (1) буде набувати вигляду

$$Z_{aH1} = \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 1}}, \quad (11)$$

де $V_{\Pi 1}$ – об'єм першої рециркуляційної порожнини, $[M^3]$.

Для другої розрахункової ділянки значення акустичного імпедансу записується у вигляді

$$Z_{aH2} = \frac{2j f_{\Pi} \rho h_r}{r_r^2}. \quad (12)$$

Акустичний імпеданс третьої розрахункової ділянки записується аналогічно до (11)

$$Z_{aH3} = \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}}, \quad (13)$$

де $V_{\Pi 2}$ – об'єм другої рециркуляційної порожнини, $[M^3]$.

Акустичний імпеданс четвертої розрахункової ділянки, враховуючи (2) записується у вигляді

$$Z_{aH4} = \frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2}. \quad (14)$$

Виходячи з (11)–(14), загальний імпеданс ко

$$H_{aH} = \frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 V_{\Pi 1} V_{\Pi 2}} \left(\frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2} \right) + \frac{2j f_{\Pi} \rho^2 h_r}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 1} r_r^2} \left[\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} + \left(\frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2} \right) \right]. \quad (15)$$

Наступним кроком у формуванні узагальнених залежностей комплексного акустичного резонатору буде підстановка значень акустичних імпедансів (11)–(15).

Витрата першої розрахункової ділянки (6) записується наступним чином

$$\dot{X}_1 = \frac{P \left[\frac{2j f_{\Pi} \rho h_r}{r_r^2} \left(\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} + \left(\frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2} \right) \right) + \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} \left(\frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2} \right) \right]}{\frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 V_{\Pi 1} V_{\Pi 2}} \left(\frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2} \right) + \frac{2j f_{\Pi} \rho^2 h_r}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 1} r_r^2} \left[\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} + \left(\frac{12\mu a_{\Pi}}{c_{\Pi}^3 b_{\Pi}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_{\Pi}}{r_{\Pi}^2} \right) \right]}. \quad (16)$$

Витрата другої розрахункової ділянки (7) записується у вигляді формули

$$\dot{X}_2 = \frac{p \cdot \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1}} \cdot \left(\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} + \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right)}{\frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 v_{n1} v_{n2}} \cdot \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) + \frac{2j f_{\Pi} \rho^2 h_r}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1} r_r^2} \cdot \left[\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} + \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right]} \cdot (17)$$

Витрата третьої розрахункової ділянки (8) приймає вигляд

$$\dot{X}_3 = \frac{p \cdot \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1}} \cdot \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right)}{\frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 v_{n1} v_{n2}} \cdot \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) + \frac{2j f_{\Pi} \rho^2 h_r}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1} r_r^2} \cdot \left[\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} + \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right]} \cdot (18)$$

Витрата четвертої розрахункової ділянки (9) записується залежністю

$$\dot{X}_4 = \frac{p \cdot \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1}} \cdot \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}}}{\frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 v_{n1} v_{n2}} \cdot \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) + \frac{2j f_{\Pi} \rho^2 h_r}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1} r_r^2} \cdot \left[\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} + \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right]} \cdot (19)$$

Загальна витрата комплексного акустичного резонатору (10) записується у вигляді

$$\dot{X}_1 = \frac{p \cdot \left[\left(\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1}} + \frac{2j f_{\Pi} \rho h_r}{r_r^2} \right) \cdot \left(\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} + \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right) \cdot \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} \cdot \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right]}{\frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 v_{n1} v_{n2}} \cdot \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) + \frac{2j f_{\Pi} \rho^2 h_r}{2\pi j f_{\Pi} v_{n1} r_r^2} \cdot \left[\frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} v_{n2}} + \left(\frac{12\mu a_m}{c_m^3 b_m} + \frac{2j f_{\Pi} \rho c_m}{r_m^2} \right) \right]} \cdot (20)$$

Отже, (11)–(15) та (16)–(20) є узагальненими залежностями комплексного акустичного резонатору.

На основі вище представлених рівнянь, за допомогою систем автоматичного проектування (САПР), було розроблено твердотілу модель комплексного акустичного резонатору для ступеня ОВ (рис. 3), що складається з надстаторного кільця 1, яке в свою чергу пов'язане з акустичними порожнинами в тілі спрямляючої лопатки 3, за допомогою рециркуляційних каналів 2. На поверхні спрямляючої лопатки ступеня ОВ розміщено ряд щілинних пристроїв 4, які забезпечують всмоктування чи видув робочого тіла з системи.

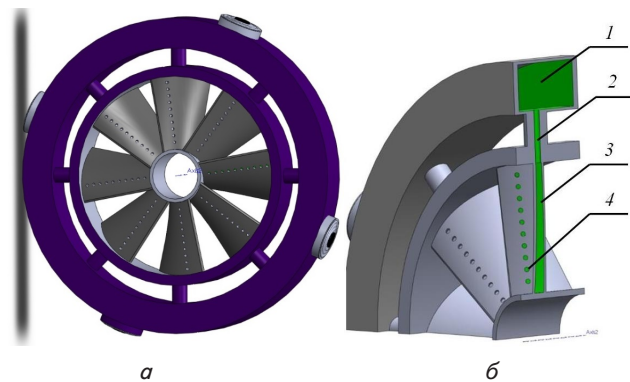


Рис. 3. Вінець спрямляючих лопаток ступеня ОВ з комплексним акустичним резонатором: а – загальний вигляд; б – розріз лопаткового вінця

Вінець спрямляючих лопаток з комплексним акустичним резонатором (рис. 3) забезпечує ефективність керування відривними течіями в діапазоні високочастотних та низькочастотних коливань, що значно розширює режим його ефективної експлуатації. Для узгодження режиму роботи резонатору та частотних характеристик ступеня ОВ може застосовуватись контур адаптації, що представляє собою розміщений на поверхні надстаторного кільця рушійний елемент. Таким чином, змінюючи амплітуду та частоту коливань рушійного елемента, можна забезпечити необхідні параметри комплексного акустичного резонатору.

5. Визначення взаємозв'язку між параметрами комплексного акустичного резонатору

Апробація узагальнених залежностей комплексного акустичного резонатору показує наступний взаємозв'язок її елементів:

при збільшенні частоти коливань f системи, акустичний імпеданс надстаторного кільця Z_{aH1} зменшується, акустичний імпеданс горла Z_{aH2} зростає, акустичний імпеданс в тілі спрямляючої лопатки Z_{aH3} зменшується, акустичний імпеданс щілинних пристроїв Z_{aH4} збільшується, загальний імпеданс системи H_{aH} також зростає (рис. 4).



Рис. 4. Вплив частоти коливань на імпеданси ділянок резонатору

Так, при збільшенні значення частоти коливань f адаптивної системи, спостерігається зменшення витрати на всіх розрахункових ділянках (рис. 5). Також слід зауважити, що при збільшенні частоти коливань f , значення витрати горла системи \dot{X}_2 та рециркуляційної порожнини в тілі спрямляючої лопатки \dot{X}_3 відрізняються на соті долі цілого числа, тобто $\dot{X}_2 \approx \dot{X}_3$. Дослідження значень витрати надстаторного кільця \dot{X}_1 та витрати рушійного елемента \dot{X}_0 , показують також незначні зміни їхніх значень, тобто $\dot{X}_0 \approx \dot{X}_1$.

З проведеного вище аналізу можна зробити висновок, що зміною витрати загальної розрахункової ділянки \dot{X}_0 можна задавати необхідну амплітуду та частоту роботи системи керування відривними течіями. Така конструкція системи дозволить застосову-

вати комплексний акустичний резонатор в системах автоматики для запобігання явища відриву потоку в лопаткових вінцях турбомашин.



Рис. 5. Вплив частоти коливань на витрати ділянок резонатору

6. Обговорення результатів розробки методики розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору

Розроблена методика розрахунку параметрів та характеристик елементів коливального контуру комплексного акустичного резонатору може застосовуватись для розрахунку систем керування відривними течіями на етапі їхнього проектування. Також методика може бути адаптована для формування та розрахунку ефективності впливу періодично-імпульсних систем керування відривними течіями в лопаткових вінцях турбомашин.

Представлені узагальнені залежності розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору для керування відривними течіями дозволяють розрахувати ділянки резонатору змінної геометрії. Оскільки картина течії в лопаткових вінцях турбомашин характеризується частотою коливань, що обумовлена нерівномірністю поля розподілу значень повного тиску та осевої швидкості, то значення цих коливань повинні враховуватись при проектуванні комплексного акустичного резонатору. Приймаючи значення частоти власних коливань, за наведеними узагальненими залежностями (рівняння (15)–(20)) можна знайти значення геометричних параметрів комплексного акустичного резонатору. У випадку коли геометричні параметри

резонатору не задовольняють конструктивні вимоги ступеня ОВ та не забезпечують безвідривності потоку, тоді, для узгодження режиму роботи резонатору та характеристик ступеня ОВ, може застосовуватись контур адаптації, що представляє собою розміщений на поверхні надстаторного кільця рушійний елемент.

Результати дослідження визначають рівень впливу резонатору на газодинамічні параметри течії в ступенях ОВ.

Для верифікації та апробації математичної моделі та сформованих узагальнених залежностей комплексного акустичного резонатору, в майбутніх дослідженнях доцільно провести чисельний та натурний експеримент.

7. Висновки

Отже, в роботі представлено розробку методики розрахунку геометричних параметрів та характеристик елементів коливального контуру комплексного акустичного резонатору, що може використовуватись для керування відривними течіями в ступені ОВ. Особливістю методики розрахунку є те, що з її використанням можна розраховувати ділянки акустичних резонаторів змінної геометрії, також на її основі можуть розроблятися та розраховуватись періодично-імпульсні системи керування відривними течіями.

Представлені узагальнені залежності розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору, що дозволяють розраховувати резонатор на задані імпульси, витрати та частоти власних коливань.

Відповідно до геометричних параметрів, що були розраховані ґрунтуючись на узагальнених залежностях, засобами САПР розроблено твердотілу модель лопаткового вінця спрямляючих лопаток ступеня ОВ.

За результатами апробації узагальнених залежностей наведено взаємозв'язок між геометричними параметрами комплексного акустичного резонатору та значеннями частоти коливань в ступені ОВ.

Література

1. Kweder, J. Experimental Evaluation of an Internally Passively Pressurized Circulation Control Propeller [Text] / J. Kweder, Cale H. Zeune, J. Geiger, A. Lowery, J. Smith // Journal of Aerodynamics. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–10. doi: 10.1155/2014/834132
2. Шлихтинг, Г. Ю. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Ю. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 713 с.
3. Shafer, D. M. Active and passive flow control over the flight deck of small naval vessels [Text] / D. M. Shafer // 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2005. doi: 10.2514/6.2005-5265
4. Lupea, I. Considerations on the Helmholtz resonator simulation and experiment [Text] / I. Lupea // Proceedings of the Romanian academy. – 2012. – Vol. 12, Issue 2. – P. 118–124.
5. Singh, D. K. Systematic Impedance Model for Non-Linear Helmholtz Resonator Liner [Text] / D. K. Singh, S. W. Rienstra // 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2013. doi: 10.2514/6.2013-2223
6. Shimizu, T. Slit Resonator Design and Damping Estimation in Linear and Non-linear Ranges [Text] / T. Shimizu, D. Hori, K. Kitamura, Y. Daimon, A. Oyama, // 41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2011. doi: 10.2514/6.2011-3261
7. Kinsler, L. E. Fundamentals of Acoustics. Chaps 10 [Text] // L. E. Kinsler. – New York, John Wiley & Sons, 2000. – P. 272–301.
8. Богданов, М. Ю. До питання застосування пасивних методів управління пограничним шаром для зменшення вторинних втрат в лопаткових вінцях осевого компресора [Текст]: матер. XI міжн. наук.-техн. конф. / М. Ю. Богданов, Е. П. Ясиницький, В. М. Охмакевич, В. М. Нікітіна, М. І. Кінащук // „ABIA-2013”. – 2013. – Т. 3. – С. 14.5–14.8.
9. Cerfacs, N. G. Unsteady simulation of axial compressor stage with passive control strategies [Text] / N. G. Cerfacs // Journal of Turbomachinery. – 2009. – Vol. 131, Issue 2. – P. 021013. doi: 10.1115/1.2988156
10. Smith, A. E. Evaluation of boundary layer flow control methods for aero-optic mitigation [Text] / A. E. Smith, S. Gordeyev // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013. doi: 10.2514/6.2013-718
11. Бунимович, А. И. Некоторые результаты экспериментального исследования плоских компрессорных решеток [Текст] / А. И. Бунимович, А. А. Святогоров // Труды ЦИАМ. – 1955. – № 307. – С. 16–30.

12. Поплавская, Т. В. Интерференционный метод управления развитием возмущений в ударном слое на пластине [Текст]: межд. конф. / Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский, А. А. Маслов, С. Г. Миронов, И. С. Цырюльников // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика, 2011. – С. 306–311.
13. Терещенко, Ю. М. Моделирование течения на пластине с турбулизатором [Текст] / Ю. М. Терещенко, И. А. Ластивка, Л. Г. Волянская, Е. В. Дорошенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 5. № 8 (53). – С. 56–58. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1280/1181>
14. Бородулин, В. И. Универсальный механизм порождения пристенной турбулентности и детерминированная турбулентность [Текст] / В. И. Бородулин, Ю. С. Качанов // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (3). – С. 653–655.
15. Корнилов, В. И. Влияние вертикальных устройств разрушения вихрей на аэродинамическое сопротивление плоской пластины [Текст] / В. И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 269–279.
16. Szwaba, R. Shock wave – boundary layer interaction control by air-jet streamwise vortices [Text] / R. Szwaba, P. Flaszynski, J. Szumski, J. Telega // 8th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows Lyon, 2007.
17. Kirilovskiy, S. Study of flow control by localized volume heating in hypersonic boundary layers [Text] / S. Kirilovskiy, P. Polivanov, A. Sidorenko, A. Maslov // CEAS Space Journal. – 2014. – Vol. 6, Issue 3-4. – P. 119–132. doi: 10.1007/s12567-014-0064-y
18. Ingard, U. On the theory and design of acoustic resonators [Text] / U. Ingard // J. Acoustic Soc. Am. 1953. – V. 25 (6). – P. 1037 – 1061.
19. Tijdeman, H. On the propagation of sound waves in cylindrical tubes [Text] / H. Tijdeman // Journal of Sound and Vibration. – 1974. – Vol. 39, Issue 1. – P. 1–33. doi: 10.1016/s0022-460x(75)80206-9
20. Zwikker, C. Sound Absorbing Materials [Text] / C. Zwikker, C. W. Kosten. – Amsterdam, NY, Elsevier, 1949. – Chaps 1-2.
21. Karal, F. C. The analogous acoustical impedance for discontinuities and constrictions of circular cross section [Text] / F. S. Karal // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1953. – Vol. 25, Issue 2. – P. 327–334. doi: 10.1121/1.1907041
22. Ingard, U. Notes On Duct Attenuators (N4) [Text] / U. Ingard. – Self-published, Kittery Point, NE, 1999.
23. Paiva, R. The helmholtz resonator tree [Text] / R. Paiva, V. Valimaki // Proc. of the 15th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-12), York, UK, 2012.

В роботі наведено результати розробки центрального модуля обробки і передачі даних програмно-апаратного комплексу для комп'ютеризації навчального експерименту. Представлено методичку розрахунків аналого-цифрового входного тракту системи. Розроблена система може використовуватись в навчальному експерименті і для розширення можливостей більш дорогого наукового обладнання

Ключові слова: комп'ютеризація, автоматизація, вимірювання, аналого-цифровий перетворювач, датчик, віддалена взаємодія, експеримент

В работе приведены результаты разработки центрального модуля обработки и передачи данных программно-апаратного комплекса для компьютеризации учебного эксперимента. Представлена методика расчетов аналого-цифрового входного тракта системы. Разработанная система может быть успешно использована как в учебном эксперименте, так и для расширения возможностей научного оборудования

Ключевые слова: компьютеризация, автоматизация, измерение, аналого-цифровой преобразователь, датчик, удаленное взаимодействие, эксперимент

УДК 004.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47797

РОЗРОБКА СХЕМИ ПРОГРАМНО- АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Р. Ю. Лопаткін

Кандидат фізико-математичних наук,
доцент, завідувачий*

E-mail: lopatkin@iap.sumy.org

С. М. Ігнатенко

Науковий співробітник

E-mail: mynameissergey@gmail.com

*Науково-дослідний центр

навчально-наукових приладів

Інститут прикладної фізики НАН України

вул. Петропавлівська, 58, м. Суми, Україна, 40000

1. Вступ

Навчальний експеримент в навчальному процесі є основою вивчення природничих наук. Комп'юте-

ризація експерименту розширює обізнаність учнів з досліджуванним фізичним явищем, формує навички і надає їм впевненості під час використання сучасних експериментальних методів, ознайомлює з передови-