



Богданов М. Ю.,  
Кірчу Ф. І.

## ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА СИНТЕТИЧНИХ СТРУМЕНІВ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ВІДРИВНИМИ ТЕЧІЯМИ ТУРБОМАШИН

*В статті наведені особливості використання імпульсно-періодичних систем, що представлені у вигляді генераторів синтетичних струменів та можуть використовуватися для усунення явища відривних течій в лопаткових вінцях турбомашин. Запропоновано використовувати генератор синтетичних струменів із змінною геометрією, що надасть змогу задавати величину частоти власних коливань системи. Налаштування частоти власних коливань системи керування відривом забезпечить розширення діапазону її ефективної роботи, а також збільшить ефективність роботи ступенів турбомашин.*

**Ключові слова:** генератори синтетичних струменів, імпульсні системи, лопаткові вінці, відривні течії, рушійний елемент.

### 1. Вступ

Ефективність газотурбінних двигунів (ГТД) є однією з важливих умов, що визначають надійність та рівень безпеки їх експлуатації в наземному використанні, чи в якості силової установки літака [1]. Нестійка робота осьових вентиляторів (ОВ) в системі двигуна є причиною зменшення ефективності останнього, а також є причиною інтенсифікації коливань параметрів повного тиску та осьової швидкості в тракці двигуна.

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 обтіканням 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 активного керування відривними течіями в ОВ, що представлені у вигляді імпульсно-періодичних методів, рухомих поверхонь, є найбільш перспективними та представляють значний науково-практичний інтерес [4]. Дослідження [5] показують, що відрив потоку в ступенях ОВ має періодичний характер. Інтегральна відривна течія представляє собою взаємодію відривних течій за робочим колесом (РК) та спрямляючим апаратом (СА) ступенів, що містить, як високочастотну, так і низькочастотну складову коливань. Тому використання імпульсно-періодичних систем керування відривними те-

чіями зі змінною геометрією в ступенях ОВ, є дієвим та перспективним методом, що з рівною ефективністю буде впливати на високочастотні та низькочастотні складові коливань [6].

Такий підхід може бути досягнений за рахунок застосування системи керування відривними течіями, що включає у свій склад акустичний резонатор змінної геометрії з рушійним елементом.

Акустичний резонатор змінної геометрії складається з акустичної порожнини, задня стінка якої замінена на рушійний елемент, частоту коливань якого можна задавати засобами керування системи. Також рушійний елемент може переміщуватись в акустичній порожнині, змінюючи її геометричні параметри та, тим самим, задаючи частоту її власних коливань.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Осьові вентилятори та осьові компресори (ОК) знайшли широке використання в турбомашинобудуванні. 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.

Активні техніки керування відривним течіями передбачають перерозподіл енергії в потоці з використанням додаткової енергії з інших джерел. Тому їхнє використання дещо ускладнюється в порівнянні з пасивними техніками керування відривом потоку, оскільки пасивні методи не потребують додаткової енергії з інших джерел. Проте, слід зауважити, що активні техніки мають переваги, до яких можна віднести їх компактність, більшу ефективність та багато режимність [7].

Особлива увага вчених сьогодення сконцентрована в бік досліджень новітніх пристроїв активного керування потоком, тому що їх вивчення та удосконалення надасть змогу не тільки усунути негативні наслідки за

рахунок зміни картини течії, а й повністю контролювати зрив потоку.

Найменш дослідженим, але найбільш перспективним методом активного керування потоком — є метод імпульсної інжекції або вдвуд робочого тіла [8–11]. Раніше даний метод не вивчався через його дороговизну та великі енергетичні затрати, але представляє значний науковий інтерес, що обумовлений його перспективою на даний час. Вчені NASA [12, 13] встановили, що мікродвуд повітря, через пористу стінку заданої геометрії, є ефективним засобом впливу на картину прилежого шару. Під пористою стінкою мається на увазі мікроперфорована поверхня, використовуючи яку можна зменшити можливість сходження потоку. Мікродвуд зменшує коефіцієнт поверхневого тертя на всьому досліджуваному зразку на 40 % та збільшує показники інтегральних характеристик пограничного шару [14]. Недоліком роботи є проведення досліджень для плоскої пластини з мікроотворами, тоді як реальні співвідношення між геометрією отворів і параметрами пограничного шару потребують детального вивчення.

Для подальших досліджень даного питання та можливості розробки нових методів усунення відриву потоку пограничного шару або затягування процесу ламінарно-турбулентного переходу пропонується використовувати пористий матеріал [15]. Дані показують, що при збільшенні коефіцієнта пористості зростає індукований градієнт тиску. Однак, який саме матеріал потрібно застосовувати та яким чином в ньому робити отвори в роботі не визначено.

Дослідженнями щодо ефективності використання пристроїв активного керування потоком: відсмоктування пограничного шару та рухливої стінки, займалися російські вчені [16, 17]. В результаті дослідження встановлено, що енергетичні затрати мінімальні для рухливої сітки, а максимальні — для відсмоктування пограничного шару. Результатами розрахунків, що проводились для профілю NASA 0012 і кута атаки  $\alpha_a = 14^\circ$ , є досягнення безвідривного обтікання та виведення оптимальних параметрів рухливої стінки. Але такі показники справедливі лише за умов використання крилового профілю NASA 0012, обтікаемого з відривом при певних значеннях кута атаки, а тому потрібно розширення досліджуваних меж.

Також проводились дослідження впливу звукової хвилі на можливість управління пограничним шаром. В дослідженні [18] встановлено механізм взаємодії звукової хвилі та течії, внаслідок чого, на початку зони зриву виникають власні нестійкі коливання зсувного потоку. Під дією звукової течії відбувається посилення даних коливань, що призводить до приєднання потоку по всій довжині профілю, а при вимкненні — знову виникає зрив [19]. Подальші дослідження акустичних резонаторів дозволили впливати на потік навіть при їх вимкненні [20]. На даний час відсутні результати дослідження впливу акустичних резонаторів на характеристики ступенів ОБ та ОК, а проведені дослідження стосуються лише аеродинамічних характеристик крила.

Отже, аналіз методів активного управління прилежовим шаром показує, що їх застосування є більш ефективним в порівнянні з пасивними техніками. Але інтегральність відривних течій в ступенях ОБ ставить перед методом керування вимогу до адаптивної складової та наявності зворотного зв'язку. Адаптивна складова в запропонованій конструкції акустичного резонатора

змінної геометрії потребує формування методики налаштування його параметрів та формуванню узагальнених залежностей їх розрахунку.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є акустичний резонатор змінної геометрії.

Метою даної статті є представлення методики налаштування параметрів рушійного елемента.

Задачею даної статті є формування узагальнених залежностей розрахунку параметрів рушійного елемента при різних його налаштуваннях.

### 4. Розробка методики налаштування параметрів рушійного елемента акустичного резонатора змінної геометрії

Як зазначалось в [6], системи керування відривними течіями мають значну ефективність при режимах роботи ступенів турбомашин, що близькі до резонансних. Тому забезпечення гнучкості системи керування відривними течіями та можливості її налаштування під задані режими роботи ступенів турбомашин, значно розширить діапазон їх ефективності. Таку гнучкість системи керування відривними течіями можна забезпечити за допомогою рушійного елемента, що буде виконувати функцію збудника коливань системи, тим самим налаштуваючи її на необхідний діапазон частот та, за необхідністю, може виконувати роль діагностичного елемента системи. Також рушійний елемент може переміщуватись по внутрішній поверхні акустичного резонатора змінюючи його геометрію.

На рис. 1 представлена акустична порожнина, аналогічна до простого акустичного резонатора, задня стінка якої замінена на електромеханічний рушійний елемент, що приєднаний до пасивної електричної мережі [21].

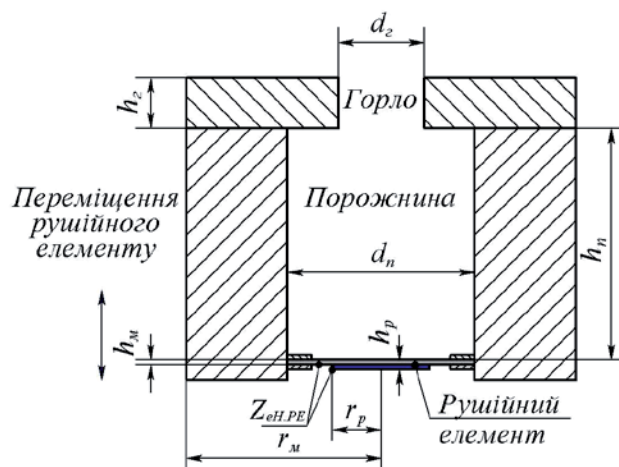


Рис. 1. Акустичний резонатор, оснащений рушійним елементом

Акустична система без рушійного елемента, характеризується одним ступенем свободи [22], в порівнянні із системами обладнаними електромеханічним елементом, що мають два або більше ступеней свободи. Це пояснюється можливістю налаштувати ємність конденсатора, опір та індуктивність рушійного елемента електричної системи.

Застосовуючи метод газодинамічних аналогій на рис. 2 представлено електричну модель у вигляді електричного коливального контуру, що є еквівалентною до акустичної системи (рис. 1).

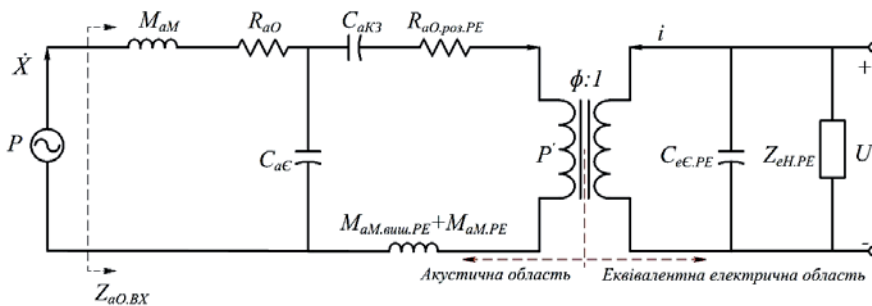


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема акустичного резонатора, що оснащений шумним елементом

Так,  $Z_{аО.ВХ}$  — вхідний акустичний імпеданс системи,  $M_{ам}$  та  $R_{аО}$  — акустична маса та акустичний опір порожнини, відповідно,  $C_{аε}$  — акустична ємність порожнини, величини  $C_{аКЗ.ПЕ}$  та  $R_{аО,роз.ПЕ}$  — визначають акустичну відповідність короткому замиканню та акустичний опір шумного елемента, що включає в себе акустичний опір розсіювання та інші конструктивні втрати затухання. Також, акустична система характеризується акустичною масою п'єзоелектричного шумного елемента  $M_{ам.ПЕ}$  та  $M_{ам.виш.ПЕ}$  — акустичною масою, що виштовхується шумним елементом. Зрештою, для еквівалентної електричної системи  $C_{еε.ПЕ}$  — електрична ємність п'єзоелектричного шумного елемента,  $Z_{еН.ПЕ}$  — опір електричного навантаження шумного елемента та  $\phi$  — коефіцієнт трансформації опору.

Проведемо перетворення енергії між акустичною та електричною областями згідно [23, 24], враховуючи коефіцієнт трансформації опору  $\phi$ . Тоді, рівняння акустичної ємності шумного елемента  $C_{аε.ПЕ}$  та акустичний імпеданс  $Z_{аН.ПЕ}$  запишемо у вигляді:

$$C_{аε.ПЕ} = \frac{C_{еε.ПЕ}}{\phi^2}, \tag{1}$$

$$Z_{аН.ПЕ} = \phi^2 Z_{еН.ПЕ}. \tag{2}$$

Схема спрощеного відображення електричного коливального контуру з перетворенням електричного імпедансу шумного елемента  $Z_{еН.ПЕ}$  у відповідний йому акустичний  $Z_{аН.ПЕ}$  представлена на рис. 3.

Вхідний акустичний імпеданс системи, згідно [23], буде мати вигляд:

$$Z_{аО.ВХ} = R_{аО} + sM_{ам} \frac{\frac{1}{sC_{аε}} \left( \frac{1}{sC_{аКЗ}} + R_{ам.виш.ПЕ} + s(M_{ам.ПЕ} + M_{ам.виш.ПЕ}) + \frac{Z_{аН.ПЕ}}{1 + sC_{аε.ПЕ}Z_{аН.ПЕ}} \right)}{\frac{1}{sC_{аε}} + \frac{1}{sC_{аКЗ}} + R_{ам.виш.ПЕ} + s(M_{ам.ПЕ} + M_{ам.виш.ПЕ}) + \frac{Z_{аН.ПЕ}}{1 + sC_{аε.ПЕ}Z_{аН.ПЕ}}}, \tag{3}$$

де  $s = j\omega$ . Рівняння (3) показує, що зміна налаштування шумного елемента відображається на значенні вхідного акустичного імпедансу акустичної системи  $Z_{аО.ВХ}$ .

Як зазначалось раніше, підлаштування системи забезпечується визначенням режимом роботи шумного елемента. Визначення режиму шумного елемента буде залежати від типу його навантаження. Налаштування коливального контуру, еквівалентного шумному елементу, буде характеризуватись визначенням необхідного значення ємнісного  $\frac{\phi^2}{C_{еК}}$ , резистивного  $\phi^2 R_{еО.нав}$  та індуктивного  $\phi^2 L_{кат}$  навантаження. На рис. 4, а, б, в представлені варіанти налаштування коливальних контурів, що еквівалентні шумному елементу.

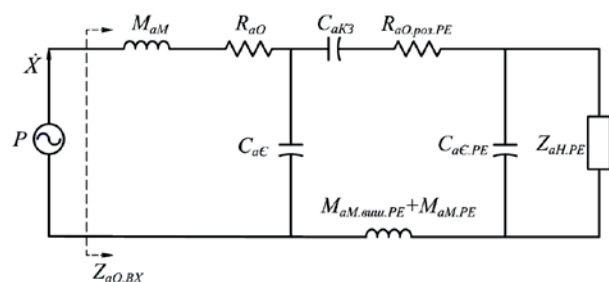


Рис. 3. Схема спрощеного відображення акустичного резонатора, оснащеного шумним елементом

Подальше формування методики розрахунку параметрів та характеристик шумного елемента системи керування відривними течіями, має на меті формування залежностей еквівалентних коливальних контурів. Так, акустична порожнина буде визначатись першим еквівалентним коливальним контуром, а параметри шумного елемента, будуть визначатись характеристиками другого коливального контуру. Проте, у випадку індуктивного налаштування  $\phi^2 L_{кат}$  шумного елемента, його параметри будуть також залежати від третього коливального контуру, який відповідає котушці індуктивності, що в свою чергу, має власну частотну характеристику.

Акустичний імпеданс першого коливального контуру, відповідно до ємнісного налаштування, приймає вигляд:

$$\begin{aligned} Z_{к1} &= R_{аО} + j \left( \omega M_{ам} - \frac{1}{\omega C_{аε}} \right) = \\ &= R_{аО} + j \sqrt{\frac{M_{ам}}{C_{аε}}} \left( \omega \sqrt{M_{ам} C_{аε}} - \frac{1}{\omega \sqrt{M_{ам} C_{аε}}} \right) = \\ &= \epsilon_{ок1} \left( \frac{R_{аО}}{Z_{к1}} + j \left( \frac{f_{рез.А}}{f_{к1}} - \frac{f_{к1}}{f_{рез.А}} \right) \right) = \\ &= \epsilon_{ок1} (\Delta_{к1} + j\Omega_{к1}), \end{aligned} \tag{4}$$

де робоча частота коливань першого коливального контуру  $f_{к1}$  записується у вигляді:

$$f_{к1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{ам} C_{аε}}}. \tag{5}$$

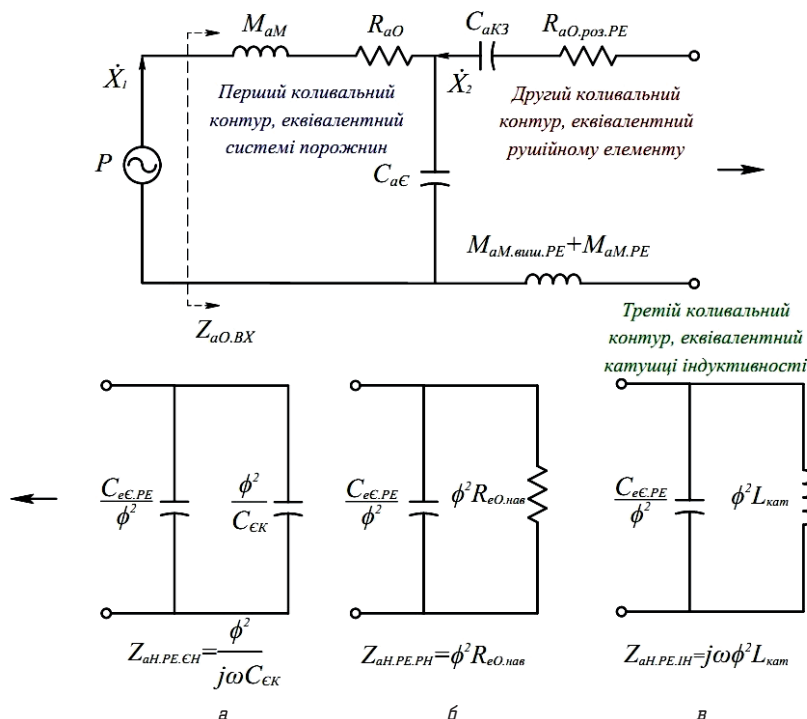


Рис. 4. Еквівалентні коливальні контри моделі з: а — ємнісним; б — резистивним; в — індуктивним налаштуванням

Згідно [25], коефіцієнт розсіювання  $\Delta_{к1}$ , що представляє собою відношення потужності розсіювання до збереженої енергії записується рівнянням:

$$\Delta_{к1} = \sqrt{\frac{R_{аО}}{M_{аМ}/C_{аЕ}}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт налаштування  $\Omega_{к1}$ , який визначається відхиленням робочої частоти коливань першого коливального контуру  $f_{к1}$  від його резонансної частоти  $f_{рез.А}$ :

$$\Omega_{к1} = \frac{f_{рез.А}}{f_{к1}} - \frac{f_{к1}}{f_{рез.А}}. \quad (7)$$

Ваговий коефіцієнт  $\epsilon_{ок1}$  характеризує відмінність систем, що мають той самий коефіцієнт розсіювання  $\Delta_{к1}$  та резонансну частоту коливань  $f_{рез.А}$ , але відрізняються одна від одної. Формула визначення вагового коефіцієнта має вигляд:

$$\epsilon_{ок1} = \sqrt{\frac{M_{аМ}}{C_{аЕ}}}. \quad (8)$$

Для другого коливального контуру система рівнянь запишеться аналогічно:

$$z_{к2} = \epsilon_{ок2}(\Delta_{к2} + j\Omega_{к2}), \quad (9)$$

$$f_{к2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ})/C_2}}, \quad (10)$$

$$\Delta_{к2} = \frac{R_{аО,роз.РЕ}}{\sqrt{(M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ})/C_2}}, \quad (11)$$

$$\Omega_{к2} = \frac{f_{рез.А}}{f_{к2}} - \frac{f_{к2}}{f_{рез.А}}, \quad (12)$$

$$\epsilon_{ок2} = \sqrt{\frac{M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ}}{C_2}}, \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{(C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К})C_{аК3}C_{аЕ}}{(C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К})C_{аК3} + (C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К} + C_{аК3})C_{аЕ}}. \quad (14)$$

Загальний акустичний імпеданс системи для двох коливальних контурів, враховуючи [24–26], буде мати вигляд:

$$Z_{аО.ВХ} = Z_{к1} - \frac{1}{Z_{к2} \left( j\omega_k C_{аЕ} \right)^2}. \quad (15)$$

Зв'язок між частотою коливань акустичної системи та рушійним елементом досліджувався Фішером [27]. Було визначено, що відношення енергії коливань, яка сконцентрована в зоні взаємозв'язку між рушійним елементом та акустичною системою порожнин, визначається коефіцієнтом зв'язку  $K$ , що записується у вигляді:

$$K = \sqrt{\frac{C_{аЕ}C_2}{C_{аЕ}^2}}. \quad (16)$$

У випадку, коли резонансна частота коливань системи дорівнює нулю  $f_{рез.А} = 0$ , робочі частоти двох коливальних контурів можна записати у вигляді:

$$f_{1,2}^2 = \frac{(f_{к1}^2 + f_{к2}^2) \pm \sqrt{(f_{к1}^2 + f_{к2}^2)^2 - 4(1-K^2)(f_{к1}f_{к2})^2}}{2}. \quad (17)$$

Після підстановки, рівняння (17) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} f_{к1}^2 + f_{к2}^2 &= \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{1}{M_{аМ}C_{аЕ}} + \frac{1}{(M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ})C_2} \right) = \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \left( \left( \frac{1}{M_{аМ}} + \frac{1}{M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ}} \right) \frac{1}{C_{аЕ}} + \frac{C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К} + C_{аК3}}{(M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ})(C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К})C_{аК3}} \right) = \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{1}{M_{аМ}C_{аЕ}}(1+\alpha) + \frac{C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К} + C_{аК3}}{(M_{аМ.РЕ} + M_{аМ.виш.РЕ})(C_{аЕ.РЕ} + C_{аЕ.К})C_{аК3}} \right) = \\ &= (1+\alpha)f_{П}^2 + f_{РЕ}^2, \end{aligned} \quad (18)$$

де масове відношення між горлом порожнини та п'єзоелектричним рушійним елементом  $\alpha$  записується формулою:

$$\alpha = \frac{M_{aM}}{M_{aM.PE} + M_{aM.вншPE}}. \quad (19)$$

Враховуючи дослідження Блекстока [28], частоту коливань першого коливального контуру можна записати у вигляді:

$$f_{\Pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_{aM}C_{aC}}}, \quad (20)$$

а рівняння визначення частоту коливань п'єзоелектричного рушійного елемента у вигляді:

$$f_{PE} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{aC.PE} + C_{aC.EK} + C_{aK3}}{(M_{aM.PE} + M_{aM.вншPE})(C_{aC.PE} + C_{aC.EK})C_{aK3}}}. \quad (21)$$

Відповідно до Прасада [29], акустична маса рушійного елемента  $M_{aM.PE}$  буде мати вигляд:

$$M_{aM.PE} = \frac{2\pi}{V_n} \int_0^{r_M} \rho \omega(r)^2 r_n dr, \quad (22)$$

де  $\omega(r)$  — поперечне переміщення еластичної мембрани, [м].

Загальне рівняння, що поєднує коливальний контур акустичної системи та рушійного елемента записується наступним чином:

$$f_{k1}^2 - f_{k2}^2 = (1 - \alpha) f_{\Pi}^2 - f_{PE}^2. \quad (23)$$

Частота коливань рушійного елемента для розімкнутого коливального контуру  $C_{aC.EK} = 0$  або  $Z_{aH.PE.EH} = 1/sC_{aC.EK} \rightarrow \infty$  має вигляд:

$$(f_{PE})_{роз} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{aC.PE} + C_{aK3}}{(C_{aC.EK} + M_{aM.вншPE})C_{aC.PE}C_{aK3}}}. \quad (24)$$

Для короткого замикання, режим роботи системи порожнин з п'єзоелектричним рушійним елементом  $C_{aC.EK} = \infty$  або  $Z_{aH.PE.EH} = 1/sC_{aC.EK} \rightarrow 0$ :

$$(f_{PE})_{кор} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(M_{aM.PE} + M_{aM.вншPE})C_{aK3}}}, \quad (25)$$

де  $C_{aK3}$ , відповідно до [29], записується рівнянням:

$$C_{aK3} = \int_0^{r_M} \frac{2\pi r_n \omega(r)}{P} dr. \quad (26)$$

Акустичну масу, що виштовхується рушійним елементом  $M_{aM.вншPE}$  можна записати у вигляді:

$$M_{aM.вншPE} = \frac{8\rho}{3\pi^2 r_M}. \quad (27)$$

Частота коливань рушійного елемента при ємнісно навантаженні  $C_{aC.EK} = \phi^2 / C_{ЕК}$  записується у вигляді:

$$(f_{PE})_{EH} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{aC.PE} + C_{aC.EK} + C_{aK3}}{(M_{aM.PE} + M_{aM.вншPE})(C_{aC.PE} + C_{aC.EK})C_{aK3}}}. \quad (28)$$

Аналізуючи рівняння (24), (25) та (28) очевидно, що:

$$(f_{PE})_{кор} < (f_{PE})_{EH} < (f_{PE})_{роз}. \quad (29)$$

Отже, рівняння (28) показує, яким чином відбувається налаштування та визначення режиму роботи п'єзоелектричного рушійного елемента з ємнісними навантаженнями. Рівняння (24) та (25) будуть визначати границі ємнісного налаштування, що відповідають розімкнутому коливальному контуру та короткозамкнутому. Також, необхідно зауважити, що при збільшенні ємності конденсатора, частота коливань другого коливального контуру буде зміщуватись до значень, які відповідають його короткому замиканню (рис. 5).

На рис. 4, б представлена система резистивного налаштування коливального контуру, що являє собою модель з двома степенями свободи. Резистивне налаштування коливального контуру є складним для визначення його параметрів в математичному вигляді, тому далі представлено орієнтовну математичну модель коливального контуру з резистивним налаштуванням рушійного елемента. Так, у випадку коли рушійний елемент системи акустичних порожнин характеризується резистивним налаштуванням, мають місце перетворення ефективних навантажень, що записується у вигляді акустичного імпедансу еквівалентному імпедансу накопичення енергії резистором:

$$Z_{aH.PE.PH} = \frac{1}{\phi^2} \frac{R_{eO}}{1 + j\omega C_{eC.PE} R_{eO}}. \quad (30)$$

У випадку короткого замикання електричний опір системи наближається до нуля  $R_{eO} \rightarrow 0$ , а у випадку розімкнутого коливального контуру електричний опір прямує до нескінченності  $R_{eO} \rightarrow \infty$ . Частота коливань системи для незначного діапазону опору електричного навантаження  $R_{eO}$  буде записуватись залежністю:

$$f_{k1} \ll \frac{1}{2\pi C_{eC.PE} R_{eO}}. \quad (31)$$

Апроксимація рівняння (30), враховуючи рівняння (31), буде мати вигляд:

$$Z_{aH.PE.PH} = \frac{1}{\phi^2} R_{eO} (1 - j\omega_k C_{eC.PE} R_{eO}). \quad (32)$$



Рівняння (32) показує, що резистивні навантаження зменшують акустичну масу п'єзоелектричного рушійного елемента  $M_{ам.РЕ}$  на величину  $-j\omega_k C_{еє.РЕ} R_{еО} / \phi^2$ , тобто ефективна акустична маса п'єзоелектричного рушійного елемента має вигляд:

$$M_{ам.РЕ.ефект} = M_{ам.РЕ} - j\omega_k C_{еє.РЕ} R_{еО} / \phi^2. \quad (33)$$

Таким чином, частота коливань акустичної системи  $f_{П}$  визначається аналогічно рівнянню (20), а частота коливань другого контуру, що еквівалентний рушійному елементу, запишеться у вигляді:

$$(f_{РЕ})_{РН} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(M_{ам.РЕ} + M_{ам.випш.РЕ} - C_{еє.РЕ} R_{еО} / \phi^2) C_{акЗ.РЕ}}}. \quad (34)$$

Отже, при збільшенні резистивних навантажень, частота коливань рушійного елемента  $f_{РЕ}$  набуває більш відмінних значень від частоти коливань короткозамкненого еквівалентного коливального контуру рушійного елемента  $(f_{РЕ})_{кор}$ , та наближається до значень частоти коливань рушійного елемента, що еквівалентні значенням розімкненого коливального контуру  $(f_{РЕ})_{роз}$  (рис. 5). Також слід зауважити, що при великих значеннях опору електричного навантаження  $R_{еО}$  припущення визначене рівнянням (31) не виконується, а рівняння (34) не відображає резистивного налаштування рушійного елемента.

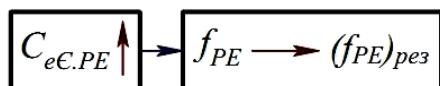


Рис. 5. Взаємодія параметрів при резистивному навантаженні

Індуктивне налаштування акустичної системи (рис. 4, в) буде характеризуватись слабо-затухаючими коливаннями котушки індуктивності та утворить систему з трьома степенями свободи. Для спрощення задачі відображення індуктивного налаштування коливального контуру, еквівалентного рушійному елементу, приймається, що система порожнин при індуктивному навантаженні, характеризується незначними затуханнями коливального контуру. Тоді акустичний імпеданс коливальному контуру котушки індуктивності записується у вигляді залежності:

$$Z_{кЗ} = \frac{[\phi^2 / (j\omega C_{еє.РЕ})] j\omega \phi^2 L_{кат}}{[\phi^2 / (j\omega C_{еє.РЕ})] + j\omega \phi^2 L_{кат}}. \quad (35)$$

Після апроксимації рівняння (35) буде мати вигляд:

$$Z_{кЗ} = j\omega \phi^2 L_{кат}. \quad (36)$$

Частота коливань буде визначатись залежністю:

$$f \ll \frac{1}{2\pi \sqrt{C_{еє.РЕ} L_{кат}}} = f_{кЗ}, \quad (37)$$

де  $f_{кЗ}$  — частота коливань третього коливального контуру. Фізично, третій коливальний контур еквівалентний котушці індуктивності, додає до другого коливального контуру еквівалентного рушійному елементу додаткову масу, що визначається як  $\phi^2 L_{кат}$ .

Отже, частота коливань акустичної системи  $f_{П}$  визначається аналогічно рівнянню (20), а частота коливань другого контуру, що еквівалентний рушійному елементу, запишеться у вигляді:

$$(f_{РЕ})_{РН} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(M_{ам.РЕ} + M_{ам.випш.РЕ} + \phi^2 L_{кат}) C_{акЗ.РЕ}}}. \quad (38)$$

При даному навантаженні, збільшення значення  $\phi^2 L_{кат}$  — призводить до зміщення значень частота коливань другого контуру, що еквівалентний рушійному елементу  $f_{РЕ}$  від значень частоти коливань короткозамкненої системи  $(f_{РЕ})_{кор}$  (рис. 6).

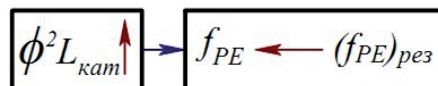


Рис. 6. Взаємодія параметрів при індуктивному навантаженні

Визначення значень частоти коливань акустичної системи  $f_{П}$  та рушійного елемента  $f_{РЕ}$ , є досить складною та багатопараметричною задачею. Характеристика резонансної частоти коливань акустичної системи  $f_{рез.А}$  відображується рівнянням (20), частота власних коливань  $f_{в.к}$  знаходиться у відповідності до рівняння (25). Частотні характеристики рушійного елемента описуються рівняннями, виходячи з його налаштування, так, при ємнісному навантаженні, частота коливань рушійного елемента  $f_{РЕ}$  записується рівнянням (28), при резистивному — рівнянням (34), при індуктивному — рівнянням (38).

## 6. Обговорення результатів розробки методики розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору

Розроблена методика налаштування рушійного елемента акустичного резонатору змінної геометрії може застосовуватись для розрахунку збудників коливань періодично-імпульсних систем керування відривними течіями на етапі їхньої розробки.

Представлені узагальнені залежності розрахунку способів налаштування рушійного елемента дозволять на етапі проектування з максимальною ефективністю підбирати типи рушійних елементів. Оскільки картина течії в лопаткових вінцях турбомашин характеризується частотою коливань, що обумовлена нерівномірністю поля розподілу значень повного тиску та осової швидкості, то значення цих коливань повинні враховуватись при розрахунку рушійного елемента. Прийнявши значення частоти власних коливань, за вищенаведеними узагальненими залежностями можна розрахувати максимально ефективний спосіб підключення рушійного елемента. Так з використання акустичного резонатору змінної геометрії оснащеного рушійним елементом можна ефективно

впливати на інтегральні відривні течії в ступенях ОВ та задовольняти конструктивні вимоги ГТД.

Результати дослідження визначають рівень впливу акустичного резонатору з різними типами налаштування рушійного елемента на газодинамічні параметри течії в ступенях ОВ.

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

## 7. Висновки

Отже, в роботі представлено розробку методики налаштування рушійного елемента, що може використовуватись для оцінки впливу його ефективності на відривні течії в ступені ОВ. Особливістю методики розрахунку є те, що з її використанням можна розраховувати різні способи підключення рушійного елемента до пасивної мережі.

Представлені узагальнені залежності розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору дозволяють визначати умови зміни частоти коливань системи, при різних типах налаштування рушійного елемента.

За результатами апробації узагальнених залежностей наведено взаємозв'язок між типами налаштування рушійного елемента та частотою його коливань.

## Література

- Kweder, J. Experimental Evaluation of an Internally Passively Pressurized Circulation Control Propeller [Text] / J. Kweder, C. H. Zeune, J. Geiger, A. D. Lowery, J. E. Smith // *Journal of Aerodynamics*. — 2014. — Vol. 2014. — P. 1–10. doi:10.1155/2014/834132
- Шлихтинг, Г. Ю. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Ю. Шлихтинг. — М.: Наука, 1969. — 713 с.
- Shafer, D. Active and Passive Flow Control over the Flight Deck of Small Naval Vessels [Electronic resource] / D. Shafer, T. Ghee // 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. — Available at: \www/URL: <http://doi.org/10.2514/6.2005-5265>
- Lupea, I. Considerations on the Helmholtz resonator simulation and experiment [Text] / I. Lupea // *Proceedings of the Romanian academy, Series A*. — The Publishing House Proceedings of the Romanian Academy, 2012. — Vol. 12, № 3. — P. 118–124.
- Shimizu, T. Slit Resonator Design and Damping Estimation in Linear and Non-linear Ranges [Electronic resource] / T. Shimizu, D. Hori, K. Kitamura, Y. Daimon, A. Oyama // 41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011. — Available at: \www/URL: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-3261>
- Kinsler, L. E. Fundamentals of Acoustics [Text] / L. E. Kinsler. — New York: John Wiley & Sons, 2000. — Chaps 10. — P. 272–301.
- Богданов, М. Ю. До питання застосування пасивних методів управління пограничним шаром для зменшення вторинних втрат в лопаткових вінцях осевого компресора [Текст] / М. Ю. Богданов, Е. П. Ясиніцький, В. М. Охмакевич, В. М. Нікітіна, М. І. Кінашук // *Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013»*. — 2013. — Т. 3. — С. 14.5–14.8.
- Абзалилов, Д. Ф. Моделирование устройств активного управления пограничным слоем, предотвращающих отрыва потока на крыловых профилях [Текст] / Д. Ф. Абзалилов, Н. Б. Валитов, Н. Б. Ильинский // *Материалы XVI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС2009)*. — Алушта, 2009. — С. 45–47.
- Голованов, А. Н. Влияние акустических возмущений на свободно-конвективного течения [Текст] / А. Н. Голованов // *Прикладная механика и техническая физика*. — 2006. — Т. 47, № 5. — С. 27–33.
- Занин, Б. Ю. О новых методах управления дозвуковыми отрывными течениями [Текст] / Б. Ю. Занин, И. Д. Зверков, В. В. Козлов, А. М. Павленко // *Вестник Новосибирского государственного университета*. — 2007. — Т. 2, № 1. — С. 10–18.
- Collins, F. G. Influence of Sound upon Separated Flow over Wings [Text] / F. G. Collins, J. Zelenevits // *AIAA Journal*. — 1975. — Vol. 13, № 3. — P. 408–410. doi:10.2514/3.49717
- Patterson, C. Evaluation of Pulsed & Steady Blowing Flow Control in a Slotted Leading Edge Configuration [Text] / C. Patterson. — School of Engineering, Tufts University Medford, 2011. — 53 p.
- Shafer, D. M. Active and passive flow control over the flight deck of small naval vessels [Electronic resource] / Daniel M. Shafer // *Scientific World Journal*. — 2014. — Available at: \www/URL: <http://www.hindawi.com/journals/tswj/>
- Rullán, J. M. Flow control over a circular arc airfoil [Electronic resource] / José M. Rullán // Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE In Engineering Mechanics. — Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2014. — Available at: \www/URL: [http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10222004-132351/unrestricted/thesis\\_Jose\\_Rullan.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10222004-132351/unrestricted/thesis_Jose_Rullan.pdf)
- Левичев, О. Ф. Категория синтеза в науке, философии и образовании [Электронный ресурс] / О. Ф. Левичев // *Электронный научный журнал*. — 2013. — № 6. — Режим доступа: \www/URL: <http://grani.agni-age.net/articles12/4914.htm>
- Лебедев, С. А. Уровни научного знания [Текст] / С. А. Лебедев // *Вопросы философии*. — 2010. — № 2. — С. 1–8.
- Корнилов, В. И. Управление турбулентным пограничным слоем пассивными и активными методами. Успехи и проблемы [Текст] / В. И. Корнилов, А. В. Бойко // *International Conference on the Methods of Aerophysical Research — ICMAR*. — 2010. — С. 1–9.
- Hwang, D. A proof of concept experiment for reducing skin friction by using a micro-blowing technique [Electronic resource] / D. Hwang // 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. — Available at: \www/URL: <http://doi.org/10.2514/6.1997-546>
- Данилов, Д. С. Самоиндуцированный отрыв ламинарного пограничного слоя и процессы вязко-невязкого взаимодействия над пористой поверхностью [Текст] / Д. С. Данилов, И. И. Липатов, Г. Ю. Толкачев // *Письма в ЖТФ*. — 2010. — Т. 36, № 19. — С. 72–75.
- Валитов, Р. А. Применение устройств активного управления пограничным слоем с учетом энергетических затрат для предотвращения отрыва потока [Текст]: материалы Восьмой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения-2009» / Р. А. Валитов // *Труды математического центра имени Н. И. Лобачевского*. — 2009. — Т. 39. — С. 147–148.
- Sheplak, M. Electromechanical acoustic liner [Electronic resource]: Patent U.S. № 6782109 / Sheplak, M., Cattafesta, L., Nishida, T., Horowitz, S. B.; assignee: University of Florida. — Filed 3 April 2001; Published 24 August 2004. — Available at: \www/URL: <https://www.google.com.ua/patents/US6782109?dq=Electromechanical+acoustic+liner&hl=ru&sa=X&ved=0CBsQ6AEwAGoVChMIr6C5j-3axgIVwnE-Ch2N6Qko>
- Ingard, U. Notes On Duct Attenuators (N4) [Electronic resource] / U. Ingard. — NE: Kittery Point, 1999. — Available at: \www/URL: <http://www.ingard.com/>
- Liu, F. A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator [Text] / F. Liu, S. Horowitz, T. Nishida, L. Cattafesta, M. Sheplak // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2007. — Vol. 122, № 1. — P. 291–301. doi:10.1121/1.2735116
- Liu, F. A Tunable Electromechanical Helmholtz Resonator [Electronic resource] / F. Liu, S. B. Horowitz, L. Cattafesta, M. Sheplak // 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit (Hilton Head, South Carolina). — 2003. — AIAA Paper 2003-3145. — Available at: \www/URL: [http://www.researchgate.net/publication/233532493\\_A\\_Tunable\\_Electromechanical\\_Helmholtz\\_Resonator](http://www.researchgate.net/publication/233532493_A_Tunable_Electromechanical_Helmholtz_Resonator)
- McKee, R. J. Acoustics in Pumping Systems [Electronic resource] / R. J. McKee, E. L. Broerman // 25th International Pump Users Symposium, February 23–26, 2009, Houston, TX. — Available at: \www/URL: <http://turbolab.tamu.edu/uploads/files/papers/p25/P25-Tut1.pdf>

26. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
27. Fischer, F. A. Fundamentals of Electroacoustics [Text] / F. A. Fischer. — New York: Interscience Publishers Inc., 1955. — 186 p.
28. Blackstock, D. T. Fundamental of Physical Acoustics [Text] / D. T. Blackstock. — New York: John Wiley & Sons, 2000. — 560 p.
29. Prasad, S. A. Analytical Electroacoustic Model of a Piezoelectric Composite Circular Plate [Text] / S. A. Prasad, Q. Gallas, S. B. Horowitz, B. D. Homeijer, B. V. Sankar, L. N. Catafesta, M. Sheplak // AIAA Journal. — 2006. — Vol. 44, № 10. — P. 2311–2318. doi:10.2514/1.19855

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОТРЫВНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ ТУРБОМАШИН

В статье приведены особенности использования импульсно-периодических систем, которые представлены в виде генераторов синтетических струй и могут использоваться для устранения отрыва потока в лопаточных венцах турбомашин. Предложено использовать генератор синтетических струй с изменяемой геометрией, что позволит задавать величину частоты собственных колебаний системы. Настройка частоты собствен-

ных колебаний системы управления отрывными течениями обеспечит расширения диапазона её эффективной работы, а также увеличит эффективность работы ступеней турбомашин.

**Ключевые слова:** генераторы синтетических струй, импульсно-периодические системы, лопаточные венцы, отрывные течения, движущий элемент.

*Богданов Микола Юрійович, старший викладач, кафедра авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: BogdanovNY@gmail.com.*

*Кірчу Федір Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: fkirchu@gmail.com.*

*Богданов Николай Юрьевич, старший преподаватель, кафедра авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.*

*Кирчу Федор Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.*

*Bohdanov Mykola, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: BogdanovNY@gmail.com.*

*Kirchu Fedor, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: fkirchu@gmail.com*

УДК 654.937

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.46936

Галица В. И.,  
Качанов П. А.

## РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ХРОНОМЕТРИРОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЭСТАФЕТНЫХ КОМАНД 4 × 100 м

В статье представлены инструментальные средства хронометрирования в беговых видах легкой атлетики, проанализированы их преимущества и недостатки в различных вариантах применения. Описан метод усовершенствования применения данных средств для подготовки национальной эстафетной команды 4 × 100 м в легкой атлетике.

**Ключевые слова:** электронно-оптические системы, оптический луч, единое временное пространство, оптический створ.

### 1. Введение

Успехи украинских легкоатлетов на международной арене становятся все менее громкими. И этот факт объясняется объективными причинами. Но есть отдельный вид легкой атлетики, который перечеркивает всю логику спортивного бытия — это эстафетный бег 4 × 100 метров. Украинские спринтеры в мировой таблице о рангах мужского и женского спринта весьма далеки от мировой элиты. И, тем не менее, нашим командам регулярно удается лишать куда более титулованных соперников медалей на крупных международных соревнованиях. Объяснение только одно — правильная методика подготовки при передаче эстафетной палочки и оптимальная связка участников на каждом этапе передачи. Свою лепту вносят и инструментальные средства объективного контроля — электронного хронометража при пробегании атлетами участка дистанции, где выполняется передача [1].

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Классические электронно-оптические системы измерения времени пробега отрезков дистанции построены на принципе его фиксации в момент пересечения оптического луча пробегающим атлетом. Используются варианты как разнесенной схемы установки излучателя и приемника излучения на финишной линии (рис. 1) [1], так и установки излучателя и приемника в общем корпусе с использованием уголкового отражателя (рис. 2) [2].

Первый вариант позволяет обеспечить как хорошую дальность порядка десятков — сотен метров, так и предсказуемую точность формирования оптической оси. Второй же вариант при меньшей дальности (до 20 м) более технологичен — вся электронная часть с элементами питания и передачи информации расположена в одном корпусе. К тому же упрощается процесс юстировки при установке оборудования. Достаточно