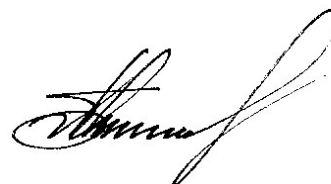


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**БОГДАНОВ МИКОЛА ЮРІЙОВИЧ**



УДК 681.513.6: 533.694.7: 629.735.035.3'7(043.5)

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ  
АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ  
НА ВІДРИВНУ ТЕЧІЮ В СТУПЕНЯХ ОСЬОВИХ  
ВЕНТИЛЯТОРІВ**

Спеціальність: 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Терещенко Юрій Матвійович,**  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри авіаційних двигунів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Дихановський Віктор Миколайович,**  
Секція прикладних проблем Президії НАН України,  
Заступник голови Секції.

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Сєверін Сергій Дмитрович,**  
Інститут технічної теплофізики НАН України.

Захист дисертації відбудеться «03» березня 2016 р. о 15-15 годині в аудиторії 1.105 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.05 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ – 058, проспект Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий « 01 » лютого 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.062.05  
кандидат технічних наук, доцент



Т. В. Козлова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дисертації.** Осьові вентилятори широко використовуються в якості рушіїв на пілотованих і безпілотних літальних апаратах (UAV) та на апаратах вертикального зльоту (VTOL). Значного застосування осьові вентилятори набули в якості вентиляційних установок на залізничному транспорті і промислових об'єктах.

Враховуючи високі вимоги до технічних та енергетичних характеристик літальних апаратів, а також значну вартість їх виробництва, одним з основних напрямків у сучасному авіадвигунобудуванні є аеродинамічне вдосконалення осьових вентиляторів. Одним із шляхів аеродинамічного вдосконалення осьових вентиляторів є зменшення рівня кінцевих втрат обумовлених вихровими течіями у проточній частині вентиляторів. Аналіз попередніх досліджень показав, що одним з напрямків їх вдосконалення є застосування методів активного та пасивного впливу.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі зі створення методичного апарату для розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів. Тема дисертаційної роботи є актуальною та має важливе науково-практичне значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дана робота є складовою частиною досліджень, що проводяться на кафедрі авіаційних двигунів Національного авіаційного університету і спрямована на покращення параметрів та характеристик ступенів осьових вентиляторів. Дослідження проводилось у рамках наступних науково-дослідних робіт:

– № 703-Х10 «Дослідження методів впливу на течію в лопаткових вінцях компресорів ГТД для забезпечення удосконалення їх параметрів та характеристик»;

– № 736-Х11 «Розробка методики розрахунків величин тяги авіаційних двоконтурних ТРД за термогазодинамічними параметрами, замірємими у процесі роботи двигунів на землі в умовах їх компоновки на крилі літака, так і на випробувальних стендах»;

– № 733-ДБ-11 «Вдосконалення газодинамічної стійкості багаторежимних газотурбінних двигунів»;

– № 3.07.01.03 «Розробка та дослідження методів покращення економічності ГТД шляхом застосування щілинних лопаткових вінців в осьовому компресорі»;

– № 7.07.01.03 «Розробка та дослідження методів покращення економічності ГТД шляхом вдосконалення робочого процесу в його елементах».

**Метою дослідження** є підвищення ефективності ступенів осьових вентиляторів із застосуванням адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію в широкому діапазоні їх експлуатації.

**Задачі дослідження,** що впливають з поставленої в роботі мети,

зводились до:

1. Проведення аналізу сучасного стану результатів дослідження методів покращення параметрів та характеристик ступенів осьових вентиляторів;
2. Розробка методики розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи (адаптивного акустичного резонатору);
3. Проведення дослідження впливу адаптивної системи на характеристики ступеня осьового вентилятора;
4. Розробка рекомендацій щодо застосування адаптивної системи в ступені осьового вентилятора.

*Об'єктом дослідження є робочий процес у ступені осьового вентилятора.*

*Предметом дослідження є кінцеві вихрові течії в ступені осьового вентилятора.*

*Методи дослідження - методи чисельної газодинаміки, метод електрогазодинамічної подібності.*

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше обґрунтовано доцільність застосування адаптивної системи для зменшення рівня кінцевих вихрових течій;
- вперше розроблено методику розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи;
- вперше отримано узагальнені залежності для розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи;
- вперше проведено оцінку зміни параметрів ефективності ступеня осьового вентилятора із застосуванням адаптивної системи.

**Практичне значення одержаних результатів.** Побудовані автором моделі та методика розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи можуть бути рекомендовані для використання при проектуванні перспективних вентиляторів провідними КБ. Практичне значення мають:

- методика розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи (адаптивного акустичного резонатору);
- методика розрахунку геометричних параметрів спрямляючої лопатки з рециркуляцією примежового шару, що може бути рекомендована для використання на перспективних осьових вентиляторах;
- випробувальний стенд дослідження характеристик вентилятора з адаптивною системою, що може бути рекомендовано для впровадження в навчальний процес у «Національному авіаційному університеті».

**Особистий внесок здобувача.** Результати експериментальних досліджень, методики, узагальнені залежності для розрахунку параметрів та характеристик адаптивної системи, а також оцінка зміни параметрів ефективності ступеня осьового вентилятора при її застосуванні, отримані здобувачем самостійно з урахуванням рекомендацій наукового керівника.

У наукових статтях, що були надруковані у співавторстві, автору дисертації належить:

- у роботі [1] запропоновано метод розрахунку профілю лопаток осьового компресора;

– у роботах [2, 5] розроблено методику моделювання та представлені результати дослідження нестационарних характеристик ступеня осьового вентилятора;

– у роботі [3] запропоновано методику розрахунку параметрів та характеристик комплексного акустичного резонатору;

– у роботі [4] розроблено підходи до методики налаштування параметрів рушійного елемента;

– у роботі [6] представлено результати чисельного моделювання турбулентних течій та розглянуто вплив пасивних методів керування примежовим шаром на аеродинамічні характеристики.

**Апробація результатів дисертації.** Отримані результати дисертаційного дослідження доповідались і отримали позитивну оцінку на: засіданнях кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету м. Київ; X Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2011» 19–21 квітня 2011 р. м. Київ; V Міжнародній науково-технічній конференції молодих спеціалістів авіамоторобудівельної галузі «Молодь в авіації: нові рішення та передові технології» 16–20 травня 2011 р. Україна, Запоріжжя-Алушта; XII Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» 11–13 жовтня 2011 р. м. Донецьк; Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», ІФНТУНГ 15–18 травня 2012 р. м. Івано-Франківськ; XIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» 19–20 вересня 2012 р. м. Чернігів; V Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» 25–27 вересня 2012 р. м. Київ; XI Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2013» 21–23 травня 2013 р. м. Київ; VI Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» 23–25 вересня 2014 р. м. Київ.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи повно та в установлені строки опубліковано у 13 друкованих працях, у тому числі 6 наукових праць опубліковано у виданнях, що входять до переліку фахових видань ДАК МОН України з технічних наук, з яких 4 публікації у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз та можуть прирівнюватися до публікацій у наукових періодичних виданнях інших держав, та 7 тез доповідей.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 150 сторінки основного тексту, 61 рисунок і 15 таблиць, список використаних джерел складається із 154 найменувань на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкриті сутність та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження; вказано об'єкт, предмет та методи дослідження; відображено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, представлені результати апробації літературних джерел з розкриттям особистого внеску здобувача.

У першому розділі проведено огляд опублікованих досліджень існуючих методів зниження рівня кінцевих втрат обумовлених вихровими течіями у проточній частині вентиляторів. Огляд містить результати, отримані експериментальними, аналітичними, напівемпіричними та чисельними методами.

Аналіз опублікованих досліджень існуючих методів зниження рівня кінцевих втрат показав їх недостатню ефективність, тому їх розробка, продовжує залишатися актуальною.

Результати попередніх досліджень, проведених у ЦІАМ та ЦАГІ показали, що для зменшення рівня кінцевих втрат необхідно застосовувати комплексний підхід, оскільки усі з існуючих методів впливу на газодинаміку течії характеризуються обмеженим діапазоном ефективності.

На базі проведеного аналізу обґрунтовано викладені раніше цілі та задачі дисертаційної роботи, а також вибрані відповідні їм методи дослідження.

У другому розділі розроблено та реалізовано за допомогою програмного пакету SolidWorks розрахункову модель ступеня осьового вентилятора, враховуючи його геометричні параметри.

Дослідний ступень складається з шести робочих (РЛ) та семи спрямних лопаток (СЛ). Параметри змодельованого ступеня ОВ:  $C_{сер} = 35,0$  [м/с],  $C_{ст.в} = 7,32$  [кг/с] та  $\eta_{ст.в}^* = 0,63$ .

Дослідження параметрів ефективності ступеня ОВ з адаптивною системою керування кінцевими відривними течіями проводилось у відповідності з наступною розрахунковою схемою (рис. 2.1).

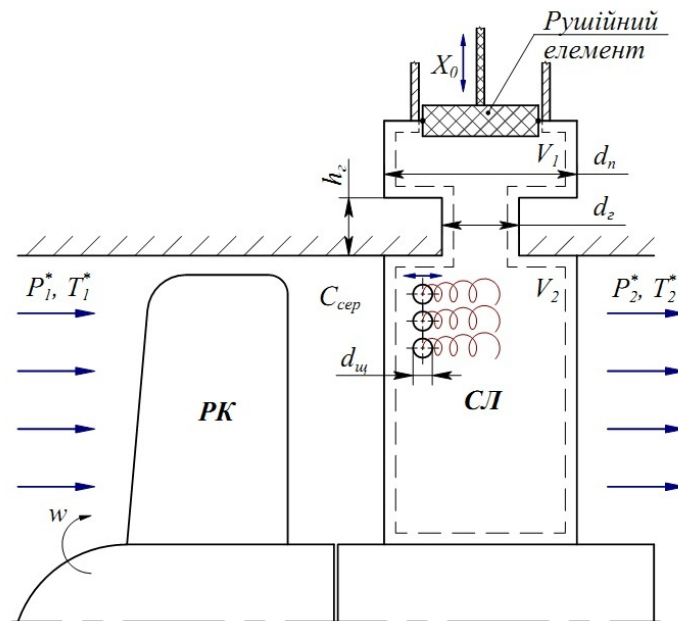


Рис. 2.1. Схема адаптивної системи керування кінцевими відривними течіями в ступені ОВ

Розглянуто формування розрахункової поверхні лопаток ступеня ОВ (рис. 2.2), визначено координати точок сіткових поверхонь, що розміщено на поверхні лопаток, необхідних для розрахунку параметрів потоку. Описано застосований метод чисельного розрахунку, що базується на моделюванні

тривимірних течій у проточній частині ступеня ОВ з використанням системи рівнянь газової динаміки Нав'є-Стокса.

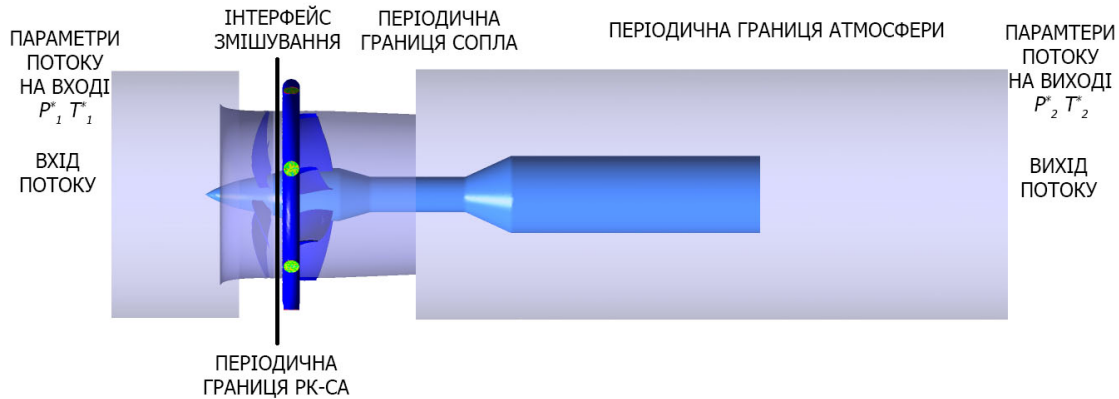


Рис. 2.2. Схема розрахункової області ступеня ОВ

Розрахункова сітка має блочну структуру та складається з структурованої сітки із чотирикутними елементами в межах прилежого шару і неструктурованої сітки з трикутними елементами в усій розрахунковій зоні. Загальна кількість елементів розрахункової сітки складала в середньому  $7 \cdot 10^6$  елементів усіх розрахункових перерізів.

Граничні умови на вході в ступень ОВ задавались за параметрами потоку, що були одержані в результаті проведення газодинамічного розрахунку. Під час проведення чисельного дослідження ступеня ОВ застосовувалась модель турбулентної в'язкості  $k - \omega$  Ментера з стандартним набором констант  $\alpha_{\infty}^* = 1, \alpha_{\infty} = 0,52, \alpha_0 = 1/9, \alpha_1 = 0,31, \beta_{\infty}^* = 0,09, \beta_{i1} = 0,075, \beta_{i2} = 0,0828, \sigma_{k1} = 1,176, \sigma_{k2} = 1,0, \sigma_{\omega 1} = 2,0, R_{\beta} = 8, R_k = 6, \zeta^* = 1,5, M_{t0} = 0,25$ . В'язкість газу моделювалась за законом Свізерленда.

В роботі зазначено, що одним із основних параметрів, який характеризує ефективність керування відривними течіями (кінцевими вихровими структурами) в ступені ОВ є коефіцієнт імпульсу вдуву  $C_{\mu}$ , що записується у вигляді відношення коефіцієнта імпульсу секундної маси робочого тіла щілинно-порожнинного комплексу  $J_{щ.п}$  до коефіцієнта імпульсу секундної маси робочого тіла в каналі  $J_0$

$$C_{\mu} = \frac{J_{щ.п}}{J_0}, \quad (2.1)$$

Коефіцієнт імпульсу секундної маси робочого тіла в каналі визначається наступною формулою:

$$J_0 = \rho \pi^2 S_{пер} \cdot \frac{\delta}{2} \cdot C_{сер}^2, \quad (2.2)$$

де  $S_{пер}$  – площа поперечного перерізу розрахункової області, [м];  $\delta$  – товщина прилежого шару;  $C_{сер}$  – швидкість в заданому об'ємі, [м/с].

Коефіцієнт імпульсу секундної маси робочого тіла щілинно-порожнинного комплексу записується у вигляді:

$$J_{\text{щ.п}} = \rho_{\text{щ}} \vartheta_{\text{щ}}^2 \pi r_{\text{щ}}^2, \quad (2.3)$$

де  $\rho_{\text{щ}}$  – густина робочого тіла в щілині, [кг/м<sup>3</sup>];  $\vartheta_{\text{щ}}$  – швидкість робочого тіла в щілині, [м/с];  $r_{\text{щ}}$  – радіус щілини.

Оскільки картина течії ступеня ОВ, має пульсуючий характер, тоді справедливим буде твердження, що вихроутворення мають визначений інтервал сходження, який може бути представлений у вигляді

$$F^* = \frac{fX_{\text{В}}}{C_{\text{сер}}}, \quad (2.4)$$

де  $f$  – частота коливань потоку, [Гц];  $X_{\text{В}}$  – характерний розмір масштабу відривної зони, відстань від місця установки виконавчого механізму до задньої кромки профілю, [м];  $C_{\text{сер}}$  – швидкість потоку в заданому об'ємі, [м/с].

Таким чином, розрахунок вентиляторної решітки з газодинамічним впливом на кінцеві вихрові течії умовно поділяється на ряд етапів:

- розрахунок вентиляторної решітки без газодинамічного впливу на кінцеві вихрові течії за відомими рекомендаціями;
- розрахунок характеру течії в решітках, а також розрахунок параметрів примежового шару на профілях;
- визначення теоретичного коефіцієнту імпульсу вдуву  $C_{\mu}$  (рівн. 2.1), що знаходиться в межах  $C_{\mu} = 0,001 \div 0,005$ , а значення зведеної частоти збудження потоку, (рівн. 2.4), в межах  $F^* = 0,8$ .

**У третьому розділі** представлено методику розрахунку параметрів та характеристик елементів коливального контуру адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів, визначено аналогію між акустичними та електричними елементами систем.

Одним з елементів системи є акустична порожнина (рис. 3.1 зображення а)). До геометричних параметрів порожнини слід віднести: об'єм  $V_n$ , довжину горла  $h_2$ , площу поперечного перетину горла  $S_2$ . До параметрів оточуючого середовища, де розмішена порожнина слід віднести: швидкість потоку в заданому об'ємі  $C_{\text{сер}}$  та його тиск  $P$ .



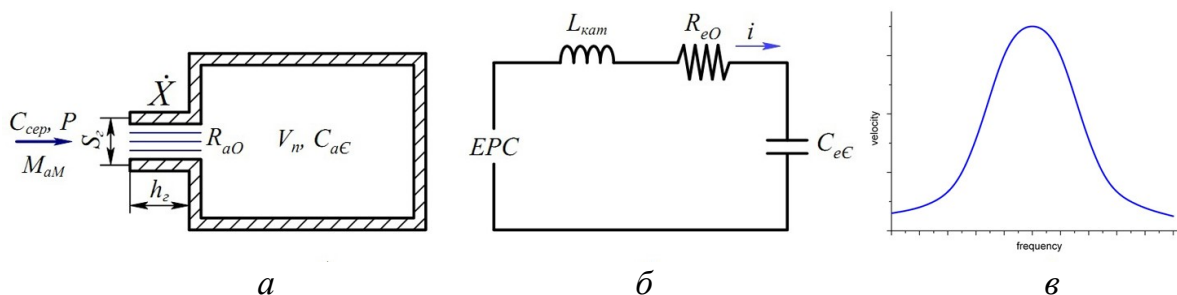


Рис. 3.1. Зображення акустичної порожнини *a*), еквівалентної електричної схеми *б*) та залежності частоти власних коливань системи *в*)

Так, в акустичній системі (рис. 3.1 зображення *a*)) тиск  $P$  діє послідовно на акустичну масу  $M_{aM}$  та акустичний опір  $R_{aO}$ , що відповідає опору робочого тіла в порожнині, з'єднаного з об'ємом  $V_n$ , який в свою чергу, характеризується акустичною ємністю  $C_{aE}$  (рис. 3.2). Акустична маса  $M_{aM}$  визначається робочим тілом, що знаходиться в об'ємі, де усі його частини під дією тиску  $P$  рухаються синфазно, тобто з однаковим знаком за амплітудою та фазою.

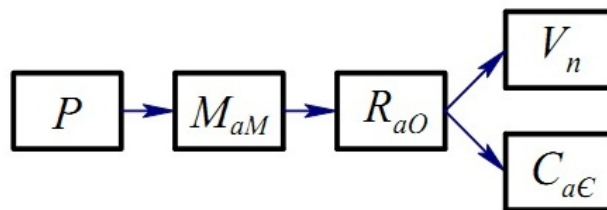


Рис. 3.2. Взаємодія параметрів акустичної порожнини

Для еквівалентної електричної схеми (рис. 3.1 зображення *б*)), справедливо наступне: електрорушійна сила (EPC) діє на послідовно з'єднані індуктивність  $L$ , електричний опір  $R_{eO}$  та електричну ємність  $C_{eE}$  (рис. 3.3).

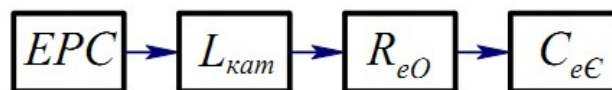


Рис. 3.3. Взаємодія параметрів електричної схеми

Адаптивна система газодинамічного впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів характеризується акустичним імпедансом, що записується у вигляді:

$$Z_{aH} = \frac{12\mu a_{щ}}{c_{щ}^3 b_{щ}} + j \frac{6\rho a_{щ} \omega}{5b_{щ} c_{щ}}; \quad (3.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості,  $[кг/м^3]$ ;  $a_{щ}$  – довжина щілини,  $[м]$ ;  $j$  – уявна одиниця;  $c_{щ}$  – висота щілини,  $[м]$ ;  $b_{щ}$  – ширина щілини,  $[м]$ ;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота коливань,  $[Гц]$ .

Витрата адаптивної системи записується рівнянням:

$$\dot{X} = \frac{p\varepsilon^{j\omega t}}{R_{aO} + j\omega M_{aM} - \frac{j}{\omega C_{aE}}} = \frac{p}{Z_{aH}}, \quad (3.2)$$

де  $R_{aO}$  – акустичний опір;  $M_{aM}$  – акустична маса;  $C_{aE}$  – акустична ємність.

Наведено розробку узагальнених залежностей та формування

математичної моделі адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів. Адаптивна система буде представлена у вигляді акустичної моделі з рушійним елементом та еквівалентного їй електричного коливального контуру. Так, ґрунтуючись на методі газодинамічних аналогій для електричної та акустичної системи, можемо записати наступне: сила струму  $i$  – аналогічна витраті в середовищі  $\dot{X}$ , електрорушійна сила  $EPC$  – аналогічна тиску  $P$ , електричний опір  $R_{eO}$  – аналогічний акустичному опору  $R_{aO}$ , індуктивність  $L_{кам}$  – аналогічна акустичній масі  $M_{aM}$ , акустична ємність  $C_{aЄ}$  – аналогічна електричній ємності  $C_{eЄ}$ .

Акустична модель системи представляє собою ряд послідовно з'єднаних рециркуляційних порожнин, остання з яких буде оснащена рушійним елементом (рис. 3.4).

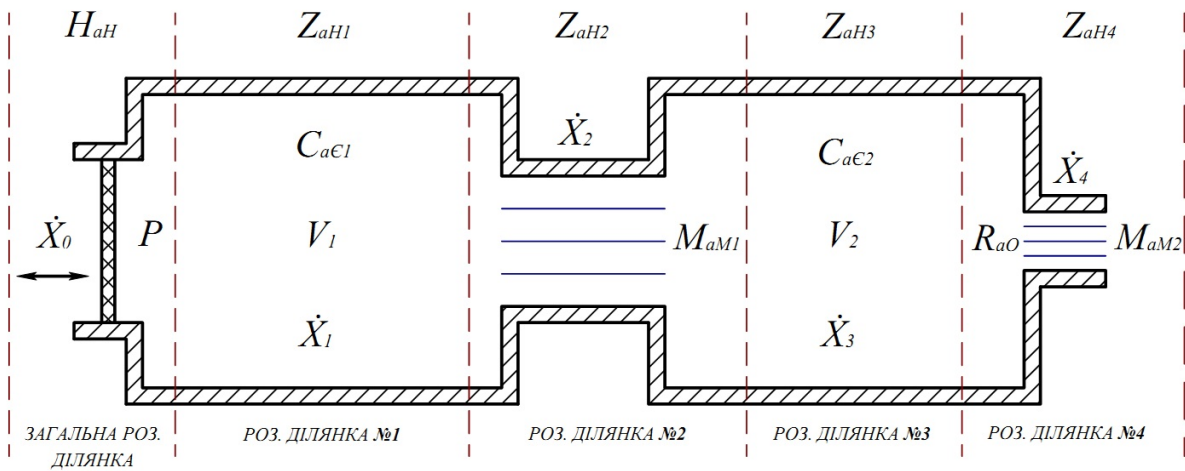


Рис. 3.4. Розрахункові ділянки рециркуляційних порожнин адаптивної системи

Відповідно до акустичної моделі, зображення еквівалентного електричного контуру та частотної характеристики системи буде мати вигляд (рис. 3.5)

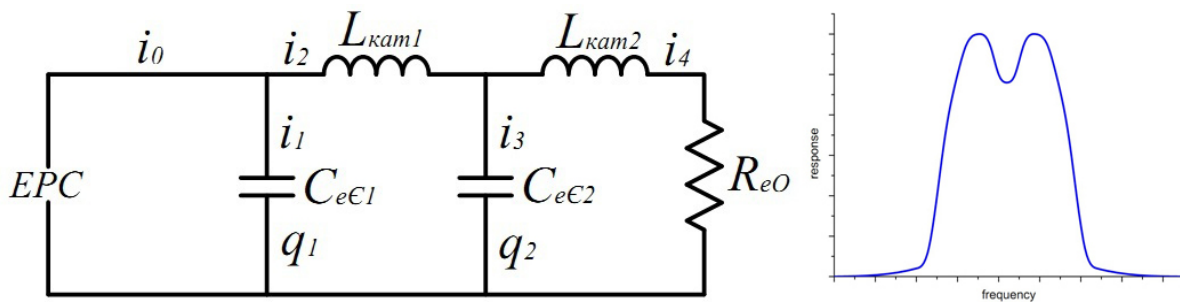


Рис. 3.5. Еквівалентний електричний контур та частотна характеристика адаптивної системи

Для елементів системи зображених на (рис. 3.4 та 3.5) аналогічними будуть: індуктивність  $L_{кам1}$  до акустичної маси  $M_{aM1}$ , індуктивність  $L_{кам2}$  до акустичної маси  $M_{aM2}$ , електрична ємність  $C_{eЄ1}$  до акустичної ємності  $C_{aЄ1}$ , електрична ємність  $C_{aЄ2}$  до акустичної ємності  $C_{aЄ2}$  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  $\dot{X}_4$ .

Загальний імпеданс адаптивної системи записується наступним чином

$$H_{aH} = \frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 V_{n1} V_{n2}} \cdot \left( \frac{12\mu a_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}}^3} + \frac{2jf_{\Pi}\rho c_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2} \right) + \frac{2jf_{\Pi}\rho^2 h_2}{2\pi j f_{\Pi} V_{n1} r_2^2} \times \left[ \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{n2}} + \left( \frac{12\mu a_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}}^3 b_{\text{ш}}} + \frac{2jf_{\Pi}\rho c_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2} \right) \right] \quad (3.3)$$

Загальна витрата адаптивної системи записується у вигляді

$$\dot{X}_0 = \frac{\left[ \left( \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 1}} + \frac{2jf_{\Pi}\rho h_2}{r_2^2} \right) \cdot \left( \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} + \left( \frac{12\mu a_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}}^3 b_{\text{ш}}} + \frac{2jf_{\Pi}\rho c_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2} \right) \right) \cdot \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} \cdot \left( \frac{12\mu a_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}}^3 b_{\text{ш}}} + \frac{2jf_{\Pi}\rho c_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2} \right) \right]}{\frac{\rho^2 a^2}{4\pi^2 j^2 f_{\Pi}^2 V_{n1} V_{n2}} \cdot \left( \frac{12\mu a_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}}^3 b_{\text{ш}}} + \frac{2jf_{\Pi}\rho c_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2} \right) + \frac{2jf_{\Pi}\rho^2 h_2}{2\pi j f_{\Pi} V_{n1} r_2^2} \cdot \left[ \frac{\rho a}{2\pi j f_{\Pi} V_{\Pi 2}} + \left( \frac{12\mu a_{\text{ш}}}{c_{\text{ш}}^3 b_{\text{ш}}} + \frac{2jf_{\Pi}\rho c_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}^2} \right) \right]} \quad (3.4)$$

Загальна енергія системи – сума кінетичної та потенційної енергії, має вигляд

$$W_A = \frac{1}{2} \left( M_{aM} \dot{X}_0^2 + \frac{\dot{X}_0^2}{C_{aE}} \right). \quad (3.5)$$

Відображено розробку методики розрахунку параметрів та характеристик рушійного елемента адаптивної системи впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів, а також визначено умови зміни частоти коливань системи при різних налаштуваннях рушійного елемента.

Оскільки режим роботи рушійного елемента має періодичний характер, тоді коефіцієнт імпульсу секундної маси робочого тіла щільно-порожнинного комплексу набуває вигляду:

$$J_{\text{ш.п}} = \rho_{\text{ш}} \pi r_{\text{ш}}^2 \vartheta_{\text{ш}}^2 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right), \quad (3.6)$$

де  $t$  – час роботи адаптивної системи, [сек],  $T=1/f$  – період коливань, [сек].

Таким чином, в розділі сформовано узагальнені залежності (рівн. 3.3 та 3.4) та розроблено математичну модель адаптивної системи впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів. Визначено взаємозв'язок параметрів системи (рис. 3.2 та 3.3), розроблено алгоритм розрахунку її геометричних параметрів (рис. 3.6).

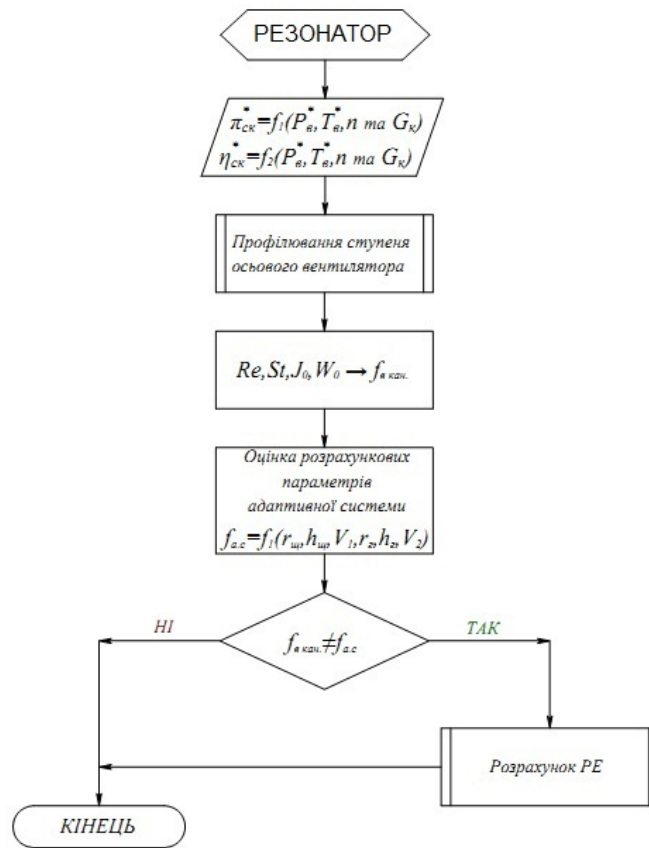


Рис. 3.6. Алгоритм розрахунку геометричних параметрів системи

У четвертому розділі описаний стенд для досліджень характеристик осьового вентилятора та наведено методику проведення експериментальних досліджень ступеня осьового вентилятора з адаптивною системою газодинамічного впливу на кінцеві втрати.

Основною метою проведення експериментальних досліджень, що проводились на стенді, була апробація та верифікація отриманих результатів дослідження характеристик ефективності ступеня, в «базовому» виконанні та з комплексним резонатором. Схема робочої частини експериментального стенду з розміщенням реперних точок представлена на (рис. 4.1).

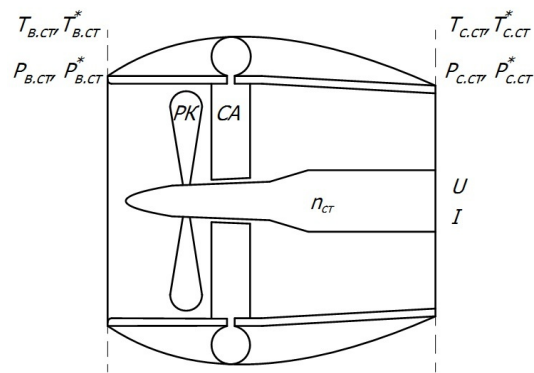


Рис. 4.1. Схема робочої частини стенду з розміщенням реперних точок

Обробка результатів здійснювалась за допомогою автоматизованого вимірювального комплексу, в якому перетворення сигналу від аеродинамічних зондів здійснюється за допомогою кременевих датчиків тиску типу MPXV5004GVP компанії Freescale Semiconductor. В якості аналогових пристроїв зв'язку з датчиками використовувались модулі гальванічної розв'язки типу ADC-1293G виробництва компанії HOLIT Data Systems.

Розроблено методику визначення ККД  $\eta_{\text{ст.в}}^*$  ступеня ОВ, що ґрунтується на вимірюванні повних тисків на вхідному перерізі, частоти обертання ступеня та крутного моменту на валу ступеня.

В такому випадку, ККД ступеня ОВ визначається як відношення потрібної потужності до затраченої та записується рівнянням

$$\eta_{\text{ст.в}}^* = \frac{Q_{\text{ст.в}} / \rho \cdot p_{\text{ст.в}}^*}{N_{\text{ст.в}}}, \quad (4.1)$$

де  $Q_{\text{ст.в}}$  – об'ємна витрата ступеня ОВ;  $N_{\text{ст.в}}$  – потужність, що витрачається на привід ступеня ОВ.

Потужність, що витрачається на обертання ступеня ОВ визначається за наступною формулою

$$N_{\text{ст.в}} = \frac{\pi n_{\text{ст.в}}}{30} \cdot M_{\text{ст.в}}, \quad (4.2)$$

де  $M_{\text{ст.в}}$  – крутний момент на валу досліджуваного ступеня;  $n_{\text{ст.в}}$  – частота обертання ступеня осевого вентилятора.

Так само потужність, що витрачається на обертання ступеня ОВ, можна записати наступною залежністю

$$N_{\text{ст.в}} = U \cdot I, \quad (4.3)$$

де  $U$  – напруга, що підводиться до електродвигуна;  $I$  – сила струму.

Прирівнявши формули (4.2) та (4.3), крутний момент електродвигуна буде мати вигляд

$$M_{\text{ст.в}} = \frac{30UI}{\pi n_{\text{ст.в}}}. \quad (4.4)$$

Враховуючи формулу (4.3), рівняння (4.1) приймає вигляд

$$\eta_{\text{ст.в}}^* = \frac{Q_{\text{ст.в}} / \rho \cdot p_{\text{ст.в}}^*}{UI}. \quad (4.5)$$

Наведено методику визначення сили тяги  $P$  ступеня ОВ, що визначається як рівнодійна сил тиску на усі елементи конструкції ступеня.

Враховуючи, що дослідження ступеня ОВ проводились в стендових умовах, буде справедливою умова ( $V = 0$ ), тоді силу тяги  $P$  можна записати у вигляді

$$P = G_{\text{ст.в}\Sigma} \cdot C_{\text{вих}}. \quad (4.6)$$

Розроблений в ході дисертаційного дослідження стенд, дозволяє проводити вимірювання сили тяги  $P$  ступеня ОВ прямим методом. Для цього визначається сума усіх моментів та сил, що діють на ступінь ОВ.

Сума усіх моментів та сил записується залежністю

$$\Sigma M_0 = 0, -P_1a + P_2b = 0 \rightarrow P_2b = P_1a \rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \frac{a}{b}, \quad (4.7)$$

де  $P_1, P_2$  – сили, що діють на досліджуваній ступінь ОВ;  $a, b$  – плечі силової схеми ступеня ОВ.

Слід зауважити, що оцінка параметрів ККД  $\eta_{\text{ст.в}}^*$  та сили тяги  $P$  ступеня ОВ під час проведення експериментальних досліджень визначалась у відносних величинах, тоді (рівн. 4.5 та 4.6) набувають вигляду

$$\eta_{\text{ст.в}}^* = \frac{\eta_{\text{ст.в.реж}}^*}{\eta_{\text{ст.в.роз}}^*}, \quad (4.8)$$

Де  $\eta_{\text{ст.в.роз}}^*$  – ККД ступеня ОВ на розрахунковому режимі;  $\eta_{\text{ст.в.реж}}^*$  – ККД ступеня ОВ на заданому режимі.

Відповідно сили тяги  $P$  ступеня ОВ

$$\bar{P} = \frac{P_{\text{реж}}}{P_{\text{роз}}}, \quad (4.9)$$

де  $P_{\text{роз}}$  – сила тяги ступеня ОВ на розрахунковому режимі;  $P_{\text{реж}}$  – сила тяги ступеня ОВ на заданому режимі.

Проведено метрологічну оцінку похибок вимірювань. Представлено алгоритми обробки результатів прямих та непрямих вимірювань та наведена форма представлення результатів експериментального дослідження. Вказано метод перевірки нормальності розподілу результатів вимірювань. Сформовано тарувальну таблицю вимірювальних каналів, зазначено, що похибки вимірювальних каналів стенду відповідають нормативним вимогам та можуть бути прийняті як істинні значення вимірювальних параметрів ступеня ОВ.

У п'ятому розділі описано результати експериментальних досліджень «базового» ступеня та ступеня ОВ з резонатором при розрахунковому і зривному режимах роботи, а також результати чисельного дослідження ступеня ОВ із застосуванням адаптивної системи впливу на кінцеві вихорові течії при зривному режимі роботи.

Отримано розподіл значень параметрів повного тиску  $p^*$  «базового» ступеня ОВ на розрахунковому та зривному режимах. Визначено особливості роботи «базового» ступеня ОВ на зривному режимі, що полягає в періодичному формуванні «М-подібних» піків значень параметрів повного тиску  $p^*$  та появи низькочастотної складової коливань, що становить  $f \cong 71,4$  [Гц] (рис. 5.1).

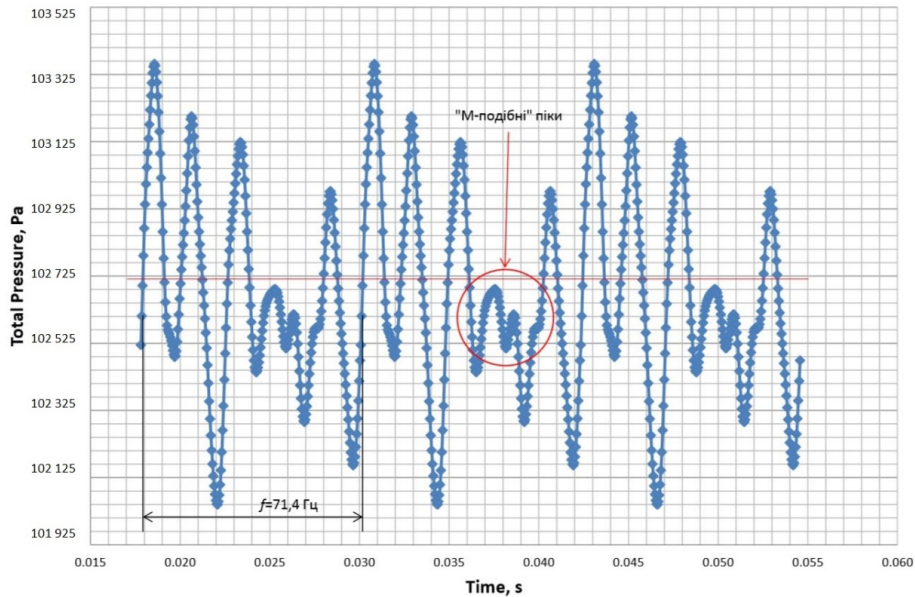


Рис. 5.1. Зміна значень повного тиску  $p^*$  при зривному режимі роботи «базового» ступеня ОВ

Отримано розподіл значень параметрів  $p^*$  ступеня ОВ з резонатором на розрахунковому та зривному режимах. Особливість роботи ступеня ОВ з резонатором на зривному режимі є те, що резонатор акумулював високочастотну складову коливань параметрів  $p^*$ , тим самим провівши перерозподіл значень повного тиску. Амплітуда коливань значень повного тиску  $p^*$  знаходиться в межах  $p^* = 102275 \div 103225$  [Па]. Середнє значення повного тиску  $p^*$  складає  $p^* = 1550,2$  [Па] (рис. 5.2).

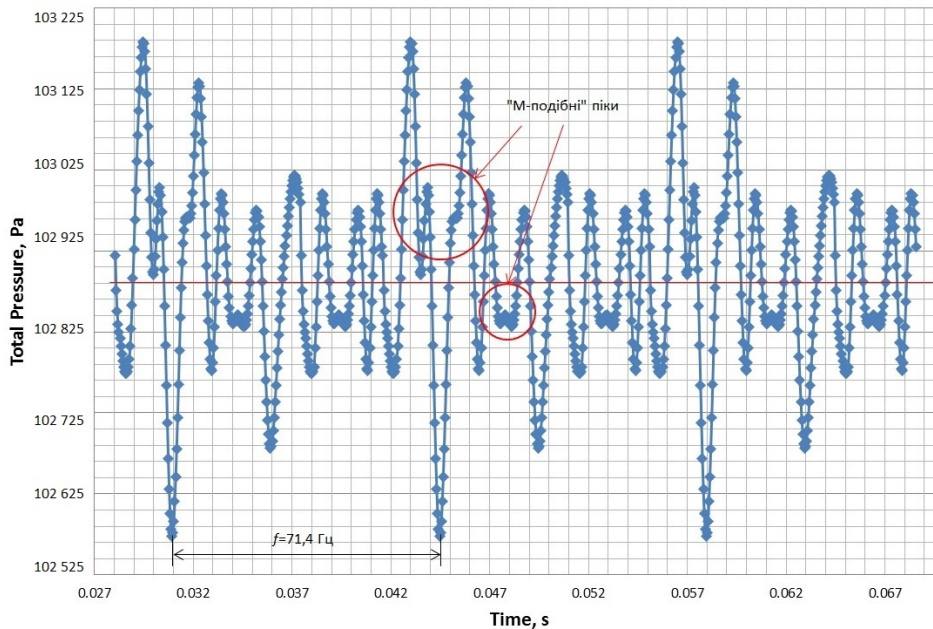


Рис. 5.2. Зміна значень повного тиску  $p^*$  при зривному режимі роботи ступеня ОВ з резонатором

Оцінка роботи ступеня ОВ з адаптивною системою показала, що робота системи має імпульсний характер, це добре прослідковується на кривій розподілу значень повного тиску (рис. 5.3). Крива розподілу значень, що відповідає частоті коливань  $f \cong 71,4$  [Гц] є вдувом робочого тіла в примежовий шар, подальша зміна значень відповідає накопиченню робочого тіла адаптивною системою.

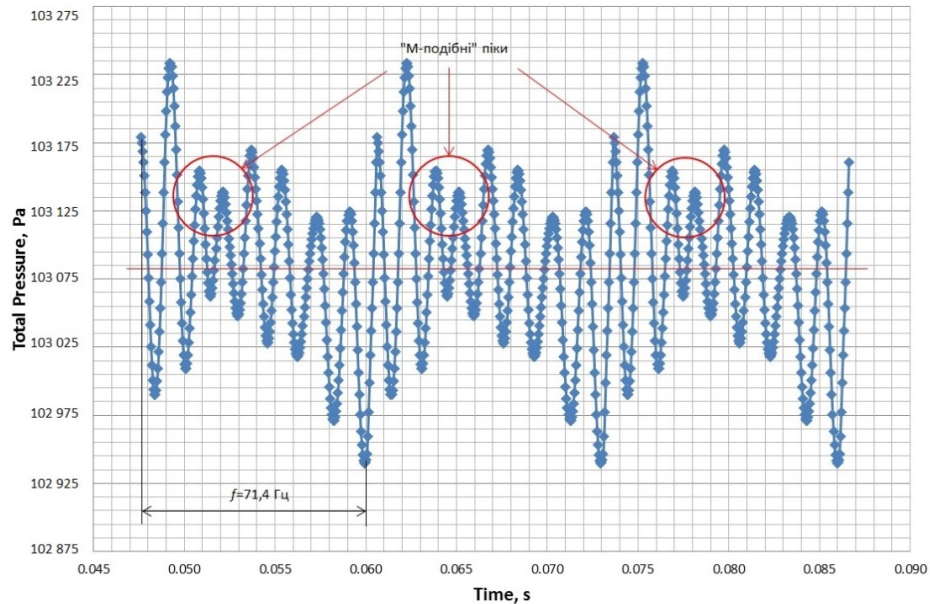


Рис. 5.3. Зміна значень повного тиску  $p^*$  при зривному режимі роботи ступеня ОВ з адаптивною системою

Зміна роботи ступеня ОВ з резонатором на розрахунковому режимі полягає в збільшенні амплітуди коливань значень повного тиску  $p^*$  на 4 % та збільшенні середнього значення осьової швидкості  $C_{\text{сер}}$  на 17 %. Застосування резонатору на розрахунковому режимі роботи ступеня ОВ призвело до збільшення значення  $\bar{\eta}_{\text{ст.в}}^*$  ступеня на 7 % в порівнянні з «базовим» ступенем. Значення тяги  $\bar{P}$  ступеня ОВ з резонатором на номінальному режимі роботи на 3,5 % більше ніж у «базового» ступеня.

На зривному режимі роботи ступеня ОВ з резонатором, останній акумулював високочастотну складову параметрів  $p^*$  та  $C_{\text{сер}}$ , тим самим провівши перерозподіл їхніх значень, що призвело до підвищення  $\bar{\eta}_{\text{ст.в}}^*$  на 5 % та сили тяги  $\bar{P}$  на 1,4 %.

Результати дослідження ступеня ОВ з адаптивною системою впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів характеризуються зменшенням амплітуди високочастотних та низькочастотних коливань значень повного тиску  $p^*$  і осьової швидкості  $C_{\text{сер}}$  на 5 %, в порівнянні з ступенем ОВ з резонатором, та на 15 % в порівнянні з «базовим» ступенем ОВ. Застосування системи на зривному режимі роботи ступеня осьового вентилятора, призводить до приросту значень  $\bar{\eta}_{\text{ст.в}}^*$  ступеня на 7 % та сили тяги  $\bar{P}$  на 4,5 %.



Порівняння параметрів ефективності «базового», ступеня з резонатором та адаптивною системою впливу на відривну течію представлено у вигляді розподілу параметрів ефективності ступеня ОВ на розрахунковому та зривному режимах (рис. 5.4).

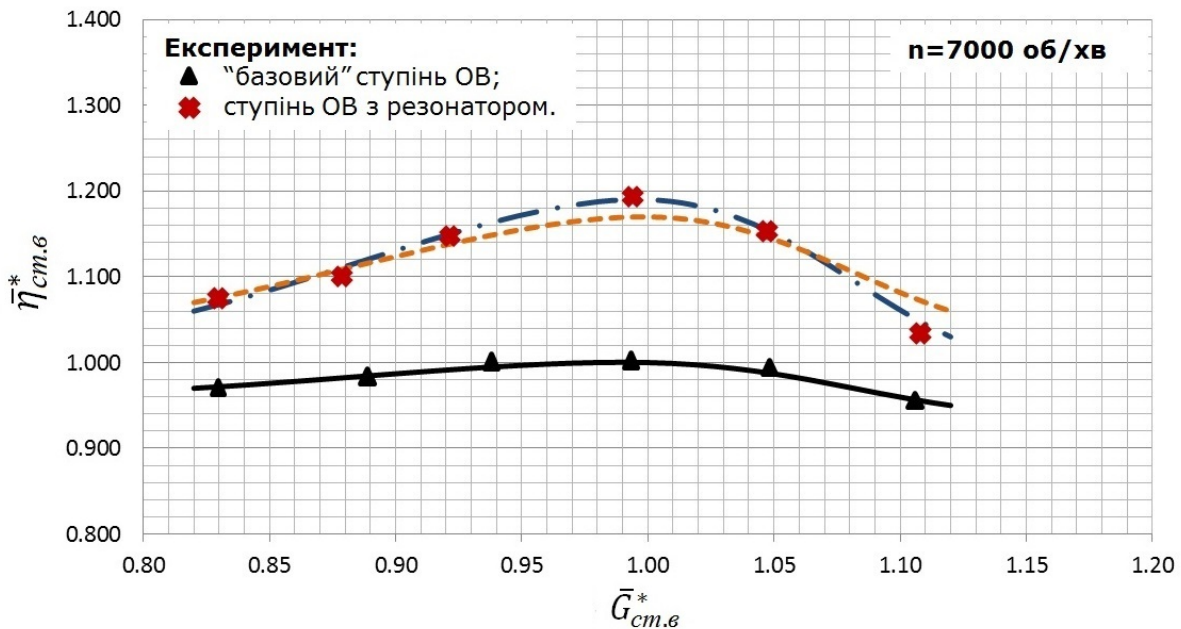


Рис. 5.4. ККД ступеня ОВ: — · — з резонатором; — — — з адаптивною системою

## ВИСНОВКИ

У ході проведення досліджень по темі даної дисертаційної роботи одержано нові наукові і практичні результати, що мають істотні переваги перед існуючими та полягають в наступному:

1. Встановлено, що для зменшення рівня кінцевих втрат необхідно застосовувати комплексний підхід, оскільки усі існуючі методи впливу на кінцеві вихрові течії у проточній частині вентиляторів характеризуються обмеженим діапазоном ефективності.

2. Представлені особливості моделювання ступеня осьового вентилятора (ОВ). Наведено математичні залежності визначення зміни значень основних показників роботи ступенів, визначено особливості налаштування розрахункової сітки та встановлення граничних умов розрахунку ступеня ОВ. Наведена методика розрахунку факторів газодинамічного впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів.

3. Розроблено методику розрахунку параметрів та характеристик елементів коливального контуру адаптивної системи впливу на відривну течію у проточній частині вентиляторів, визначено аналогію між акустичними та електричними елементами систем. Сформовано узагальнені залежності та розроблено математичну модель адаптивної системи. Визначено взаємозв'язок параметрів системи, розроблено алгоритм розрахунку її параметрів та алгоритм адаптації системи до ступеня ОВ. Розроблено методику розрахунку параметрів та характеристик рушійного елемента адаптивної системи. Визначено умови

зміни частоти коливань системи при різних налаштуваннях рушійного елемента.

4. Отримані розподіли значень параметрів повного тиску  $p^*$  та осьової швидкості  $C_{\text{сер}}$  ступеня ОВ на номінальному та зривному режимах. Визначено особливість роботи «базового» ступеня ОВ на номінальному режимі, що полягає в періодичному формуванні «М-подібних» піків значень параметрів повного тиску  $p^*$  та осьової швидкості  $C_{\text{сер}}$ . Встановлено появу низькочастотної складової коливань при зривному режимі роботи ступеня ОВ, що становить  $f \cong 71,4$  [Гц].

5. Встановлено, що застосування резонатору на розрахунковому режимі роботи ступеня ОВ призвело до збільшення значення ККД ступеня  $\bar{\eta}_{\text{ст.в}}^*$  на 5 % в порівнянні з «базовим». Встановлено, що значення сили тяги  $\bar{P}$  ступеня ОВ з резонатором при номінальному режимі роботи на 1,4 % більше, ніж у базового ступеня.

6. Визначено, що застосування адаптивної системи при зривному режимі роботи ступеня ОВ, призводить до приросту значень ККД ступеня  $\bar{\eta}_{\text{ст.в}}^*$  на 7 % та сили тяги  $\bar{P}$  на 4,5 %.

У результаті проведених досліджень, було досягнуто мети дисертаційної роботи, що полягала в підвищенні ефективності ступенів осьових вентиляторів із застосуванням адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію в широкому діапазоні їх експлуатації.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Bogdanov M. Y. Construction of compressor stage blade row according to the gas-dynamic calculation / M.Y. Bogdanov, P.I. Grekov, K.I. Kapitanchuk, I. A. Lastivka // Наукоємні технології. – 2012. – № 1(13). – С. 5–8.

2. Богданов М. Ю. Моделювання нестационарних характеристик ступеня осьового вентилятора / М. Ю. Богданов // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2015. – № 22 (1131). – С. 95–99. *(наукометричне видання)*

3. Богданов М. Ю. Розробка методики розрахунку параметрів комплексного акустичного резонатору / М. Ю. Богданов, Ф. І. Кірчу // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 4/9 (76). – С. 15–20. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.46500. *(наукометричне видання)*

4. Богданов М. Ю. Застосування генератора синтетичних струменів в системах керування відривними течіями турбомашин / М. Ю. Богданов, Ф. І. Кірчу // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 4/3(24). – С. 13–20. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.46933. *(наукометричне видання)*

5. Кірчу Ф. І. Широкохордний вентилятор для двигунів БпЛА / Ф. І. Кірчу, М. Ю. Богданов, Г. М. Нікітіна // Труды Національного університету оборони України ім. Івана Черняховського: зб. наук. пр. – К., 2015. – № 4. – С. 184–194.

6. Кирчу Ф. И. Численное моделирование отрывных течений и управление пограничным слоем в диффузорных каналах / Ф. И. Кирчу, Пейман Мохаммади, Н. Ю. Богданов, Али Джалали // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: «Машинобудування». – 2015. – № 2(74). – С. 106–115. *(наукометричне видання)*

**Матеріали доповідей:**

1. Богданов М. Ю. Питання застосування щілинних лопаткових вінців в компресорах енергетичних установок / М. Ю. Богданов, Г. М. Нікітіна, В. В. Роздобудько, В. М. Зюзьков // АВІА-2011: X міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 квітня 2011 р. – К. : НАУ, 2011. – Т. II. – С. 11.13–11.16.

2. Богданов М. Ю. До питання застосування щілинних лопаткових вінців в компресорах енергетичних установок / М. Ю. Богданов // Молодь в авіації: нові рішення та передові технології: V міжнародна науково-технічна конференція молодих спеціалістів авіамоторобудівельної галузі, 16–20 травня 2011 р.: тези доп. – Запоріжжя-Алушта: Вид-во ОАО «Мотор Січ», 2011. – С. 25–27.

3. Богданов М. Ю. Дослідження характеристик ступеня осьового компресора із щілинними лопатковими вінцями / М. Ю. Богданов, І. О. Ластівка, І. Ф. Кінащук, Г. М. Нікітіна // Промислова гідравліка і пневматика: XII міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП, 11–13 жовтня 2011 р.: тези доп. – Донецьк: Вид-во ДВНЗ «Донецький національний технічний ун-т», 2011. – С. 17–18.

4. Богданов М. Ю. Відновлення геометричних розмірів лопаток газотурбінної установки шляхом плазмової наплавки або напилення / М. Ю. Богданов // Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: Міжнародна науково-технічна конференція, 15–18 травня 2012 р.: тези доп. – Івано-Франківськ: Вид-во «ІФНТУНГ», 2012. – С. 194–195.

5. Богданов М. Ю. Щодо побудови лопаткових вінців ступеня осьового компресора / М. Ю. Богданов, Г. М. Нікітіна, М. І. Кінащук // Промислова гідравліка і пневматика: XIII міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП, 19–20 вересня 2012 р.: тези доп. – Чернігів: Вид-во «Чернігівський держ. технологічний ун-т». – С. 10–11.

6. Богданов М. Ю. До питання застосування пасивних методів управління пограничним шаром для зменшення вторинних втрат в лопаткових вінцях осьового компресора / М. Ю. Богданов, Е. П. Ясиніцький, В. М. Охмакевич, Г. М. Нікітіна, М. І. Кінащук // АВІА-2013: XI міжнародна науково-технічна конференція, 21–23 травня 2013 р.: тези доп. – К. : НАУ, 2013. – Т. III. – С. 14.5–14.8.

7. Kapitanchuk K. I. Integral method of gas ejectors calculating in mixing chamber with uneven flow by sections / K. I. Kapitanchuk, P. I. Grekov, N. M. Andriyshyn, M. Y. Bogdanov // Safety in Aviation and Space Technologies: the sixth world congress «Aviation in the XXI-st century», 23–25 вересня 2014 р.: тези доп. – К. : НАУ, 2014. – Т. I. – С. 1.5.15–1.5.18.

## АНОТАЦІЯ

**Богданов М. Ю. Методика визначення параметрів адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію в ступенях осьових вентиляторів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний авіаційний університет, Київ 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої задачі розробки та обґрунтування наукових засад створення адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію в ступенях осьових вентиляторів (ОВ). Показано, що одним з основних напрямків зменшення рівня кінцевих втрат, та як наслідок, аеродинамічного вдосконалення осьових вентиляторів, є застосування методів активного та пасивного керування відривними течіями.

В дисертації вперше сформульовано загальні положення адаптивної системи газодинамічного впливу на відривну течію в ступенях ОВ та розроблено методику розрахунку її параметрів і характеристик. На основі розрахункових досліджень отримані узагальнені залежності та сформовано математичну модель системи. Для дослідження ефективності впливу адаптивної системи на параметри ефективності ступеня ОВ розроблено експериментальний газодинамічний стенд, що дозволяє провести апробацію та верифікацію результатів чисельного дослідження. Показана можливість підвищення ефективності ступеня ОВ із застосуванням адаптивної системи.

**Ключові слова:** осьовий вентилятор, кінцеві відривні течії, адаптивна система, методика розрахунку геометричних параметрів резонатору, узагальнені залежності комплексного резонатору, ефективність.

## АННОТАЦИЯ

**Богданов Н. Ю. Методика определения параметров адаптивной системы газодинамического влияния на отрывное течение в ступенях осевых вентиляторов.** – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный авиационный университет, Киев 2016.

Диссертационная работа посвящена решению важной задачи разработки и обоснования научных положений формирования адаптивной системы газодинамического влияния на отрывное течение в ступенях осевых вентиляторов (ОВ). Показано, что одним из основных путей уменьшения уровня концевых потерь и, как следствие, аэродинамического совершенствования осевых вентиляторов, является использование методов активного и пассивного влияния на отрывные течения.

Приведены математические зависимости определения значений основных показателей работы ступени, определены особенности настройки расчетной сетки и граничных условий расчета ступени ОВ. Представлена методика

расчета факторов газодинамического влияния на отрывное течение в проточной части вентилятора.

В диссертации впервые сформулированы общие положения адаптивной системы газодинамического влияния на отрывные течения в ступенях ОВ, а также разработана методика расчета её параметров и характеристик. На основании расчетных исследований получены обобщенные зависимости и сформировано математическую модель системы. Для исследования эффективности влияния адаптивной системы на параметры эффективности ступени ОВ, разработан экспериментальный стенд, который позволяет провести апробацию и верификацию результатов численного исследования. Показана возможность повышения эффективности ступени ОВ с использованием адаптивной системы.

**Ключевые слова:** осевой вентилятор, концевые отрывные течения, адаптивная система, методика расчета геометрических параметров резонатора, обобщенные зависимости комплексного резонатора, эффективность.

## ABSTRACT

**Bohdanov M. Y. Method of determining the parameters of the adaptive system of gas-dynamic effect on the separated flow in axial fans stages. – Manuscript.**

The dissertation for the degree of a Candidate of Engineering Sciences [technical science], major 05.05.03 – Engines and powerplants. – National aviation university, Kyiv 2016.

The dissertation is devoted to a solution of an important problem of developing and scientific substantiation of principles of creating an adaptive system of gas-dynamic effects on separated flow in axial fans stages. It showed that one of the main ways of final losses reducing, and as a result, aerodynamic improving of axial fans, is the use of methods of active and passive influence on separated flow control.

General features [terms] of adaptive system of gas dynamic effects on separated flow in axial fan stages and the method of calculation of its parameters and characteristics were first formulated in the dissertation. Generalized correlations and a mathematical model of the system were obtained on the basis of undertaken calculations. An experimental gas-dynamic stand was developed to study the effectiveness of the impact of adaptive systems on efficiency parameters of axial fan stages. The stand allows to conduct approbation and verification of the results of numerical study. A possibility of increasing the axial fan stage efficiency with the use of the adaptive system was shown.

**Keywords:** axial fan, tip separated flows, adaptive system, method of calculating the geometric parameters of resonator, generalized correlations of complex resonator, efficiency.

Підп. до друку 28.01.2016. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 6-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002