

*У статті розглянутий гістерезисний ефект характеристик компресорних решіток їх при нестационарному обтіканні*

*Ключові слова: гістерезис, компресорна решітка, газодинамічна стійкість*

*В статье рассмотрен гистерезисный эффект характеристик компрессорных решеток при их нестационарном обтекании*

*Ключевые слова: гистерезис, компрессорная решетка, газодинамическая устойчивость*

*This article describes the characteristics of hysteresis effect of compressor cascade in their unsteady flow*

*Key words: hysteresis, compressor cascade, gasdynamic stability*

# ВПЛИВ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ЕФЕКТІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТОК

**І. Ф. Кінащук**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Кафедра авіаційних двигунів

Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680

Контактний тел.: 066-286-34-17

E-mail: kinaschuk@gmail.com

## 1. Вступ

Проблема підвищення аеродинамічної навантаженості компресорів тісно пов'язана з проблемою забезпечення газодинамічної стійкості авіаційних ГТД [1].

Вирішення цієї проблеми, що має важливе практичне значення, передбачає розробку загальної теорії компресорів газотурбінних двигунів, в яких використовуються газодинамічні методи дії на обтікання елементів і проведення систематичних досліджень за оцінкою впливу застосування цих методів на параметри й характеристики компресорів і двигунів в цілому.

Граничне аеродинамічне навантаження компресорних решіток, що визначається максимально допустимою для даних решіток величиною відношення швидкостей перед решітками до швидкості за нею ( $W_1/W_2 = \text{const}$ ), є параметром, що визначає границю беззривного обтікання вінців лопаток рівня осевого компресора [25]. Відношення  $W_1/W_2$ , яке може розглядатися як рівень дифузорності потоку, дозволяє визначити значення кута атаки (кута натікання потоку) або коефіцієнта витрати на границі газодинамічної стійкості. При відомій геометрії вінців лопаток рівнів осевого компресора і заданих кінематичних параметрах потоку на розрахунковому режимі визначення показників роботи компресора, відповідних границі газодинамічної стійкості, проводиться на підставі аналізу зміни ступеню дифузорності потоку в міжлопаткових каналах.

Для визначення границі зриву вінця лопатки в даний час використовуються безрозмірні критерійні величини, що мають в своїй основі положення про граничну міру дифузорності потоку.

Одним з найбільш істотних моментів протікання зривної характеристики рівня осевого компре-

сора є та обставина, що розвинений зрив має місце при докритичних кутах атаки – на правих гілках зривної характеристики (при цих же значеннях кута атаки має місце беззривне обтікання вінця лопатки, що характеризується беззривною характеристикою).

При помпажі осевого компресора ступені періодично переходять з беззривної характеристики на зривну і назад, причому, перехід зі зривної характеристики на беззривну відбувається при менших кутах атаки, чим критичні кути атаки, відповідні початку розвинутого зриву.

Це явище, відоме як гістерезис в характеристиках компресорів, має в своїй основі певні особливості в обтіканні компресорних решіток на докритичних і надкритичних режимах. Оскільки аеродинамічні характеристики компресорних решіток більшою мірою визначаються процесами, що протікають в пограничних шарах на лопатках, представляє практичний інтерес розгляд впливу періодичної нерівномірності потоку перед решітками на характер обтікання компресорних решіток і потоку в пограничному шарі на лопатках.

## 2. Гістерезисні явища нестационарному обтіканні поверхонь

Розглядаючи течію у вінцях лопаток багатоступінчатих компресорів, що працюють в умовах нерівномірного по колу потоку (причому, для випадків, коли причиною нерівномірності потоку є збурення, що вносяться аеродинамічними слідами за вихідними кромками лопаток попередніх ступенів), можна відзначити, що розрахункова схема, відповідна картині нестационарного обтікання компресорної решітки, може бути отримана, якщо представити значення швидкостей і тиску у вигляді суми стаціонарної і пульсаційної складових

$$u(x,y,\tau) = \bar{u}(x,y) + u_1(x,y,\tau);$$

$$v(x,y,\tau) = \bar{v}(x,y) + v_1(x,y,\tau);$$

$$p(x,\tau) = \bar{p}(x) + p_1(x,\tau),$$

де  $\bar{p}(x)$ ,  $\bar{u}(x,y)$ ,  $\bar{v}(x,y)$  – усереднені за період значення складових швидкості  $u$  і  $v$  і тиск  $p$ ;  $u(x,y,\tau)$ ,  $v(x,y,\tau)$ ,  $p(x,\tau)$  – пульсаційні складові швидкості і тиск. Осі координат  $x$  і  $y$  даному випадку направлені, відповідно, уздовж хорди профілю і нормально до неї. Метод передбачає лінеаризацію рівняння, що визначає швидкість періодичного потоку в основному потоці. Аналіз теоретичних рішень задачі про визначення поля пульсаційних швидкостей (задачі Стокса про обтікання безмежної пластини осцилюючим потоком) у вигляді хвилі Стокса показує, що різні шари осцилюють з фазовим зрушенням відносно зовнішнього потоку і відносно один одного, що обумовлює інерційність перехідних процесів в пограничному шарі і можливість прояву гістерезисних ефектів при обтіканні пластин періодично нерівномірним потоком. Суть рішень полягає в тому, що вони передбачають при високочастотних збуреннях, що накладаються на основний потік, деформацію лише зовнішнього потоку до границі пограничного шару: перебіг в ядрі пограничного шару не зазнає при цьому істотних змін порівняно з обтіканням поверхні стаціонарним потоком. При низькочастотних збуреннях в потоці, відповідних значенням критерію Струхаля  $S_r = 0,1$  відбувається зміна характеру течії в пограничному шарі, тобто перебудова його структури [2].

Вирішення рівнянь нестационарного пограничного шару при певному профілю швидкостей дозволяє виділити для динамічного пограничного шару стаціонарну складову і гармоніки другого порядку. Таким чином, гармонізація нерівномірності потоку (зовнішніх збурень, що накладаються на стаціонарний потік) дозволяє спростити вирішення теоретичних завдань і заздалегідь дозволяє спростити, коли можна і коли не можна використовувати принцип усереднювання параметрів потоку для дослідження потоку в пристінних шарах.

Принципово важливим з наведеного аналізу результатів теоретичних досліджень нестационарних пограничних шарів є висновки про те, що найбільш істотний вплив на потік, у пограничному шарі і особливо, в пристінних областях пограничного шару, повинні надавати низькочастотні коливання, що накладаються на основний потік, а високочастотні коливання практично не зачіпають потік в пограничному шарі.

Загальним для всіх теоретичних робіт є використання при вирішенні рівняння, що описують процеси в нестационарних пограничних шарах, ряду емпіричних співвідношень, достовірність і коректність яких визначає якість отримуваних теоретичних рішень.

Ключем концепції до пояснення гістерезисних ефектів є зіставлення частоти періодичного зриву вихорів з обтічної поверхні і частоти осциляції потоку (коливань лопаток в потоці). Великим числом досліджень встановлено, що частота зриву вихорів (пульсацій швидкості в сліді за циліндром) відповідає значенням чисел Струхаля

$$S_{r1} = \frac{\omega_1 d}{W} > 0,2 - 0,4 \left( \begin{array}{l} \text{при значеннях числа} \\ \text{Re } 0,3 \cdot 10^6 < \text{Re} < 0,8 \cdot 10^6 \end{array} \right),$$

де  $\omega_1$  – частота зриву вихорів;

$d$  – діаметр циліндра,

$W$  – швидкість набігаючого потоку,.

На рис. 1 приведені значення аеродинамічних чисел Струхаля, що характеризують періодичність зриву вихорів при закризисному обтіканні циліндрів, при вимушених коливаннях круглого циліндра в потоці, що обтікає циліндр із швидкістю  $W$ , якщо частота коливань циліндра далека від частоти зриву вихорів, тобто якщо аеродинамічне число Струхаля  $S_{r1} = \frac{\omega_1 d}{W}$  більше кінематичного числа Струхаля  $S_r = \frac{\omega d}{W}$ , то з коливаючого циліндра продовжують зриватися бічною поверхнею вихори з частотою  $\omega_1$ , при якій  $S_{r1} = 0,2$ . Аналіз залежності аеродинамічного числа Струхаля від кінематичного числа Струхаля показує ряд характерних режимів обтікання осцилюючого циліндра:

- перший режим, що характеризується  $0 \leq S_r \leq 0,04$ . На цьому режимі частота періодичного зриву вихорів відповідає аеродинамічному числу Струхаля  $S_r = 0,2$  (цей режим зриву вихорів має місце як при обтіканні осцилюючого циліндра, так і нерухомого циліндра),

- другий режим, відповідний значенням кінематичного числа Струхаля  $0,04 < S_r \leq 0,2$ . У цьому діапазоні періодичні коливання циліндра починають робити вплив на частоту сходу вихорів, відбувається «захват» частоти зриву вихорів частотою циліндра, що коливається.

- третій режим, відповідний значенням числа Струхаля  $S_r > 0,2$ , характеризується інтенсивним «захватом» частоти зриву вихорів. Але далі  $S_r = 0,28$  цей діапазон не досліджений і відсутні рекомендації про поведінку потоку на поверхні циліндра і в сліді за ним числах Струхаля  $S_r = 0,1$ . Ця область зміни Струхаля відповідає умовам обтікання лопаток вінців осьових компресорів і заслуговує на ретельне вивчення.

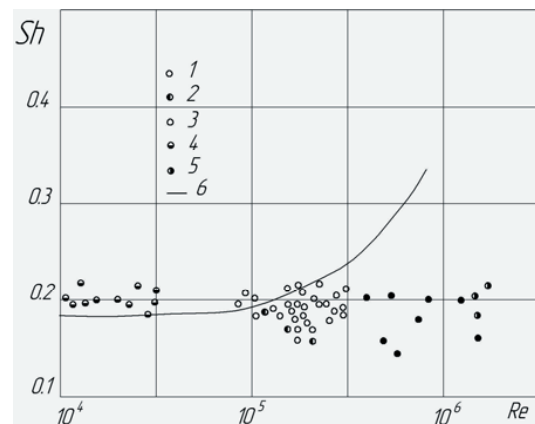


Рис. 1. Залежність аеродинамічного числа Струхаля від числа Рейнольдса для циліндра в потоці

Оскільки практичний інтерес має завдання про зіставлення частот зриву потоку з ізольованих поверхонь (крил) і лопаток в компресорних решітках з

періодичною нерівномірністю потоку, оточуючого ці елементи, завдання експериментальних досліджень формулювалися таким чином:

- оцінка впливу періодичних обурень, що вносяться до потоку на виникнення і розвиток срывних явищ на поверхнях.
- розгляд можливості поширення цих результатів на аналіз гістерезисних ефектів в компресорних решітках.

### 3. Вплив періодичної нерівномірності потоку на характеристики компресорних решіток

Розглянемо принципові особливості постановки експериментальних досліджень впливу періодичної нерівномірності потоку на течію в пограничних шарах на лопатках і аеродинамічні характеристики компресорних решіток. Нестаціонарне обтікання об'єктів забезпечувалося такими заходами:

- дія на пограничний шар і дослідження стійкості пограничного шару при різній частоті обурень;
- можливість зміни частоти періодичних обурень в широких межах;
- чітка фіксація частоти обуренні, що вносяться до потоку, і мала інерційність системи.

Ефект гістерезису визначався при послідовному виведенні досліджуваних решіток на закритичні режими і поверненні решітки на режими беззривного обтікання рис. 2.

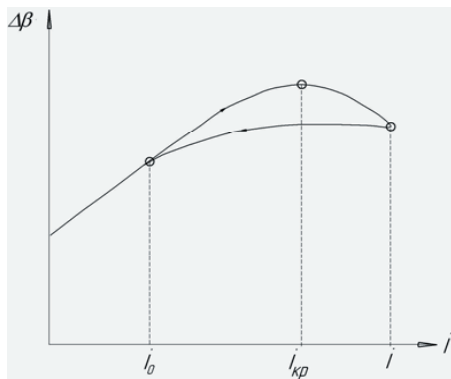


Рис. 2. Гістерезис характеристик дифузornoї решітки

Зміна режиму обтікання решітки (по куту атаки) здійснилася ступінчастим поворотом всієї обойми з решітками, поміщеними в робочій частині аеродинамічної труби. Виміри проводилися при фіксованих значеннях кута атаки, що розрізняються на  $\Delta i = 1^\circ - 2^\circ$ . Настання зривного режиму обтікання (при збільшенні кута атаки) і відновлення беззривного обтікання (при зменшенні кута атаки) контролювалося по розподілу тиску на поверхні дренажних лопаток. Величина безрозмірного коефіцієнта тиску  $\bar{p}$  підраховувалася для кожної дренажної точки по співвідношенню

$$\bar{p} = \frac{\rho - \rho_m}{S \frac{W_m^2}{2}}$$

де  $\rho_m$  - тиск в необуреному потоці перед решіткою;

$\rho$  - тиск на поверхні;

$W_m$  - швидкість потоку перед решіткою.

При менших значеннях параметра нерозрахованості в процесі експериментів (у відповідних решітках) не було виявлено нахилу до прояву гістерезису.

Як показали результати досліджень решіток рис. 3, складених з профілів з різними кутами вигину середньої лінії ( $\theta_1 = 10^\circ; \theta_2 = 20^\circ; \theta_3 = 30^\circ$ ), збільшення кута вигину профілів однорядної решітки приводить до значнішого прояву ефекту гістерезису при малій і великій густині, причому, це вплив найістотніше в решітках з малою густиною.

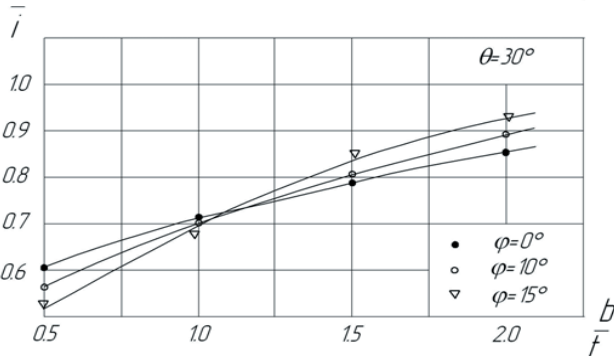
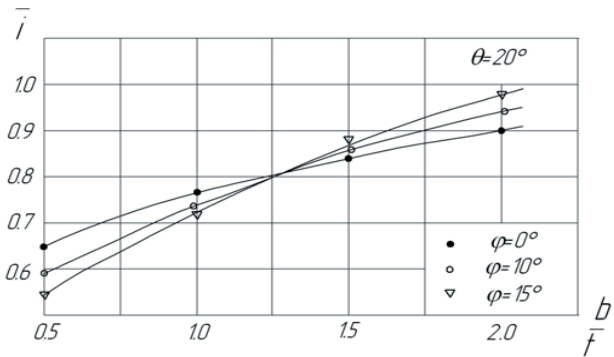
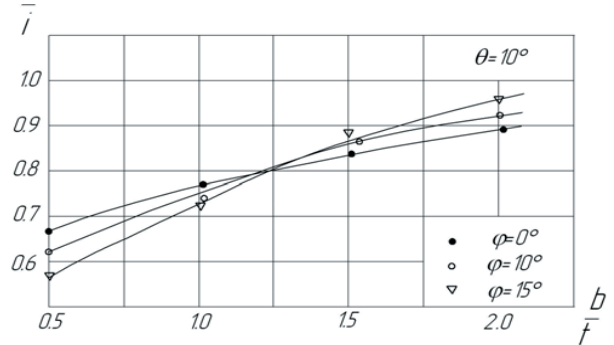


Рис. 4. Гістерезис характеристик однорядних дифузornoї решіток

В однорядних решітках (рис. 3) з профілів з кутами вигину середньої лінії  $\theta = 30^\circ$  зміна густини від  $\frac{b}{t} = 0,5$  до  $\frac{b}{t} = 2,0$  приводить до нівеляції ефекту гістерезису: якщо при  $\frac{b}{t} = 0,5$  і  $i = 1,25$  гістерезис виявляється в тому, що кут атаки, при якому має місце відновлення вихідного обтікання ( $i_0$ ) на 40-48% менше, чим  $i_{кр}$ , то при  $\frac{b}{t} = 2,0$  це розузгодження складає 8-12%.

При малій густині  $\frac{b}{t}=1,0$  збільшення кута ковзання від  $\varphi=0^\circ$  до  $\varphi=30^\circ$  приводить до зниження  $i_0$  (відповідно від  $\bar{i}=0,6$  до  $\bar{i}=0,52$ ). При  $\frac{b}{t}>1,5$  збільшення кута ковзання приводить до менш помітного прояву ефекту гістерезису:  $\bar{i}$  змінюється при збільшенні кута ковзання від 0,85 до 0,98. Як показали результати досліджень решіток, складених з профілів з різними кутами вигину середньої лінії ( $\theta_1=10^\circ; \theta_2=20^\circ; \theta_3=30^\circ$ ), збільшення кута вигину профілів однорядної решітки приводить до істотнішого прояву ефекту гістерезису при малій і великій густині, причому, це вплив найістотніше в решітках з малою густиною.

**4. Висновки**

Загальний аналіз даних експериментальних досліджень показують, що при значеннях параметра нерозрахованості  $i>1,1-1,2$  у характеристиках типових

компресорних решіток виявляється ефект гістерезису (при квазістаціонарному обтіканні), що обумовлює зниження ефективності компресорних решіток при їх роботі в потоці, що має певну нерівномірність, на докритичних і критичних кутах атаки.

Таким чином проблема підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів і вдосконалення аеродинаміки їх проточної частини передбачає вирішення завдань про зниження впливу гістерезисних ефектів на характеристики вінців лопаток, що працюють в реальних умовах в періодично нерівномірному по колу потоці.

Література

1. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1970.- 603 с.
2. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. – М.: Машиностроение, 1987.- 167 с.

УДК 612.331

# ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**В. Г. Сиченко**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
завідувач кафедри  
Кафедра електропостачання залізниць  
Дніпропетровський національний університет інженерів  
залізничного транспорту ім. акад. В.А. Лазаряна  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, Україна  
Контактний тел.: (0562) 33-19-11  
E-mail: elsnz@mail.ru

*Розглянуто методологію побудови імітаційної моделі для дослідження електромагнітних процесів електрифікованої ділянки постійного струму*

*Ключові слова: імітаційна модель, графік руху поїздів, моделювання міжпоїздних інтервалів, тяговий розрахунок, електричний розрахунок*

---

*Розглянуто методологію побудови імітаційної моделі для дослідження електромагнітних процесів електрифікованої ділянки постійного струму*

*Ключові слова: імітаційна модель, графік руху поїздів, моделювання міжпоїздних інтервалів, тяговий розрахунок, електричний розрахунок*

---

*Consider methodologies for constructing a simulation model for the study of electromagnetic processes electrified section of DC*

*Key words: simulation model, the schedule of trains, modeling of trains intervals, traction calculation, the electric account*

**1. Вступ**

Система тягового електропостачання електрифікованої ділянки постійного струму (СТЕ) є сукупністю територіально розосереджених і працюючих паралельно електроенергетичних пунктів - тягових підстанцій, постів секціонування, пунктів паралельного з'єднання, пристроїв контактної мережі і ліній електропередачі між ними, об'єднаних спільністю цілей і призначена для переробки і передачі електроенергії необхідної

якості електрорухомому складу. Особливостями передачі електроенергії по тяговій мережі є зміна положення споживачів (ЕРС) і зміна режимів їх роботи, а також обмеження, що накладаються поїздами один на одного залежно від їх взаємного розташування. З точки зору забезпечення пропускну здатності електрифікованих залізниць основним показником якості енергообмінних процесів є рівень напруги на шинях тягової підстанції і, отже, на струмоприймачах електровозів, який, проте, залежить не тільки від зміни