

Л. В. КОЛОДЯЖНА, Ю. А. БИКОВ, Р. ЖАНДКОВСКИ

АНАЛІЗ АЕРОПРУЖНОСТІ ЛОПАТКОВОГО ВІНЦЯ ТУРБИНИ З НЕСИМЕТРИЧНИМ ТИСКОМ НА ВИХОДІ

Елементи потужних парових турбін зазнають значних нестационарних навантажень, зокрема лопатки ротора останніх ступенів. Ці навантаження, у деяких випадках, можуть викликати самозбудні коливання, які є вкрай небезпечні та мають негативний вплив на ефективність та ресурс лопаткового апарату. Тому при розробці нових чи модернізації існуючих ступенів парових турбін рекомендовано проводити дослідження аеропружних характеристик робочих лопаток. Представлено результати числового аналізу аеропружних характеристик лопаткового вінця ротора останнього ступеня парової турбіни 380 МВт з урахуванням несиметричного розподілу тиску за ступенем. Розподіл тиску спричинений впливом вихлопного патрубка та отриманий експериментальним шляхом. При аналізі використовувався перевірений чисельний метод одночасного розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та пружних коливань лопаток, який дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр нестационарних навантажень і коливань лопаток в потоці в'язкого газу. Результати моделювання представлено у вигляді переміщень периферійного перетину лопатки та аеродинамічних сил, що діють на цей перетин, а також їх спектри. Також в результаті отримано залежність коефіцієнта аеропружності від міжлопаткового кута зсуву фаз коливань. Результати розрахунків показали відсутність флатеру та автоколивань за першою власною формою коливань лопаток у частковому режимі роботи парової турбіни. Аналіз результатів не виявив значного впливу несиметричності тиску на виході з вінця, завдяки значній різниці між частотами збудження, що спричинені нерівномірністю, та власними частотами коливань лопаток.

Ключові слова: флатер, парова турбіна, модальний метод, числова аеродинаміка, частковий режим.

L. KOLODYAZHNAYA, Y. BYKOV, R. RZADKOWSKI

AEROELASTICITY ANALYSIS OF TURBINE BLADE WITH ASYMMETRIC OUTLET PRESSURE

Elements of high-power steam turbines are subjected to significant unsteady loads, in particular, rotor blades of the last stages. These loads can, in some cases, cause self-excited oscillations, which are extremely dangerous and have a negative impact on the efficiency and service life of the blade cascade. Therefore, when designing new or modernizing existing steam turbine stages, it is recommended to study the aeroelastic characteristics of the blades. The paper presents the results of numerical analysis of the aeroelastic characteristics of the rotor blade cascade of the last stage of a 380 MW steam turbine, taking into account the asymmetric pressure distribution behind the stage. The pressure distribution is caused by the influence of the exhaust hood and was obtained experimentally. The analysis used a proven numerical method for simultaneously solving the coupled problem of unsteady aerodynamics and elastic oscillations of blades, which allows predicting the amplitude-frequency spectrum of unsteady loads and blade oscillations in a viscous gas flow. The modeling results are presented in the form of displacements of the peripheral blade section and aerodynamic forces acting on this section, as well as their spectra. Also, the dependence of the aeroelasticity coefficient on the inter-blade phase angle of oscillation was obtained. The results of the calculations showed the absence of flutter and self-oscillations according to the first natural form of blade oscillations in the partial mode of operation of a steam turbine. The analysis of the results did not reveal a significant effect of the pressure asymmetry at the outlet of the cascade, due to the significant difference between the excitation frequencies caused by the non-uniformity and the natural frequencies of blade oscillations.

Key words: flutter, steam turbine, modal method, CFD, partial mode.

Вступ

Однією з найбільш значних проблем, що впливають на надійність експлуатації проточних частин турбомашин, є аеропружні явища лопаткових апаратів. Задача дослідження аеропружності виникає в різноманітних лопаткових машинах, зокрема, в парових турбінах [1]–[4], вітрових турбінах [5], вентиляторах [6]–[8], компресорах [9], [10], і т. п. Математичні методи дослідження аеропружних явищ у турбомашині полягають у моделюванні взаємодії двох середовищ з різними фізичними характеристиками (рідкого та пружного). Найбільш ефективними за часом методами моделювання є розв'язання проблеми у частотній області [11]–[13]. Ці підходи ігнорують вплив лопаток, що коливаються, на основний потік газу. У рамках окремо розглянутих задач випадає з розгляду одне з найскладніших і найменш вивчених явищ – коливання, що самозбуджуються (флатер). Для отримання повної картини взаємодії рідини та структури необхідно пряме розв'язання рівнянь

Нав'є-Стокса та руху лопатки [14]–[16].

В результаті аналізу сучасного стану проблеми аеропружності турбомашин і існуючих методів прогнозування флатера можна зробити висновок, що найбільш перспективним підходом у дослідженні аеропружної поведінки лопаткового вінця (ступеня) турбомашини є підхід, заснований на тривимірній моделі нестационарної аеродинаміки і модальному аналізі руху лопатки (зв'язана аеропружна задача) [17]–[18]. Даний метод розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки і пружних коливань лопаток дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток в тривимірному потоці газу, включаючи вимушені коливання, самозбудні коливання з метою підвищення надійності лопаткових апаратів турбомашин.

В цій роботі використано математичну модель течії в'язкого газу у вигляді системи нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом [19], встановлено початкові та граничні умови для розв'язання задачі, використано

© Л. В. Колодяжна, Ю. А. Биков, Р. Жандковски, 2024

модель турбулентності Болдвіна-Ломакса. Для опису коливань лопаток в тривимірному потоці в'язкого газу використовується модальний підхід.

Мета роботи

Основна мета роботи – підвищення надійності робочого колеса парової турбіни на стадії проектування шляхом прогнозування нестационарних аеропружних характеристик на підставі розв'язання зв'язаної задачі аеродинаміки і пружних коливань лопаток в тривимірному потоці в'язкого газу.

Постановка аеропружної задачі

З використанням відомого числового методу було проведено аналіз аеропружної поведінки лопаткового вінця останнього ступеня турбомашини 380 МВт. В процесі експлуатації в частковому режимі було виявлено пошкодження лопаток ротора в кореновому перетині [14].

З використанням запропонованого числового методу [20], [21] послідовного на кожній ітерації інтегрування рівнянь течії в'язкого газу (осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса)

і рівнянь коливань лопаток під дією миттєвих нестационарних навантажень, (з використанням модального підходу) проведено числовий аналіз аеропружної поведінки лопаткового вінця останнього ступеня турбомашини на частковому режимі.

На рис. 1 представлено фрагменти різницевої сітки в меридіональній площині (рис. 1а), в тангенціальній площині (кореневий переріз лопаткового вінця, рис. 1б, середній переріз лопаткового вінця, рис. 1в та периферійний переріз лопаткового вінця, рис. 1г). Кожен із сегментів розрахункової області дискретизується з використанням гібридної деформованої $H-O$ сітки. Щільність різницевої сітки для кожного з міжлопаткових каналів становить: H -сітка містить 66800 комірок, деформуєма O -сітка $48 \times 30 \times 200 = 288000$.

Числове дослідження проведено для лопаткового вінця останнього ступеня парової турбіни потужністю 380 МВт з довжиною робочої лопатки $L = 900$ мм при різних значеннях міжлопаткового фазового кута (МЛФК).

Розглядався частковий режим роботи лопаткового вінця останнього ступеня з несиметричним по колу протитиском.

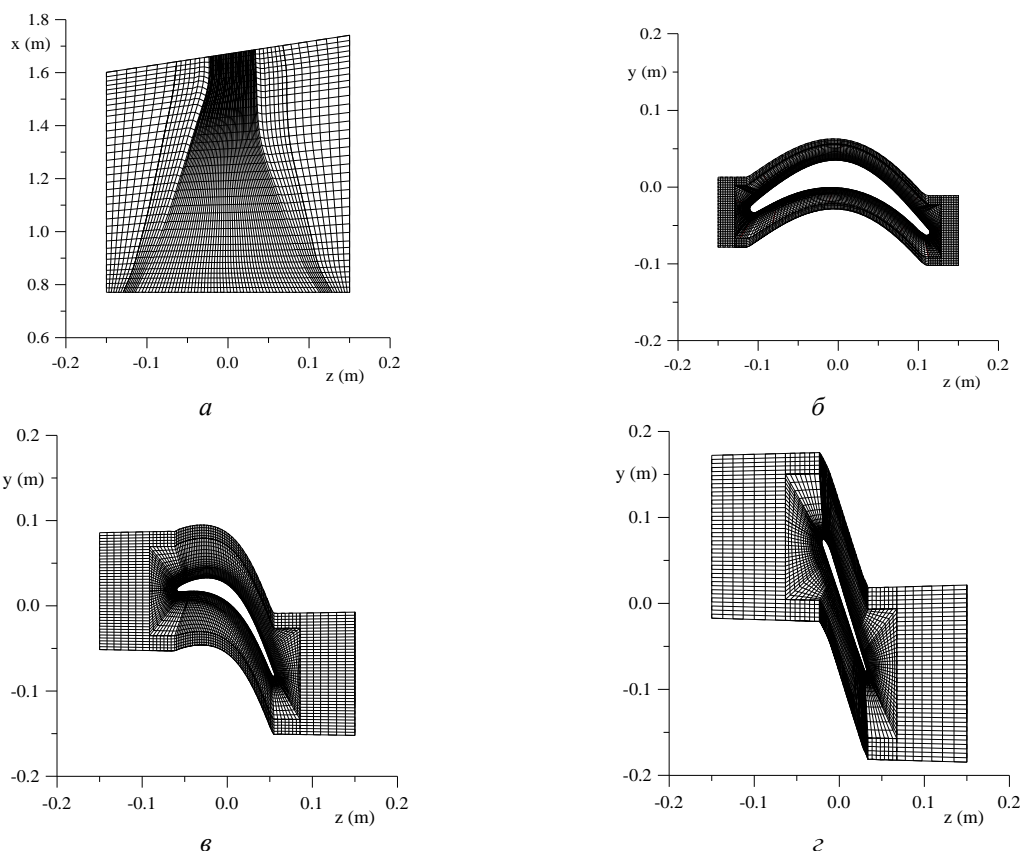


Рис. 1 – Фрагмент різницевої сітки:

а – меридіональний переріз різницевої сітки; б – кореневий переріз різницевої сітки;
в – середній переріз різницевої сітки; г – периферійний переріз різницевої сітки

Розрахунки виконано для часткового режиму з параметрами:

– постійні за радіусом тиск і температура загальмованого потоку перед вінцем $P_0 = 9200$ Па; $T_0 = 348$ К;

– кути потоку в коловому (α) і радіальному (γ) напрямках задано;

– змінний за радіусом та в коловому напрямку статичний тиск за вінцем $P_2 = 10310\text{--}10830$ Па;

– частота обертання ротора $n = 3000$ об/хв.

Розподіл статичного тиску за вінцем в коловому напрямку показано на рис. 2.

Коливання робочих лопаток визначалися з урахуванням першої власної форми коливань лопаток, відповідна власна частота складала 120 Гц.

На першому етапі виконано аеродинамічні розрахунки лопаткового вінця турбіни при заданому законі коливань лопаток. Лопатки здійснюють гармонійні коливання по кожній з власних форм по одному і тому ж закону з постійним кутом зсуву фаз δ (МЛФК = 0° , 180° , $\pm 90^\circ$ для першої власної форми):

$$q_{ij} = q_{i0} \cdot \sin[2\pi v_i t + (j-1)\delta],$$

де q_{ij} – модальний коефіцієнт;

i – номер власної форми;

j – номер лопатки;

q_{i0} – амплітуда коливань i -ої власної форми;

v_i – власна частота;

δ – міжлопатковий кут зсуву фази коливань сусідніх лопаток.

Числовий аналіз

Стійкість до флатеру системи «потік пари – лопатковий вінець» без врахування механічного демпфування визначається аеродинамічним коефіцієнтом демпфування D , рівним узятому із знаком «мінус» коефіцієнту роботи W , здійснюваним аеродинамічним навантаженням за один період коливань. Знак «мінус» сумарної роботи ($D > 0$) відповідає аеродемпфуванню, знак «плюс» – самозбудженню лопатки ($D < 0$).

Характер обміну енергією між потоком пари і лопатками, що коливаються, показано на рис. 3 (вплив міжлопаткового кута зсуву фази коливань лопаток на усереднений по довжині коефіцієнт аеродемпфування).

Як видно з графіку на рис. 3, коефіцієнт аеродемпфування $D > 0$ ($W < 0$) для всіх значень МЛФК, що відповідає відведенню енергії від лопатки (аеродемпфування коливань). Максимальні значення коефіцієнта аеродемпфування відповідають МЛФК = $+90^\circ$, мінімальні значення (найбільше збудження) відповідають МЛФК = -90° .

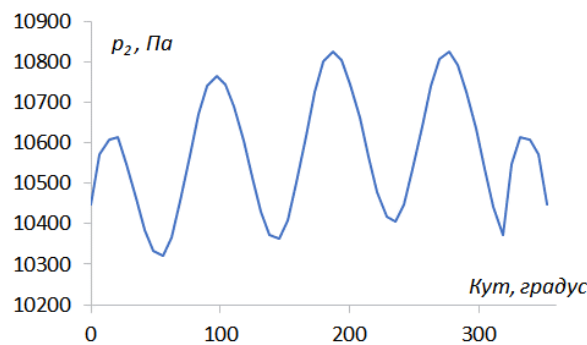


Рис. 2 – Розподіл статичного тиску за вінцем в коловому напрямку

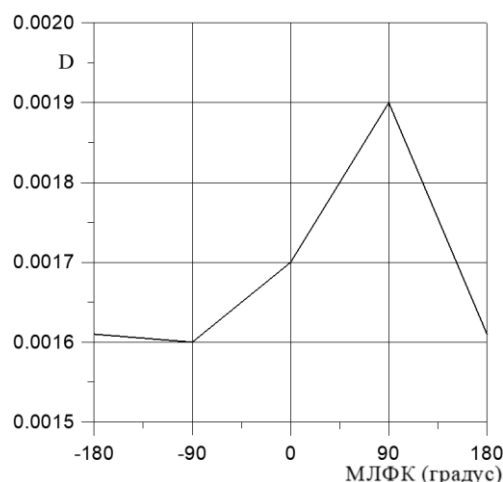


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта аеродемпфування від кута зсуву фази коливань лопаток (МЛФК)

На рис. 4 наведено графіки зміни коефіцієнта аеродемпфування за висотою лопатки для різних кутів зсуву фази коливань сусідніх лопаток МЛФК = 0° , 180° , $\pm 90^\circ$.

Як видно з графіків на рис. 4, гармонічні коливання за висотою лопатки характеризуються відведенням енергії від лопатки в потік.

Остаточну оцінку аеропружної поведінки лопаткового вінця можна отримати при розв'язанні зв'язаної задачі аеродинаміки і пружних коливань. В цьому випадку реакція лопаток залежить не лише від гармонійних коливань, але і від аеродинамічної взаємодії і обміну енергією між нестационарним потоком і лопатками, що коливаються. В статті приведено результати моделювання тільки для МЛФК = -90° та $+90^\circ$, оскільки для них отримано екстремальні значення коефіцієнта аеродемпфування.

На рис. 5 приведено графіки зміни в часі переміщень периферійного перетину лопатки для МЛФК = -90° і їх амплітудно-частотні характеристики (зв'язані коливання протягом 16 періодів коливань $t = 0,0 - 0,134$ с).

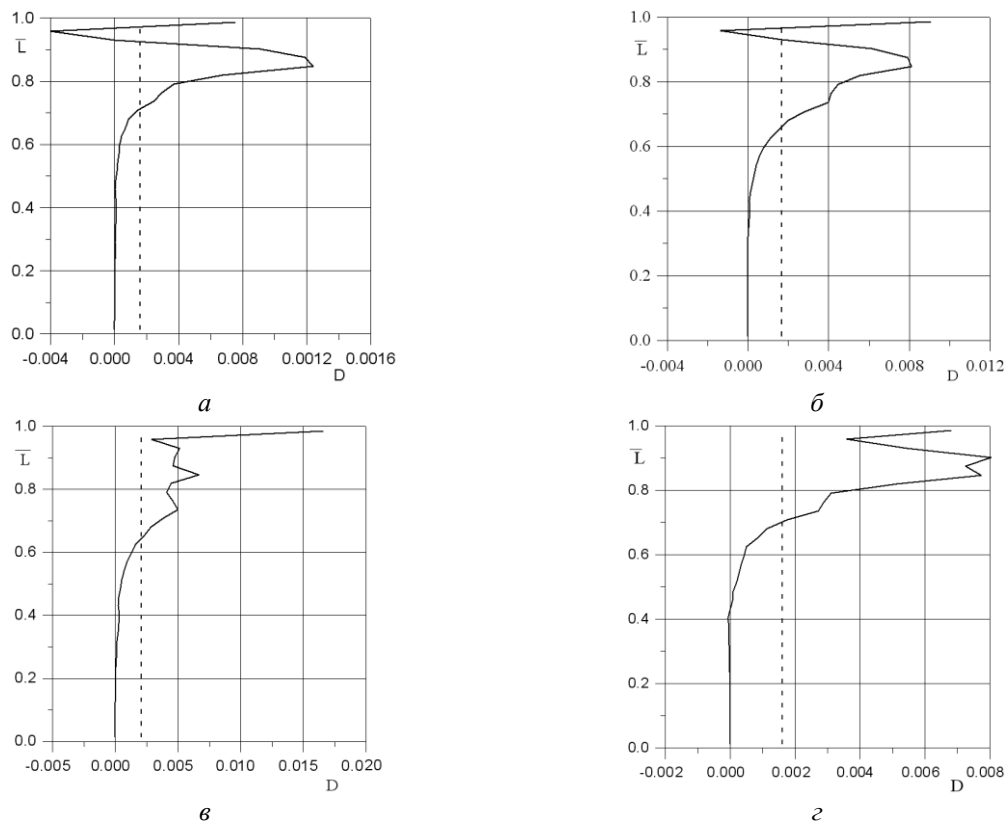
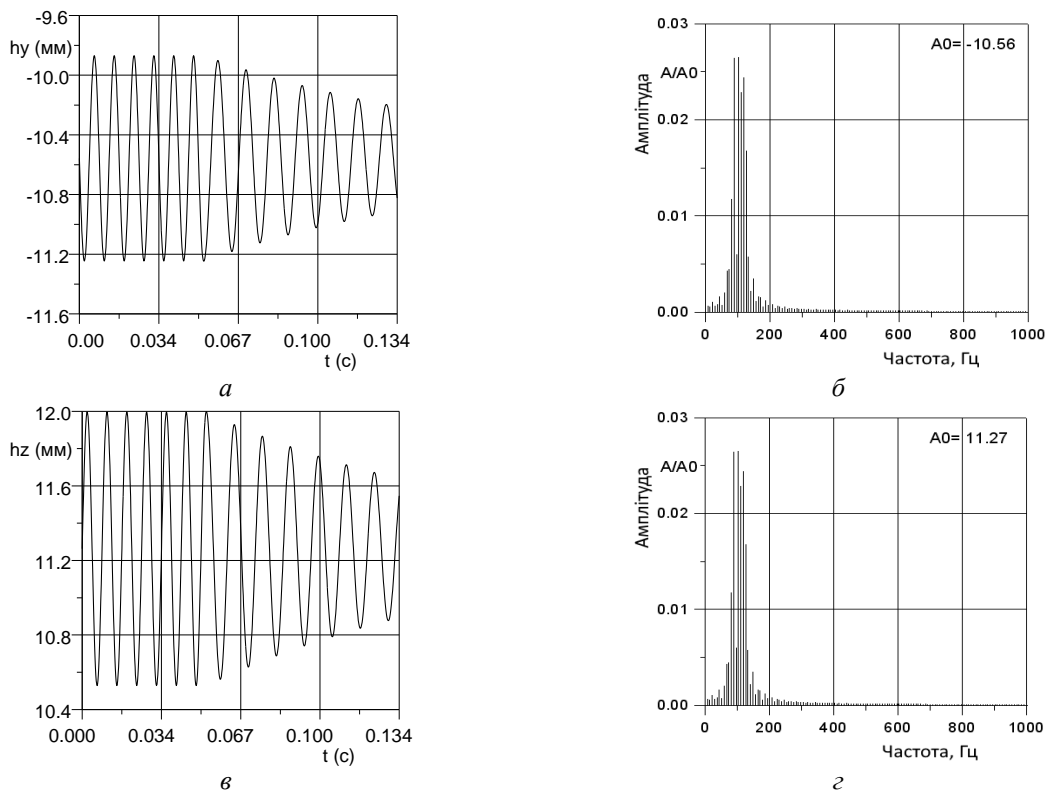


Рис. 4 – Зміна коефіцієнта аеродемпфування за висотою лопатки (МЛФК):
 $a - -90^\circ$; $б - 0^\circ$; $в - +90^\circ$; $г - 180^\circ$



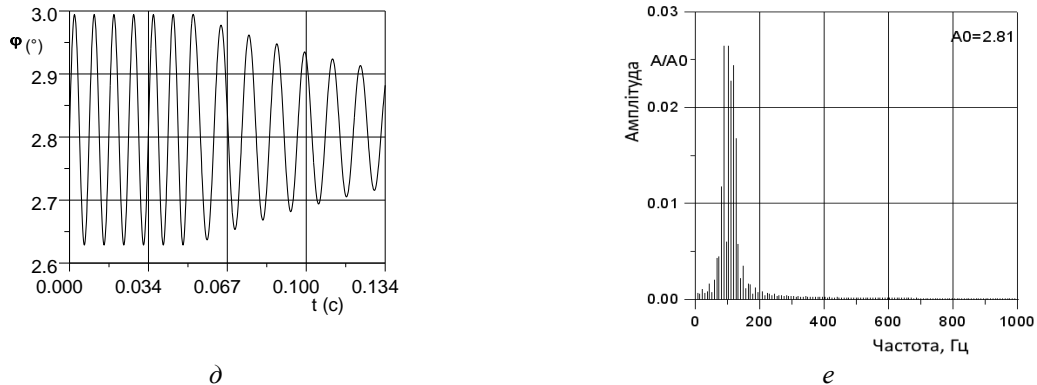


Рис. 5 – Переміщення периферійного перетину лопатки (МЛФК = -90°):
 а – в коловому напрямку; б – амплітудно-частотний спектр; в – в осьовому напрямку; г – амплітудно-частотний спектр; д – кут повороту відносно центру тяжіння; е – амплітудно-частотний спектр

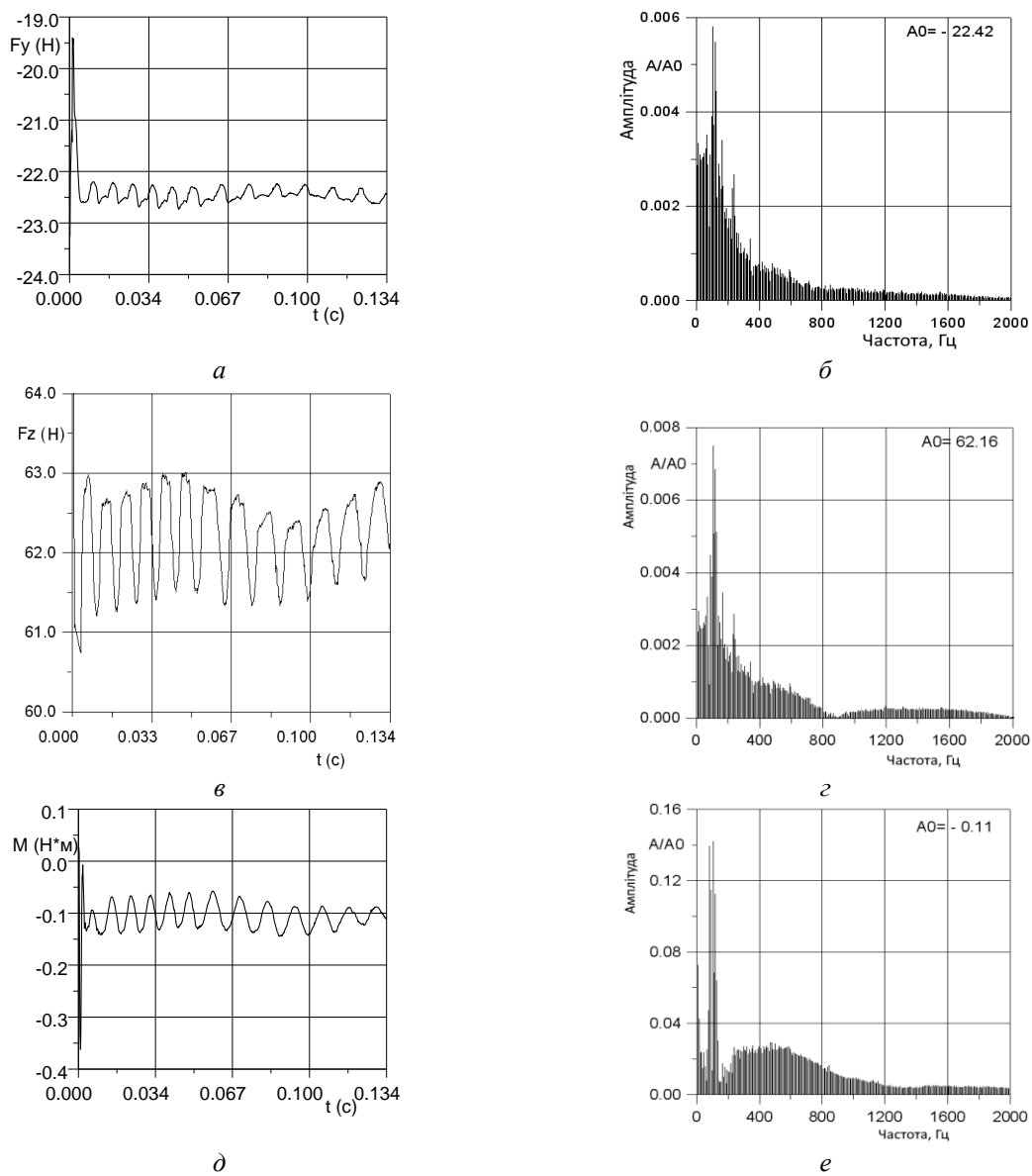


Рис. 6 – Зміна нестационарних сил в периферійному перетині робочої лопатки (МЛФК = -90°):
 а, б – окружна сила і амплітудно-частотна характеристика; в, г – осьова сила і амплітудно-частотна характеристика; д, е – аеродинамічний момент і амплітудно-частотна характеристика

На графіках рис. 5 видно, що зв'язані коливання лопаткового вінця характеризуються демпфуванням коливань для першої власної форми. Переважаючими частотами є частоти, близькі до власних частот лопатки (119 Гц) та частоти впливу несиметричного тиску за лопатками (105 Гц).

Коливання лопаток приводять до появи нестационарних аеродинамічних навантажень, які діють на лопатки. Починаючи з моменту часу $t = 0,05$ с (стартовий режим зв'язаних коливань) подальший рух лопаток визначається нестационарними силами, що діють на лопатки, які, у свою чергу, залежать від коливань лопаток, тобто рух лопаток і сили, діючі на них, знаходяться з розв'язання зв'язаної задачі.

На рис. 6 приведено графіки нестационарних аеродинамічних навантажень (колова, осьова сила і аеродинамічний момент), що діють у периферійному перетині, а також їх амплітудно-частотні спектри (МЛФК = -90° , відповідного найбільшому збудженню).

На графіках рис. 6 добре видно, що амплітуда аеродинамічних сил зменшується з часом. Переважаючими частотами є частоти, близькі до власних частот лопатки (119 Гц) та частоти, викликані несиметричним тиском за лопатками (105 Гц).

На рис. 7 приведено графіки зміни в часі переміщень периферійного перетину лопатки для МЛФК = $+90^\circ$ та їх амплітудно-частотні характеристики (зв'язані коливання протягом 16 періодів коливань $t = 0,0 - 0,14$ с).

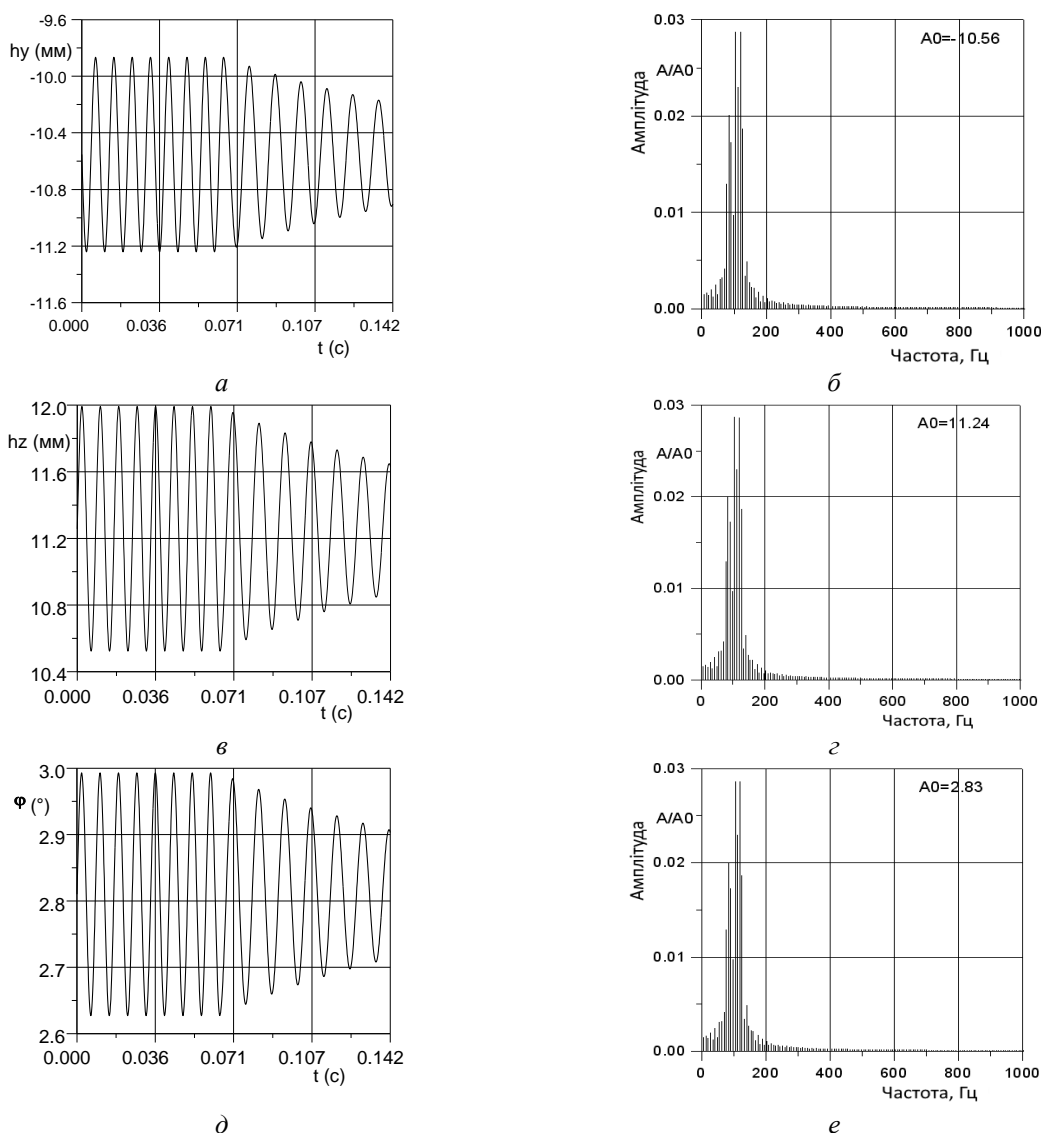


Рис. 7 – Переміщення периферійного перетину лопатки (МЛФК = $+90^\circ$):

a – в коловому напрямку; *б* – амплітудно-частотний спектр; *в* – в осьовому напрямку; *г* – амплітудно-частотний спектр; *д* – кут повороту відносно центру тяжіння; *е* – амплітудно-частотний спектр

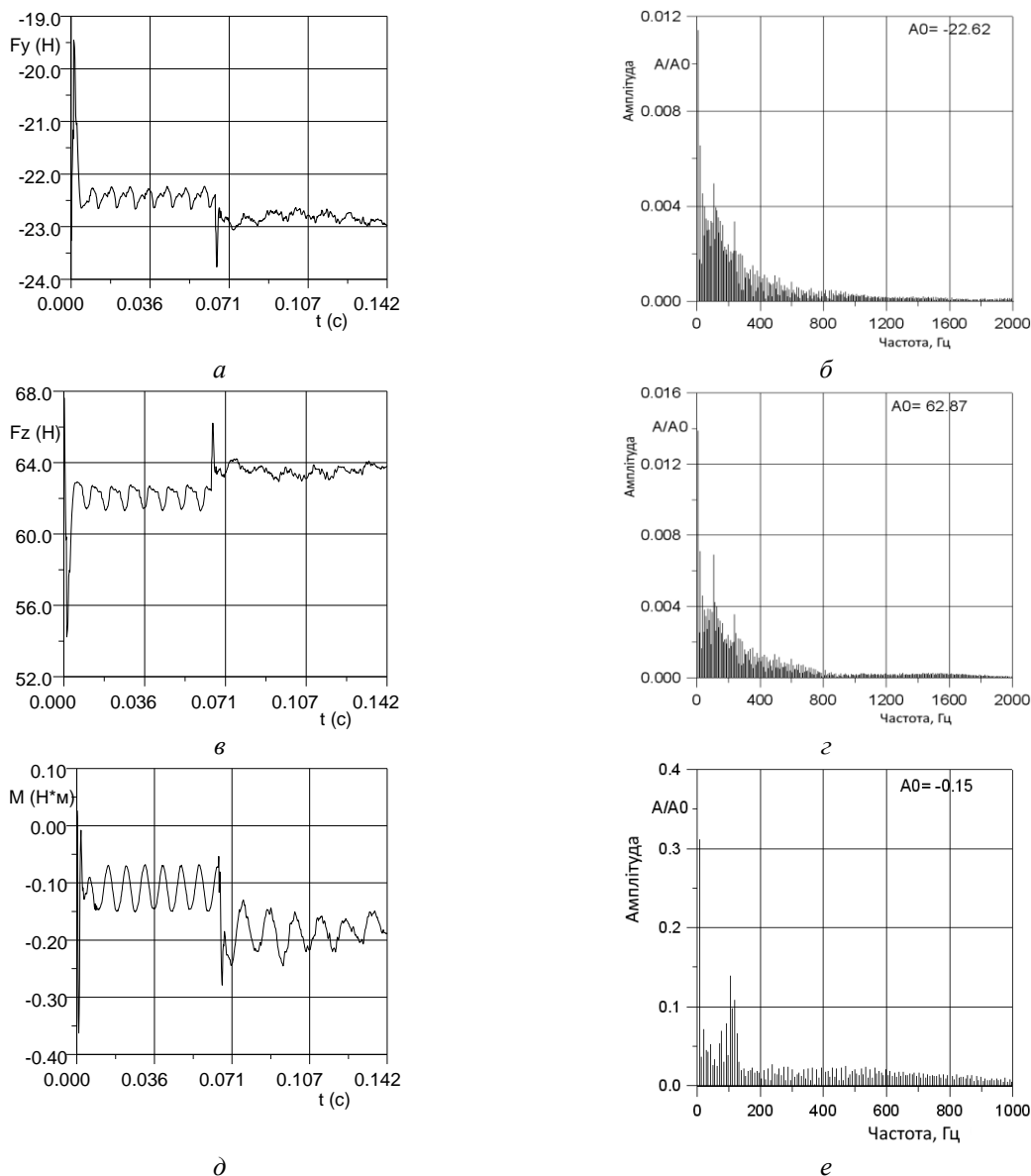


Рис. 8 – Зміна нестационарних сил в кореновому шарі робочої лопатки (МЛФК = +90°):
 а, б – окружна сила і амплітудно-частотна характеристика; в, г – осьова сила і амплітудно-частотна характеристика; д, е – аеродинамічний момент і амплітудно-частотна характеристика

На графіках рис. 7 добре видно, що зв'язані коливання лопаткового вінця для МЛФК = +90° також характеризуються демпфуванням коливань для першої власної форми. Переважаючими частотами є частоти, близькі до власних частот лопатки та частот несиметричного тиску за ротором (119 та 105 Гц).

На рис. 8 приведено графіки нестационарних аеродинамічних навантажень (колова, осьова сила і аеродинамічний момент), що діють у периферійному перетині, а також їх амплітудно-частотні спектри (МЛФК = +90°, відповідного найменшому збудженню).

Представлено графіки залежності навантажень за часом демонструють підвищені значення у період вимушених коливань та зниження амплітуд під час зв'язаних коливань, коли амплітуда вібрацій лопатки знижується.

Найбільший вклад в нестационарні складові коливань в коловому та осьовому напрямку вносить частота, викликана несиметричним тиском за ротором (105 Гц), в крутильні коливання – частоти, близькі до першої власної частоти (119 Гц). Переміщення лопатки по всім напрямкам демпфуються під час самозбудних коливань.

Висновки

Проведено числовий аналіз аеропружних характеристик лопаткового вінця ротора останнього ступеня парової турбіни 380 МВт з довжиною лопаток 900 мм з несиметричним розподілом тиску за лопатками ротору. При аналізі використовувався метод розв'язання зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та пружних коливань лопаток, який дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр нестационарних навантажень і коливань лопаток в потоці в'язкого газу. Числове моделювання виконувалось для вимушених та самозбудних коливань лопаток, що обтікаються в'язким газом. Результати розрахунків підтвердили стійкий режим роботи лопаток робочого колеса останнього ступеня турбіни на частковому режимі з урахуванням впливу несиметричного за колом тиску за лопатками ротору, що викликаний впливом вихлопного патрубку.

Список літератури

- Rzadkowski R. Unsteady Forces in LP Last Stage 380 MW Steam Turbine Rotating and Non-vibrating Rotor Blades with Exhaust Hood / R. Rzadkowski, J. Surwilo, L. Kubitz, M. Szymaniak // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 5. – pp. 357–368. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0055-y>.
- Petrie-Repar P. Two-Dimensional Steam Turbine Flutter Test Case / P. Petrie-Repar, C. Fuhrer, M. Grübel, D. Vogt // ISUAAAT2014, The 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, 8th–11th September 2015, Stockholm, Sweden. – N.Y.: Curran Associates, Inc., 2015. – pp. 33–43.
- Drewczyński M. Free vibration of a mistuned steam turbine last stage Bladed Disc / M. Drewczyński, R. Rzadkowski, A. Maurin, P. Marszałek // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2015*, June 15–19, Montreal, Canada. – GT 2015-26011. – N.Y.: ASME, 2015. – 10 p. – DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2015-42080>.
- Sun T. Detached-Eddy Simulation Applied to Aeroelastic Stability Analysis in a Last-Stage Steam Turbine Blade / T. Sun, P. Petrie-Repar, D. M. Vogt, A. Hou // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(9). – pp. 091002-1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043407>.
- Sabale A. K. Nonlinear Aeroelastic Analysis of Large Wind Turbines Under Turbulent Wind Conditions / A. K. Sabale, N. K. V. Gopal // *AIAA Journal*. – 2019. – No. 57(10). – pp. 4416–4432. – DOI: <https://doi.org/10.2514/1.J057404>.
- Romera D. Nonlinear Stability Analysis of a Generic Fan with Distorted Inflow Using Passage-Spectral Method / D. Romera, R. Corral // *ASME. J. Turbomach.* – 2021. – No. 143(6). – pp. 061001-1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4050144>.
- Stapelfeldt S. Improving the Flutter Margin of an Unstable Fan Blade / S. Stapelfeldt, M. Vahdati // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(7). – pp. 071006-1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4042645>.
- Vahdati M. Aeroelastic Instability in Transonic Fans / M. Vahdati, N. Cumpsty // *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*. – 2018. – No. 138(2). – pp. 022604-1–14. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4031225>.
- Hanschke B. Consequences of Borescope Blending Repairs on Modern High-Pressure Compressor Blisk Aeroelasticity / B. Hanschke, A. Kühhorn, S. Schrape, T. Giersch // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(2). – pp. 021002-1–7. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4041672>.
- Vallon A. Numerical investigations of flutter phenomenon in compressor stages of helicopter engines / A. Vallon, M. Herran, V. Ficat-Andrieu, Y. Detandt // 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. – 2018. – AIAA 2018-4091. – pp. 1–9. – DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2018-4091>.
- Corral R. Tip-Shroud Labyrinth Seal Effect on the Flutter Stability of Turbine Rotor Blades / R. Corral, M. Greco, A. Vega // *ASME. J. Turbomach.* – 2019. – No. 141(10). – pp. 101006-1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043962>.
- Huang H. An Efficient Aeroelastic Eigenvalue Method for Analyzing Coupled-Mode Flutter in Turbomachinery / H. Huang, W. Liu, P. Petrie-Repar, D. Wang // *ASME. J. Turbomach.* – 2021. – No. 143(2). – pp. 021010-1–12. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048294>.
- Ojha V. Adaptive High-Order Fluid-Structure Interaction Simulations with Reduced Mesh-Motion Errors / V. Ojha, K. J. Fidkowski, C. E. S. Cesnik // *AIAA Journal*. – 2021. – No. 59(6). – pp. 2084–2101. – DOI: <https://doi.org/10.2514/1.J059730>.
- Rzadkowski R. Unsteady Rotor Blade Forces of 3D Transonic Flow Through Steam Turbine Last Stage and Exhaust Hood with Vibrating Blades. Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya, R. Szczepanik // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2019. – pp. 523–531. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_52.
- Rzadkowski R. Aeroelasticity analysis of unsteady rotor blade forces and displacements in LP last stage steam turbine with various pressure distributions the stage exit / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 5. – pp. 333–337. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0049-9>.
- Rzadkowski R. Aeroelastic Behaviour of a 3.5 Stage Aircraft Compressor Rotor Blades Following a Bird Strike / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya, L. Kubitz // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 4. – pp. 281–287. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0044-1>.
- Rzadkowski R. Flutter of long blades in a steam turbine / R. Rzadkowski, L. Kubitz, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 4. – pp. 289–296. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0040-5>.
- Донченко В. В. Прогнозування флатера лопаткового вінця вентилятора авіаційного двигуна / В. В. Донченко, В. І. Гнесін, Л. В. Колодяжна, І. Ф. Кравченко, О. В. Петров // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 2(4). – 11–17 с. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.02>.
- Rusanov A. The Efficiency Increase of the Steam Turbine Low Pressure Cylinder Last Stage by the Blades Spatial Profiling / A. Rusanov, V. Shvetsov, S. Alyokhina, N. Pashchenko, R. Rusanov, M. Ishchenko, L. Slaston, R. Sherfedinov // *J. of Mech. Eng.* – 2020. – Vol. 23(1). – pp. 6–14. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2020.01.006>.
- Gnesin V. I. Aeroelastic behaviour of turbine blade row in 3D viscous flow / V. I. Gnesin, L. V. Kolodiazhnaya, R. Rzadkowski // *J. of Mech. Eng.* – 2018. – Vol. 21(1). – pp. 19–30. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2018.01.019>.
- Kolodiazhnaya L. V. Aeroelastic Characteristics of Rotor Blades of Last Stage of a Powerful Steam Turbine / L. V. Kolodiazhnaya, Y. A. Bykov // *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannya*. – 2023. – Vol. 26(1). – pp. 6–14. – ISSN 2709-2984. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2023.01.006>.

References (transliterated)

- Rzadkowski R., Surwilo J., Kubitz L. and Szymaniak M. (2018), “Unsteady Forces in LP Last Stage 380 MW Steam Turbine Rotating and Non-vibrating Rotor Blades with Exhaust

- Hood”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 5, pp. 357–368, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0055-y>.
2. Petrie-Repar P., Fuhrer C., Grübel M. and Vogt D. (2015), “Two-Dimensional Steam Turbine Flutter Test Case”, *ISUAAAT2014, The 14th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, 8th–11th September 2015, Stockholm, Sweden*, N.Y.: Curran Associates, Inc., pp. 33–43.
 3. Drewczyński M., Rzakowski R., Maurin A. and Marszałek P. (2015), “Free vibration of a mistuned steam turbine last stage Bladed Disc”, *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2015, June 15–19, Montreal, Canada, GT 2015-26011*, N.Y.: ASME, 10 p.
 4. Sun T., Petrie-Repar P., Vogt D. M. and Hou A. (2019), “Detached-Eddy Simulation Applied to Aeroelastic Stability Analysis in a Last-Stage Steam Turbine Blade”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(9), pp. 091002-1–11, <https://doi.org/10.1115/GT2015-42080>.
 5. Sabale A. K. and Gopal N. K. V. (2019), “Nonlinear Aeroelastic Analysis of Large Wind Turbines Under Turbulent Wind Conditions”, *AIAA Journal*, No. 57(10), pp. 4416–4432, <https://doi.org/10.2514/1.J057404>.
 6. Romera D. and Corral R. (2021), “Nonlinear Stability Analysis of a Generic Fan with Distorted Inflow Using Passage-Spectral Method”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 143(6), pp. 061001-1–9, <https://doi.org/10.1115/1.4050144>.
 7. Stapelfeldt S. and Vahdati M. (2019), “Improving the Flutter Margin of an Unstable Fan Blade”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(7), pp. 071006-1–9, <https://doi.org/10.1115/1.4042645>.
 8. Vahdati M. and Cumpsty N. (2018), “Aeroelastic Instability in Transonic Fans”, *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power.*, No. 138(2), pp. 022604-1–14, <https://doi.org/10.1115/1.4031225>.
 9. Hanschke B., Kühhorn A., Schrape S. and Giersch T. (2019), “Consequences of Borescope Blending Repairs on Modern High-Pressure Compressor Blistk Aeroelasticity”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(2), pp. 021002-1–7, <https://doi.org/10.1115/1.4041672>.
 10. Vallon A., Herran M., Ficat-Andrieu V. and Detandt Y. (2018), “Numerical investigations of flutter phenomenon in compressor stages of helicopter engines”, *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA 2018-4091*, pp. 1–9, <https://doi.org/10.2514/6.2018-4091>.
 11. Corral R., Greco M. and Vega A. (2019), “Tip-Shroud Labyrinth Seal Effect on the Flutter Stability of Turbine Rotor Blades”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 141(10), pp. 101006-1–10, <https://doi.org/10.1115/1.4043962>.
 12. Huang H., Liu W., Petrie-Repar P. and Wang D. (2021), “An Efficient Aeroelastic Eigenvalue Method for Analyzing Coupled-Mode Flutter in Turbomachinery”, *ASME. J. Turbomach.*, No. 143(2), pp. 021010-1–12, <https://doi.org/10.1115/1.4048294>.
 13. Ojha V., Fidkowski K. J. and Cesnik C. E. S. (2021), “Adaptive High-Order Fluid-Structure Interaction Simulations with Reduced Mesh-Motion Errors”, *AIAA Journal*, No. 59(6), pp. 2084–2101, <https://doi.org/10.2514/1.J059730>.
 14. Rzakowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L. and Szczepanik R. (2019), “Unsteady Rotor Blade Forces of 3D Transonic Flow Through Steam Turbine Last Stage and Exhaust Hood with Vibrating Blades”, *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, pp. 523–531, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_52.
 15. Rzakowski R., Gnesin V. and Kolodyazhnaya L. (2018), “Aeroelasticity analysis of unsteady rotor blade forces and displacements in LP last stage steam turbine with various pressure distributions the stage exit”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 5, pp. 333-337, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0049-9>.
 16. Rzakowski R., Gnesin V., Kolodyazhnaya L. and Kubitz L. (2018), “Aeroelastic Behaviour of a 3.5 Stage Aircraft Compressor Rotor Blades Following a Bird Strike”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 4, pp. 281–287, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0044-1>.
 17. Rzakowski R., Kubitz L., Gnesin V. and Kolodyazhnaya L. (2018), “Flutter of long blades in a steam turbine”, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, Vol. 6, Iss. 4, pp. 289–296, <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0040-5>.
 18. Donchenko V., Gnesin V., Kolodyazhnaya L., Kravchenko I. and Petrov A. (2020), “Predicting the Flutter of the Fan Row in the Aircraft Engine”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 2(4), pp. 11–17, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.02.02>.
 19. Rusanov A., Shvetsov V., Alyokhina S., Pashchenko N., Rusanov R., Ishchenko M., Slaston L. and Sherfedinov R. (2020), “The Efficiency Increase of the Steam Turbine Low Pressure Cylinder Last Stage by the Blades Spatial Profiling”, *J. of Mech. Eng.*, vol. 23(1), pp. 6–14, <https://doi.org/10.15407/pmach2020.01.006>.
 20. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. and Rzakowski R. (2018), “Aeroelastic behaviour of turbine blade row in 3D viscous flow”, *J. of Mech. Eng.*, vol. 21(1), pp. 19–30, <https://doi.org/10.15407/pmach2018.01.019>.
 21. Kolodiazhna L. V., Bykov Y. A. (2023), “Aeroelastic Characteristics of Rotor Blades of Last Stage of a Powerful Steam Turbine”, *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*, vol. 26(1), pp. 6–14, ISSN 2709-2984, <https://doi.org/10.15407/pmach2023.01.006>.

Надійшла (received) 25.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Колодяжна Любов Володимирівна (Kolodyazhnaya Lyubov) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, провідний науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, м. Харків, Україна; тел.: (057) 349-47-27; e-mail: gnesin@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5469-4325>.

Биков Юрій Адольфович (Bykov Yuriy) – кандидат технічних наук, Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, старший науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, м. Харків, Україна; тел.: (057) 349-47-76; e-mail: bykow@ipmach.kharkov.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7089-8993>.

Rzakowski Romuald – Doctor of Technical Sciences, Professor, The Institute flow machines PAN, Head of Department of Dynamics and Aeroelasticity; Gdansk, Poland; e-mail: z3@imp.gda.pl; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0560-1222>.