

В.Г. МАРТИНЕНКО

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ МІЦНОСТІ РОТОРА ДИМОСОСУ

В роботі описано процес оцінки статичної і динамічної міцності ротора осьового димососу зі здвоєними лопатками, що дозволяють значно підвищити його ефективність. Для побудови розрахункової моделі аналізу міцності виконано спрощення геометричної моделі шляхом видалення болтових з'єднань, зрощування малих поверхонь, а також моделювання зварних швів у вигляді зкруглень та фасок. Такі спрощення дозволили побудувати якісну скінченно-елементну сітку, що має достатню точність для виконання інженерних розрахунків. Розрахункові моделі включають скінченно-елементну модель одного сектора циклічної симетрії робочого колеса димососу, що використовується для більш точного визначення його напружено-деформованого стану та локальних максимумів напружень в місцях їхньої концентрації в кореневих перерізах лопаток та у місцях їхнього з'єднання перемичками від дії відцентрових сил, аеродинамічних навантажень на лопатку та теплових навантажень від прогріву колеса, а також скінченно-елементну модель всього ротора із менш детальним розбиттям робочого колеса, яке в даному випадку відіграє роль масово-інерційного елемента, та більш детальним розбиттям валу для аналізу його статичної міцності і реакцій у підшипникових вузлах від дії сил тяжіння та визначення власних частот й форм коливань ротора та можливості виникнення резонансів із кратностями частоти збуджуючих навантажень. Аналіз статичної міцності робочого колеса та валу ротора димососу виконувався шляхом порівняння еквівалентних за Мізесом напружень із допустимими напруженнями, а аналіз динамічної міцності ротора димососу виконувався шляхом визначення рівня відстройки власних частот коливань від кратностей частоти збуджуючого навантаження, яким в даному випадку приймалися відцентрові сили, що діють на дисбаланс ротора, який обертається. Детальний аналіз результатів розрахунків дозволив встановити, що елементи ротора димососу відповідають вимогам статичної міцності під дією усіх можливих типів навантажень, а власні частоти коливань ротора мають достатній рівень відстройки від кратностей частоти збуджуючого навантаження. Таким чином зроблений висновок про статичну і динамічну міцність ротора димососу, що впливають на його ресурс та довговічність роботи на номінальному режимі.

Ключові слова: осьовий ротор, здвоєна лопатка, статична міцність, довговічність, резонанс, підшипник, метод скінченних елементів.

В работе описан процесс оценки статической и динамической прочности осевого ротора дымососа со вдвоенными лопатками, позволяющими значительно повысить его эффективность. Для построения расчетной модели прочностного анализа выполнено упрощение геометрической модели путем удаления болтовых соединений, сращивания малых поверхностей, а также моделирования сварных швов в виде скруглений и фасок. Такие упрощения позволили построить качественную конечно-элементную сетку, имеющую достаточную точность для выполнения инженерных расчетов. Расчетные модели включают конечно-элементную модель одного сектора циклической симметрии рабочего колеса дымососа, используемого для более точного определения его напряженно-деформированного состояния и локальных максимумов напряжений в местах их концентрации в корневых сечениях лопаток и в местах их соединения перемычками от действия центробежных сил, аэродинамических нагрузок на лопатку и тепловых нагрузок от прогрева колеса, а также конечно-элементную модель всего ротора с менее детальным разбиением рабочего колеса, которое в данном случае играет роль массово-инерционного элемента, и более детальным разбиением вала для анализа его статической прочности и реакций в подшипниковых узлах от действия сил тяжести и определения собственных частот и форм колебаний ротора и возможности резонансов с кратностями частоты возбуждающих нагрузок. Анализ статической прочности рабочего колеса и вала ротора дымососа выполнялся путем сравнения эквивалентных по Мизесу напряжений с допустимыми напряжениями, а анализ динамической прочности ротора дымососа выполнялся путем определения уровня отстройки собственных частот колебаний от кратностей частоты возбуждающей нагрузки, которой в данном случае принимались центробежные силы, действующие на дисбаланс вращающегося ротора. Подробный анализ результатов расчетов позволил установить, что элементы ротора дымососа отвечают требованиям статической прочности под действием всех возможных типов нагрузок, а собственные частоты колебаний ротора имеют достаточный уровень отстройки от кратностей частоты возбуждающей нагрузки. Таким образом, сделан вывод о статической и динамической прочности ротора дымососа, влияющих на его ресурс и долговечность работы на номинальном режиме.

Ключевые слова: осевой ротор, вдвоенная лопатка, статическая прочность, долговечность, резонанс, подшипник, метод конечных элементов.

The work describes the process of assessing the static and dynamic strength of the rotor of an axial smoke exhauster with twin blades which allow significantly increasing its efficiency. To build a calculation model for the strength analysis, the geometric model was simplified by removing bolted connections, slicing small surfaces, as well as modeling welds in the form of roundings and chamfers. Such simplifications made it possible to build a high-quality finite-element mesh with the sufficient accuracy for performing engineering calculations. Calculation models include a finite-element model of one sector of cyclic symmetry of the impeller of the smoke exhauster, which is used to more accurately determine its stress-strain state and local maximum stresses in the places of their concentration in the root sections of the blades and in the places where they are connected by jumpers due to the action of centrifugal forces, aerodynamic loads on the blade and thermal loads due to wheel heating, as well as a finite-element model of the entire rotor with a less detailed meshing of the impeller, which in this case plays the role of a mass-inertia element, and a more detailed meshing of the shaft to analyze its static strength and reactions in bearing assemblies from the action of gravity and determine natural frequencies and mode shapes of rotor vibrations and the possibility of resonances with multiples of the frequency of exciting loads. The analysis of the static strength of the impeller and the rotor shaft of the smoke exhauster was performed by comparing the von Mises equivalent stresses with the allowable stresses, and the analysis of the dynamic strength of the smoke exhauster rotor was performed by determining the level of detuning of the natural frequencies of vibrations from multiples of the frequency of the exciting load, which in this case was assumed to be the centrifugal forces acting on the unbalance of the rotating rotor. A detailed analysis of the results of calculations made it possible to establish that the elements of the smoke exhauster rotor meet the requirements of static strength under the action of all possible types of loads, and the natural frequencies of the rotor oscillations have a sufficient level of detuning from multiples of the frequency of the exciting load. In this way, a conclusion was made about the static and dynamic strength of the rotor of the smoke exhauster, which affect its resource and durability of operation in the nominal mode.

Keywords: axial rotor, twin blade, static strength, durability, resonance, bearing, finite element method.

Вступ. Осьові димососи призначені для ефективно діють, а також для відсмоктування димових газів з топок котлів на димових газів з топок газомазутних котлів. Димососи такого типу відрізняються унікальністю співвідношення розмірів установки та її

продуктивності порівняно з відцентровим димососами, що мають аналогічні аеродинамічні характеристики.

При розробці конструкцій димососів велика увага приділяється ефективності переміщення газів у приміщеннях та спорудах, де вони використовуються [1, 2]. Порушення норм та правил проектування аеродинамічної мережі може призвести не тільки до неефективної її роботи, що загрожує життю людей, які знаходяться у приміщеннях з вентиляцією, але й до зриву потоку у димососі [3], який в свою чергу спричиняє підвищену взаємодію між лопатками та потоком й ефекти флатера [4]. Задля зниження таких

ефектів, підвищення аеродинамічної ефективності та міцності димососа використовуються здвоєні лопатки, що вже гарно себе зарекомендували в попередніх дослідженнях [5].

Оскільки ротор димососа, що розглядається та показаний на рис. 1, має діаметр робочого колеса близько 1.4 м, швидкість обертання 1500 обертів за хвилину і робочу температуру навколишнього середовища близько 120°C, він є високонавантаженою машиною, що вимагає ретельного аналізу її статичної та динамічної міцності.

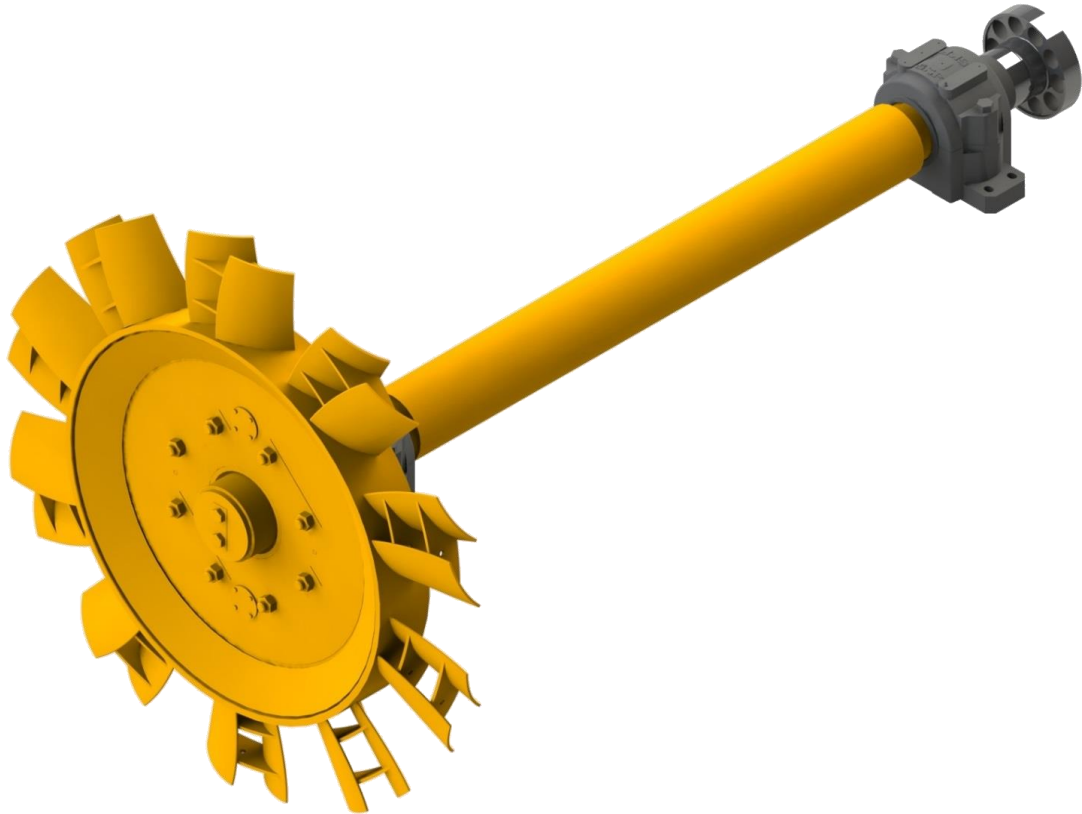


Рис. 1 – Ротор димососа у підшипникових опорах

1. Аналіз існуючих шляхів рішення проблеми.

Проблема аналізу міцності осьових вентиляторів розглядається широким колом вчених та інженерів.

Вентилятори димососи допоміжної вентиляції, на відміну від основної вентиляції [6, 7], є роторними машинами середнього розміру, які переміщують повітря через вентиляційні тунелі з метою або доставки свіжого повітря до робочих місць, або видалення з них шкідливих газів [8]. Ці машини можуть бути оснащені довгими трубами довжиною до 2000 м, що дозволяє переміщати їх поблизу основного стовбура вентиляційної шахти та мати безпосереднє сполучення з місцем знаходження людей [9].

Саме тому оцінка міцності промислових вентиляторних машин такого типу є дуже важливою задачею, адже їхнє руйнування може призвести до шкідливих дл життя та здоров'я людей умов.

У роботах [10, 11] описано процес оцінки статичної та динамічної міцності лопатей промислових осьових вентиляторів. У статті [12] розглядалися засоби контролю зриву потоку в осьових вентиляторах, оскільки вони відіграють одну з найбільш вирішальних ролей у виникненні поломок лопатей осьового вентилятора. У статті [13] показано важливий вплив структури задньої кромки на стабільність осьового потоку вентиляторів. Дослідження [14] запропонувало метод виявлення тріщин, заснований на оцінці власних частот лопатей, тоді як дослідження [15] проілюструвало дослідження діагностики несправностей лопаті вентилятора турбовентиляторного двигуна. В цій роботі представлений аналіз статичної міцності та відбудови від резонансних режимів ротора осьового димососа зі здвоєними листовими лопатками.

2. Постановка задачі. Матеріали, з яких виготовлені конструктивні елементи ротора, разом з границею текучості σ_T і допустимим напруженням σ_D представлені в табл. 1, причому допустиме напруження розраховується з коефіцієнта запасу $n = 1.6$:

$$\sigma_D = \sigma_T / n. \quad (1)$$

Таблиця 1 – Матеріали ротора димососу

Конструктивний елемент	Матеріал	Границя текучості, МПа	Допустиме напруження, МПа
Елементи робочого колеса	Сталь 09Г2С	305	190
Маточина			
Елементи здвоєних лопаток			
Вал	Сталь 45	275	172

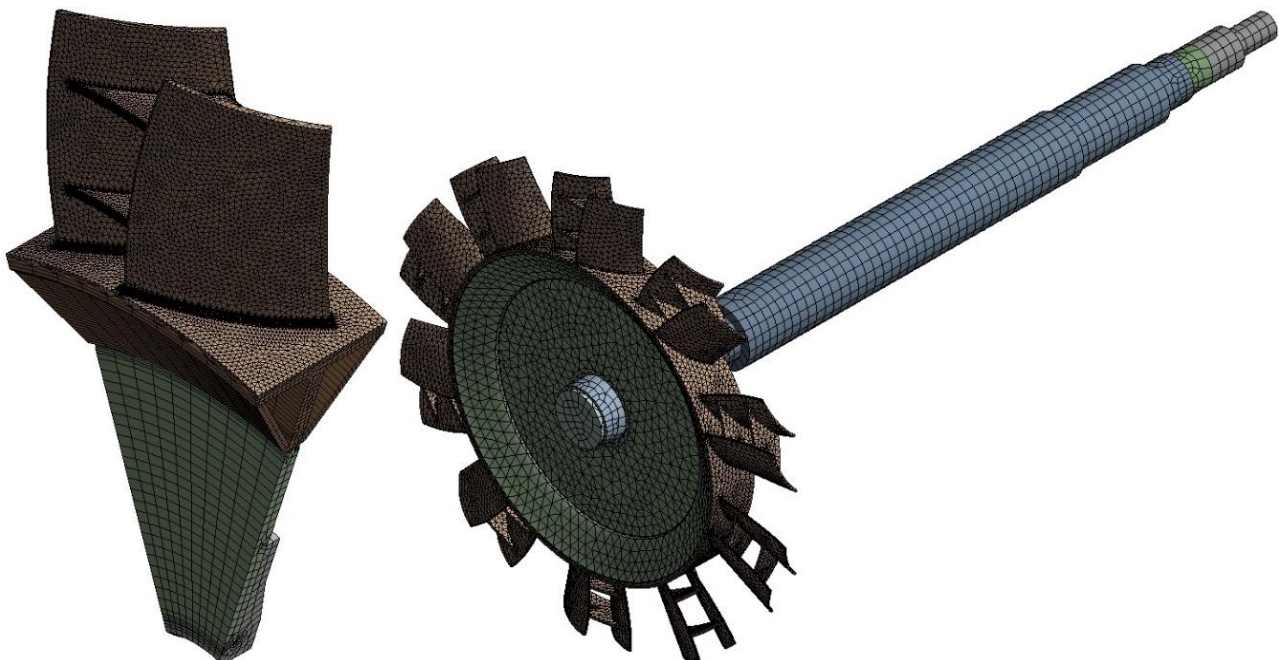


Рис. 2 – Розрахункові моделі: уточнена циклічно симетрична модель робочого колеса димососа та модель ротора димососу

Оцінка похибки скінченно-елементної дискретизації проводилася шляхом порівняння максимальних еквівалентних по Мізесу напружень як результатів пробних статичних аналізів на робочій та вдвічі більш дрібній сітках, а також шляхом порівняння аналогічних величин на робочій сітці при поелементному та повузловому виведенні результатів. У всіх випадках робочі скінченно-елементні сітки продемонстрували похибку менше ніж 2%, що є допустимою інженерною точністю.

До розрахункової моделі робочого колеса були прикладені механічне навантаження від дії відцентрової сили на частоті обертання 1500 об/хв, аеродинамічні навантаження на лопатку, а також теплове навантаження від його прогріву до температури 120°C. До розрахункової моделі ротора

з тривимірної конструкторської моделі (рис. 1) шляхом спрощення несуттєвих з точки зору міцності елементів, моделювання зварних з'єднань і контактної взаємодії елементів конструкції ротора отримана розрахункова модель.

На рис. 2 зліва показана розрахункова скінченно-елементна модель робочого колеса ротора димососа, яка представляє собою його сектор циклічної симетрії. При цьому в місцях очікуваних локальних максимумів напружень виконано згущення скінченно-елементної сітки.

На рис. 2 справа показана повна розрахункова модель ротора димососа, що має більший порівняно з попередньою розмір скінченного елемента, і призначена для аналізу статичної міцності ротора з урахуванням власної ваги, знаходження радіальних навантажень на підшипникові вузли, а також проведення аналізу власних частот (ВЧ) і власних форм (ВФ) ротора.

прикладалося навантаження від дії його власної ваги для оцінки міцності валу і навантажень на підшипникові вузли.

3. Аналіз статичної міцності ротора димососу.

На рис. 3 показані контурні графіки еквівалентних за Мізесом напружень в найбільш навантаженому елементі ротора – здвоєних лопатках. При цьому еквівалентні за Мізесом напруження визначаються з наступного співвідношення:

$$\sigma_i = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/2\}^{1/2}, \quad (1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

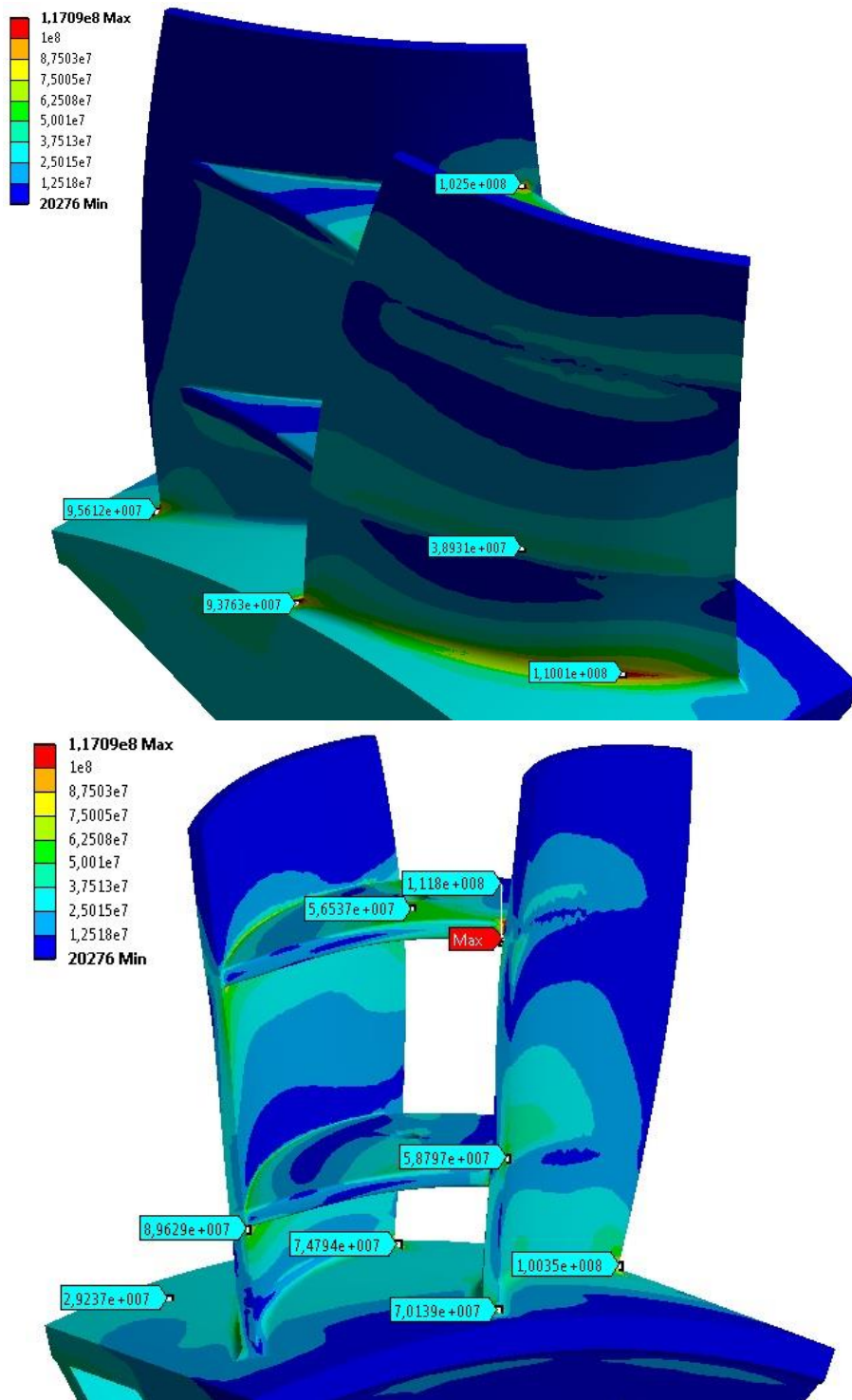


Рис. 3 – Еквівалентні за Мізесом напруження в лопатці, Па

Як видно з графіків, значення максимального напруження досягається в місці зварного з'єднання між верхньою перемичкою і переднім листом лопатки і становить 117 МПа. Також у місцях зварних з'єднань між лопаткою і робочим колесом та перемичками досягаються напруження близько 100-110 МПа. На рис. 4 показаний контурний графік еквівалентного за Мізесом напруження в роторі димососа. Як видно з графіка, максимальне напруження у валі становить

значення менше 10 МПа, а на робочому колесі (без урахування лопаток) 50 МПа.

Таким чином, запас міцності, обчислений як відношення границі текучості матеріалів, з яких виготовлений ротор, до максимального напруження в ньому становить 2.7, що є достатньою величиною не тільки для статичної міцності димососа, але і для нівелювання небажаних змінних у часі напружень, що впливають на його втомну міцність.

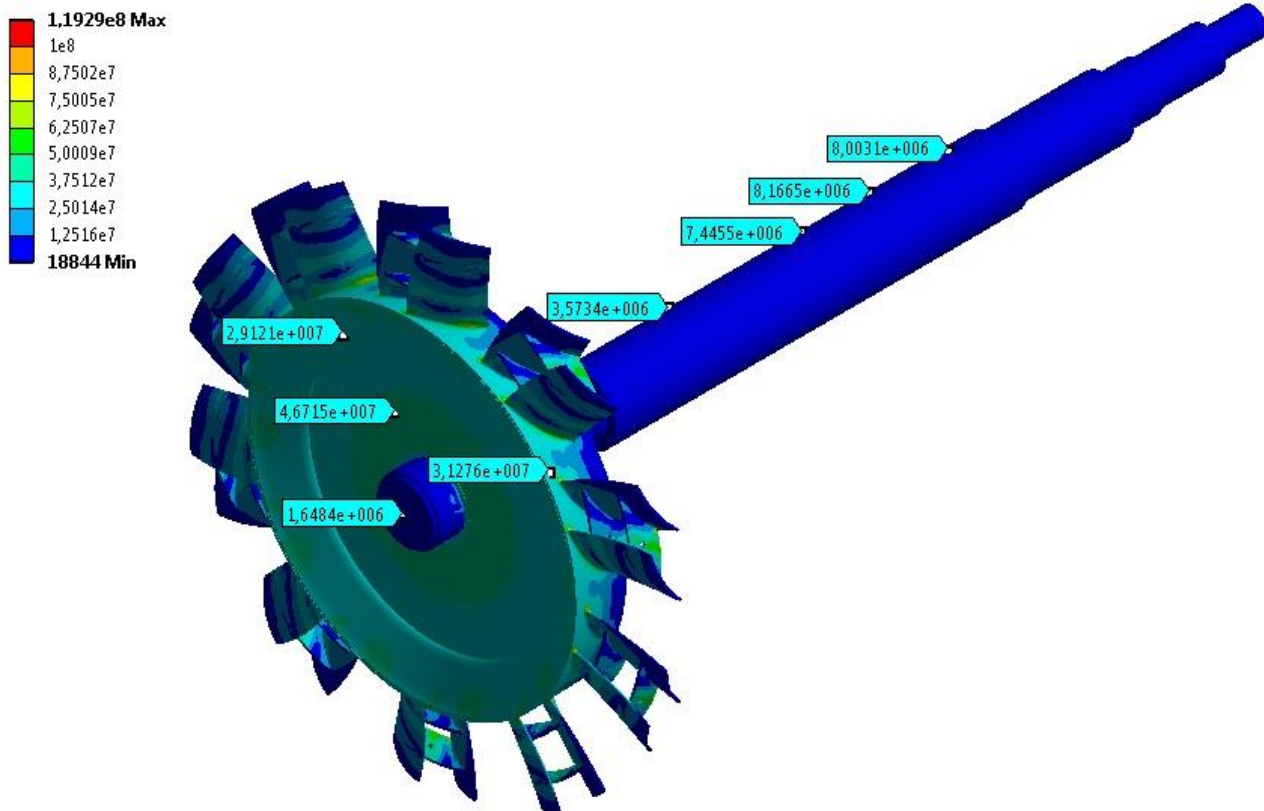


Рис. 4 – Еквівалентні за Мізесом напруження в роторі, Па

4. Результати модального аналізу ротора димососа. Після проведення модального аналізу ротора димососа оцінювався відносний ступінь його відбудови від резонансних режимів за такою формулою:

$$\eta_{ik} = 100\% * (\omega_i - k * \omega) / \omega_i, \quad (1)$$

де η_{ik} – відносна відбудова i -ої власної частоти ротора від резонансу з k -ою кратністю

збуджуючого навантаження (КЗН), що дорівнює частоті обертання ротора ω ;

ω_i – i -а власна частота ротора.

Результати такої оцінки разом із першими шістьма власними частотами ротора наведено в табл. 2. Як можна побачити з таблиці, ротор димососа має відбудову від резонансних режимів понад 20%, що показує достатній рівень усунення динамічних явищ у ньому.

Таблиця 2 – Відносна відбудова ВЧ ротора від КЗН

Номер ВЧ (i)	Значення ВЧ, Гц	η_{i1} , %	η_{i2} , %	η_{i3} , %	η_{i4} , %	η_{i5} , %
1	32,84	33,14	66,86	166,86	266,86	366,86
2	56,14	127,59	27,59	72,41	172,41	272,41
3	128,62	421,43	321,43	221,43	121,43	21,43
4	140,47	469,47	369,47	269,47	169,47	69,47
5	179,25	626,69	526,69	426,69	326,69	226,69
6	219,1	788,24	688,24	588,24	488,24	388,24

На рис. 5 показані перші шість власних форм коливань ротора димососа: крутильна форма, форма згинання диска з одним вузловим діаметром, перша власна форма валу, парасолькова форма, друга власна форма валу, форма згинання диска з двома вузловими діаметрами. Аналіз форм власних коливань дозволяє зрозуміти їхню природу та передбачити можливі шляхи зниження або відбудова від таких коливань. Наприклад, парасолькова форма коливань, в якій маточина виконує осьові коливання, подібні до функції парасольки, та форма згинання диска, коли

робоче колесо коливається поперек осі вала, впливають на міцність маточини. Форми власних коливань валу впливають на його міцність. Вищі форми зазвичай відповідають лопатевим коливанням з різними показниками циклічності, оскільки ротор вентилятора є циклічною конструкцією.

Варто зазначити, що власні частоти, що відповідають згинальним власним формам валу, уточнювалися за допомогою врахування впливу на них гіроскопічного моменту на балочній скінченно-елементній моделі.

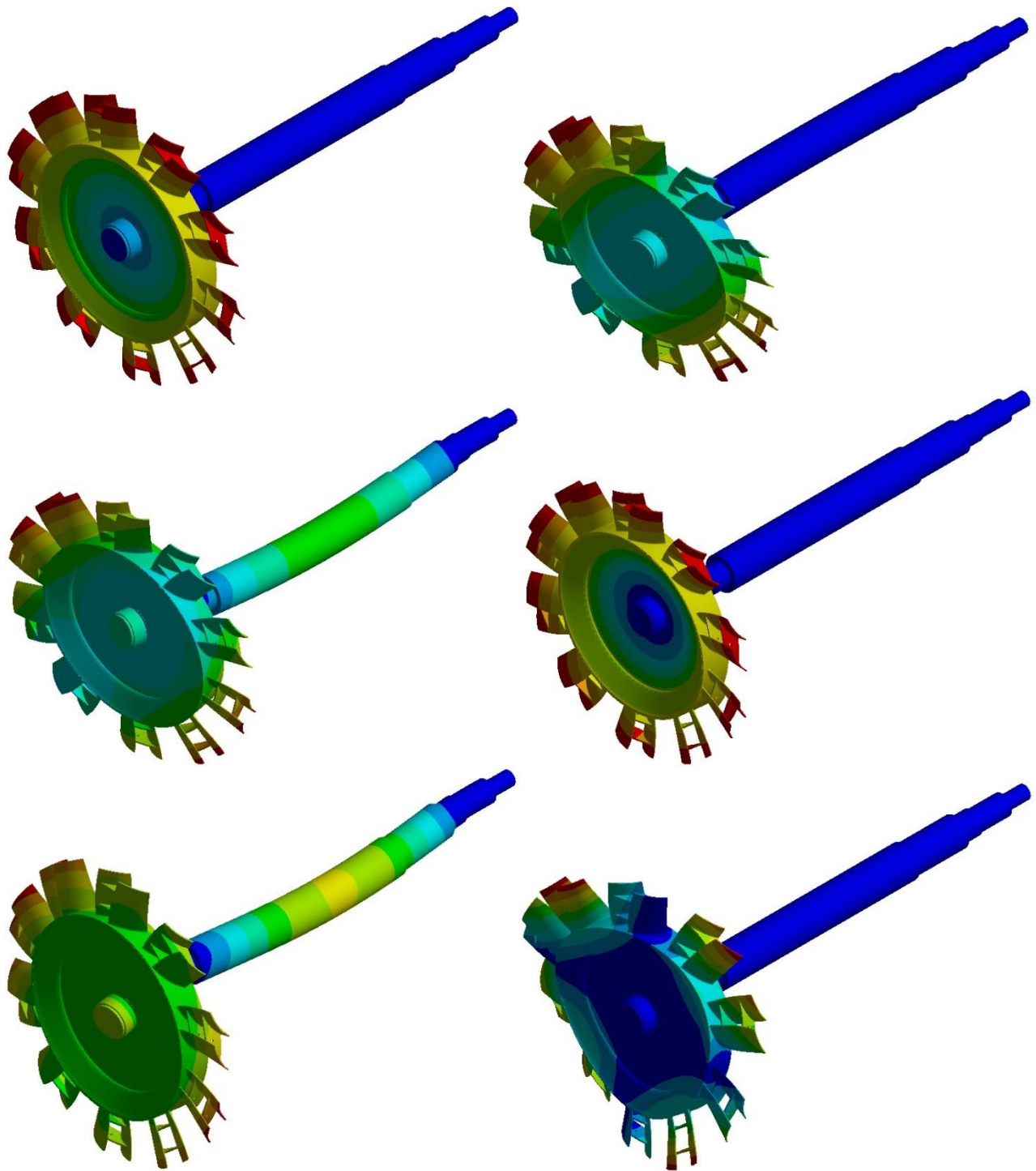


Рис. 5 – Власні форми коливань ротора димососа

Висновки. Димосос, що розглядається в роботі, є високопродуктивною машиною та працює в умовах високих навантажень на його конструктивні елементи.

Максимальне еквівалентне за Мізесом напруження в роторі досягається в зварних з'єднаннях його здвоєних лопаток і має значення близько 117 МПа. Таким чином коефіцієнт запасу статичної міцності становить близько 2.7. Відносна відбудова власних частот ротора від кратностей збуджуючого навантаження перевищує 20%, що свідчить про

достатній рівень усунення резонансних режимів у ньому. Таким чином, ротор димососа, що був розглянутий в роботі є статично та динамічно міцною машиною.

Список літератури

1. Xu P. Study on smoke exhaust performance in tunnel fires based on heat and smoke exhaust efficiency under the lateral centralized mode / P. Xu, D. Zhu, R. Xing, C. Wen, S. Jiang, L. Li // Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 34. – P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102002>

2. Huang Y. Computational fluid dynamics-assisted smoke control system design for solving fire uncertainty in buildings / Y. Huang, X. Zhou, B. Cao, L. Yang // *Indoor and Built Environment*. – 2020. – Vol. 29. – P. 40-53. <https://doi.org/10.1177/1420326X19842370>
3. Sheard A.G. The mechanical impact of aerodynamic stall on tunnel ventilation fans / A.G. Sheard, A. Corsini // *International Journal of Rotating Machinery*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1155/2012/402763>
4. Chen Q.G. Numerical study on air-structure coupling dynamic characteristics of the axial fan blade / Q.G. Chen, B. Xie, F. Li, W.G. Gu // *Materials Science and Engineering Conference Series*. – 2013. – Vol. 52, No. 2. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/52/2/022037>
5. Мартиненко В.Г. Розробка здвоєної лопатки осевого вентилятора із підвищеними аеродинамічними характеристиками / В.Г. Мартиненко, М.І. Гриценко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2019. – № 1. – С. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2019.1.187414>
6. Мартыненко В.Г. Анализ статической и динамической прочности осевого вентилятора с учётом аэродинамических свойств потока и неоднородности температурного поля / В.Г. Мартыненко, Н.И. Гриценко // *Проблемы машиностроения*. – 2015. – Т. 18, № 4/1. – С. 44-52.
7. Мартиненко В.Г. Проектування, аналіз та експериментальне дослідження статичної міцності композиційної біметалічної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти / В.Г. Мартиненко, М.І. Гриценко, С.В. Маєродій // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2018. – № 38 (1314). – С. 20-31. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>
8. de Villiers D.J. Evaluating the impact of auxiliary fan practices on localised subsurface ventilation / D.J. de Villiers, M.J. Mathews, P. Maré, M. Kleingeld, D. Arndt // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – Vol. 29, Is. 6. – P. 933-941. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.02.008>
9. Nel A.J.H. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations / A.J.H. Nel, J.C. Vosloo, M.J. Mathews // *Journal of Energy in Southern Africa*. – 2018. – Vol. 29, No. 3. – P. 22-32. <http://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445>
10. Neff T. Structural statics and dynamics on axial fan blades / T. Neff, A. Lahm // *International Mine Ventilation Congress*. – 2014. – P. 1-7.
11. Zare A. Finite element analysis of axial fan blade with different chord lengths / A. Zare A, K.M. Munisamy, A. Najafzadeh, B. Shahizare // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2013. – Vol. 6. – P. 4403-4409.
12. Bianchi S. A critical review of stall control techniques in industrial fans / S. Bianchi, A. Corsini, A.G. Sheard, C. Tortora // *International Scholarly Research Notices*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1-18. <https://doi.org/10.1155/2013/526192>
13. Zhang W. The influence of axial-flow fan trailing edge structure on internal flow / W. Zhang, J. Yuan, B. Zhou, H. Li, Y. Yuan // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10, Is. 11. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1177/1687814018811745>
14. Yu M. Crack detection of fan blade based on natural frequencies / M. Yu, S. Fu, Y. Gao, Y. Xu // *Advances in Fluid Dynamics of Turbomachinery*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1155/2018/2095385>
15. Han Z. Research on fault diagnosis of the fan blade of turbofan engine / Z. Han, J. Chen, B. Zhang, Y. Wang, Z. Gao // *2016 Prognostics and System Health Management Conference*. – 2016. P. 1-5. <https://doi.org/10.1109/PHM.2016.7819838>
- efficiency under the lateral centralized mode. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022, vol. 34, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102002>
2. Huang Y., Zhou X., Cao B., Yang L. Computational fluid dynamics-assisted smoke control system design for solving fire uncertainty in buildings. *Indoor and Built Environment*. 2020, vol. 29, pp. 40-53. <https://doi.org/10.1177/1420326X19842370>
3. Sheard, A.G., Corsini A. The mechanical impact of aerodynamic stall on tunnel ventilation fans. *International Journal of Rotating Machinery*. 2012, vol. 2012, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1155/2012/402763>
4. Chen Q.G., Xie B., Li F., Gu W.G. Numerical study on air-structure coupling dynamic characteristics of the axial fan blade. *Materials Science and Engineering Conference Series*. 2013, vol. 52, no. 2, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/52/2/022037>
5. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Розробка здвоєної лопатки осевого вентилятора із підвищеними аеродинамічними характеристиками [Development of a double blade axial fan with increased aerodynamic characteristics]. *Вісник НТУ «ХПІ»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 1, pp. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2019.1.187414>
6. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Analiz staticheskoy i dinamicheskoy prochnosti oseвого ventilyatora s uchotom aerodinamicheskikh svoystv potoka i neodnorodnosti temperaturного polya [Analysis of the static and dynamic strength of an axial fan, taking into account the aerodynamic properties of the flow and the heterogeneity of the temperature field]. *Problemy mashinostroyeniya* [Problems of machine building]. 2015, vol. 18, no. 4/1, pp. 44-52.
7. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I., Mavrody S.V. Proektuvannya, analiz ta eksperymental'ne doslidzhennya statychnoyi mitsnosti kompozytsiyanoi bimetalichnoyi lopatky ventilyatora holovnoho provitryuvannya shakhty [Design, analysis and experimental study of static strength of composite bimetal blade of mine main ventilation fan]. *Вісник НТУ «ХПІ»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 38 (1314), pp. 20-31. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>
8. de Villiers D.J., Mathews M.J., Maré P., Kleingeld M., Arndt D. Evaluating the impact of auxiliary fan practices on localised subsurface ventilation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, is. 6, pp. 933-941. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.02.008>
9. Nel A.J.H., Vosloo J.C., Mathews M.J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22-32. <http://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445>
10. Neff T., Lahm A. Structural statics and dynamics on axial fan blades. *International Mine Ventilation Congress*. 2014, pp.1-7.
11. Zare A., Munisamy K.M., Najafzadeh A., Shahizare B. Finite element analysis of axial fan blade with different chord lengths. *Indian Journal of Science and Technology*. 2013, vol. 6, pp. 4403-4409.
12. Bianchi S., Corsini A., Sheard A.G., Tortora C. A critical review of stall control techniques in industrial fans. *International Scholarly Research Notices*. 2013, vol. 2013, pp. 1-18.
13. Zhang W., Yuan J., Zhou B., Li H., Yuan Y. The influence of axial-flow fan trailing edge structure on internal flow. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, vol. 10, is. 11, pp. 1-12.
14. Yu M., Fu S., Gao Y., Xu Y. Crack detection of fan blade based on natural frequencies. *Advances in Fluid Dynamics of Turbomachinery*. 2018, vol. 2018, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1155/2018/2095385>
15. Han Z., Chen J., Zhang B., Wang Y., Gao Z. Research on fault diagnosis of the fan blade of turbofan engine. *2016 Prognostics and System Health Management Conference*. 2016, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/PHM.2016.7819838>

References (transliterated)

1. Xu P., Zhu D., Xing R., Wen C., Jiang S., Li L. Study on smoke exhaust performance in tunnel fires based on heat and smoke exhaust

Надійшла (received) 08.09.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мартиненко Володимир Геннадійович (Мартыненко Владимир Геннадьевич, Martynenko Volodymyr Gennadiyovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри Динаміки та міцності машин; м. Харків; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>.