

До спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.06 при Національному
університеті «Львівська політехніка»
079013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Драч Ілони Володимирівни
«Наукові основи автоматичного зрівноваження роторів рідинним балансиrom»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми дисертації. Характерною особливістю більшості роторних машин зі змінним дисбалансом (таких, як: побутова техніка, канатно-навивні та землерийні машини, ротаційні друкарські машини, моталки прокатних станів, шліфувальні верстати, вентилятори, вітрогенератори, сепаратори і центрифуги в харчовій, хімічній, гірничій та медичній промисловості) є неминуча наявність дисбалансу, обумовленого технологічним процесом їх експлуатації. При цьому вони функціонують в широкому діапазоні частот обертання. До таких машин висуваються високі вимоги щодо забезпечення їх вібраційної надійності, яка є одним із визначальних техніко-економічних показників виробів машинобудування, та довготривалої експлуатації. В значній мірі це залежить від вирішення задачі балансування роторів, як засобу запобігання надмірних вібрацій та поломок роторних машин, а також підвищення комфорту для обслуговуючого персоналу. Необхідно зазначити, що дисбаланс переважної більшості роторних машин може суттєво змінюватися під час експлуатації або в міжпусковий період машини. Ефективним методом безупинного балансування в експлуатаційних умовах машин із змінним дисбалансом ротора є пасивне автоматичне балансування за допомогою пристроїв з вільним переміщенням коригувальних мас, якими використовуються, зокрема, рідини. Однак, узагальнююче теоретичне обґрунтування автоматичного балансування роторних машин за допомогою робочої рідини в широкому діапазоні частот обертання, як докритичних, так і закритичних, відсутнє.

З цього погляду актуальність представленої дисертаційної роботи І.В.Драч, яка є логічним продовженням низки науково-дослідних робіт із зазначеної проблеми, що виконуються впродовж тривалого періоду в Хмельницькому національному університеті, не викликає сумнівів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою частиною проектів, які виконувались у відповідності до наукової тематики і в межах 6 держбюджетних науково-

дослідних тем Хмельницького національного університету та науково-дослідних робіт за договорами про дружню співпрацю з ПАТ «Геофіпольський цукровий завод», з ДП «Новатор» (м. Хмельницький).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розвитку наукових основ автоматичного зрівноваження роторів машин балансиrom прямої дії рідинного типу для підвищення ефективності їх функціонування та забезпечення вібростійкості обертових елементів машин шляхом комплексного вивчення динамічних процесів системи ротор – рідинний балансиr та визначення оптимальних параметрів автобалансувальних пристроїв (АБП).

Комплексний підхід до математичного моделювання процесу автоматичного балансування роторів рідинним балансиrom, на відміну від існуючих, містить гідродинамічну задачу обертання частково заповненої рідиною циліндричної порожнини, задачу хвилеутворення на поверхні рідини, геометричні моделі поведінки рідини в камері АБП.

При цьому адекватність побудованих моделей дала можливість пояснити нові властивості та закономірності процесу автобалансування пружно-деформівних роторів і роторів на пружних опорах рідинними робочими тілами:

- теоретично обґрунтовано існування зони нестійкості в околі критичної швидкості обертання ротора та залежність її діапазону від ступеня заповнення камери АБП рідиною, що дає змогу враховувати вплив малих збурень потоку, викликаних обертанням камери, при конструюванні АБП з рідинним робочим тілом;

- запропоновано науково-обґрунтовані умови настання автобалансування з огляду на векторні співвідношення силових чинників, які враховують рух рідини в роторній системі з АБП, що дає змогу визначати діапазони кутових швидкостей обертання ротора, за яких відбувається зменшення вібрації залежно від кута нахилу осі роторної системи і конструкції АБП;

- науково обґрунтовано оцінювання ефективності автоматичного балансування рідинним АБП, що дозволяє визначити його оптимальні параметри, які враховують наявність достатнього об'єму робочої рідини для ефективного балансування роторної системи, просторове положення осі ротора, геометричні параметри АБП і фізичні властивості робочої рідини;

- уточнено вплив пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансування, а запропоновані рішення щодо покращення вібростійкості роторних систем з автобалансиrom рідинного типу за рахунок оптимального компонування їх конструкцій дають змогу підвищити ефективність самозрівноваження до 50% для вертикальної та до 30% для горизонтальної роторних систем.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані в дисертації результати забезпечують можливість оптимізації параметрів та ефективного використання рідинних автобалансувальних пристроїв для роторних машин зі змінним дисбалансом.

Зокрема, результати роботи дозволяють обирати певний тип рідинного АБП (однокамерний, багатоканальний, з перегородками), розраховувати основні параметри АБП (геометричні розміри пристрою, достатній об'єм і фізичні властивості робочої рідини), визначати діапазон кутових швидкостей, за яких відбувається автобалансування, оцінювати вплив пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансування. Запропоновані у роботі рішення щодо підвищення вібростійкості роторних машин за рахунок оптимального конструювання конструкції роторної системи дають можливість суттєво підвищити ефективність рідинного автобалансування.

Технічну новизну розробок захищено 5-ма патентами на корисні моделі.

Результати роботи впроваджено на ПАТ «Теофіпольський цукровий завод» для покращення вібростійкості центрифуг періодичної дії, на ДП «Красилівський агрегатний завод» для зниження вібрацій відцентрового радіального вентилятора витяжної системи.

Наукові положення дисертації впроваджені у навчальний процес Хмельницького національного університету.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність основних результатів. Обґрунтованість наведених в дисертації наукових положень та висновків базується на успішному визначенні перспективних напрямів вирішення сформульованої проблеми, виборі адекватних моделей досліджень, опрацюванні недоліків та переваг існуючих підходів до дослідження процесу зрівноваження роторів машин пасивними автобалансирами, використанням добре апробованого математичного апарату системного аналізу та математичного моделювання, комплексним характером експериментів, сучасними математичними методами обробки їх результатів. Достовірність запропонованих положень забезпечується використанням базових положень динаміки машин, теорії коливань і гідродинаміки, методів аналітичного моделювання і прикладної математики, сучасних комп'ютерних систем і програмних продуктів, достатньо хорошою збіжністю теоретичних висновків з результатами експериментальних досліджень, які проводились із застосуванням раніше апробованого методу швидкісної відеофіксації на спеціально розроблених стендах.

Таким чином, наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, достовірні, а їх обґрунтування проведено з необхідною повнотою.

Структура та загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст викладено на 287 сторінках друкованого тексту. В роботі 102 рисунки, 8 таблиць, 5 додатків, список посилань містить 231 найменування.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання, методи їх досягнення, визначено

наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів досліджень. Наведено відомості щодо структури та обсягу роботи.

У *першому розділі* на основі наукових літературних джерел проаналізовано сучасний стан результатів теоретичних досліджень і практики автоматичного балансування рідинного типу. Встановлено основні вимоги до автобалансувальних пристроїв залежно від умов експлуатації та обслуговування, конструктивних характеристик і динамічних властивостей незрівноваженої обертальної системи. Оцінено переваги рідинних пасивних автобалансирів прямої дії. Визначено недоліки існуючого класичного підходу до дослідження самозрівноваження роторів балансиrom рідинного типу, а також істотну неповноту теорії методу автоматичного балансування рідинним АБП, що стосується найбільш загальних, фундаментальних питань щодо забезпечення вібростійкості та зрівноваження роторів автобалансирами такого типу.

Сформульовано основні наукові завдання дисертаційної роботи.

У *другому розділі* описано методологію проведення досліджень руху рідини в камері АБП. Розроблено комплексну математичну модель рідинного АБП, що містить гідродинамічну задачу обертання циліндричної порожнини частково заповненої рідиною, задачу хвилеутворення на поверхні рідини, геометричні моделі поведінки рідини в камері АБП. Як результат розв'язано такі завдання дисертаційного дослідження:

- проведено моделювання режимів руху (якісних станів) робочої рідини в камері АБП та отримано аналітичні оцінки кутових швидкостей обертання роторної системи, за яких відбувається приєднання робочої рідини до руху і до ефективного автобалансування в докритичному діапазоні;

- проаналізовано збурення відносного руху рідини в камері АБП, що обумовлені об'ємними переносною і коріолісовою силами інерції, знайдені викривлення полів швидкостей, тисків і вільної поверхні рідини, досліджено резонансні явища в потоці робочої рідини, надано фізичне пояснення одержаних результатів, які необхідно враховувати під час конструювання автобалансувальних пристроїв рідинного типу;

- обґрунтовано існування зони нестійкості в околі критичної швидкості обертання ротора з АБП та залежність її діапазону від ступеня заповнення камери автобалансира рідиною;

- із застосуванням математичного апарату оптимізаційних задач з параметром обґрунтовано оцінку ефективності автоматичного балансування рідинним АБП в залежності від просторового положення осі роторної системи і конструкції автобалансувального пристрою та фізичних властивостей робочих рідин;

- із застосуванням математичного апарату параметричних коливань проаналізовано рух рідини з урахуванням кута нахилу осі ротора з камерою АБП відносно лінії горизонту, отримано аналітичні залежності величини залишкових прогинів від кута нахилу та доведено, що зі збільшенням кута нахилу залишкові прогини ротора зменшуються за абсолютною величиною.

У *третьому розділі* наведено результати експериментальної перевірки математичних моделей руху рідини в камері АБП. Описано використане обладнання, устаткування і методики експериментальних досліджень коливань вільного краю барабанів установок, що моделюють роторні системи з вертикальною, горизонтальною віссю обертання та віссю, нахиленою під кутом до лінії горизонту. Для проведення експериментальних досліджень автоматичного усунення рідиною незрівноваженості ротора дисертантом використано розроблене за її безпосередньої участі в Хмельницькому національному університеті обладнання для балансування роторів з різними жорсткістю та умовами закріплення.

У *четвертому* розділі викладено результати розробки, перевірки і застосування методу визначення оптимальних параметрів автобалансувального пристрою, який враховує наявність достатнього об'єму робочої рідини для ефективного балансування роторної системи, кут нахилу осі ротора, геометричні параметри АБП і фізичні властивості робочої рідини.

У *п'ятому* розділі викладено результати розробки, перевірки і застосування розрахунково-експериментального методу оцінювання впливу пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність її рідинного самозрівноваження.

На підставі отриманих результатів дисертаційної роботи сформульовано відповідні *висновки* та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення.

У *додатках* наведені методики налаштування використаного обладнання і розрахунку параметрів коливних систем дослідних установок, представлені матеріали з впровадження результатів роботи, лістинги комп'ютерних програм та результати моделювання.

Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота є завершеною науковою роботою і за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України, які висуваються до докторських дисертацій. У ній розв'язана наукова проблема забезпечення вібростійкості обертових елементів машин на основі розвитку та практичного застосування теорії автоматичного зрівноваження роторів пасивними рідинними балансирами, проведення комплексного математичного моделювання динамічних процесів у роторних системах з урахуванням умов експлуатації та оптимізації конструкцій балансувальних пристроїв.

Наукові положення та результати, які виносились на захист кандидатської дисертації, наводяться лише в оглядовій частині докторської дисертації Драч І.В.

Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації, аналіз реферату

За темою дисертації опубліковано 53 наукові праці, з них: 1 – монографія у співавторстві; 2 публікації – розділи у монографіях, що опубліковані у

закордонних виданнях; 15 статей у журналах, що входять до переліку фахових наукових видань України (категорії «Б»); 5 статей у журналах, що проіндексовані в наукометричних базах Scopus та Web of Science; 2 статті у закордонних журналах; 5 патентів на корисну модель; 2 публікації – матеріали доповідей на міжнародних конференціях у виданнях, що проіндексовані в наукометричних базах Scopus та Web of Science. Результати роботи доповідались і були схвалені на 21 науковій конференції.

Кількість публікацій, їх повнота та обсяг у достатній мірі відображають особистий внесок дисертантки та відповідають вимогам, що висуваються до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Реферат за своїм змістом відповідає основним положенням та висновкам, що наведені в дисертаційній роботі, відображає її структуру. Реферат написаний за встановленою формою, у повній мірі розкриває сутність виконаної роботи, відображає загальний зміст та є ідентичним основним положенням дисертації.

Зауваження до дисертації

Позитивно оцінюючи подану на рецензування дисертаційну роботу, необхідно разом з тим відзначити такі зауваження:

1. У роботі стисло та не систематизовано наведені результати інших вчених щодо досліджень рідинного автобалансування роторів машин і не вистачає аналізу цих результатів. Немає конкретизованого (проілюстрованого) опису машин і механізмів, для яких застосовним є пасивне балансування;

2. У роботі недостатньо представлені методи вивчення і дослідження хвильових процесів на поверхні рідини у виробничих умовах;

3. В роботі не зовсім чітко прослідковується, яка існує залежність ефективності автобалансування від геометричних параметрів автобалансира;

4. Потребує пояснення, яким чином погіршиться якість балансування, якщо дисбаланс рідини буде більшим за дисбаланс ротора.

5. Незважаючи на завершений характер дисертації, хотілося б побажати авторці у своїй подальшій роботі поширити розроблені математичні моделі і методи досліджень автоматичного зрівноваження роторів рідинним балансиром на випадки довгомірних гнучких роторів, як систем з розподіленими параметрами, а також приділити увагу поглибленому вивченню нестационарних динамічних процесів у механічних системах роторів, які улаштовані АБП.

6. У роботі дисертантка часто вживає терміни «критична кутова швидкість» і «резонансна швидкість», але не наведено їх чіткого визначення і в чому полягає їх відмінність, якщо вона є.

7. У роботі зустрічаються описки, неточності формулювання, зокрема, нестандартизованим в теорії механічних коливань є термін «логарифмічний декремент затухання коливань». Вживаються також деякі синоніми – автобалансування, самобалансування, самозрівноваження. Варто дотримуватись єдиної термінології.

Висновок про відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Драч Ілони Володимирівни «Наукові основи автоматичного зрівноваження роторів рідинним балансиrom» має важливе значення в галузі динаміки та міцності машин. Вирішено актуальну для динаміки машин науково-прикладну проблему щодо зрівноваження та забезпечення вібростійкості машин із змінним дисбалансом ротора балансирами прямої дії рідинного типу.


Одержані нові рішення науково-прикладної проблеми, актуальність, практичне значення, новизна, повнота та закінченість досліджень, обґрунтування висновків заслуговують позитивної оцінки. Зміст дисертаційної роботи, отримані основні наукові положення та висновки відповідають паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Реферат відповідає змісту дисертації.

Зазначені вище зауваження слід розглядати як побажання для подальшої плідної наукової праці і не знижують загальної позитивної оцінки роботи. Дослідження за тематикою дисертаційної роботи доцільно продовжити у Хмельницькому національному університеті в співдружності з відповідними науковими установами НАН України та іншими зацікавленими організаціями, а результати роботи можна рекомендувати для використання на підприємствах машинобудування, харчової та переробної промисловості, інших галузях економіки України, а також під час проведення науково-дослідних робіт у відповідних проектно-конструкторських установах та організаціях.

Робота відповідає вимогам п. п. 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р., а її авторка, Драч Ілона Володимирівна, заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри галузевого машинобудування
Вінницького національного технічного університету,

доктор технічних наук, професор  Л.К. Поліщук

Підпис д.т.н., професора Поліщука Л.К. засвідчую:

Вчений секретар ВНТУ,

к.т.н., доцент



І.В. Віштак

