

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

1. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота виконана в Хмельницькому національному університеті (ХНУ) Міністерства освіти і науки України.

Робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг роботи становить 377 сторінок друкованого тексту, у тому числі 287 сторінок основного тексту, список із 231 найменування використаних джерел.

До розгляду подано дисертацію, автореферат дисертації, копії опублікованих робіт, автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата наук.

2. Оцінка актуальності теми дисертації

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуальної науково-прикладної проблеми в галузі технічних наук щодо забезпечення вібростійкості обертових частин машин із змінним дисбалансом. Розвинуто наукові основи пасивного балансування прямої дії рідинного типу з оптимальними параметрами конструкції автобалансувального пристрою.

Пасивні пристрої автоматичного зрівноважування рідинного типу, виконані на основі порожнин, частково заповнених рідиною, дозволяють знижувати вібрацію роторних машин безпосередньо в процесі їх роботи і мають низку переваг: є регуляторами прямої дії й не вимагають підведення енергії й створення систем керування для переміщення рідких коригувальних мас, не викликають зношування робочих поверхонь, надійні та безшумні в роботі, прості та дешеві у виготовленні. Однією з проблем, що утруднюють ефективне застосування рідинних автоматичних балансувальних пристроїв (АБП), є складність підбору таких значень параметрів автобалансира, за яких забезпечувалась би надійна стійкість його роботи.

Вважається, що для однодискової роторної машини умовою стійкості автобалансування є робота в закритичному діапазоні швидкостей обертання. Саме до такої умови стійкості призводять елементарні фізичні міркування, засновані на понятті самоцентрування ротора, і аналітичні дослідження, які мають за основу кінетостатичний або квазістатичний метод, метод усереднення. Однак досвід експериментальних досліджень показує, що межі зони ефективної роботи рідинного АБП містяться в докритичному діапазоні, можуть суттєво перевищувати критичну швидкість обертання ротора, ефективно автобалансування спостерігається при переході ротора через критичну швидкість. В цій дисертаційній роботі виконано аналіз роботи рідинного автобалансира в загальному випадку руху роторної системи з АБП.

Дисертаційна робота є складовою частиною проектів, які виконувались в межах держбюджетних науково-дослідних робіт Хмельницького національного університету: «Дослідження динаміки горизонтальних роторних машин і створення систем превенції (попередження) їх дефектів» (2007–2008, № держреєстрації 0107U003780); «Дослідження динаміки і зниження вібрацій роторних машин з врахуванням гідродинамічної взаємодії їх елементів» (2009–2010, № держреєстрації 109U005846); «Поглиблене дослідження явища автоматичного балансування рідиною і його застосування для зрівноваження деталей з горизонтальною віссю обертання» (2009–2010, № держреєстрації 0109U000517), «Розробка теорії та практики автоматичного зрівноваження обертових тіл рідинними і сипкими матеріалами без підведення енергії та керування рухом» (2016–2018, № держреєстрації 0116U001547, авторка була відповідальним виконавцем); «Наукові основи перетворення критичних обертів в некритичні, резонансних частот в нерезонансні і критичних сил по Ейлеру в некритичні в виробках військової і невійськової техніки» (2020–2022, № держреєстрації 0120U102067); науково-дослідних робіт за договором про дружню співпрацю з ПАТ «Теофіпольський цукровий завод» – «Зниження віброактивності центрифуг для відокремлення кристалів сахарози» (2017–2018, № держреєстрації 0117U001171, авторка була відповідальним виконавцем); з ДП «Новатор» (м. Хмельницький) – «Розробка методики розрахунку параметрів рідинних автобалансувальних пристроїв» (2019–2020, № держреєстрації 0119U102791, авторка була науковим керівником).

3. Оцінка наукових результатів дисертації

Вирішення поставлених завдань дисертаційної роботи виконане на основі нових наукових положень, а саме:

– запропоновано комплексний підхід до математичного моделювання процесу автоматичного балансування роторів рідинним балансиром прямої дії, який охоплює гідродинамічну задачу обертання частково заповненої рідиною циліндричної порожнини, задачу хвилеутворення на поверхні рідини; геометричні моделі поведінки рідини в камері АБП;

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

– запропоновано науково обґрунтовані умови настання автобалансування з огляду на векторні співвідношення силових чинників, які враховують рух рідини в роторній системі з АБП;

– науково обґрунтовано оцінювання ефективності автоматичного балансування рідинним АБП, що дало змогу визначити його оптимальні параметри;

– удосконалено оцінювання впливу пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансування.

4. Оцінка практичного значення результатів роботи

Практичне значення роботи полягає у тому, що на підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема в галузі динаміки та міцності машин – зрівноваження та забезпечення вібростійкості машин із змінним дисбалансом ротора балансирами прямої дії рідинного типу з оптимальними параметрами.

Отримані авторкою результати з розробки методу визначення оптимальних параметрів рідинного автобалансира можуть бути використані для проектування і створення сучасних самобалансирів на підприємствах легкої, харчової промисловості (для зрівноваження екстракторів машин з осушення цукру, центрифуг, сепараторів тощо); для зрівноваження барабанів побутових пральних машин з вертикальним і горизонтальним розташуванням барабана; для зрівноважування вітряків в новітніх екологічно чистих сучасних технологіях енергозабезпечення тощо.

Уточнено вплив пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансування; запропоновано рішення щодо покращення вібростійкості роторних систем з автобалансиром рідинного типу за рахунок оптимального компоновання їх конструкцій, що дають змогу підвищити ефективність самозрівноваження для вертикальної та горизонтальної роторних систем.

Технічну новизну запропонованих розробок захищено 5 патентами на корисні моделі.

Запропоновані технічні рішення проваджені на ПАТ «Геофіпольський цукровий завод» – спроектовано конструкцію пасивного автобалансира для покращення вібростійкості центрифуг періодичної дії; на ДП «Красилівський агрегатний завод» – конструктивне рішення для проектування двокамерного пасивного автобалансира рідинного типу для зниження вібрацій відцентрового радіального вентилятора витяжної системи.

Результати проведених досліджень застосовуються у навчальному процесі Хмельницького національного університету при викладанні низки навчальних дисциплін та при виконанні кваліфікаційних робіт.

5. Оцінка достовірності та обґрунтованості основних положень і висновків дисертації, ідентичність змісту реферату й основних положень дисертації

Наукові положення, висновки та пропозиції у достатній мірі обґрунтовані теоретичним аналізом, експериментальними дослідженнями, тому їх слід вважати цілком достовірними.

Теоретичні дослідження мають за основу фундаментальні положення динаміки машин, теорії коливань і гідродинаміки. Теоретичні дослідження процесу автобалансування проведені за допомогою методів системного аналізу та математичного моделювання із застосуванням аналітичних та чисельних підходів. Дослідження руху рідини в камері АБП здійснювались з використанням методів аналітичного моделювання і прикладної математики, що ґрунтуються на засадах теорії стійкості розв'язків диференціальних рівнянь.

Експериментальні дослідження роботи рідинного АБП проводились на спеціально розроблених стендах з віброапаратурою із застосуванням методу швидкісної відеофіксації. Обробка результатів експериментальних досліджень з виміром розмаху коливань вільного краю ротора дослідної установки реалізована методами математичної статистики.

Використані в дисертації основні теоретичні положення, припущення, спрощення є коректними і не містять протиріч. Усі наявні в дисертації аналітичні залежності одержані шляхом логічних математичних перетворень. Обґрунтованість встановлених закономірностей підтверджувалась експериментальним шляхом.

Висновки і рекомендації, які наведені в дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими, їх достовірність підтверджена експериментально.

Реферат за своїм змістом відповідає основним положенням, висновкам, які наведені в дисертаційній роботі, відображає її структуру, за своїм змістом, основними положеннями та висновками ідентичний з дисертацією.

Наукові положення дисертації, що складають наукову новизну і виносяться на захист, не повторюють цих положень у дисертації здобувачки на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Результати роботи достатньо апробовано на міжнародних наукових і науково-технічних конференціях. У повному обсязі ці результати доповідались на розширених наукових міжкафедральних семінарах у ХНУ, на фаховому семінарі у НУ «Львівська політехніка».

Нові наукові результати та положення повністю відображені у 53 роботах, а саме: 1 монографії; 2 публікаціях – розділах у монографіях, що опубліковані у закордонних виданнях; 15 статтях у фахових наукових виданнях України, 9 статтях у наукових виданнях іноземних держав; 5 патентах на корисну модель, 21 тезах доповідей у збірниках міжнародних конференцій. Зокрема, 18 робіт опубліковані одноосібно, а 7 – у наукових виданнях, що входять у наукометричні бази Web of Science та Scopus.

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

6. Оцінка змісту й оформлення дисертації

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну в галузі динаміки машин науково-прикладну проблему забезпечення вібростійкості обертових елементів машин на основі розвитку і практичного застосування теорії автоматичного зрівноваження роторів пасивними рідинними балансирами, проведення комплексного математичного моделювання динамічних процесів у роторних системах з урахування умов експлуатації та оптимізації конструкцій балансувальних пристроїв.

Науково-прикладна проблема поставлена коректно.

У дисертації послідовно розглянуто окремі складові проблеми та розроблено засоби для їх вирішення.

У **першому** розділі авторка детально розглядає основні етапи наукової думки в межах проблеми зрівноваження роторів пасивним АБП і результати досліджень у сучасних напрямках розвитку рідинного автобалансування. Розглянуто кінетостатичні рівняння руху механічної системи з автобалансувальним пристроєм рідинного типу. Проаналізовано основні результати, недоліки та невирішені проблеми класичного підходу до дослідження процесу зрівноваження та вібростійкості такої роторної системи.

У **другому** розділі авторкою викладено загальну методику проведення дисертаційного дослідження; розкрито методи моделювання, розрахунків, гіпотези.

У результаті моделювання режимів руху (якісних станів) робочої рідини в камері АБП дисертанткою обґрунтовано аналітичні оцінки кутових швидкостей обертання роторної системи, за яких відбувається включення робочої рідини в рух і в ефективне автобалансування в докритичному діапазоні.

На основі аналізу 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.

На основі аналізу частотного рівняння системи диференціальних рівнянь, які описують рух ротора встановленого в пружних опорах, що обертається з рідинним автобалансином, дисертанткою теоретично обґрунтовано існування зони нестійкості в околі критичної швидкості обертання ротора та пряму залежність її діапазону від ступеня заповнення камери АБП рідиною.

Із застосуванням теорії екстремальних задач з параметром авторкою роботи науково обґрунтовано оцінювання ефективності автоматичного балансування рідинним АБП, зокрема, доведено, що максимальна ефективність балансування досягається, коли величини дисбалансу коригувальної рідини і дисбалансу ротора еквівалентні.

У результаті дослідження руху рідини з урахуванням кута нахилу осі ротора з камерою АБП відносно лінії горизонту, здійсненого за допомогою математичного апарату параметричних коливань, авторкою отримано аналітичні залежності величини залишкових прогинів від кута нахилу та доведено, що зі збільшенням кута нахилу, залишкові прогини ротора зменшуються за абсолютною величиною.

Третій розділ авторка присвятила застосуванню розроблених у другому розділі математичних моделей для кількісного оцінювання діапазонів кутових швидкостей, за яких відбувається включення рідини в обертаний рух в камері балансира і процес автобалансування рідиною. Розрахункові дані перевірялись експериментально з вимірюванням амплітуд коливань роторів дослідних установок і з безпосереднім візуальним спостереженням за положенням робочої рідини в камері АБП відносно дисбалансу при обертанні системи.

У **четвертому** розділі дисертантка одержала низку наукових і практичних результатів щодо застосування розробленого методу визначення оптимальних

параметрів автобалансира рідинного типу. Авторка запропонувала введення додаткових нових критеріїв оптимальності: зменшення діапазону кутових швидкостей включення робочої рідини в обертовий рух; зменшення діапазону кутових швидкостей включення робочої рідини в процес балансування; зменшення діапазону зони нестійкості в околі критичної кутової швидкості. Таким чином, дисертанткою враховані нові параметри для розрахунку рідинного АБП: просторове положення осі роторної системи; фізичні властивості робочої рідини (в'язкість і густина), форма вільної поверхні рідини залежно від кута нахилу осі обертання роторної системи та відношення поточної кутової швидкості до критичної (докритичний діапазон, закритичний, діапазон критичних кутових швидкостей).

Для реалізації методу розроблено програмне забезпечення. Перевірка адекватності математичних моделей, які покладені в основу методу, і верифікація програмного забезпечення для розрахунку оптимальних параметрів АБП здійснювалась шляхом співставлення значень коефіцієнта ефективності балансування, одержаного теоретичними розрахунками, і визначеного експериментально як відношення амплітуд коливань вільного краю барабана дослідної установки без рідини в АБП і з рідиною на основі обробки осцилографічних даних. Усереднені значення коефіцієнтів ефективності балансування ротора рідинним автобалансиром, обчислені теоретично і знайдені експериментально, відрізняються не більше ніж на 15 %.

Дисертантка, ґрунтуючись на розроблених моделях, запропонувала загальний підхід до розв'язання задач проектувального розрахунку параметрів рідинного АБП.

Авторка у п'ятому розділі розробила розрахунково-експериментальний метод оцінювання впливу пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансирування, що зводиться до:

- чисельного аналізу узагальнених динамічних моделей машин зі змінним дисбалансом ротора з вертикальною та горизонтальною осями обертання з шістьма ступенями вільності з врахуванням зв'язності коливань за всіма узагальненими координатами;
- розрахунку параметрів коливань дослідних установок та наступному зіставленні розрахункових основних характеристик динамічного процесу коливальної системи із отриманими експериментально, що дає можливість підвищити ефективність зниження віброактивності роторів за рахунок вдосконалення конструкцій.

Завдяки застосуванню цього методу вдалося уточнити наукові дані щодо впливу пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансирування.

Наведені в дисертаційній роботі висновки і рекомендації є достатніми і належним чином обґрунтовані. Для їх висвітлення авторкою проведені необхідні теоретичні та експериментальні дослідження, виконані публікації та розроблені відповідні методики.

Отже, на основі розгляду матеріалів дисертації можна зробити позитивний висновок про повноту розробки поставленої науково-прикладної проблеми.

Дисертація оформлена відповідно до вимог щодо оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 № 40, добре ілюстрована. Стиль та послідовність викладення матеріалу відповідають вимогам до написання наукових робіт.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи подану до опонування дисертаційну роботу, необхідно відзначити наступні зауваження.

1. У математичній моделі розподілу швидкостей в об'ємі в'язкої робочої рідини в процесі обертового руху вертикальної роторної системи не враховано вплив на рух робочої рідини примежового шару рідини поблизу верхньої і нижньої основ та стінки циліндричної камери. Незрозуміло, чи можливо результати цього моделювання використати для роторів машин з горизонтальною віссю обертання.

2. Варто було б провести теоретичне дослідження стійкості якісних станів руху робочої рідини в камері АБП в широкому діапазоні значень заповнення камери і в'язкості рідини.

3. Розроблені математичні моделі руху рідини в камері АБП і динамічного процесу автобалансування рідиною мали би бути реалізовані у вигляді прикладних комп'ютерних програм.

4. У представленій математичній моделі руху робочої рідини в камері АБП потребує пояснення, яка швидкість перетоку рідини перед тим, як вона встановиться проти дисбалансу.

5. Як видно з отриманих результатів експериментального дослідження роботи рідинного балансира з перегородками, його конструктивні параметри мають суттєвий вплив на ефективність автобалансування. Тому варто було б провести теоретичне дослідження взаємодії потоку робочої рідини з перегородками.

6. Для узагальнення впливу в'язкості робочої рідини на ефективність балансування необхідно було також дослідити зміну температурного режиму роботи роторної системи з АБП.

Зауважу також, що у тексті дисертаційної роботи та реферату є неточності редакційного характеру і трапляються деякі синтаксичні і стилістичні огріхи та помилки.

8. Загальна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Драч Ілони Володимирівни «Наукові основи автоматичного зрівноваження роторів рідинним балансиrom» є завершеною науковою працею і має важливе значення в галузі динаміки та міцності машин на сучасному етапі її розвитку. Вирішено актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у забезпеченні вібростійкості обертових елементів машин зі змінним дисбалансом.

Одержані нові розв'язки науково-прикладної проблеми. Актуальність, практичне значення, новизна та завершеність 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 повністю та адекватно відображає зміст дисертації.

Вказані у п. 7 цього відгуку зауваження щодо представленого дослідження не знижують вагомість отриманих у роботі наукових та практичних результатів і не змінюють її позитивної оцінки.

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 присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент,
директор Інституту прикладної математики
та фундаментальних наук
Національного університету
«Львівська політехніка»,
доктор технічних наук, професор



Петро ПУКАЧ

Підпис доктора технічних наук, професора
Петра Пукача засвідчую:

Вчений секретар Національного університету
«Львівська політехніка»,

к.т.н., доцент




Роман БРИЛИНСЬКИЙ