

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 на тему: “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 виконувалася в Хмельницькому національному університеті (ХНУ) Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 377 сторінок друкованого тексту, з них: анотація – на 20 стор., зміст – на 4 стор., основний текст – на 287 стор., список із 231 найменування – на 24 стор., додатки – на 40 стор. Дисертація містить 102 рисунки та 8 таблиць.

На розгляд представлено дисертацію, автореферат дисертації, копії опублікованих робіт, автореферат дисертації кандидата наук.

#### **2. Оцінка актуальності теми дисертації.**

У роботі вирішується важлива науково-технічна проблема, що має вагомe значення для розвитку динаміки і міцності машин і полягає у подальшому розвитку теорії і практики автоматичного статичного зрівноваження роторів машин рідинним (пасивним) автобалансиrom для підвищення ефективності їх функціонування, зменшення віброактивності шляхом комплексного вивчення динамічних процесів системи ротор-рідинний автобалансиr та визначення оптимальних параметрів автобалансиру.

Технічна актуальність проблеми полягає у тому, що рідинні автобалансири виконані на основі порожнин, частково заповнених рідиною, 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. Такими пристроями можна балансувати на ходу широкий клас роторів – барабани пральних машин, екстракторів, сепараторів, центрифуг тощо. Крім того сама рідина виділяється у процесі роботи багатьох роторних машин, а корпусом рідинного автобалансиру може бути сам барабан роторної машини, через що приєднання автобалансира до ротора майже не вимагає його модернізації.

Наукова актуальність проблеми полягає у тому, що є принципові недоліки у методологічному підході до дослідження процесу зрівноваження та віброзахисту

ротора рідинним автобалансиром, які треба усунути. Для таких досліджень застосовується кінетостатичний або квазістатичний метод, який ґрунтується на припущеннях: перехідні процеси на рух ротора з автобалансиром майже не впливають і тому рух системи подається як обертання навколо осі жорсткого тіла; корегувальна рідина дуже повільно реагує на сили, що на неї діють, і зрештою приходиться до положення відносної рівноваги лише в зарезонансному діапазоні частот обертання системи. Відповідно до цих припущень замість гідродинамічних рівнянь руху ротора з рідинним автобалансиром складаються рівняння кінетостатики. За результатами цього підходу всі пристрої з рідиною працюватимуть на швидкостях, більших за резонансні. Практичний досвід застосування рідинних автобалансирів свідчить, що в реальних системах теоретичні висновки не завжди підтверджуються. Зокрема, рідинний автобалансир забезпечує більш спокійний перехід ротором резонансних швидкостей, дещо зменшує віброактивність роторної машини на дорезонансних частотах.

Робота виконувалась у відповідності до наступних проектів, які виконувалися в межах держбюджетних науково-дослідних робіт Хмельницького національного університету: «Дослідження динаміки горизонтальних роторних машин і створення систем превенції (попередження) їх дефектів» (2007-2008, ДР № 0107U003780); «Дослідження динаміки і зниження вібрацій роторних машин з врахуванням гідродинамічної взаємодії їх елементів» (2009-2010, ДР № 109U005846); «Поглиблене дослідження явища автоматичного балансування рідиною і його застосування для зрівноваження деталей з горизонтальною віссю обертання» (2009-2010, ДР № 0109U000517), «Розробка теорії та практики автоматичного зрівноваження обертових тіл рідинними і сипкими матеріалами без підведення енергії та керування рухом» (2016-2018, ДР № 0116U001547, авторка є 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, ДР № 0120U102067); науково-дослідних робіт за договором про дружню співпрацю з ПАТ «Геофіпольський цукровий завод» «Зниження віброактивності центрифуг для відокремлення кристалів сахарози» (2017-2018, ДР № 0117U001171, авторка є відповідальним виконавцем); з ДП «Новатор» (м. Хмельницький) «Розробка методики розрахунку параметрів рідинних автобалансувальних пристроїв» (2019-2020, ДР № 0119U102791, авторка є науковим керівником).

### **3. Оцінка наукових результатів дисертації.**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в істотному розвитку теорії і практики статичного балансування роторів рідинним пасивним автобалансиром з оптимальними параметрами конструкції автобалансиру для зменшення віброактивності роторних машин із змінним дисбалансом. Зокрема:

*уперше:*

– у рамках плоскої моделі 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 автобалансувального пристрою;

– із застосуванням теорії екстремальних задач з параметром науково обґрунтовано оцінювання ефективності автоматичного балансування рідинним АБП, що дало змогу визначити 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, запропоновані рішення щодо покращення вібростійкості роторних систем з автобалансиrom рідинного типу за рахунок оптимального конструювання конструкцій роторних систем дають змогу підвищити ефективність самозрівноваження до 50% для вертикальної та до 30% для горизонтальної роторних систем;

*удосконалено:*

– оцінювання впливу пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність рідинного автобалансування. Суть новизни полягає у чисельному аналізі узагальнених динамічних моделей машин зі змінним дисбалансом ротора з вертикальною та горизонтальною осями обертання з шістьма ступенями вільності з урахуванням зв'язаності коливань за усіма узагальненими координатами; розрахунку параметрів коливань дослідних установок та наступному зіставленні розрахункових основних характеристик динамічного процесу коливних систем із отриманими експериментально, що дає змогу підвищити ефективність вібростійкості роторів і, отже, вдосконалити конструкції;

*набула подальшого розвитку:*

– теорія зрівноваження та забезпечення вібростійкості роторів машин пасивними автобалансирами рідинного типу на основі комплексного підходу до математичного моделювання процесу автоматичного балансування роторів рідинним балансиrom прямої дії, яка, на відміну від існуючих, охоплює гідродинамічну задачу обертання частково заповненої рідиною циліндричної порожнини, задачу хвилеутворення на поверхні рідини; геометричні моделі поведінки рідини в камері автобалансира, що дало змогу розробити методологію зрівноваження та забезпечення вібростійкості роторів пасивними рідинними автобалансирами.

#### **4. Оцінка практичного значення результатів роботи.**

Результати роботи дозволяють для широкого класу машин з пружно-деформівним ротором, ротором на пружних опорах (де наявна різниця фаз між напрямком сили від дисбалансу і прогином ротора або переміщенням ротора) обирати певний тип рідинного автобалансира (однокамерний, багатокамерний, з перегородками); розраховувати основні параметри автобалансира (геометричні розміри пристрою, достатній об'єм і фізичні властивості робочої рідини); визначати діапазон кутових швидкостей, за яких відбувається статичне автобалансування; оцінювати вплив пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність автобалансування. Встановлено, що запропоновані у роботі рішення щодо підвищення вібростійкості роторних машин за рахунок оптимальної компоновки конструкції роторної системи дають змогу суттєво підвищити ефективність рідинного автобалансування не залежно від кута нахилу осі ротора.

Запропоновані нові технічні рішення з конструкції рідинних автобалансирів, способів балансування коліс автомобіля, центрифуги. Технічні рішення захищені 5 патентами України на корисну модель.

Здійснено впровадження результатів наукових досліджень у вигляді нових конструкцій автобалансирів та розроблених методик на ПАТ «Геофіпольський цукровий завод» для покращення вібростійкості центрифуг періодичної дії (акт від 20.12.2018); на ДП «Красилівський агрегатний завод» для зниження вібрацій відцентрового радіального вентилятора витяжної системи (акт від 10.02.2022); на ТДВ «Завод АДВІС» (м. Хмельницький) (акт від 25.06.2021) і ТОВ НВФ "АДВІСМАШ" (м. Хмельницький) (акт від 23.11.2021) для підвищення вібростійкості промислових пороховентилляторів ВЦП-6-45 і компресорів TREK 22L; у вигляді рекомендацій для підвищення вібростійкості роторного устаткування лічильників води, при їх проектуванні та удосконаленні існуючих моделей на ДП «НОВАТОР» (м. Хмельницький) (акт від 16.02.2021).

Наукові положення дисертації впроваджені у навчальний процес Хмельницького національного університету, зокрема, у лекційних курсах, лабораторних заняттях та курсовому проектуванні з навчальних дисциплін «Математичне моделювання динамічних систем» і «Математичне моделювання економічних і природничих процесів», а також при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт студентами спеціальності 113 прикладна математика (акт від 24.12.2021).

#### **5. Достовірність і обґрунтованість наукових результатів, положень і оцінка висновків.**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів забезпечені використанням фундаментальних законів математики, механіки та гідродинаміки. Методологічною основою роботи є системний підхід до вивчення досліджуваних явищ і процесів, що дало змогу комплексно розглянути питання, пов'язані з віброзахистом роторних машин рідинним пасивним автобалансиром. Теоретичні

дослідження здійснювались з використанням сучасних методів аналітичного моделювання і прикладної математики. У теоретичних дослідженнях достовірність результатів обумовлена використанням фізично обґрунтованих припущень при побудові й аналізі математичних моделей руху ротора та роботи рідинного автобалансира, що ґрунтуються на засадах прикладної теорії стійкості та теорії коливань. Для реалізації математичних моделей використано ПП: MathCAD, MATLAB. Експериментальні дослідження динамічних процесів системи ротор-автобалансир-робоча рідина здійснювались з багаторазовим повторенням експериментів із застосуванням методу візуального спостереження за поведінкою робочої рідини в камері автобалансиру - методу відеофіксації швидкоплинних процесів. Обробка результатів експериментальних досліджень з виміром розмаху коливань вільного краю ротора дослідної установки реалізована методами математичної статистики за допомогою вбудованих функцій MS Excel. Правомірність прийнятих припущень для теоретичних досліджень ефективності рідинного автобалансування доведена встановленням похибок визначення основних параметрів, які містяться в допустимих межах в процесі порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів підтверджується апробацією результатів роботи на наукових семінарах та міжнародних науково-технічних конференціях, а також впровадженням результатів роботи на ТДВ «Завод АДВІС» (м. Хмельницький), ПАТ «Теофіпольський цукровий завод», ДП «Красилівський агрегатний завод», ТОВ НВФ "АДВІСМАШ" (м. Хмельницький), ДП «НОВАТОР» (м. Хмельницький).

Нові наукові результати та положення повністю відображені у 53 наукових працях, серед яких: 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 реферуються науково-метричними базами даних Web of Science, Scopus; 2 статті у закордонних журналах; 5 патентів України на корисну модель; 2 публікації – матеріали доповідей на міжнародних конференціях у виданнях, що реферуються науково-метричними базами даних Web of Science, Scopus; 21 – матеріали наукових конференцій.

## **6. Оцінка змісту, оформлення дисертації та автореферату.**

У дисертації розв'язані такі завдання:

– у рамках плоскої моделі проведено комплексне математичне моделювання динаміки роторної системи з рідинним автобалансиром, яке включає гідродинамічну задачу обертання циліндричної порожнини, частково заповненої рідиною; задачу хвилеутворення на поверхні рідини та геометричні моделі поведінки рідини в камері автобалансира;

– проаналізовано збурення відносного руху рідини в камері автобалансира, 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 рідинних автобалансувальних пристроїв;

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

– проведено моделювання режимів руху (якісних станів) робочої рідини в камері автобалансира; обґрунтовано оцінки кутових швидкостей обертання роторної системи, за яких відбувається включення робочої рідини в рух і в ефективне автобалансування в докритичному діапазоні;

– обґрунтовано оцінку ефективності автоматичного балансування рідинним автобалансиром в залежності від просторового положення осі роторної системи і конструкції автобалансира та фізичних властивостей робочих рідин;

– розроблено метод визначення оптимальних параметрів автобалансиру, який враховує наявність достатнього об'єму робочої рідини для ефективного балансування роторної системи, кут нахилу осі ротора, геометричні параметри автобалансира і фізичні властивості робочої рідини;

– проаналізовано рух рідини з урахуванням кута нахилу осі ротора з камерою автобалансира 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;

– розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання впливу пружно-інерційних, демпфувальних і геометричних характеристик роторної системи на ефективність автобалансування.

В результаті розроблено теорію і практику (часткового) статичного балансування роторів одним рідинним автобалансиром. В дослідних установках автобалансир встановлюється на верху барабана чи на передній кромці барабана. Площина корекції знаходяться на відстані від центра мас. По суті зменшуються коливання верхньої чи передньої кромки барабана (для зменшення вібрацій в зоні командоапарату, місці завантаження барабану робочою речовиною тощо), що є типовим для побутових пральних машин, центрифуг, сепараторів, екстракторів тощо.

На основі розгляду матеріалів дисертації можна зробити позитивний висновок про повноту розв'язання поставленої науково-технічної проблеми.

Дисертація оформлена у відповідності до вимог ДСТУ, належним чином ілюстрована, стиль та послідовність викладення матеріалу відповідають вимогам до написання наукових робіт. В тексті дисертації є посилання автора на свої роботи.

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

Автореферат в достатній мірі відображає зміст дисертації, а наукові положення та результати, що наведені в ньому ідентичні викладеним у дисертаційній роботі.

В авторефераті і дисертації відзначений особистий внесок Драч І.В. в наукові публікації із співавторами. Завдяки цьому внеску одержані всі наукові результати, що складають наукову новизну досліджень і виносяться на захист.

### 7. Основні зауваження.

1. При статичному автобалансуванні залишається моментна незрівноваженість, яка не досліджена. Не досліджена точність балансування у термінах класів точності, не оцінена залишкова незрівноваженість у загальноприйнятих одиницях вимірювання ( $\Gamma^* \text{мм}$ );

2. В теоретичних дослідженнях працездатності рідинного АБ не використовуються загальноприйняті просторові моделі руху ротора з автобалансиром: з нерухомою точкою; на двох пружно-в'язких опорах; консольного ротора; моделі гнучкого ротора тощо. Не досліджено динамічне балансування жорсткого ротора (у двох площинах корекції), балансування (у одній і декількох площинах корекції) гнучких роторів. В оглядовій частині дисертації було б доцільно більш докладно обґрунтувати таке звуження поставленої проблеми.

3. В експериментах розділу 3 знайдена і врахована тільки одна резонансна частота, яка проявлялася через статичну незрівноваженість, розташовану в площині корекції автобалансира. Пояснень щодо існування і кількості інших резонансних частот в експериментальній частині дисертації не надано. Не пояснено чому інші резонансні частоти не проявляються.

4. В авторефераті (с.16, 17) і дисертації прийнято, що  $60/(2\pi) \approx 10$ , що зменшує точність розрахунків резонансних і інших характерних частот майже на 5%. Розмірність кутових частот вказана в  $\text{с}^{-1}$ , що характерно для частоти коливань в Гц, а не в рад/с.

5. В експериментах для побудови амплітудно-частотних характеристик, визначення резонансних частот, ефективності автобалансування тощо використовувалися дискретні швидкості обертання барабана (с. 199 дисертації)  $\omega = 180 \text{ об/хв.}, 250 \text{ об/хв.}$  – дорезонансна зона,  $350 \text{ об/хв.}$  – резонансна зона,  $525 \text{ об/хв.}, 670 \text{ об/хв.}, 890 \text{ об/хв.}$  Не досліджено як така мала кількість точок впливає на точність експериментів.

6. В дисертації не роз'яснено чому «Діапазон резонансних швидкостей обертання вертикальної роторної системи  $\omega_p$  складає від 490 об/хв до 570 об/хв» (с. 202), Діапазон резонансних швидкостей обертання горизонтальної роторної системи  $\omega_p$  складає від 330 об/хв до 370 об/хв (с. 203). Чому такі великі діапазони?

7. На рис. 5.3, с. 273 дисертації показані перші 6 власних мод коливань барабану з вертикальною віссю обертання і відповідні частоти. Чи вірно показані резонансні частоти (по ним центрування по центру мас проходить після центрування по куту нахилу подовжньої осі ротора)?

Вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Висвітлення вказаних питань у дисертації може вплинути лише на краще сприйняття поданого матеріалу.



### 8. Загальна оцінка роботи.

Дисертація Драч І.В. є закінченою науковою працею і відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин (теорія і методи захисту машин, приладів і апаратури, а також оператора від ударів і вібрацій). У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішено актуальну в галузі динаміки та міцності машин науково-прикладну проблему зменшення віброактивності роторних машин на основі розвитку і практичного застосування теорії автоматичного (статичного) балансування роторів рідинним автобалансиром, шляхом проведення комплексного математичного моделювання динамічних процесів у роторних системах з урахуванням умов експлуатації та оптимізації конструкцій балансувального пристрою. В результаті отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності є значним досягненням для розвитку теорії і методів захисту машин, приладів і апаратури, а також оператора від ударів і вібрацій у галузі динаміки і міцності машин.

Таким чином, дисертація Драч І.В. відповідає вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідно до положень п. п. 7 та 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р., зокрема, вимогам щодо наукової новизни і практичного значення, обґрунтованості і достовірності сформульованих наукових положень, висновків, рекомендацій, повноти та завершеності, а її автор Драч Ілона Володимирівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент  
завідувач кафедри деталей машин  
та прикладної механіки  
Центральноукраїнського національного  
технічного університету (м. Кропивницький),  
доктор технічних наук, професор

Підпис Г.Б. Філімоніхіна засвідчую,  
Проректор



Г.Б. Філімоніхін

О.М. Левченко