

## Рецензія

рецензента Курпа Л.В. на дисертаційну роботу

**Малишева Сергія Євгенійовича** „Біфуркації та стійкість нелінійних коливань балочних конструкцій з тріщинами втоми“ представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 - Прикладна математика, в 11 галузі знань – математика та статистика

**1. Актуальність теми дисертації.** Проблема, якій присвячена дисертаційна робота, є актуальною завдяки широкому використанню балок, як складових елементів багатьох сучасних конструкцій. Під час експлуатації конструкцій при дії циклічного навантаження можливе виникнення на балках тріщин втоми. Подібні тріщини можуть бути відкритими або закритими, тобто дихаючими. Дихаючі тріщин викликають зміни в жорсткості конструкції, що призводить до суттєвих нелінійних ефектів. Тому врахування тріщин втоми та дослідження їх впливу на поведінку елементів конструкцій має важливе значення при проектуванні конструкцій. Враховуючи важливість даної проблеми, багато вчених приділяли і приділяють велику увагу на її розв'язання. Але залишається досить велика кількість нерозв'язаних питань, особливо це стосується параметричних коливань та дослідження нелінійних ефектів, які виникають при наявності дихаючих тріщин. Тому розробка підходів для дослідження різноманітних нелінійних явищ, які виникають під час коливань балок з дихаючими тріщинами є актуальною та важливою науково-практичною задачею.

**2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Здобувач брав участь у виконанні науково-дослідницької роботи за темою III-11-21 «Наукові основи використання вуглецевих наноматеріалів та нанокомпозитів для підвищення динамічної міцності і стійкості машинобудівних конструкцій» (№ 0121U100411) де було побудовано математичні моделі, розроблені алгоритми та спеціальне програмне забезпечення для дослідження напружено-деформованого стану

елементів енергетичних машин та ракетно- космічної техніки при високошвидкісних навантаженнях.

**3. Обґрунтованість та достовірність результатів, отриманих у дисертаційній роботі** підтверджується: коректністю математичних постановок задач, використанням обґрунтованих та апробованих математичних методів. Для отримання математичних моделей вимушених, вільних та параметричних коливань балок використовувалися варіаційні принципи Остроградського–Гамільтона та Ху–Вашидзу. Для побудови скелетних кривих та частотних відгуків використано метод продовження по параметру у комбінації з методом стрільби, або ортогональних колокацій. Для аналізу стійкості та біфуркацій нелінійних коливань була використана Теорія Флоке та метод відображень Пуанкаре.

**4. Оцінка змісту дисертації.** Дисертаційна робота складається із наступних структурних частин: анотація українською та англійською мовами, вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел, додатки. У вступі надається обґрунтування актуальності обраної теми дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача у дисертаційну роботу, надано коротку .

У першому розділі розглянуто наведено порівняння різних існуючих моделей, які використовуються для опису нелінійних коливань балок з тріщинами втоми.

У другому розділі представлено чисельні методи, які були розроблені та вдосконалені здобувачем. Надано загальну інформацію про автоматичне диференціювання, та наведено приклади його застосування . Запропоновано метод розрахунку матриці Якобі для двоточкових крайових задач, який дозволяє не виводити рівняння в варіаціях. Також пропонується метод розрахунку спектру показників Ляпунова для систем звичайних диференціальних рівнянь з використанням автоматичного диференціювання.

У третьому розділі за допомогою варіаційних принципів побудовано математичні моделі коливань балок з розкритими тріщинами втоми, а також аналогічні моделі при геометрично нелінійному деформуванні балок з тріщинами. Для врахування тріщини втоми використано модель з  $\delta$ -функцією. За допомогою принципу Ху–Вашизу отримано диференціальні рівняння геометрично нелінійних коливань та побудована модель параметричних коливань балки з тріщиною втоми. При цьому було враховано ефекти нелінійної кривини та нерозтяжності серединної лінії балки. Для врахування останнього використано метод множників Лагранжа.

У четвертому розділі проведено чисельний аналіз коливань балок з тріщинами втоми із врахуванням ефекту дихання тріщин. Цікавим є дослідження лінійних коливань балки з розкритою тріщиною для моделі з тривимірним напруженим станом навколо тріщини. Для знаходження власних частот та власних функцій здобувач використовує метод зважених нев'язок, а систему базисних функцій побудовано за допомогою кубічних Б-сплайнів. Це один із прикладів, який демонструє уміння здобувача використовувати широкий спектр знань як з прикладної математики, так із розроблених раніш підходів для дослідження поставлених в роботі проблем.

Виконано низку досліджень для аналізу вимушених коливань консольної балки з однією та двома тріщинами втоми при малих амплітудах коливань. Проведено аналіз нелінійних нормальних форм вільних коливань балки з тріщиною втоми при геометрично нелінійному деформуванні. Розглянуто параметричні коливання балки з тріщиною втоми, де враховано велику кривину та нелінійну інерцію. Проаналізовано вплив дисипації на параметричні коливання балки з тріщиною втоми. Показано можливість переходу до хаотичних коливань в наслідок біфуркації Неймарка–Сакера. Для проведення чисельних досліджень розроблено та вдосконалено чисельні методи продовження по параметру за допомогою методики автоматичного диференціювання. Запропоновано алгоритм розрахунку спектру показників Ляпунова з використанням дуальних чисел.

**Висновки**, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

**Список літератури** досить широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості джерел філософського змісту (в тому числі вітчизняні), богословських та деяких наукових робіт, а також іноземних джерел.

**Додаток** містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

**5. Наукова новизна отриманих результатів.** До найбільш суттєвих наукових результатів, що стосуються балок з дихаючими тріщинами, можна віднести наступні:

1. Побудовані математичні моделі геометрично нелінійних коливань, які отримані за допомогою варіаційних принципів.
2. Розроблено математичну модель параметричних коливань, що враховує нерозтяжність серединної лінії балки та можливість виникнення хаотичних коливань.
3. Доведення явища виникнення хаотичних коливань балки з тріщиною в області субгармонічного резонансу внаслідок біфуркації подвоєння періоду.
4. Побудовані нелінійні нормальні форми вільних коливань балки з дихаючою тріщиною при геометрично нелінійному деформуванні.
5. Виявлення явища багатозначності частотних відгуків на малих амплітудах коливань балки з тріщиною, що зумовлено постійною складовою у навантаженні.
6. Розроблені алгоритми та програми, що реалізують запропоновані підходи з використанням сучасних ефективних методів, модифікації існуючих методів та автоматичного диференціювання.

## **6. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про високий науковий рівень роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Результати, що представлені в дисертаційній роботі, отримані особисто здобувачем та опубліковані у 6 наукових роботах в міжнародних журналах, які включено до наукометричної бази Scopus та/або Web of Science Core Collection.

Дисертант активно приймав участь в українських конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

## **7. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. Як визначалась необхідна кількість ітерацій при застосуванні методу продовження розв'язків по довжині дуги і методу Ньютона?
2. При використуванні делта функції як обчислювались похідні першого та другого порядку ( рівняння 4.17)
3. В таблиці 4.1 наведено порівняння відносної різниці між значеннями частот, отриманих за допомогою запропонованих підходів та за допомогою пакету ANSYS. Вважаю, що доцільно було б навести значення відносної похибки, тобто отриману різницю збільшити у 100 разів.
4. З роботи не зрозуміло чи враховують розроблені підходи зміну поведінки тріщини за часом, тобто переходити від закритої до відкритої і навпаки?
5. В роботі присутня деяка нечітка термінологія, наприклад параметричне навантаження або параметричне збурення, кінематичне збурення, варіаційний принцип Ху- Вашизу( стор.4) замість Ху-Вашидзу, на стор.17 посилання на формулу (1.9) замість (1.8),

**8. Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам.**

На підставі вищевикладеного, вважаю, що в цілому дисертаційна робота **Малишева Сергія Євгенійовича** „Біфуркації та стійкість нелінійних коливань балочних конструкцій з тріщинами втоми“, є завершеною науковою працею. В ній містяться нові підходи для дослідження поведінки балок з дихаючими тріщинами, які враховують особливості нелінійних процесів їх деформування.

Вважаю, що за актуальністю теми, високим науковим рівнем виконаних досліджень, науковою новизною та практичною цінністю отриманих результатів, представлена дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а її автор – Малишев Сергій Євгенійович, заслуговує присудження йому їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 - Прикладна математика.

Рецензент,

професор кафедри прикладної математики  
Національного технічного університету «ХПІ»,  
доктор технічних наук, професор

*Л. Курпа* Лідія Курпа

Особистий підпис проф. Л. В. Курпа засвідчую.

Вчений секретар НТУ «ХПІ», проф.

*Максим Малько* Максим Малько

