

67-72-52/2  
сід 09.04.21р

## В І Д Г У К

офіційного опонента, к.т.н., доц., с.н.с. Устиненка Олександра Віталійовича на дисертаційну роботу Сукова Максима Геннадійовича "Обґрунтування параметрів великогабаритних хвильових зубчастих передач приводів потужних машин", що подана до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

### 1. Актуальність теми дисертації

Поліпшення масогабаритних характеристик механічних приводів є актуальним завданням сучасного вітчизняного машинобудування. Особливо це відноситься до потужних приводів, що застосовуються в гірничій та металургійній галузях промисловості.

Найчастіше такі потужні приводи виконуються на базі зубчастих передач. Але, на жаль, традиційні зубчасті передачі вичерпали свої можливості з точки зору поліпшення масогабаритних характеристик. Тому дуже перспективною задачею є розробка та застосування у потужних великогабаритних приводах хвильових зубчастих передач. Вони мають декілька переваг, насамперед, можливість реалізації великих передатних відношень та передач великих навантажень.

Але при цьому виникає питання адаптації досліджень та розрахункових методик, що вже існують, до великогабаритних хвильових зубчастих передач (ВГХЗП), які застосовуються у важкому машинобудуванні. Виявляється, що існуючі підходи та методики справедливі тільки для відносно невеликих (з точки зору габаритів та навантажень) хвильових передач. В той же час крутні моменти на тихохідних валах ВГХЗП перевищують 10000 Н·м. Тому виникає актуальна науково-практична задача розробок нових підходів та методик, що забезпечать обґрунтований вибір структури та параметрів великогабаритних хвильових зубчастих передач з урахуванням їх конструктивно-технологічних особливостей та умов роботи.

Дисертаційна робота, що рецензується, присвячена саме вирішенню цієї задачі, це свідчить про її актуальність.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їхня вірогідність**

Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані:

– сучасною математичною моделлю розподілу навантаження в зубчастому зачепленні ВГХЗП, що враховує важливі силові характеристики, а саме: розподіл сил по ширині зубчастого вінця в залежності від фази зачеплення; залежність осьових сил від зовнішнього навантаження; максимальну нормальну силу, що діє на зубець;

– математичною моделлю напружено-деформованого стану (НДС) гнучкого колеса ВГХЗП, яка враховує сумісний вплив зубчастого та шліцьового вінців, що зв'язані циліндричною оболонкою, на величини нормальних та дотичних напружень, а також на лінійні деформації гнучкого колеса. Застосування цієї моделі для розрахунків дозволило підвищити на 20–25% навантажувальну здатність гнучкого колеса;

– встановленням закономірності переміщення зубців у деформованому зачепленні ВГХЗП, що враховують швидкості руху точок гнучкого колеса у радіальному та окружному напрямках, окружні швидкості та швидкості ковзання гнучкого колеса;

– встановленням умови відсутності інтерференції та "проскакування" зубців у хвильовому зачепленні;

– порівняльним аналізом теоретичних досліджень силового навантаження та напружено-деформованого стану з даними експериментальних стендових досліджень ВГХЗП.

Отримані висновки та рекомендації базуються на великому обсязі розрахунків, порівняльному аналізі теоретичних і експериментальних даних автора та інших дослідників хвильових передач. Результати теорії і експериментів адекватні та збігаються з достатньою точністю. Це свідчить про достовірність отриманих у дисертації результатів.

### 3. Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, рекомендації з використання

У дисертаційній роботі вирішується важлива науково-практична задача підвищення технічного рівня та ефективності роботи великогабаритних хвильових зубчастих передач шляхом обґрунтованого вибору їхніх структури та параметрів з урахуванням конструктивно-технологічних особливостей і умов роботи.

У роботі отримано наступні нові наукові результати:

– набула подальшого розвитку математична модель розподілу навантаження в зубчастому зачепленні ВГХЗП, яка, на відміну від існуючих, враховує наступні показники: розподіл сил по ширині зубчастого вінця в залежності від фази зачеплення; залежність осьових сил від зовнішнього навантаження; максимальну нормальну силу, що діє на зубець;

– встановлені закономірності переміщення зубців у деформованому зачепленні ВГХЗП. Вони базуються на основних кінематичних характеристиках з урахуванням силових показників, а саме: швидкості руху точок гнучкого колеса у радіальному та окружному напрямках, окружних швидкостях та швидкостях ковзання, що викликані поворотом нормалі до нейтрального шару гнучкого колеса, внаслідок його розтягування і розкручування зубців в залежності від параметрів ВГХЗП та величини деформації гнучкого колеса;

– встановлені граничні умови відсутності інтерференції, "проскакування" та "заклинювання" зубців у процесі роботи ВГХЗП;

– розроблено математичну модель НДС гнучкого колеса ВГХЗП. Вона, на відміну від існуючих, враховує сумісний вплив зубчастого та шліцьового вінців, які зв'язані циліндричною оболонкою, на величини нормальних та дотичних напружень та лінійні деформації гнучкого колеса. Це дає можливість досягнути зниження максимальних значень нормальних згинальних напружень до максимального рівня дотичних та підвищити на 20–25 % навантажувальну здатність гнучкого колеса.

Отримані наукові результати забезпечують вибір раціональних конструктивних параметрів ВГХЗП, чим сприяють поліпшенню ефективності їх роботи.

Практичне значення роботи полягає у подальшому розвитку теоретичних та експериментальних методик оцінки геометричних, кінематичних та силових показників ефективності ВГХЗП, а також розрахунків міцності їхніх основних деталей. При цьому:

- вдосконалено методику силового аналізу ВГХЗП, це дозволяє підвищити точність теоретичного та експериментального визначення навантажень;

- удосконалені підходи щодо підвищення ефективності ВГХЗП, це дозволило розробити практичні рекомендації, а саме, використати проміжне кільце з бронзи для зниження осьової сили та підвищення ККД редуктора;

- результати практичних натурних досліджень дозволили розробити та впровадити у виробництво на ПрАТ "Новокраматорський машинобудівний завод" ("НКМЗ") 16 великогабаритних хвильових редукторів загальною масою більше ніж 110 т, знизити трудомісткість більше ніж на 30 % та металомісткість більше ніж на 40 %, економічний ефект від впровадження склав понад 2 млн. грн. Це підтверджено актом впровадження хвильових зубчастих редукторів у продукції ПрАТ "НКМЗ", який наведений у додатку Г.

#### **4. Повнота викладу наукових положень дисертації в опублікованих роботах**

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи досить повно опубліковані в наукових виданнях, які відповідають вимогам МОН України; доповідалися на 8 міжнародних науково-технічних конференціях. Основний зміст дисертації опубліковано в 13 статтях у фахових наукових виданнях України; 5 – у збірниках доповідей міжнародних науково-технічних конференціях, що входять в індексацію Scopus; 6 публікацій у інших виданнях; 2 патенти на корисну модель (разом 26 публікацій). Список публікацій наводиться в дисертації та авторефераті.

## **5. Ідентичність змісту автореферату та основних положень дисертації**

В авторефераті повною мірою відображені положення, результати та висновки дисертації.

Зміст автореферату та дисертації ідентичні.

## **6. Коротка характеристика змісту та зауваження**

### ***Зміст роботи.***

Робота містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки, викладена на 246 сторінках, з яких 149 стор. основного тексту, 7 таблиць на 5 стор., 58 рисунків на 53 стор., 218 літературних джерел на 27 стор., 4 додатка на 53 стор.

*У вступі* викладено актуальність та ціль роботи, дана її загальна характеристика, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

*У першому розділі*, який присвячений обґрунтуванню досліджень хвильових передач для приводів потужних машин, аналізується сучасний стан теоретичних та експериментальних досліджень хвильових зубчастих передач. Аналіз існуючих робіт показав, що наявні розрахункові методики розроблені переважно для хвильових зубчастих передач відносно невеликих габаритів з малими модулями, що працюють при невеликих навантаженнях. Тому їхнє застосування для проектування ВГХЗП практично неможливе. Наприкінці розділу визначені напрямки теоретичних та експериментальних досліджень, обґрунтовано мету та задачі дисертаційної роботи.

*У другому розділі*, який присвячений обґрунтуванню конструктивно-силових параметрів у деформованому хвильовому зубчастому зачепленні, спочатку розроблено методику моделювання взаємодії елементів зачеплення у процесі передачі крутного моменту. Це дало змогу виконати дослідження впливу навантажень на елементи ВГХЗП під час взаємодії жорсткого та гнучкого коліс з генератором хвиль. Після цього виконано аналіз силових факторів у деформованому зубчастому зачепленні та дослідження обертального

моменту на гнучкому зубчастому колесі. Напрацювання цього розділу дають змогу істотно підвищити точність оцінки силових характеристик елементів зубчастого зачеплення по ширині вінця та в окружному напрямку.

*У третьому розділі*, який присвячений дослідженню кінематики деформованого зубчастого зачеплення великогабаритної хвильової передачі, спочатку виконано моделювання та дослідження відносного положення зубців ВГХЗП у процесі роботи. На його основі виконано розрахунок інтерференції зубців хвильових передач та проаналізовано вплив на її значення величин навантажень. Це дозволяє визначити межі існування інтерференції хвильового зачеплення в залежності від основних геометричних, конструктивних та силових параметрів. Подалі проведено дослідження кінематичних параметрів у зачепленні ВГХЗП, які дозволили визначити повну колову швидкість точок гнучкого колеса та швидкість ковзання зубців у зачепленні, в залежності від параметрів хвильової передачі та розмірів деформації гнучкого колеса, для різних фаз зубчастого зачеплення. І наприкінці розділу запропоновані конструктивні рішення, що усувають інтерференцію та "проскакування" зубців у великих хвильових передачах.

*У четвертому розділі*, який присвячений дослідженню НДС ВГХЗП, спочатку розроблено методику дослідження силової взаємодії елементів передачі. Гнучке колесо розглядається як тонкостінна циліндрична оболонка. Розрахунками встановлено, що напруження розтягнення, що виникають в оболонці, спрямовані вздовж твірної циліндра, занадто малі, тому їх можна не враховувати. Подалі виконано дослідження процесу взаємодії гнучкого колеса із зубчастим та шліцьовим вінцями, що пов'язані оболонкою; в основу покладено напівбезмоментну теорію В.З. Власова. Отримано розподіл нормальних напружень по внутрішньому та зовнішньому контурам оболонки гнучкого колеса, в також розподіл дотичних напружень. І наприкінці розділу виконано аналіз НДС гнучкого колеса методом скінченних елементів.

*У п'ятому розділі*, який присвячений натурним експериментальним дослідженням ВГХЗП для потужних приводів машин, виконані дослідження

процесу взаємодії гнучкого колеса з генератором хвиль та напружено-деформованого стану гнучкого колеса, експериментальні дослідження ККД ВГХЗП в складі потужних приводів, дослідження температурних параметрів. Також проведено оцінку адекватності теоретичних та експериментальних досліджень. Отримані результати дозволили розробити рекомендації для проведення проектно-конструкторських робіт, що забезпечують істотне зниження енергетичних втрат у ВГХЗП на стадії їх проектування.

*Висновки* повною мірою відображають результати, отримані в роботі.

*Список використаних джерел* з достатньою повнотою відображає сучасний стан досліджень хвильових зубчастих передач.

Оцінюючи дисертацію Сукова М.Г. *в цілому*, можна вважати, що вона має цілісний та завершений характер, вирішує важливу науково-прикладну задачу, пов'язану з потребою створення потужних механічних приводів для гірничої та металургійної галузей промисловості України. Є всі підстави вважати, що дисертаційна робота виконана автором самостійно та на високому науковому рівні.

#### ***Зауваження по змісту та оформленню роботи.***

*По змісту роботи:*

1. У розділі 2 виконано апроксимацію евольвентного зубця жорсткого колеса хвильової передачі у вигляді балки трапецеїдального перерізу та для неї проаналізовано напружений стан. При цьому на стор. 51 стверджується: "Результати справедливі і для евольвентного профілю зуба, при його геометричному моделюванні без апроксимації в трапецеїдальний профіль". Що мається на увазі? Якщо тотожність НДС трапецеїдального та евольвентного зубця, то це потребує додаткових доказів та роз'яснень.

2. На стор. 90, підрозділ 3.3, зазначено: "З позиції усунення негативного впливу перекосів зубців, доцільно поширювати зону зачеплення в межах до  $20...30^\circ$  в кожную сторону від великої осі генератора хвиль". Було б бажано



пояснити тут, чому саме на цю величину, або вказати "дивись стор...", де це було обґрунтовано.

3. На стор. 108, підрозділ 4.2, зазначено: "На основі отриманого рішення розроблений алгоритм для розрахунку на ЕОМ і виконаний розрахунок". Але не опису алгоритму, ні його блок-схеми не наведено. Звісно, обсяг дисертаційної роботи має обмеження, але доцільно було б навести блок-схему алгоритму хоча б у додатках.

4. У підрозділі 4.3 виконано розрахунок деформованого стану гнучкого колеса методом скінченних елементів. Але не вказано, яким чином виконувались розрахунки. Чи це була оригінальна програма розрахунків за допомогою МСЕ (тоді було б бажано навести її алгоритм у додатках), чи розрахунки виконувались в якомусь стандартному програмному пакеті, наприклад, у ANSYS або Siemens Femap?

*По оформленню роботи:*

1. У підрозділі 2.1 виконано опис методики моделювання взаємодії елементів зачеплення, але відповідні рисунки розташовано у додатку А. Це ускладнює сприйняття матеріалу.

2. Зустрічаються різночитання у термінології. Наприклад, застосовано терміни "зуб" та "зубець", "зуби" та "зубці", причому на стор. 27 в одному реченні одночасно присутні "зубів" та "зубців". Скінченні елементи названо "скінчені" та "кінцеві" (дивись стор. 121). Також зустрічається "обертальний" та "обертаючий" момент (дивись стор. 64).

3. Також у тексті зустрічаються деякі стилістичні помилки, наприклад, "інтеграція" замість "інтегрування" (дивись стор. 44).

### **Висновки:**

– дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.02.02 – машинознавство;

– виконані здобувачем теоретичні, розрахункові та експериментальні дослідження актуальні, мають наукову новизну та практичну цінність;



- автореферат з необхідною повнотою відображає зміст дисертації;
  - публікації дисертанта відповідають вимогам МОН України;
  - зазначені вище зауваження не зменшують наукового рівня та практичної цінності дисертаційної роботи;
- в цілому дисертаційна робота є завершеною науковою працею, відповідає вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема п.п. 9, 11, 12 чинного "Положення...", а її автор, Суков Максим Геннадійович, гідний присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство.

**Офіційний опонент,  
професор кафедри теорії і систем  
автоматизованого проектування  
механізмів і машин Національного  
технічного університету "Харків-  
ський політехнічний інститут",  
канд. техн. наук, доцент, старший  
науковий співробітник**

