

67-72-52/4
619 09.04.21р.

До спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06
у Національному університеті
«Львівська політехніка», 79013,
м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук

Проценка Владислава Олександровича на дисертаційну роботу

здобувача **СУКОВА Максима Геннадійовича**

*«Обґрунтування параметрів великогабаритних хвильових зубчастих передач
приводів потужних машин»*, представлену на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

Дисертаційна робота Сукова М.Г. присвячена розв'язанню актуальної задачі підвищення технічного рівня та ефективності функціонування приводів потужних машин за рахунок створення, дослідження і впровадження у практику виготовлення та експлуатації великогабаритних хвильових зубчастих передач (ВГХЗП) з урахуванням їх конструктивних і технологічних особливостей, а також умов роботи. Розв'язання цієї задачі виконане за рахунок реалізації теоретичних, експериментальних та виробничих досліджень деталей ВГХЗП, де обґрунтовано математичні моделі функціонування їх елементів, розроблено методику фізичного моделювання процесів взаємодії, досліджено напружено-деформований стан, в тому числі в зоні контакту дисків генератора хвиль з гнучким колесом. За результатами досліджень розроблено, виготовлено і успішно експлуатується 16 великогабаритних хвильових редукторів, що дозволило досягнути значної економії матеріальних та виробничих ресурсів.

Актуальність теми та обґрунтованість наукових положень пояснюється сучасними тенденціями до підвищення енергетичної ефективності та зниження матеріаломісткості деталей електромеханічних приводів важких машин, що містять передачі із великими передавальними числами. Впроваджені на сьогодні у приводи потужних машин передачі, зокрема зубчасті планетарні, мають значний коефіцієнт заповнення корпусу металом, а відтак значну масу, побудова їх у багатоступінчастому виконанні обумовлює значні механічні втрати, а відтак низьку енергетичну ефективність приводів. Значно менше поширені в приводах потужних машин хвильові передачі, не зважаючи на їх відомі переваги - меншу

навантаженість зубців через набагато більшу їх кількість у зачепленні, меншу масу і габарити, меншу шумність та більшу плавність роботи. Це пояснюється поширенням виконаних дотепер досліджень хвильових передач на агрегати із низькими та середніми навантаженнями, що містять кулачковий генератор хвиль та гнучкий кульковий підшипник. Перенесення цих результатів на важконавантажені хвильові передачі обмежується застосуванням спрощених підходів до аналізу напружено-деформованого стану елементів зубчастого зачеплення гнучкого та жорсткого коліс, що приводяться у взаємодію дисковим генератором хвиль на жорстких підшипниках.

У дисертації Сукова М.Г. подальшого розвитку отримала теорія розрахунку та конструювання деталей високонавантажених ВГХЗП із дисковим генератором хвиль. Теоретичним та експериментальним шляхом підвищено точність розрахунку зусиль у зубчастому зачепленні з урахуванням взаємодії дискового генератора хвиль та гнучкого колеса, визначено граничні умови прояву інтерференції та проскакування зубців, вперше розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану гнучкого колеса, представленого у вигляді защемленої по торцях циліндричної оболонки і пов'язаних з нею зубчастого та шліцьового вінців. Експериментально встановлено, що ККД досліджуваних передач набуває значень 0,87...0,92, що набагато перевищує цей показник для багатоступінчастих планетарних передач, поширених у приводах потужних машин. Застосовані підходи дозволяють вважати основні наукові положення, висновки та рекомендації, отримані в дисертаційній роботі, обґрунтованими.

Наукова новизна та достовірність отриманих результатів. *Наукова новизна* полягає у подальшому розвитку теорії взаємодії деталей ВГХЗП та елементів її зубчастого зачеплення у процесі передавання навантаження.

При цьому за рахунок виконання теоретичних досліджень удосконалено математичну модель розподілу навантаження в зубчастому зачепленні ВГХЗП, чим досягнуто урахування розподілу зусиль по ширині зубчастого вінця залежно від фази зачеплення, залежність осьових зусиль в зачепленні від зовнішнього навантаження, швидкостей руху точок гнучкого колеса у радіальному та коловому напрямку, ковзання в точці контакту зубців. Запропоновані розрахункові моделі дозволили встановити граничні умови відсутності інтерференції, проскакування та заклинювання зубців у зачепленні. Вперше розроблена математична модель напружено-деформованого стану гнучкого колеса ВГХЗП, якою враховано

сумісний вплив взаємодії зубчастого та шліцьового вінців, що пов'язані циліндричною оболонкою на величину напружень і деформацій гнучкого колеса.

При виконанні теоретичних досліджень використані методи вищої математики, теорії пружності та будівельної механіки, сучасні методи математичного моделювання. Експериментальні дослідження сплановані та оброблені із використанням основ теорії інженерного експерименту, методів математичної статистики. Дослідження фізичних моделей виконано із використанням електротензометрії, що забезпечена сучасним оснащенням та реєстраційним обладнанням. Дослідження енергетичної ефективності розроблених ВГХЗП виконано в натуральну величину на універсальних стендах у промислових умовах. Для оброблення отриманих теоретичних та експериментальних даних застосовані сучасні програмні комплекси. Описані методи, засоби та інструменти виконання досліджень, разом із задовільною (5,5%) збіжністю отриманих теоретичних та експериментальних результатів, дають можливість вважати сформульовані висновки *достовірними*, а запропоновані рекомендації *обґрунтованими*.

Практичне значення отриманих результатів полягає в уточненні методів розрахунку та конструювання деталей ВГХП з дисковим генератором хвиль, підвищенні їх енергетичної ефективності, зниженні матеріаломісткості, трудомісткості виготовлення та відтак вартості.

Зокрема, запропонована узагальнена математична модель зубчастого зачеплення ВГХЗП дозволяє визначати граничні умови прояву інтерференції та проскакування зубців, чим забезпечується спрощення процесу проектування ВГХЗП за рахунок зменшення невизначеності та кількості ітерацій при розрахунку. Показано, що біля торця оболонки гнучкого колеса, з'єднаного із зубчастим вінцем, треба передбачати плавний перехід, що дозволяє врахувати встановлене під час теоретичних досліджень зростання в цій зоні нормальних напружень.

Експериментальні дослідження, виконані на стендах у виробничих умовах, показали, що ККД натурних зразків ВГХЗП при номінальному навантаженні, невеликих та середніх частотах обертання генератора хвиль складає 0,92...0,90. При збільшенні навантаження вдвічі, ККД знижується на 3%, при цьому збільшення частоти обертання генератора хвиль призводить до подальшого зниження ККД до 0,87.

За результатами досліджень на ПрАТ «НКМЗ» розроблено та виготовлено 16 хвильових редукторів загальною масою понад 112 т, при чому трудомісткість виготовлення знижена на 4250 нормогодин (30,8 %), металомісткість на 77,2 т (40,7 %), економічний ефект від впровадження складає понад 2,2 млн. грн. (про що складені відповідні акти). Це доводить правомірність всіх конструкторських та технологічних рішень, науково обґрунтованих в дисертації.

Структура та зміст роботи. Представлена дисертація є рукописом, містить вступ, п'ять розділів, висновки, додатки. Повний обсяг дисертації становить 246 стор., з яких 149 стор. основного тексту, 7 таблиць на 5 стор., 58 рисунків на 53 стор., список літератури з 218 джерел на 27 стор., чотири додатки на 53 стор.

Загальна характеристика роботи.

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, аргументовано актуальність теми дослідження, встановлено його мету і задачі, обґрунтовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** "Обґрунтування досліджень хвильових передач для приводів потужних машин" виконано аналіз сучасного стану досліджень хвильових передач, зазначено їх переваги, порівняно з іншими типами зубчастих передач, серед яких високі передавальні числа в одному ступені, багатопарність зубчастого зачеплення і висока навантажувальна здатність, одні з найкращих масогабаритні показники, низька шумність та висока плавність роботи. Водночас показано, що відомий рівень досліджень практично не охоплює ВГХЗП, оскільки освоєні виробництвом хвильові передачі призначені для передачі відносно невеликих навантажень (до 5000 Н·м), що стало причиною спрощення підходів до розрахунку напружено-деформованого стану гнучкого колеса та визначення параметрів зубчастого зачеплення. Не досліджено взаємодію роликового генератора хвиль з гнучким колесом та впливу його на параметри зачеплення, оскільки поширені передачі містять кулачковий генератор та гнучкий кульковий підшипник. Недостатньо досліджено залежність ККД ВГХЗП від її конструктивних параметрів. Для існуючих передач не встановлені межі інтерференції та можливого проскакування зубців під навантаженням. Відсутні обґрунтовані рекомендації та надійні технічні рішення, що дозволяють усунути інтерференцію і проскакування зубців, знизити осьові сили і енергетичні втрати, підвищити навантажувальну здатність ВГХЗП. Вакуум у знаннях про методи розрахунку та прийоми конструювання ВГХЗП призводить до звуження галузі їх використання у важких машинах, оскільки великогабаритні хвильові редуктори,

розроблені з використанням класичних методів на практиці виявляються непрацездатними.

У другому розділі "Обґрунтування конструктивно-силових параметрів у деформованому хвильовому зубчастому зачепленні" виконана оцінка граничних умов можливого прояву інтерференції і проскакування зубців у хвильовому зачепленні, що працює з дисковим генератором хвиль. Дослідження виконані за рахунок експериментальної оцінки деформацій зубців гнучкого колеса із використанням тензометрії із використанням розробленої фізичної моделі гнучкого колеса з контрольним зубцем, деформації якого було виміряно. При цьому форма перерізу контрольного зубця прийнята трапецеїдальною, незмінною по всій ширині зубчастого вінця і за рахунок цього забезпечена можливість встановлення тензорезисторів по всій ширині контрольного зубця, що дало повну інформацію про його деформацію по всій ширині зубчастого вінця. Показано, що вжиті припущення забезпечують високу точність і достовірність результатів експерименту порівняно з відомими методиками. Розроблено методику моделювання силової взаємодії зубців у деформованому зубчастому зачепленні ВГХЗП, що має ряд переваг у порівнянні з існуючими. Масштабне моделювання деформації зуба жорсткого колеса виконано з двадцятип'ятикратним збільшенням методом тензометрії контрольного зуба і його моделі, що дозволило встановити розподіл зусиль у хвильовому зубчастому зачепленні безпосередньо за показаннями вимірної апаратури. Розроблення удосконалених фізичних і математичних моделей дозволило уточнити результати теоретичних та експериментальних досліджень силової взаємодії елементів зубчастого зачеплення ВГХЗП.

Третій розділ "Дослідження кінематики деформованого зубчастого зачеплення великогабаритної хвильової передачі" містить відповідні дослідження, якими показано, що у ВГХЗП за широких зубчастих вінців ($(50...60)m$) і великих навантажень, розподіл колових зазорів у хвильовому зубчастому зачепленні стає нерівномірним за шириною вінця. За різниці у кількості зубців жорсткого та гнучкого зубчастих коліс у 2 шт., ці зазори можуть приймати від'ємні значення, що означає їх інтерференцію, яка стає причиною їх заклинювання та проскакування у зачепленні. Тут побудовано і досліджено узагальнену математичну модель взаємодії зубців у ВГХЗП, яка стала джерелом отримання практично значимих умов, що дозволяють виключити появу інтерференції зубців при проектуванні передачі. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження кінематичних процесів у

зубчастому зачепленні ВГХЗП, дозволили визначити швидкості точок гнучкого колеса в радіальному і коловому напрямках з урахуванням його деформацій, а також швидкість ковзання зубців у зачепленні для різних фаз зубчастого зачеплення. На основі виконаних досліджень сформульовано ряд практично значимих рекомендацій щодо визначення геометричних параметрів елементів передачі при проектуванні, а також урахування експлуатаційних чинників з метою підвищення її енергетичної ефективності.

У четвертому розділі "Дослідження напружено-деформованого стану ВГХЗП" вивчено, зокрема, вплив крайового ефекту на напружений стан оболонки гнучкого колеса, і показано, що максимальні напруження, пов'язані з крайовим ефектом, мають місце в околі торця оболонки гнучкого колеса, що сполучений із зубчастим вінцем. Показано, що вказану концентрацію напружень доцільно знижувати, застосовуючи при конструюванні плавний перехід у сполученні оболонки гнучкого колеса із її зубчастим вінцем. Теоретичними дослідженнями встановлено, що напруження розтягу набувають максимуму під час проходження повз розрахунковий переріз великої осі генератора хвиль, а максимальні напруження стискання, відповідно, під час проходження малої осі генератора хвиль. Показано, що зниження максимальних значень напружень згину до рівня максимальних напружень кручення може стати причиною забезпечення більш раціонального напружено-деформованого стану гнучкого колеса і може забезпечити підвищення несівної здатності колеса на чверть. Виконані дослідження стали джерелом для отримання практично значимих рекомендацій щодо конструювання гнучкого колеса ВГХЗП, що дозволяють знизити вплив його асиметричних деформацій шляхом збільшення його жорсткості в області взаємодії з дисковим генератором хвиль за рахунок встановлення проставочного кільця на внутрішній поверхні гнучкого колеса.

У п'ятому розділі "Натурні експериментальні дослідження хвильових зубчастих передач стосовно потужних приводів машин" виконано дослідження впливу конструктивних параметрів зачеплення на інтерференцію та енергетичну ефективність ВГХЗП. Показано, що біля торців гнучкого колеса на вході та виході зубців із зачеплення, містяться зони інтерференції зубців, їх вплив на показники передачі зростає при збільшенні навантаження. Показано, що інтерференцію по ширині зубчастого вінця підсилює закручування гнучкого колеса, тому для зменшення її впливу та усунення явища проскакування зубців у зачепленні ширину зубчастого вінця коліс слід обмежувати величиною (35...40)т. Уточнено

метод визначення енергетичних втрат у хвильових передачах з дисковим генератором хвиль шляхом урахування впливу деформації гнучкого колеса на сили тертя у хвильовому зачепленні. Експерименти, виконані над натурними зразками ВГХЗП, показали справедливість отриманих теоретично висновків, зокрема експериментально підтверджено, що зі збільшенням частоти обертання генератора хвиль та моменту опору на жорсткому колесі зростають втрати в зубчастому зачепленні і генераторі хвиль, підвищується потужність тепловиділення і температура мастила передачі. В розділі задекларовано, що розбіжність отриманих теоретично та експериментально значень ККД передачі не перевищує 5%. Розбіжність даних теоретичних і експериментальних досліджень осьових сил - 7%. З урахуванням отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо виконання проектно-конструкторських робіт ВГХЗП.

Основні висновки містять стислий перелік отриманих результатів виконаних теоретичних і експериментальних досліджень, а також практичні рекомендації щодо конструювання передач, які наведено у чисельному вигляді, що підтверджує практичне значення роботи.

Список використаних джерел налічує 218 найменувань і достатньо повно охоплює опубліковані результати досліджень хвильових передач з 1966 по 2020 рік, в тому числі роботи закордонних вчених. Посилання містять згадування в основному наукових статей та монографій, аналізу патентів приділено дещо менше уваги. Кількість посилань на підручники та навчальні посібники невелика.

Додатки містять фотографії деталей впроваджених у промислове виробництво ВГХЗП у розробленні яких приймав участь дисертант, результати тензометричних досліджень розроблених фізичних моделей контрольного зуба та генератора хвиль та гнучкого колеса, кадри швидкісної фотозйомки процесу зачеплення зубців натурального зразка ВГХЗП, схеми розробленого автором та використаного типового вимірювального спорядження, схеми вимірювань, фотографії стендів та результати стендових випробувань, акти впровадження у виробництво ПрАТ "НКМЗ" із порівняльними техніко-економічними показниками нових та базових хвильових редукторів.

Ступінь апробації результатів досліджень достатньо повний. Автором опубліковано 26 наукових праць, із них – 13 статей у фахових виданнях, 5 у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 6 публікацій у інших виданнях, 2 патенти України на корисні моделі. Наведений у дисертації та авторефераті перелік публікацій та їх зміст відповідають темі роботи

і в достатньому обсязі відображають основні положення і наукові результати, що винесені на захист.

Загальні зауваження:

1. Деякі елементи оглядового матеріалу, наведеного в розділі 1, подані недостатньо логічно і послідовно - так підрозділ 1.1 містить загальні відомості про хвильові передачі, в підрозділі 1.2 задекларовано аналіз виконаних досліджень та методів розрахунку хвильових передач, проте тут знову зустрічаються цілі абзаци загальної інформації, зокрема про переваги хвильових передач, галузі їхнього застосування та ін. - це лише дарма збільшує обсяг роботи. Те саме стосується і інших розділів.

2. В тексті роботи часто зустрічається термін "масштабний фактор", проте пояснення цього терміну не дається, як і не вказуються конкретні значення цього фактора, межі його застосування та впливу.

3. В п. 2 висновків до розділу 1 сказано, що досвід освоєння великогабаритних редукторів на ПрАТ "НКМЗ" виявився невдалим, оскільки виготовлені редуктори заклинило, вони працювали нестійко і неплavno, але які саме вади існуючих методик проектування до цього призвели - чітко не вказується, хоча саме це обумовлює актуальність роботи.

4. На стор. 52 із посиланням на табл. А.1 заявлено, що в неї внесена кількість пар зубців, що знаходяться у зачепленні, але в самій таблиці наведено висоти розмаху осцилограми в мм. Рисуноків А.14 та А.15, які згадуються на стор. 55, в додатках знайти не вдалося.

5. У розділі 4 теоретично обґрунтовано, що при проектуванні доцільно забезпечувати максимальну крутильну піддатливість гнучкого колеса при забезпеченні її міцності (стор. 128), тобто забезпечувати мінімальну товщину його оболонки. Далі (стор. 138) сказано, що з метою вдосконалення конструктивних факторів гнучкого колеса за критеріями навантажувальної здатності і ресурсу роботи рекомендовано знизити товщину гнучкого колеса на 25...30%. Тут не уточнюється на якій підставі можна додатково зменшувати товщину оболонки яка попередньо визначена з умови міцності.

6. На стор. 152 та у висновку 7 до розділу 5 роботи задекларовано, що розбіжність результатів теоретичних та експериментальних досліджень ККД розроблених великогабаритних хвильових редукторів не перевищує 5%. Проте методики розрахункового визначення ККД розроблених передач в роботі не наведено, хоча теоретичні основи для її розроблення отримані, зокрема, в розділі

2, де досліджено силову взаємодію зубців у зачепленні та в розділі 3, де виконана оцінка кінематичних параметрів зачеплення, зокрема швидкості ковзання зубців.

7. Метою роботи передбачено за рахунок виконання досліджень забезпечити обґрунтований вибір структури і параметрів великогабаритних хвильових зубчастих передач. Поставлена мета реалізована за рахунок отримання масиву окремих рекомендацій щодо розрахунку і конструювання деталей цих передач, проте концентрованої інженерної методики їх проектування з урахуванням отриманих в дисертації результатів не наведено. Водночас цих результатів цілком достатньо для розроблення керівного документу з проектування великогабаритних хвильових зубчастих передач, наприклад стандарту підприємства.

8. Окремі висновки до роботи дещо громіздкі та перевантажені даними, включають загальні фрази - це утруднює сприйняття наведеної у них основної інформації щодо отриманих результатів.

9. Частина рисунків в авторефераті мають нераціонально вибраний масштаб (рис. 2, рис. 5, рис. 8, рис. 9, рис. 12, рис. 18), а рис. 19 надрукований нечітко - ці рисунки важко читаються.

10. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються окремі описки, а також незначні термінологічні неточності, пунктуаційні та стилістичні помилки.

Вказані недоліки не знижують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи, вони мають радше рекомендаційний характер.

Загальна оцінка дисертації:

1. Дисертаційна робота здобувача Сукова Максима Геннадійовича «Обґрунтування параметрів великогабаритних хвильових зубчастих передач приводів потужних машин» є завершеною кваліфікаційною науковою працею і відповідає паспорту спеціальності 05.02.02 – машинознавство.

2. У роботі розв'язано актуальну задачу підвищення технічного рівня та ефективності функціонування приводів потужних машин за рахунок створення, дослідження і впровадження у практику виробництва та експлуатації великогабаритних хвильових зубчастих передач з урахуванням їх конструктивних і технологічних особливостей.

3. Одержані в дисертації теоретичні та експериментальні результати є новими, науково обґрунтованими та цінними для практики, містять нові рішення

щодо розрахунку та конструювання великогабаритних хвильових зубчастих передач та дослідження взаємодії їх елементів.

4. Рецензовану дисертаційну роботу характеризує єдність змісту та достатня чіткість викладення матеріалу. Автореферат у стислій формі достатньо повно відображає основні положення та висновки дисертації, ступінь новизни та практичне значення отриманих результатів, їхню суть і особистий внесок автора. Винесені здобувачем на захист опубліковані праці містять достатньо повні відомості про основні наукові та практичні результати отримані у роботі. Дисертацію та автореферат написано українською мовою достатньо грамотно, докладно ілюстровано.

5. Дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 "Порядку присудження наукових ступенів" та вимогам Міністерства освіти і науки України щодо кандидатських дисертацій, а її автор, **СУКОВ Максим Геннадійович**, *заслуговує* присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство.

Офіційний опонент,

д.т.н. (за спеціальністю 05.02.02), доцент, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії

В.О. Проценко
21. IV. 2021

Підпис проф. В.О. Проценка засвідчую:

проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, к.т.н., професор



А.П. Бень