

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Васильєвої Олени Едуардівни

*«Багатопараметричний синтез конструктивних елементів
циліндричних редукторів з урахуванням
особливостей їх виготовлення та надійності»*,

яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

Дисертаційна робота Васильєвої О.Е., яка опонується, присвячена подальшому розгляду наукових основ багатопараметричного синтезу основних конструктивних елементів циліндричних редукторів з розробленням нових ефективних методів і моделей з метою забезпечення зменшення часу на синтез і параметричну оптимізацію параметрів елементів кожної конструкції з одночасним забезпеченням їх якості та надійності в процесі експлуатації. Крім цього, в роботі наведено шляхи для розширення можливостей розв'язку складних задач, що пов'язані з багатопараметричним синтезом конструктивних елементів циліндричних редукторів.

Актуальність обраної теми. Відомо, що найбільше поширення в техніці отримали циліндричні зубчасті передачі з паралельними осями. Це не тільки циліндричні редуктори, а і коробки швидкостей і подачі металорізальних верстатів, коробки швидкостей автомобілів тощо. В усіх цих механізмах необхідно постійно удосконалювати конструктивні елементи. А це можливо тільки за рахунок оптимального вибору в процесі проектування раціональної структури та відповідних для цієї структури оптимальних параметрів основних конструктивних елементів.

В той же час існуючі методології і відповідні моделі для розв'язку задач, які пов'язані із синтезом конструктивних параметрів елементів циліндричних редукторів мають обмежений характер використання. Крім

цього, існуючи методи не дозволяють обґрунтовано визначати основні конструктивні параметри корпусу редуктора, оптимізувати конструктивні параметри зубчастих передач, враховувати напружено-деформований стан валів особливо при виникненні коливних процесів.

Тому розроблення нових ефективних методів багатопараметричного синтезу конструктивних параметрів складових конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення, які розглядаються в дисертаційній роботі О.Е. Васильєвої, є актуальними і надзвичайно важливими при розв'язуванні цієї проблеми. Актуальність роботи підтверджується й тим, що вона виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт Національного університету «Львівська політехніка».

Огляд змісту роботи. Дисертація викладена на 298 сторінках основного тексту, проілюстрована 76 рисунками та 9 таблицями і включає вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел, що охоплює 308 назв та 6 додатків. Загальний обсяг дисертації – 395 сторінок.

У вступі в скороченому вигляді наведено обґрунтування роботи, її актуальність, мету та задачі досліджень, показано наукову новизну та практичну цінність, представлено особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертаційної роботи, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено розгляд та аналіз робіт в галузі оптимального проектування циліндричних редукторів. Особливу увагу автор приділив питанням зниження маси запроектованих конструкцій з одночасним забезпечення міцності та надійності. Закінчується перший розділ висновками на підставі аналізу сучасного стану, що дозволило автору сформулювати мету роботи та поставити задачі досліджень. Загалом можна відзначити, що аналіз робіт в галузі багатопараметричного синтезу конструктивних параметрів машинобудівних виробів та тенденцій їх розвитку і моделей опису виконано достатньо скрупульозно у відповідності до сучасних вимог.

Також особлива увага автором приділялася питанням надійності зубчастих передач та інших складових елементів різних редукторів.

У *другому* розділі автором розглянута похибка передаточного числа зубчастої передачі, яка обумовлена процесом зубонарізання коліс черв'ячними фрезами. Для цього було встановлено взаємозв'язок координат кутів повороту ведучого та веденого коліс зубчастої передачі; виконано профілювання дійсного профілю зубців після операції зубофрезерування черв'ячною фрезою; обґрунтовано, що гребінці (виступи) на поверхні профілю зубця під дією номінального навантаження не змінюються і залишаються певної висоти. На підставі розгляду цих задач була отримана залежність для визначення передаточного числа зубчастої передачі з урахуванням похибки, яка спричинена процесом зубофрезерування зубчастих коліс черв'ячними фрезами.

На наступному етапі виконано аналіз коливальних процесів, які виникають за рахунок зміни передаточного числа зубчастої передачі з розробленням математичної моделі динамічного процесу з урахуванням взаємодії електромагнітних явищ в асинхронному електродвигуні та механічних коливань системи. Для аналізу розробленої математичної моделі був розроблений пакет прикладних програм і отримано графічні залежності обертових моментів електродвигуна, на вхідному та на вихідному валу досліджуваної зубчастої передачі, а також залежність амплітуди коливань вихідного вала вздовж лінії зачеплення від похибки профілів зубців ведучого та веденого коліс.

Також розглянуто вплив тертя профілів зубців в зачепленні циліндричної зубчастої передачі на демпфірування вимушених коливань. Ці дослідження дозволили автору прийти до висновку, що для зменшення впливу зовнішніх збуджуючих сил, які направлені вздовж ковзання робочих профілів, на коливання зубчастої передачі необхідно зменшувати шорсткість робочих поверхонь зубців до $R_a = 1,25 \dots 0,63$ мкм.

Для перевірки результатів теоретичних досліджень були виконані експериментальні дослідження на спроектованому та виготовленому випробувальному стенді із замкненим силовим потоком, на який автор отримав патент. Результати експериментальних досліджень підтвердили справедливість теоретичних досліджень, що дозволило отримати спрощену залежність для визначення динамічних коефіцієнтів. Зауважень до проведення експериментальних досліджень немає. Тому можна відзначити, що другий розділ подано на належному науковому рівні з використанням сучасних методів проведення експериментальних досліджень і математичного апарату.

У *третьому* розділі розглянуто розв'язок задач, які пов'язані із забезпеченням надійності циліндричних редукторів в процесі синтезу їх конструктивних елементів на основі оптимального проектування. При розгляді та розв'язуванні задач, які пов'язані з надійністю конструктивних елементів редукторів, автор використовувала метод статистичного моделювання для прогнозування імовірності безвідмовної роботи редуктора та комплексного показника – коефіцієнта готовності. Результати досліджень дали можливість визначити оптимальні параметри передачі і тим самим дозволили підвищити надійність редуктора. Було встановлено, що найбільш оптимальним проміжком часу безперервної роботи редуктора без виконання технічного обслуговування є час $t_1 = 720$ год, який забезпечує імовірність безвідмовної роботи редуктора в межах $0,98 \dots 0,99$.

Завершується розділ висновками, які показують повноту виконаної роботи по третьому розділу. Загалом можна відзначити, що цей розділ є необхідним продовженням другого розділу і він розроблений на достатньому науковому рівні.

У *четвертому* розділі розглянуто багатопараметричний синтез конструктивних елементів корпусів редукторів з використанням дискретного програмування. Для розв'язування поставлених задач була розроблена математична модель синтезу конструктивних елементів корпусів

одноступеневого і двоступеневого редукторів. Запропонована математична модель для синтезу конструктивних елементів корпусу двоступеневого редуктора показала достатньо високу адекватність розроблених конструктивних елементів вже існуючим конструктивним елементам корпусів. Цей висновок підтверджений при використанні для аналізу напружено-деформованого стану корпусів редукторів метода скінчених елементів та системи SolidWorks. Тому можна констатувати, що цей розділ виконано на належному науковому рівні і він є необхідним для розгляду поставленої задачі.

У п'ятому розділі автор розглянула задачу, яка пов'язана з визначенням раціональних конструктивних параметрів зубчастих коліс на основі оптимізаційного математичного моделювання. Для багатопараметричного синтезу основних конструктивних параметрів циліндричної зубчастої передачі на основі математичної моделі автором розроблено пакет прикладних програм. Такий підхід дозволяє у декілька разів скоротити цикл конструкторської підготовки виробництва з одночасним забезпеченням оптимальної міцності, надійності, собівартості виготовлення, терміну експлуатації та експлуатаційних витрат, а також дає можливість зменшити витрати матеріалу на виготовлення передачі на 16,5% при забезпеченні необхідної міцності та надійності.. Для реалізації методу використано метод Монте-Карло, що значно спрощує процес оптимізації.

Можна констатувати, що п'ятий розділ розроблений на достатньому науковому рівні.

У шостому розділі розглянуто вплив напружено-деформованого стану вала редуктора на синтез його конструктивних елементів. Автором розроблено математична постановка задачі оптимізації, алгоритмічна модель синтезу конструктивних елементів валів та пакет прикладних програм. Отримані результати порівнювалися і аналізувалися з використанням валів діючих конструкцій редукторів. Відносна похибка для розглянутих варіантів знаходилася в допустимих межах.

В загальних висновках дисертант наводить основні результати проведених досліджень.

Наукова новизна та ступінь обґрунтованості результатів. В роботі розв'язана важлива науково-технічна проблема, а саме розробка теоретичних основ, методів та моделей багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності. Новизна цього рішення підтверджується наявністю одного патента та трьох свідоцтв про реєстрацію авторських прав. Також автором вперше, на підставі результатів теоретичних досліджень розроблено динамічну математичну модель коливання циліндричної зубчастої передачі з урахуванням якості виготовлення бокових робочих поверхонь зубців коліс. Також вперше розроблено математичні моделі багатопараметричного синтезу структури та конструктивних елементів редукторів. Крім цього, автором отримано теоретичні залежності для визначення впливу тертя профілів зубців в зачепленні циліндричної зубчастої передачі на демпфування вимушених коливань та розроблено методологію прогнозування надійності циліндричних редукторів.

Також автором удосконалено залежності для визначення похибок передаточного числа зубчастої передачі, для визначення впливу технологічних і конструкційних чинників на надійність редуктора та удосконалено методологію вибору критеріїв оптимізації основних конструктивних елементів зубчастих передач.

Достовірність та обґрунтованість результатів і висновків підтверджено коректністю постановки задач, раціональністю теоретичних припущень, строгістю математичних викладок, надійністю використаних методів розв'язання задач, раціональним вибором експериментальних методів, порівняльним аналізом результатів розрахунків та експериментальних даних.

Практичне значення. Результати дисертаційного дослідження дали можливість запропонувати інженерний метод оптимального проектування

конструктивних елементів циліндричних редукторів, який забезпечує зменшення часу на синтез та оптимізацію конструктивних параметрів, якість, надійність, зменшення маси запроєктованої конструкції та її довговічність з урахуванням запропонованих критеріїв, а також з одночасним розширенням можливостей для розв'язку різних подібних задач.

Розроблена методологія багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів впроваджена на трьох машинобудівних підприємствах України та в навчальний процес у Національному університеті «Львівська політехніка» і у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності.

Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами. Результати аналізу дисертаційного дослідження О.Е. Васильєвої показали, що тема дисертаційної роботи у цілому відповідає існуючим пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт кафедр: 1) теоретичної механіки; 2) механіки та автоматизації машинобудування. Результати дисертаційних досліджень пов'язані з науково-технічними темами: «Дослідження статички та динаміки складних механічних систем при проектуванні і експлуатації великогабаритного обладнання» (№ д/р. 0101U000882); «Створення високоефективних енергоощадних резонансних вібраційних машин з електромагнітним приводом та синфазним рухом коливних мас» (№ д/р 0108U000378); «Розробка наукових основ проектування вібраційних машин для автоматизованих виробництв» (№ д/р 0107U004846). Аналізуючи виконану роботу можна стверджувати, що вона виконувалася в рамках держбюджетних тем, які пройшли державну реєстрацію.

Публікації та оприлюднення результатів. За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 24 наукові статті, з яких 3 в закордонних виданнях і 1, що входить в науково-метричну базу Scopus, 20 наукових статей у наукових фахових виданнях України, 11 тез доповідей

науково-технічних конференцій, 1 патент на корисну модель і 3 свідоцтва на твір (комп'ютерні програми). В публікаціях в достатній мірі висвітлені наукові положення дисертаційного дослідження, основні висновки і рекомендації. Участь у міжнародних конференціях свідчить про те, що з результатами роботи широко ознайомлена наукова громадськість України та інших країн.

Оцінка дисертації, оформлення дисертації та автореферату, зауваження. Виконану роботу слід вважати закінченим науковим дослідженням, яке відповідає меті та поставленим задачам, що сформульовані в дисертації. В роботі не використовуються результати та висновки кандидатської дисертації. Структура та обсяг дисертації повністю відповідають вимогам ДАК України. Дисертація написана грамотною лаконічною мовою, що повністю відповідає вимогам до наукових праць.

Розв'язані у роботі мета і задачі досліджень, викладені методи розв'язання задач з використанням математичних моделей, впровадження результатів дослідження вказують на наукову зрілість здобувача. Загалом дисертаційна робота написана зрозумілою науковою мовою. Рисунки, таблиці виконані чітко, а написи позначені виразно.

Зміст автореферату повною мірою відповідає змісту дисертації, зауважень до автореферату немає.

Розглядаючи дисертаційну роботу загалом, можна відзначити, що вона є науковою працею, в якій за результатами досліджень розроблена методологія багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності. Значущість результатів дисертаційного дослідження О.Е. Васильєвої для науки полягає в розроблені науково обґрунтованої результатами експериментальних досліджень методології визначення оптимальних конструктивних параметрів складових елементів циліндричних редукторів.

Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків та 6 додатків на 71 сторінці. Загальний обсяг роботи – 395 сторінок. Основний зміст викладено на 298 сторінках і містить 76 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел із 308 назв.

Зауваження по роботі:

1. Методика багатопараметричного синтезу редуктора повинна враховувати клас точності зубчастих коліс. В роботі недостатньо уваги приділено питанням точності виконання зубчастого зачеплення та точності збирання редуктора.

2. Профіль зачеплення, з'єднання, вали та корпусні деталі редуктора мають випадкові похибки. Їх бажано врахувати при побудові математичних моделей та методик синтезу конструктивних параметрів редукторів.

3. В першому розділі необхідно було б більше уваги приділити розгляду та аналізу робіт, які пов'язані із заміною зубчастої пари шестерня – колесо еквівалентною динамічною системою з моментами інерції. В цьому випадку жорсткістю зубців нехтують, тому що вона вважається значно більшою у порівнянні з жорсткістю з'єднань зубчастих коліс з іншими деталями редуктора. Цей висновок використовується у другому розділі при розробленні математичної моделі з використанням рівняння Лагранжа другого роду.

4. В першому розділі роботи можна було б не зосереджуватися на відомих положеннях по надійності. При розгляді надійності редукторів автор прийняла за основу розподіл Вейбулла. На наш погляд це правильний підхід, але на стор. 64 автор вказує на можливість використання експоненціального закону розподілу, розподілу Релея та нормального розподілу. Але про ці розподіли ніякого аналізу та висновків не зроблено.

5. В другому розділі не наведено аналіз результатів теоретичних досліджень, які отримано у вигляді графічних залежностей (рис. 2.6 – рис. 2.8). Їх аналіз дозволив би більш якісно обґрунтувати коливні процеси зубчастих коліс. Матеріал по математичній обробці результатів

повнофакторного експерименту, доцільно розмістити не в розділі, а в додатках до дисертації.

6. В третьому розділі при розгляді методу статистичного моделювання не вказується як з його допомогою можна визначити і застосувати відповідний закон розподілу: експоненціальний, Вейбулла, нормальний.

7. В четвертому розділі при визначенні розмірів конструктивних елементів корпусу в залежності від його напружено-деформованого стану використовується «Метод сил». Необхідно було б обґрунтувати його застосування, хоча для підтвердження отриманих результатів був використаний метод скінченних елементів.

8. В роботі не наведено основних напрямків застосування оптимізаційних математичних моделей при розробленні конструкції редуктора з урахуванням всіх складових конструктивних елементів. При виборі критеріїв оптимізації необхідно було б обґрунтувати прийняття його меж.

9. В п'ятому розділі не виконано аналіз емпіричної залежності для визначення кута нахилу зубців передачі в залежності від допустимого рівня звуку згідно із санітарними нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96, що дозволяє не перевищувати його значення в межах 50...85 дБ.

10. В роботі не наведено напрямків подальшого удосконалення роботи розроблених систем за рахунок поєднання їх із засобами автоматизованого проектування. В роботі та авторефераті наявні деякі неточності редакційного характеру.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Васильєвої О.Е. «Багатопараметричний синтез конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності» виконана на високому науковому рівні і актуальну тему. Зроблені у цьому відгуку зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Це можна пояснити тим, що вони не впливають на висновки і не спростовують основних положень дисертації..

В дисертаційній роботі Васильєвої О.Е. одержано нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності забезпечують вирішення важливої науково-практичної проблеми багатопараметричного синтезу основних параметрів складових конструктивних елементів редуктора.

Загалом, розглянута дисертаційна робота задовольняє вимоги п. 9 та 10 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор, Васильєва Олена Едуардівна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство.

Офіційний опонент, доктор
технічних наук, професор,
завідувач кафедри конструювання
верстатів і машин
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
Заслужений діяч науки і техніки України



В.Б. Струтинський

Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А. Мельниченко