

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Васильєвої Олени Едуардівни

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

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** Для ефективного проектування механізмів, механічних систем та машин під час виконання напружено-деформованого аналізу необхідно мати достовірні дані про їх оптимальні параметри. Зокрема, у випадку проектування складних механічних систем сучасні САПР і комп'ютерні програми аналізу не дозволяють отримати ці значення з достатньою точністю, оскільки під час проектування просто неможливо врахувати реальні умови функціонування всієї системи. Незважаючи на те, що сьогодні існує потужний арсенал методів і програмного забезпечення для проведення теоретичних досліджень оптимального проектування машинобудівних конструкцій, постає потреба у розробці методів багатопараметричного синтезу конструктивних елементів складного обладнання, до яких відносять і редуктори. Що стосується існуючих методів, то вони не дають можливості точно враховувати внутрішні динамічні навантаження та не в стані впоратись з обґрунтованим розрахунком основних параметрів корпусу редуктора. Вони також не враховують напружено-деформований стан валів, особливо в процесі експлуатації. Тому тема дисертації, спрямована на вирішення проблеми з розроблення нових методів багатопараметричного синтезу конструктивних параметрів складових елементів циліндричних редукторів (зубчастої передачі, вала, корпусу і т.д.) з урахуванням особливостей їх виготовлення, що скорочують час на синтез та оптимізацію параметрів складових елементів, з забезпеченням якості,

надійності, зменшенням маси за заданими критеріями оптимізації, є актуальною.

**Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась в межах науково-дослідних робіт кафедри механіки та автоматизованого машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» – «Статика та динаміка пружно-пластичних систем» і пов'язана з науково-технічною темою «Дослідження статички та динаміки складних механічних систем при проектуванні і експлуатації великогабаритного обладнання» (№ д/р. 0101U000882) (проведено аналіз і визначена похибка передаточного числа зубчастої передачі, яка обумовлена процесом зубонарізання коліс черв'ячними фрезами; розроблено теоретичні основи для визначення впливу тертя профілів зубців в зачепленні циліндричної зубчастої передачі на демпфірування вимушених коливань), а також кафедри механіки та автоматизації машинобудування «Створення високоефективних енергоощадних резонансних вібраційних машин з електромагнітним приводом та синфазним рухом коливних мас» (№ д/р 0108U000378) (розроблено методологію синтезу конструктивних параметрів циліндричних редукторів та встановлено їх вплив на надійність; розроблено оптимізаційні математичні моделі синтезу зубчастих передач, алгоритми і програми багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів).

Тема дисертації цілком відповідає науковим канонам кафедри механіки та автоматизації машинобудування НУ «Львівська політехніка» «Розробка наукових основ проектування вібраційних машин для автоматизованих виробництв» (№ д/р 0107U004846).

**Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій роботи** полягає в тому, що вони формуються на застосуванні положень теорії надійності, класичної механіки пружно-деформівного твердого тіла та теорії збереження енергії, опору матеріалів, деталей машин, методах

планування та проведення повнофакторного експерименту, математичної статистики, методах оптимізації.

**Наукова новизна результатів роботи** полягає у вирішенні актуальної та важливої наукової проблеми з розробки наукових основ багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів. Здобувач розробила математичну модель динамічного процесу циліндричної зубчастої передачі з урахуванням особливостей виготовлення бокової робочої поверхні зубців коліс зубофрезеруванням черв'ячними фрезами. Дисертант розробила теоретичні залежності для визначення впливу тертя профілів зубців у зачепленні циліндричної зубчастої передачі на демпфірування вимушених коливань. Автором розроблено метод прогнозування надійності циліндричних редукторів з використанням методу статистичного моделювання та отримано залежність для визначення коефіцієнту від дії внутрішніх динамічних навантажень, обумовлених технологією зубофрезерування черв'ячними фрезами. Здобувач започаткувала методи багатопараметричного синтезу структури та складових конструктивних елементів редукторів на основі оптимізаційних моделей з використанням для розв'язку методу Монте-Карло і пакету прикладних програм, які забезпечують достатню точність і швидкість розрахунків. В дисертаційній роботі також удосконалено: залежності для визначення похибок передаточного числа зубчастої передачі; залежності для визначення кута повороту веденого колеса з урахуванням коливання передаточного числа; залежності для визначення впливу технологічних і конструктивних параметрів складових елементів редуктора на надійність і можливість модифікації його конструкції; вибір критеріїв оптимізації основних конструктивних елементів зубчастих передач. Велику увагу дисертант приділила принципу побудови оптимізаційних математичних моделей для оптимального проектування машинобудівних конструкцій з урахуванням їх напружено-деформованого стану. В свою чергу, для розв'язання практичних задач автор створила інженерний метод багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів з використанням

інноваційних технологій.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в тому, що методи багатопараметричного синтезу конструктивних елементів циліндричних редукторів, які розроблені здобувачем, дозволяють ще на етапі проектування машин отримувати з необхідною точністю достовірні значення оптимальних параметрів, що забезпечує якість виготовлення, надійність, зменшення маси запроектованої конструкції за заданими критеріями оптимізації з одночасним розширенням можливостей для розв'язання подібних задач з використанням інформаційних технологій. Для реалізації цього методу розроблено алгоритми і комп'ютерні програми «Корпус», «Зубчасте колесо», «Вал» на основі дискретного програмування, що здійснюють синтез конструктивних параметрів корпусів редукторів, зубчастих коліс, валів за заданими критеріями, виконують обґрунтований вибір підшипників, шпонкових і різьбових з'єднань.

Створено випробувальний стенд із замкненим силовим потоком для дослідження навантажувальної здатності редуктора та коливних процесів на режимах, які відповідають реальним умовам експлуатації. На спроектований та виготовлений стенд здобувачем отримано патент на корисну модель. Автор розробила рекомендації для зменшення маси корпусів і деталей редуктора, забезпечення їх міцності та надійності. В подальшому вони можуть бути використані під час розв'язання практичних задач у науково-дослідних інститутах та підприємствах машинобудівного спрямування і у навчальних процесах відповідних закладів освіти.

**Оцінка структури, обсягу та змісту роботи.** 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 найменувань та 4 додатки.

**Вступ** автор присвятила актуальності дисертаційного дослідження, розглянула зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформулювала мету і задачі дослідження, обґрунтувала сутність наукової

новизни, практичного значення здобутих результатів, приділила увагу даним про особистий внесок здобувача, навела результати апробації дисертації та список публікацій.

**У першому розділі** дисертант розглядає сучасний стан проблеми оптимального проектування циліндричних редукторів. Автор, як фахівець, проаналізувала існуючі оптимізаційні задачі стосовно машинобудівних конструкцій. Досліджуються питання зниження маси запроєктованих конструкцій з одночасним забезпеченням міцності та надійності під час проектування. Дисертант розкрила сучасні методики розрахунку і проектування складових елементів циліндричних редукторів, які базуються на суб'єктивних підходах конструктора та забезпеченні міцності з використанням довідкової літератури. Здобувач констатує, що багатопараметрична оптимізація конструктивних елементів циліндричних редукторів та їх структурна оптимізація майже не розглядалися.

Дисертант проаналізувала сучасні методи забезпечення надійності машинобудівних конструкцій, в результаті чого виявлено, що існуючі методики визначення оптимального часу напрацювання на відмову стосуються лише машинобудівних конструкцій загального машинобудування, а методи математичного моделювання надійності зубчастих передач циліндричних редукторів і заходи для її підвищення не досліджуються взагалі. Проведений аналіз дозволив сформулювати задачі досліджень.

**Другий розділ** автор присвятила розробленню математичної моделі динамічних процесів з урахуванням взаємодії електромагнітних явищ асинхронного електродвигуна та механічних коливань редукторів. Здобувач отримала залежність для визначення коефіцієнту від дії внутрішніх динамічних навантажень, обумовлених технологією зубофрезерування черв'ячними фрезами, залежність отримана вперше. Варто відзначити велику увагу, що приділяється в дисертації впливу тертя профілів зубців в зачепленні циліндричної зубчастої передачі на демпфірування вимушених коливань. В дисертаційній роботі встановлено, що коливання, які є перпендикулярними до

напрямку ковзання робочих поверхонь зубців коліс, демпфіруються тертям за законом в'язкого опору, а тертя робочих поверхонь зубців коліс в напрямку заданого руху не тільки не демпфірує коливання, але й підсилює ефект дії зовнішніх збуджуючих сил. В розглядуваній роботі дисертант обґрунтувала, що для зменшення впливу зовнішніх збуджувальних сил, що спрямовані вздовж ковзання робочих профілів, необхідно зменшувати шорсткість робочих поверхонь зубців.

Велику увагу здобувач приділяє експериментальним дослідженням для перевірки отриманих теоретичних результатів, що пов'язані з похибкою передаточного числа зубчастої передачі, яка зумовлена процесом зубонарізання коліс черв'ячними фрезами. Автором був спроектований та виготовлений випробувальний стенд для перевірки на адекватність фізичної та математичної моделей динамічних процесів. Експериментально отримані залежності для визначення першої гармоніки (коливання корпусу редуктора), шостої (коливання зубчастого колеса) і сьомої (робочого профілю зуба) гармонік. Здійснено порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень з визначенням відносної похибки до результатів експерименту. Значення похибки, наведеної в дисертаційній роботі, є допустимим, а отримані результати щодо дії внутрішніх динамічних навантажень можуть бути використані для розрахунку активних поверхонь зубців на контактну втому та втому зубців при згині.

Автором отримано результати, що дали можливість встановити значення сумарної лінійної похибки вздовж лінії зачеплення під час розрахунку коефіцієнта, який враховує дію внутрішніх динамічних навантажень. Це дає можливість обчислити як суму допусків на похибку профілю зубця, так і на відхилення кроку зачеплення.

**Третій розділ** дисертант присвятила дослідженням по забезпеченню надійності циліндричних редукторів. Під час проведення цього дослідження було отримано значення показників надійності циліндричного редуктора протягом одного внутрішньоциклового періоду згідно планово-

попереджувального ремонту обладнання. Автор уточнила параметри масштабу  $a$  і форми  $b$  згідно розподілу Вейбулла з використанням методу статистичного моделювання. Результати теоретичних досліджень розподілу Вейбулла дали можливість побудувати відповідну залежність з накладанням на неї лінії тренда, в результаті чого було отримано рівняння для визначення уточнених параметрів. Отже, прийнятий в межах планово-попереджувального ремонту обладнання час безперервної роботи редуктора  $t_1 = 1666,7$  год. є завищеним та не забезпечує достатньої надійності роботи редуктора. Автором було встановлено, що найбільш оптимальним проміжком часу безперервної роботи редуктора без виконання технічного обслуговування є час  $t_1 = 720$  год., який забезпечує достатню імовірність безвідмовної роботи. Модифікація корпусу редуктора з метою підвищення надійності дала можливість збільшити його середнє напрацювання на відмову.

Автор приділила увагу впливу відстані між опорами швидкохідного вала на напруження згину, в результаті чого було надано рекомендації по модифікації конструкції корпусу редуктора. Дисертант розробила методологію прогнозування надійності циліндричних редукторів з використанням методу статистичного моделювання.

Дисертантом було доведено, що з метою підвищення надійності зубчастої передачі необхідно приймати більші значення коефіцієнта ширини зубчастого вінця з рекомендованих меж його зміни.

**У четвертому розділі** автор розробила оптимізаційні математичні моделі синтезу конструктивних параметрів корпусів редукторів. Дисертантом отримано залежності для визначення параметрів конструктивних елементів корпусу циліндричного редуктора з урахуванням напружено-деформованого стану та у функціональній залежності від товщини його стінки. Результати перевірки визначеної товщини стінки корпусу редуктора дали можливість отримати максимальне нормальне напруження з урахуванням максимального внутрішнього зусилля та максимального згинального моменту, який діє на стінку корпусу, а також осьового моменту опору перерізу стінки корпусу.

Автор застосувала метод скінченних елементів з використанням системи SolidWorks для порівняння результату, отриманого методом сил. Була отримана твердотіла модель корпусу редуктора в середовищі SolidWorks згідно параметрів, які отримано за результатами синтезу конструктивних елементів одноступеневого редуктора 1ЦУ-200-6,3-11-У3 на підставі метода сил. Дисертант отримала результати розрахунків напружено-деформованого стану корпусу редуктора в середовищі SolidWorks Simulation методом скінченних елементів. Відносна похибка становить 7,7%, що є допустимим для інженерних розрахунків різних конструкцій на міцність.

Для перевірки на адекватність розробленої оптимізаційної математичної моделі було здійснено синтез конструктивних параметрів корпусів вже існуючих одноступеневого і двоступеневого циліндричних редукторів. Дисертант встановила, що під час розроблення корпусів редукторів шляхом оптимізації їх конструктивних розмірів є можливість зекономити матеріал на одному корпусі до 10,2% із забезпеченням міцності та надійності.

**У п'ятому розділі** здійснено оптимізацію конструктивних параметрів зубчастої передачі редуктора на основі дискретного програмування із застосуванням методу Монте-Карло. Було розроблено блок-схему алгоритму розв'язку моделі, на підставі якої автор створила програму «Зубчаста передача» для визначення відповідних конструктивних параметрів. Застосування пакету прикладних програм підтвердив розроблену оптимізаційну модель багатопараметричного синтезу на існуючих конструкціях редукторів. Варто відзначити, що на основі розробленої оптимізаційної математичної моделі синтезу конструктивних параметрів зубчастої передачі можна зменшити витрати матеріалу на виготовлення передачі на 16,5% при забезпеченні необхідної міцності та надійності.

**Шостий розділ** автор присвятила багатопараметричному синтезу конструктивних параметрів вала на базі таких показників, як середній термін служби (довговічність) вала; границя текучості матеріалу вала; коефіцієнт запасу міцності в його небезпечних перерізах; прогин вала та залежність кутів



нахилу перерізів вала від його прогину; кут закручування вала від обертального моменту, який передається; критична кутова швидкість обертання вала. Для синтезу оптимальних значень конструктивних параметрів вала автор представила оптимізаційну математичну модель із застосуванням дискретного програмування.

Здобувач перевірила результати оптимізації як розрахунковим методом, так і експериментальним шляхом на стенді із замкненим силовим потоком. Результати показали, що отримані за допомогою розробленої оптимізаційної математичної моделі дані повністю адекватні розрахунковим і експериментальним результатам. В результаті виконання дисертаційної роботи здобувачем було обґрунтовано, що розроблений метод багатопараметричного синтезу дає можливість забезпечити необхідну міцність на згин, втомну міцність, і жорсткість вала із запобіганням поперечних коливань, а також експлуатаційну надійність за умови вибору відповідного матеріалу. Необхідність та ефективність запропонованих рішень дисертаційної роботи дає можливість розв'язати актуальні наукові задачі.

**Публікації та оприлюднення результатів.** За матеріалами дисертації докторантом опубліковано 24 наукові статті, з яких 3 – в закордонних виданнях і 1, що входить в 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 опублікованих працях в достатній мірі висвітлені наукові положення, основні висновки і рекомендації дисертаційної роботи. Результати дисертації були представлені на багатьох міжнародних конференціях та наукових форумах, що підтверджує ознайомлення з ними широкої наукової аудиторії.

### **Зауваження.**

1. Автор згадує прізвища відомих вітчизняних вчених, що працювали над вирішенням поставленої проблеми, але мало згадуються сучасні закордонні науковці з теорії оптимізаційних задач.

2. Після підрозділу 1.3 недостатньо підсумків та постановки задач, варто було конкретніше визначатись з науковою нішею досліджень, оскільки це дещо звужує всебічність аналізу.

3. В прикладі розрахунку сумарної лінійної похибки (с. 80) і визначення дійсного робочого профілю зубця після фрезерування (с. 85) при стандартному куті зачеплення  $20^{\circ}$  для загального машинобудування чомусь приймається кут зачеплення  $30^{\circ}$ , хоча навіть для авіаційних зубчастих передач він складає максимум  $25...28^{\circ}$ .

4. Амплітудно-частотна характеристика (резонансна крива) з врахуванням сили тертя, зображена на рис. 2.13, с. 110, не виявляє, де настає резонанс і як сила тертя обмежує резонансну амплітуду.

5. На с. 110 автор стверджує, що найбільше поширення отримали косозубі зубчасті передачі. Твердження досить суперечливе, адже, наприклад, в авіаредукторах та інших агрегатах авіаційної техніки 97% зубчастих передач є прямозубими.

6. Дисертація перевантажена повторним описом відомих розрахункових залежностей з опору матеріалів, прикладної механіки, деталей машин (наприклад, с. 158, 159).

7. В розрахунках міжосьової відстані та ширини зубчастих коліс здобувач рекомендує заокруглювати отримані дані до цілих чисел, не згадуючи при цьому рядів переважних чисел.

#### **Загальний висновок.**

Аналіз, проведений після ретельного ознайомлення з дисертаційною роботою «Багатопряметричний синтез конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності», дає можливість сформулювати висновок про те, що вона є актуальним науковим та завершеним результатом проведеного дослідження. Наукова новизна та вагомість виконаних досліджень присутня у всіх розроблених методах оптимізації, а саме у багатопараметричному синтезі параметрів корпусів редукторів, зубчастої передачі та вала, тобто в загальному

багатопараметричному синтезі складових конструктивних елементів редукторів. Вважаю цей напрямок значущим для розвитку машинознавства, подальших наукових робіт та навчального процесу у закладах освіти машинобудівного спрямування. Зауваження, зроблені мною, не знижують результати роботи, а служать порадою для проведення наступних наукових досліджень, які можуть бути використані на машинобудівних підприємствах, для проведення науково-дослідних робіт у вищих навчальних закладах та науково-дослідних установах. Отже, дисертаційна робота цілком відповідає вимогам п. 9, 10 та 12 «Про порядок 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 за спеціальністю 05.02.02 - машинознавство,  
професор, керівник секції основ конструювання машин  
кафедри зварювального виробництва та автоматизованого  
проектування будівельних конструкцій Чернігівського  
національного технологічного університету

О.І. Пилипенко



Підпис Пилипенко О.І.

Підтверджую:

начальник ВК

П.О. Химко

