

Висновки

Розроблено математичну модель для визначення безрозмірних характеристик несучої здатності, статичної величини радіальної жорсткості з урахуванням неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника, яка є основою для оцінювання якості підшипників ковзання на етапі їх проектування.

Запропонована залежність функції радіального динамічного зазору у вигляді функціонального ряду з базисними тригонометричними функціями, що дозволяє описувати макро- і мікрогеометричні відхилення спряжених поверхонь підшипника та може бути використана для математичного моделювання ГСО широкою номенклатури.

При проектуванні шпindelних ГСО доцільно враховувати похибки опорних поверхонь підшипника, оскільки ідеалізація відмічених поверхонь приводить при розрахунках до завищених показників несучої здатності та жорсткості, що, у свою чергу, негативно відбивається на експлуатаційних показниках пари тертя і, як наслідок, на точності обробки різанням.

Список використаних джерел

1. Коровчинский М.В. Прикладная теория подшипников жидкостного трения / М. В. Коровчинский – М.: МиС, 1954. – 186 с.
2. Савин Л. А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
3. Белоусов А. И. Влияние некоторых погрешностей форм вала и обоймы на характеристики гидростатического подшипника / А. И. Белоусов, Т. А. Хромова // Исследование гидростатических подшипников. – М., 1973. – С. 18-28.
4. Федориненко Д. Ю. До питання визначення функції тиску в шпindelних гідростатичних опорах / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського держ. технол. ун-ту. Серія “Технічні науки”. – 2011. – №1(47). – С. 16-23.
5. Детали и механизмы металлорежущих станков / В. В. Каминская, З. М. Левина [и др.]; под ред. Д. Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 519 с. – (Шпиндели и их опоры, механизмы и детали приводов; т. 2).
6. Соколов Ю. Н. Шпиндельные гидростатические подшипники. Расчет и проектирование / Ю. Н. Соколов, А. Ф. Гордеев. – М.: ЭНИМС, 1969. – 71 с.

УДК 621.9.06:621.941:621.9-112.5

В.М. Чуприна, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОМПЛЕКТНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ В CAD-CAE СИСТЕМІ SOLIDWORKS/COSMOSWORKS

Розглянута актуальна проблема оптимізації динамічних показників комплектних шпindelних вузлів при їх автоматизованому проектуванні. Дослідження проводились в CAD-CAE системі SolidWorks /CosmosWorks за методом кінцевих елементів. Приведені рекомендації щодо застосування цього методу для вибору раціональних компоновочних параметрів комплектних шпindelних вузлів.

Вступ

Останнім часом у світі розповсюджується практика агрегатно-модульного комплектування металорізальних верстатів, у тому числі і комплектними шпindelними вузлами, які виготовляються спеціалізованими підприємствами [1]. У більшості верстатів шпindelні вузли визначають їх кінцеву якість, особливо динамічну [2]. Якість цих вузлів повинна забезпечуватися ще на стадії їх проектування. Тому задача оптимізації конструкції для вибору раціональних компоновочних параметрів шпindelних вузлів є актуальною.

Вихідні характеристики конструкцій вузлів і верстата в цілому можна отримати як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. На стадії проектування в САПР, коли ще матеріальна конструкція відсутня, застосовують розрахунковий метод [3]. Динамічний розрахунок є інформативним і дозволяє отримати дані про більшість вихідних показників, зокрема про статичну жорсткість, власні частоти коливань, форми коливань та інші параметри якості, а також дозволяє виявити “слабкі місця” розробленої конструкції. Крім того, розрахунковий шлях є також і найбільш економним, бо він не потребує виготовлення та випробування вузлів для оцінки якості майбутньої конструкції.

Серед багатьох методів і програм для динамічного розрахунку шпindelних вузлів [4-8] найбільш сучасним є метод кінцевих елементів. Він дозволяє виконувати розрахунок і оптимізацію статичних і динамічних показників шпindelних вузлів у САПР на основі їх кінцево-елементних математичних моделей. В якості кінцевих елементів можуть використовуватись одно-, дво- і трьохвимірні елементи. Однак найточніші розрахунки і наближеність результатів до параметрів реальних об’єктів дає використання параметричних 3D-моделей конструкцій.

CAD-CAE система SolidWorks/CosmosWorks широко використовується для автоматизованого проектування різних конструкцій, у тому числі верстатів і їх вузлів. Можливість оптимізації параметричних 3D-моделей об’єктів закладена в самій системі SolidWorks/CosmosWorks [9;10]. Проте її оптимізаційні можливості використовуються досить обмежено.

Мета статті

Метою статті є розробка методології оптимізації конструкцій шпindelних вузлів за статичними і динамічними показниками для вибору раціональних компоновочних параметрів конструкції в сучасних CAD-CAE системах на основі параметричних 3D-моделей.

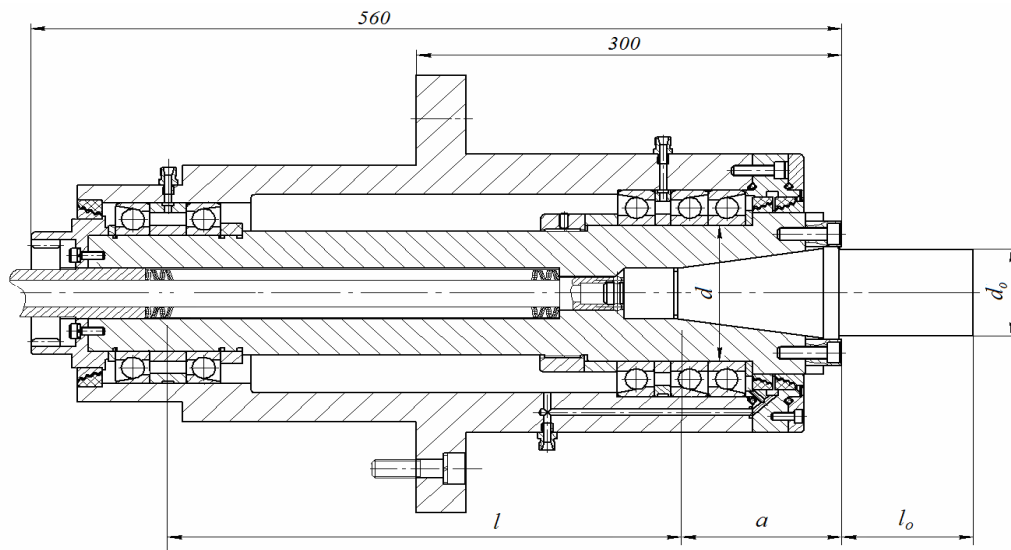
Виклад основного матеріалу

Оптимізація конструкції шпindelного вузла проводилась на прикладі модифікованих комплектних шпindelних вузлів обробляючого центру IP500ПМФ4. Для цього в CAD системі SolidWorks були розроблені параметричні 3D-моделі шпindelних вузлів. Модифікація забезпечує більш широкий діапазон швидкостей обертання шпинделя – до 2500 об/хв у силовому варіанті (на роликівих підшипниках) і до 4500 об/хв у швидкісному варіанті (на кулькових підшипниках). У цій роботі використовувався другий варіант конструкції.

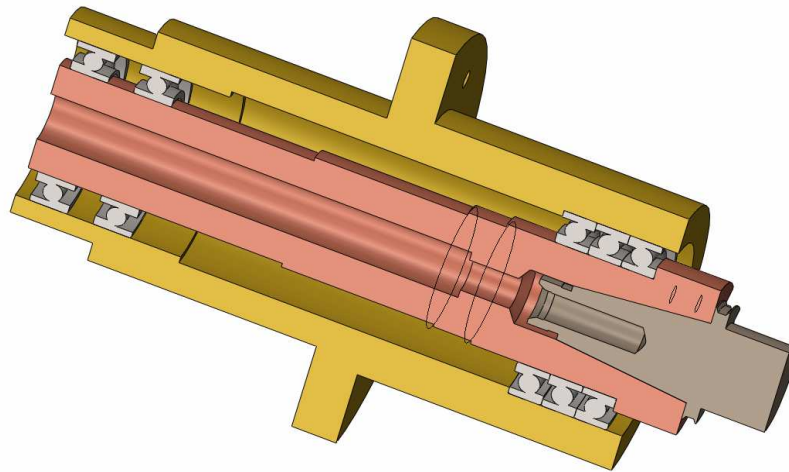
Схема комплекту шпindelного вузла (швидкісної модифікації) і його спрощена параметрична 3D-модель (з короткою оправкою) показані на рисунку 1. Конструкція шпindelного вузла має такі особливості. Шпindel розміщено в корпусі на двох опорах, зібраних з кулькових радіально-упорних підшипників за схемами “триплекс” – в передній опорі і “дуплекс” – в задній. Вал шпинделя має внутрішній отвір, в якому розташовано механізм силового затиску різних інструментальних оправок (з кінематичним замиканням).

При побудові 3D-моделі шпindelного вузла використовувались каталожні 3D-моделі підшипників з бібліотеки Tools системи SolidWorks.

Параметризації підлягали розміри усіх деталей вузла, але при оптимізації враховувалися лише основні компоновочні розміри: діаметр у передній опорі d , відстань між опорами l , довжина консолі a та розміри оправок – довжина l_o та діаметр d_o .



а)



б)

а) складальне креслення; б) параметрична 3D-модель

Рис.1. Комплексний шпиндельний вузол (швидкісний варіант з короткою інструментальною оправкою)

Розрахунки статичних та динамічних показників комплексного шпиндельного вузла виконувалися в CAD-CAE системі SolidWorks у вбудованому додатку CosmosWorks за методом скінченних елементів.

Спочатку був проведений розрахунок базового варіанта конструкції. При розрахунках використовувались такі параметри:

довжина міжопорної відстані $l=300$ мм;

діаметр оправки $d_o=70$ мм;

довжина оправки $l_o=200$ мм (довгої) та 50 мм (короткої);

нагруження радіальною силою $P=1000$ Н.

На рисунку 2 показана розрахункова модель комплексного шпиндельного вузла. В розрахунковій моделі базування і закріплення шпиндельного вузла виконувалось по фланцю корпусу, як і в реальній конструкції. Навантаження шпинделя забезпечувалось радіальною силою $P=1000$ Н, прикладеною на консолі оправки в зоні різання.

Перед початком розрахунку виконувалось автоматичне розбиття усіх деталей збірної 3D-моделі комплексного шпиндельного вузла на об'ємні кінцеві елементи. При цьому автома-

тично будувалась відповідна мережа цих елементів. Метод побудови передбачає можливість завдання розмірів елементів генеруємої мережі в широких межах. Система дозволяє також будувати комбіновані мережі з різними розмірами елементів.

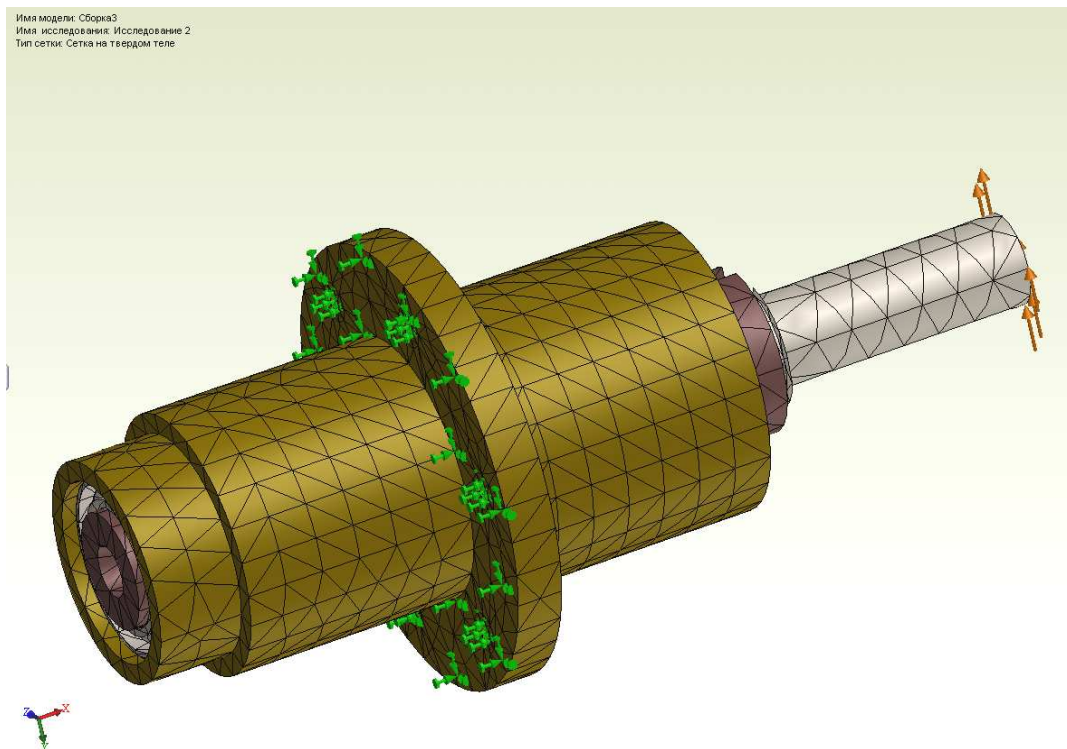


Рис.2. Розрахункова модель комплектного шпиндельного вузла з мережею кінцевих елементів (з довгою оправкою)

При розрахунках проводилося дослідження лінійної динаміки шпиндельного вузла при гармонічному навантаженні в широкому діапазоні частот (до 10000 Гц). Для кожного варіанта конструкції розраховувався ряд резонансних частот шпиндельного вузла (не менше 15 частот). Наприклад, для базового варіанта вузла він показаний на рисунку 3.

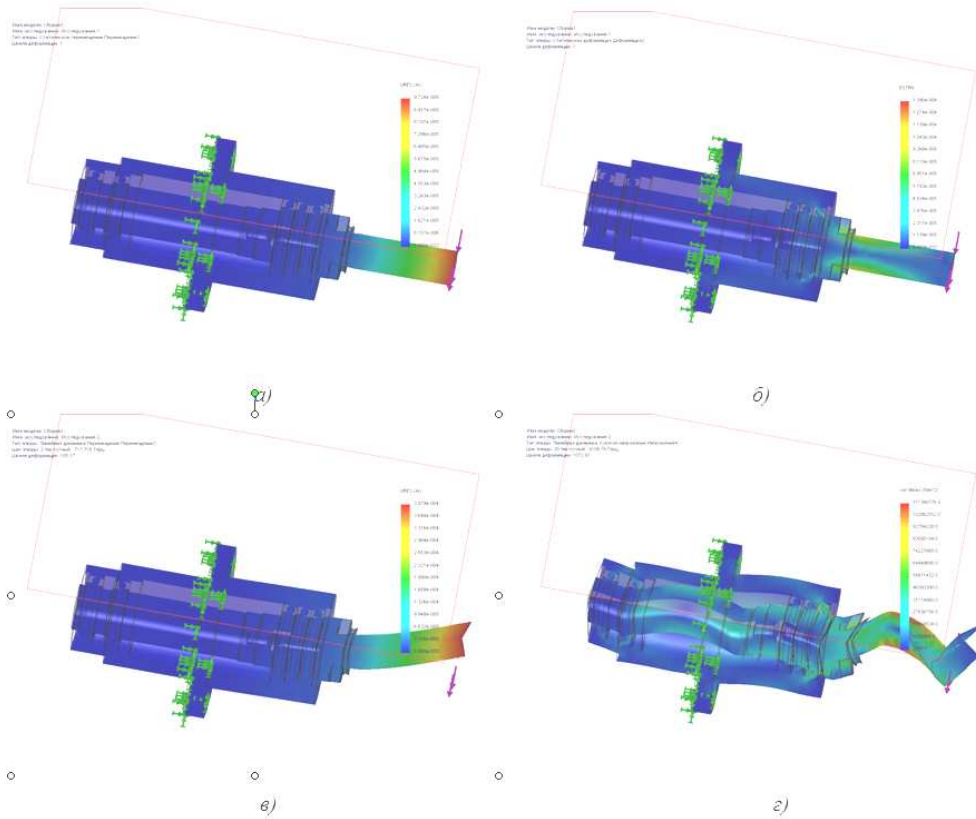
19:30, четверг, Март 10, 2011
Имя исследования: Исследование 2

Режим No.	Частотный(Рад/сек)	Частотный(Герц)	Период(Секунды)
1	5132.7	816.89	0.0012242
2	5327.2	847.86	0.0011794
3	9914.4	1577.9	0.00063374
4	9919	1578.7	0.00063345
5	10570	1682.3	0.00059441
6	10630	1691.8	0.00059107
7	17786	2830.7	0.00035327
8	17802	2833.3	0.00035295
9	18615	2962.7	0.00033753
10	19622	3123	0.00032021
11	22032	3506.4	0.00028519
12	23602	3769	0.00026532
13	26118	4156.8	0.00024057
14	26219	4172.9	0.00023964
15	28476	4532.1	0.00022065

Рис.3. Розрахунковий ряд резонансних частот (для базового варіанта з довгою оправкою)

Крім того, розраховувались величини статичних напружень і деформацій конструкції, визначались значення частот власних коливань шпинделя, будувались картини форм коливань на основних резонансних частотах. У програмі Cosmos форми коливань будуються в збільшеному масштабі (для наочності результатів).

Вибіркові приклади результатів розрахунків для довгої оправки показані на рисунку 4, а для короткої – на рисунку 5.



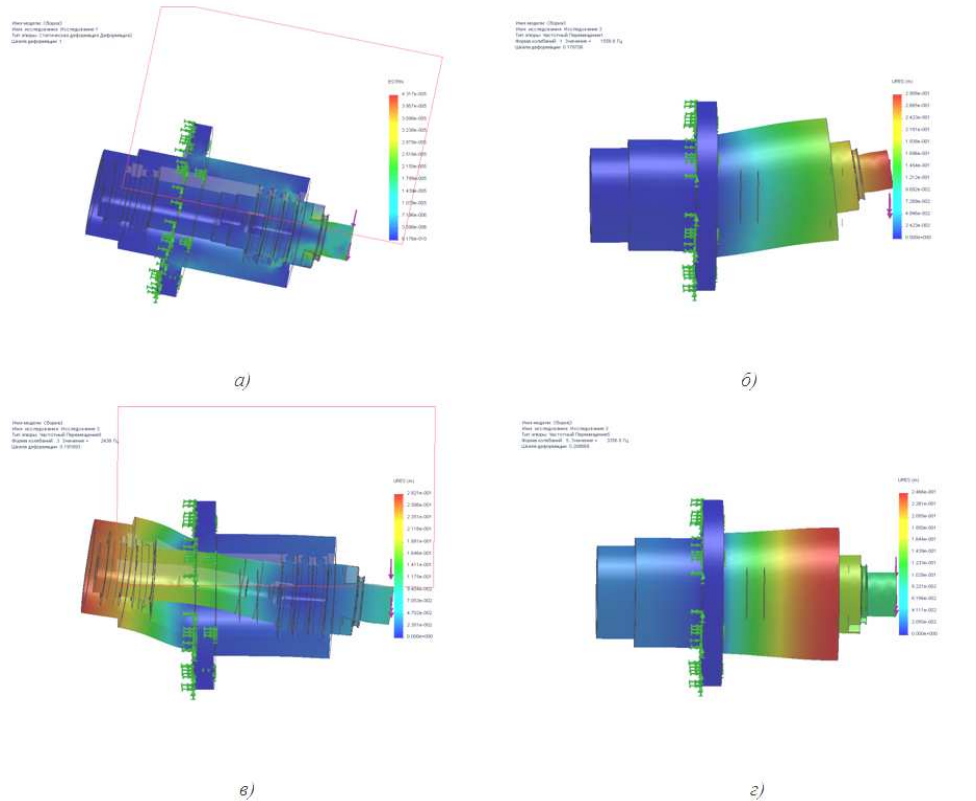
а) статичне переміщення;

б) статичне деформація;

в) форма коливань на частоті 817 Гц;

г) форма коливань на частоті 4109 Гц

Рис.4. Результати розрахунків базового варіанта комплектного штиндельного вузла (з довгою оправкою)



а) статична деформація;

б) форма коливань на частоті 1558 Гц;

в) форма коливань на частоті 2438 Гц;

г) форма коливань на частоті 3356 Гц

Рис.5. Результати розрахунків базового варіанта комплектного штиндельного вузла (з короткою оправкою)

Система CosmosWorks дозволяє проводити оптимізацію як окремих деталей, так і збірних конструкцій. Оптимізація збірної 3D-моделі може виконуватись тільки шляхом змінення збірних розмірів, але при цьому не дозволяє змінювати розміри деталей. Тому для вирішення поставленої задачі оптимізації шпиндельного вузла за статичними та динамічними показниками в якості основного варіативного параметра використовувалась міжопорна відстань (відстань між серединами опор) l . Інші параметри практично не змінювалися (окрім параметрів оправок).

З метою забезпечення можливості розширення діапазону варіювання параметром l внесено зміни в конструкцію корпусу та шпинделя, які дозволяють розташовувати задню підшипникову опору вздовж практично усього шпинделя. Для цього довжина шпинделя і відповідно корпусу збільшена на 105 мм, причому передня опора закріплена жорстко, а задня переміщувалась по шпинделю вздовж корпусу на задану відстань (залежно від розміру l). Це дозволило при розрахунках змінювати розмір l в діапазоні від 200 мм до 400 мм.

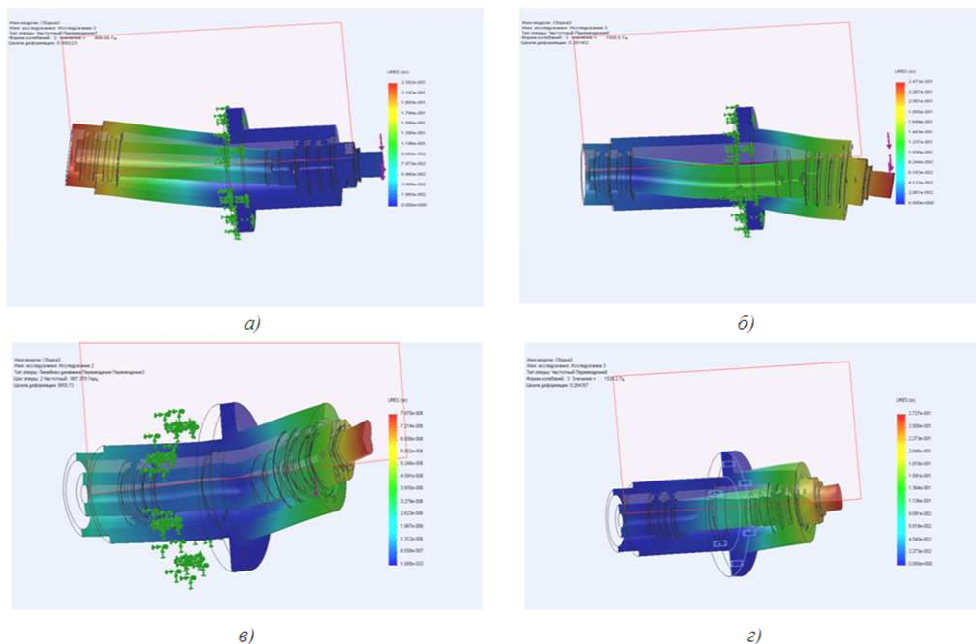
Для більш точного визначення оптимуму і можливості порівняння результатів оптимізації проводилась двома шляхами: як за автоматичним методом, вбудованим у програму Cosmos, так і вручну (на основі проведення серії розрахунків).

Однокритеріальна параметрична оптимізація в програмі CosmosWorks забезпечується шляхом пошуку екстремуму цільової функції при зміні варіативного параметра. Для цього програмі необхідно задати критерій оптимізації та діапазон змінення варіативного параметра. При статичній оптимізації в якості критерію було прийнято значення статичної жорсткості шпиндельного вузла, а при динамічній – першої власної частоти коливань шпинделя, яка визначається статичною жорсткістю конструкції (при незмінності її маси).

Оптимізація шпиндельного вузла проводилась поступово, в два етапи.

На першому етапі виконувалась наближена оптимізація для нової конструкції вузла (з подовженим корпусом). Варіативний параметр l змінювався на всьому можливому діапазоні від 200 мм до 400 мм (через 25 мм). При цьому знаходилась приблизна зона розташування оптимуму міжопорної відстані.

Для прикладу на рисунку 6 приведені картини форм коливань шпиндельного вузла з подовженим корпусом на резонансних частотах для різних значень міжопорної відстані.



а) при $l=400$ мм на частоті 908 Гц;

в) при $l=325$ мм на частоті 887 Гц;

б) при $l=375$ мм на частоті 1505 Гц;

г) при $l=300$ мм на частоті 1538 Гц

Рис.6. Форми коливань комплекту шпиндельного вузла з подовженим корпусом (коротка оправка)

На другому етапі проводилася уточнена оптимізація в значно звуженій зоні, але вже для базової конструкції (див. рисунки 4 і 5).

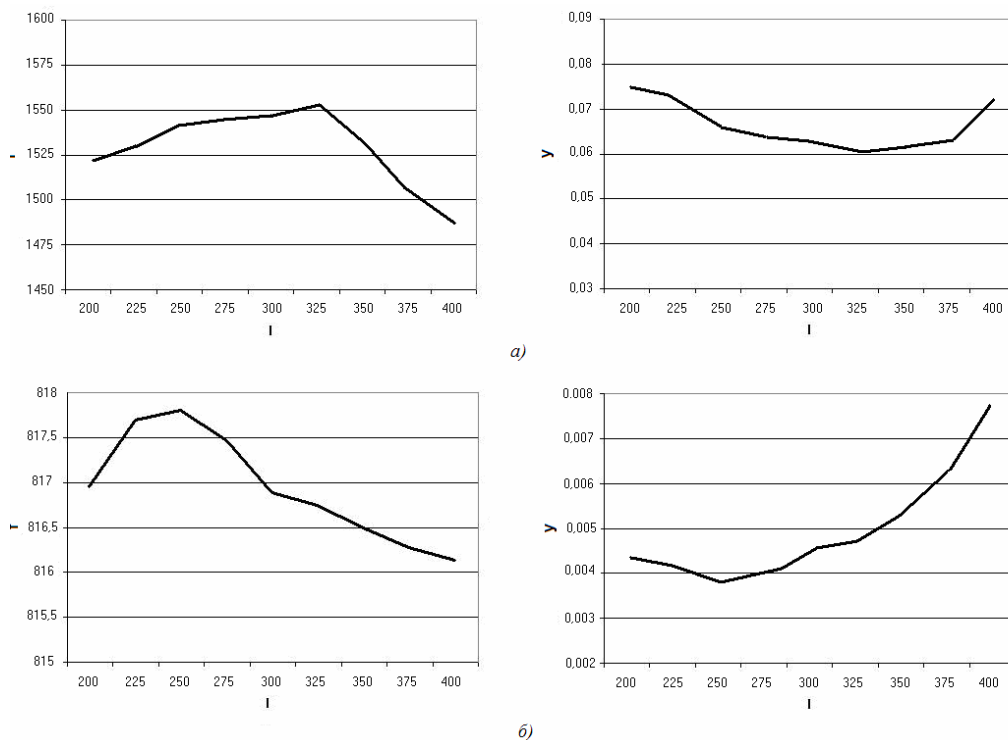
Оптимізація шпindelного вузла виконувалась як для короткої ($l_o=50$ мм), так і для довгої ($l_o=200$ мм) оправки. Результати проведених досліджень зведені в таблицю 1, а побудовані на її основі графіки результатів статичної та динамічної оптимізації комплектних шпindelних вузлів показані на рисунку 7.

Проведена серія дослідів з розрахунку статичних та динамічних показників комплектних шпindelних вузлів при різних відстанях між опорами шпинделя ($l=200\dots 400$ мм) дозволила знайти оптимальну міжопорну відстань. При використанні короткої оправки ($l_o=50$ мм) вона дорівнює $l_{opt}=300$ мм, при цьому перша резонансна частота шпindelного вузла є найбільшою, тобто 1556,51 Гц. А при використанні довгої оправки ($l_o=200$ мм) вона становить $l_{opt}=250$ мм, при цьому перша резонансна частота дорівнює 817,80 Гц. Аналіз графіків показує, що статичні і динамічні оптимальні міжопорні відстані існують, але для різних довжин оправок вони не співпадають.

Таблиця 1

Результати проведених досліджень

№ п/п	l , мм	Коротка оправка $l_o=50$ мм		Довга оправка $l_o=200$ мм	
		y , мм	f , Гц	y , мм	f , Гц
1	200	0.004437	1521.14	0.075022	816.95
2	225	0.004204	1530.05	0.073617	817.69
3	250	0.003780	1542.22	0.066834	817.80
4	275	0.004103	1544.61	0.064819	817.46
5	300	0.004622	1547.17	0.063203	816.89
6	325	0.004716	1555.84	0.060748	816.74
7	350	0.005331	1531.77	0.062156	816.51
8	375	0.004437	1509.13	0.063812	816.28
9	400	0.004437	1487.21	0.072342	816.13



а) з короткою оправкою ($l_o=50$ мм);

б) з довгою оправкою ($l_o=200$ мм)

Рис.7. Залежності першої резонансної частоти f (Гц) та статичної деформації оправки y (мм) від міжопорної відстані l (для базового варіанта комплектного шпindelного вузла)

Для перевірки коректності результатів ручної оптимізації була проведена автоматична оптимізація міжопорної відстані за допомогою вбудованих засобів системи CosmosWorks. При цьому зберігалися усі умови проведення розрахунків, як і в попередніх експериментах (діапазони варіювання, параметри оправок та інше). В результаті отримали такі значення для різних довжин оправок: для $l_o=200$ мм оптимальна міжопорна відстань становить 240 мм, а для оправки $l_o=50$ мм – 317 мм.

Таким чином, можна констатувати, що результати автоматичної і ручної оптимізації практично збігаються.

Проведені дослідження показали, що технологічні вимоги обробки суттєво впливають на зміни статичних і динамічних характеристик комплектних шпиндельних вузлів. Користуючись результатами досліджень, можна вибрати раціональні конструктивні параметри шпиндельного вузла залежно від призначення металорізального верстата. Зокрема, для швидкісних шпиндельних вузлів обробляючого центру IP500ПМФ4, що працюють переважно з довгими оправками, краще використовувати конструкцію з міжопорною відстанню в межах 240-260 мм. Для верстатів, що працюють з оправками малої довжини, раціональна міжопорна відстань лежить у межах 300-325 мм.

Висновки

Розроблена методологія оптимізації конструкцій шпиндельних вузлів за статичними і динамічними показниками забезпечує вибір раціональних компоновочних параметрів конструкції на основі оптимізації їх параметричних 3D-моделей.

Оптимізаційні параметри залежать від призначення металорізального верстата, зокрема від виду використовуваного основного і допоміжного інструмента (інструментальних оправок). При цьому зі змінням відстані між опорами шпинделя податливість (статична і динамічна) шпиндельного вузла спочатку зменшується, а потім зростає. Тобто, існує оптимальне значення, яке для різних видів оправок може суттєво відрізнятись. Тому оптимізація компоновочних параметрів шпиндельних вузлів становить важливу задачу для виробників верстатів.

Дослідженнями доведено, що засоби системи SolidWorks з вбудованим пакетом CosmosWorks дозволяють не тільки виконувати автоматизоване проектування комплектних шпиндельних вузлів і інших виробів, але й проводити раціональний вибір їх конструктивних параметрів за статичними чи динамічними критеріями оптимізації ще на стадії проектних розробок у САПР.

Список використаних джерел

1. Аверьянов О. И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О. И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 229 с.
2. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
3. Норенков И. П. Основы теории и проектирования САПР: учебник для вузов / И. П. Норенков, В. Б. Маничев – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
4. Кудинов В. А. Автоколебания при низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании / В. А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1997. – № 2. – С. 16-22.
5. Кудинов В.А. Пузылевой анализ динамических характеристик упругой системы станка / Кудинов В.А., Чуприна В.М. – М.: Станки и инструмент, 1989. – № 11. – С.8-11.
6. Чуприна В. М. Порівняльний розрахунок динамічних характеристик шпиндельного вузла верстату 16К20Ф3 в САПР / В. М. Чуприна, М. А. Дмитренко, С. В. Лоскутов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 37. – С. 105-116.
7. Левина З. М. Расчет статических и динамических характеристик шпиндельных узлов методом конечных элементов / З. М. Левина, И. А. Зверев // Станки и инструмент. – М.: Машиностроение, 1986. – № 3. – С.6-9.
8. Чернянский П. М. Оптимальное проектирование шпиндельных узлов с увеличением числа подшипников в опорах / П. М. Чернянский, В. В. Шабанов // Технология металлов. – М.: ООО "Наука и технологии", 2007. – № 5. – С. 38-42.
9. Алямовский А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
10. Lombard M. SolidWorks 2007. Bible – Wiley Publiation inc., 2007. – 1074 с.