

УДК 621.9.06

В.М. Чуприна, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**ДИНАМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ВЕРСТАТІВ ТА ЇХ ВУЗЛІВ ЗА МЕТОДОМ
КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ У САПР****В.М. Чуприна**, канд. техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СТАНКОВ И ИХ УЗЛОВ МЕТОДОМ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В САПР****V.M. Chupryna**, Candidate of Technical Sciences

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

**THE DYNAMIC CALCULATIONS OF TOOLS AND THEIR PARTS BY FINAL
ELEMENT METHOD IN CAD**

Розглянута актуальна проблема розрахунку динаміки пружної системи металорізального верстата за методом кінцевих елементів у САПР. На прикладі багатоопераційного верстата і його шпиндельного вузла запропоновано методику динамічного розрахунку з використанням 3D-моделей конструкцій. Наведені рекомендації щодо застосування цієї методики для розрахунку вихідних динамічних показників металорізальних верстатів.

Ключові слова: динаміка, багатоопераційний верстат, шпиндельний вузол, САПР, 3D-модель, метод кінцевих елементів.

Рассмотрена актуальная проблема расчета динамики упругой системы металлорежущего станка методом конечных элементов в САПР. На примере многооперационного станка и его шпиндельного узла предложена методика динамического расчета с использованием 3D-моделей конструкций. Приведены рекомендации по использованию данной методики для расчета выходных динамических показателей металлорежущих станков.

Ключевые слова: динамика, многооперационный станок, шпиндельный узел, САПР, 3D-модель, метод конечных элементов.

It is considered actual problem of the calculation speakers springy system metal cutting tool by final element method in CAD. On example machine centre tool and its spindle part methods of the dynamic calculation with use 3D-models design is offered. The recommendations on use given methodses for calculation of the output dynamic factors metal cutting tool are broughted.

Key words: dynamics, machine centre tool, spindle part, CAD, 3D-models, final element method.

Постановка проблеми. В умовах підвищеної конкуренції на ринку технологічного устаткування виробникам металорізальних верстатів необхідно забезпечувати найвищу якість виготовленої продукції. Для оцінювання якості верстатів застосовуються різні показники – точність, жорсткість, температурні деформації та інші. Також важливими показниками є динамічні показники, які забезпечують високу динамічну якість верстатів під час роботи.

Динамічна якість металорізального верстата визначається такими основними показниками: вібростійкістю, відхиленням при зовнішніх впливах і швидкодією системи [1]. Ці показники залежать не тільки від робочих процесів (різання, тертя в двигунах), але й великою мірою від якості механічної системи – пружної системи (ПС) верстата (або системи ВПД: верстат-пристосування-інструмент-деталь).

Вихідні показники верстата можна одержати як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. Проте розрахунковий шлях є більш економічним – він може застосовуватись ще на стадії проектування конструкції і не потребує виготовлення та випробування верстата для оцінювання його якості. При динамічних розрахунках верстатів можна отримати такі показники, як жорсткість (статичну і динамічну), спектр власних частот коливань, форми (моди) коливань й інші [2]. Це дозволяє знайти “слабкі місця” конструкції, усунути недоліки й оптимізувати її ще на стадії розроблення. Тому задача динамічного розрахунку верстата з метою оптимізації конструкції є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У верстатобудуванні питанням динамічних розрахунків верстатів приділяється велика увага [3-5]. Розроблені методики і програми для динамічних розрахунків верстатів і їх вузлів як з зосередженими (методи ди-

намічних жорсткостей, динамічних податливостей), так і з розподіленими (методи перехідних матриць, кінцевих елементів) параметрами.

На сучасному етапі розвитку ІТ-технологій все більшого розповсюдження набувають системи автоматизованого проектування (САПР) для створення різних технічних об'єктів, у тому числі металорізальних верстатів [6]. Для визначення вихідних параметрів якості об'єкта під час проектування використовується прототипування конструкцій у вигляді 3D-моделей – електронних тривимірних твердотільних моделей. 3D-модель по суті є математичним описом реального об'єкта, в якому кожний елемент конструкції (лінія, поверхня, тіло) описаний математичними залежностями. Тому усі необхідні розрахунки при моделюванні верстатів у САПР доцільно виконувати з використанням розроблених 3D-моделей.

Сучасний математичний апарат дозволяє розглядати складні об'єкти як системи з розподіленими параметрами, які описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних. На сьогодні найбільш поширеним методом розв'язку таких задач є метод кінцевих елементів (МКЕ) [7]. Він відноситься до діакоптичних методів дослідження систем по частинах (елементах) [8]. МКЕ може ефективно використовуватись для динамічних розрахунків різноманітних конструкцій, у тому числі і верстатів [5]. Він дозволяє виконувати розрахунок й оптимізацію статичних і динамічних показників верстатів у САПР на основі матмоделювання з використанням 3D-моделей конструкцій.

Зазвичай для континуальних систем такі задачі вирішуються за допомогою чисельних методів, наприклад, у спеціальних програмних пакетах типу ANSYS, ABAQUS, NASTRAN.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проте металорізальний верстат являє собою складну механічну складальну конструкцію з великою кількістю елементів (деталей і вузлів), виконаних з різних матеріалів, які з'єднуються між собою в місцях контакту (в стиках) точковими, прямо- і криволінійними, плоско- і неплоскоповерхневими пружно-демпфіруючими зв'язками, що значно ускладнює розрахунки за МКЕ. В цьому випадку можна застосувати методи діакоптики, як це запропоновано в роботі [9].

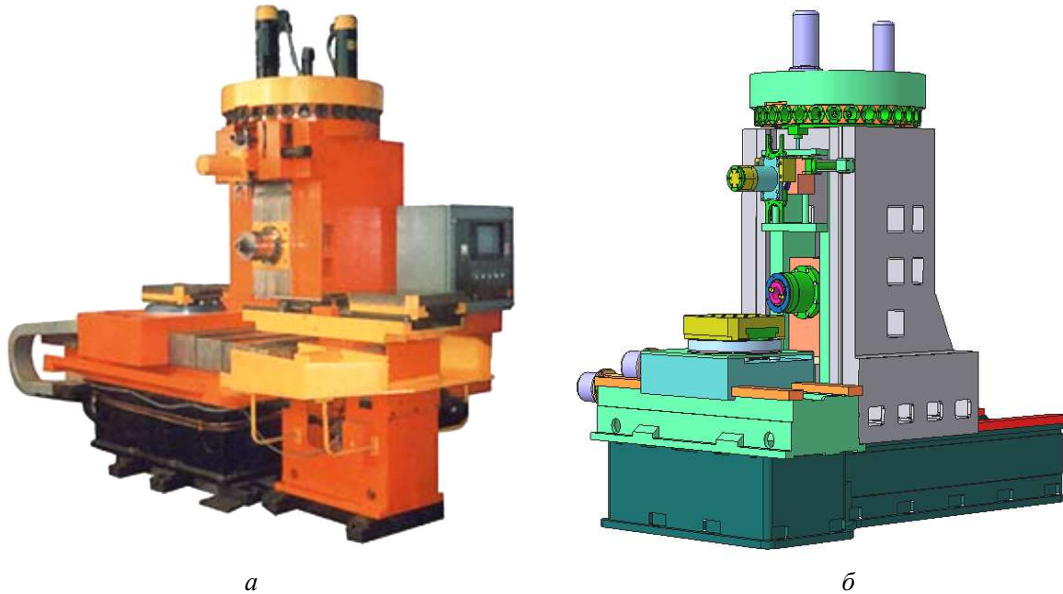
Достатньо розвинуті рішення контактних задач при інженерних розрахунках складних багатокомпонентних збірних конструкцій запропоновані в CAD-CAE-системі SolidWorks/CosmosWorks [10]. Тому в цій роботі ця система обрана як основна для розрахунку динаміки верстатів з використанням МКЕ.

Мета статті. Головною метою цієї статті є розроблення методології розрахункових досліджень динаміки пружних систем металорізальних верстатів та їх шпindelних вузлів за методом кінцевих елементів у CAD-CAE-системі SolidWorks/CosmosWorks для оцінювання їх динамічних показників під час оптимізаційного проектування в САПР.

Виклад основного матеріалу. Усі дослідження виконувались на прикладі багатоопераційного верстата з ЧПК типу обробляючий центр моделі IP500ПМФ4 з вбудованими комплектними шпindelними вузлами. Загальний вид верстата показаний на рисунку 1, а, а 3D-модель його ПС – на рисунку 1, б.

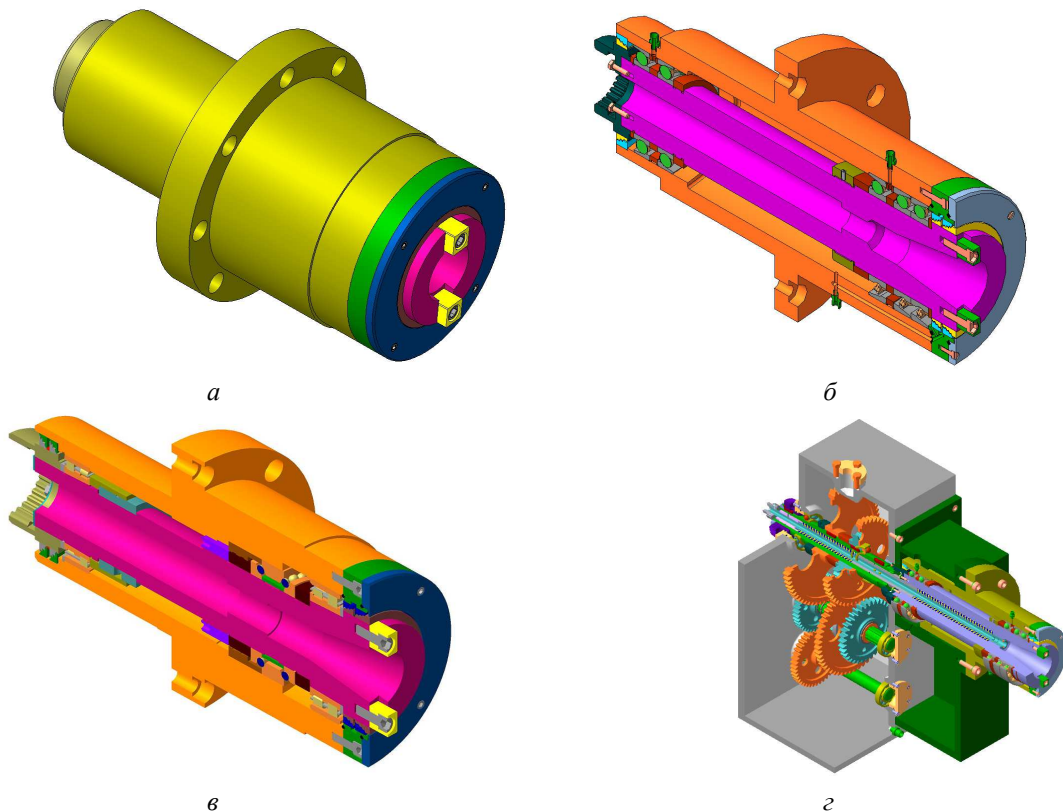
Для проведення розрахунків у CAD-системі КОМPAS-3D створена детальна твердотільна 3D-модель механічної (пружної) системи верстата (без огорожень, кожухів, станції завантаження і т.ін.). 3D-модель розроблена на базі заводських креслень і містить більше 3000 елементів (деталей).

Конструкція багатоопераційного верстата IP500ПМФ4 має практично модульну структуру і містить окремі вузли (суперелементи): шпindelний вузол (ШВ), коробку швидкостей, повздовжній стіл, поворотний стіл, палету, магазин, автооператор.



*Рис. 1. Загальний вид обробляючого центру моделі IP500ПМФ4:
а – зовнішній вигляд (фотографічне зображення); б – 3D-модель пружної системи (ПС)*

Одним з найбільш важливих вузлів конструкції є ШВ, який до 30-70 % визначає динамічну якість верстата. Його конструкція виконана у вигляді збірної комплектної одиниці: шпиндель на двох підшипникових опорах, закріплений у власному корпусі (типу “гільза”). Для розширення технологічних можливостей верстата в його конструкції застосовані модернізовані комплектні шпиндельні вузли (КШВ) як швидкісних, так і силових варіантів виконання (за принципом агрегування конструкції вони є взаємозамінні). Окремі варіанти розроблених 3D-моделей КШВ показані на рисунку 2.



*Рис. 2. Варіанти 3D-моделей комплектного шпиндельного вузла (КШВ):
а – загальний вигляд; б – швидкісний варіант; в – силовий варіант; г – монтаж КШВ у шпиндельній бабці*

Конструкції відрізняються в основному різними типами підшипників кочення в опорах шпинделя і використовуються залежно від необхідного технологічного призначення, яке пов'язане зі швидкохідністю і жорсткістю КШВ.

У швидкісних варіантах використовуються кулькові радіально-упорні підшипники серії 46000, причому в передній опорі вони встановлюються за схемами “дуплекс”, “триплекс”, “кварто”, а в задній – за схемою “дуплекс”, що забезпечує нормальну роботу КШВ при частотах обертання шпинделя від 3500 до 6000 об/хв.

У силових варіантах в обох опорах застосовані роликові підшипники з конічними роликами типу Gamet зі швидкістю обертання до 2000 об/хв або дворядні роликові підшипники з короткими роликами серії 3128000, які дозволяють швидкість до 4500 об/хв. Осьова фіксація шпинделя в останньому варіанті забезпечується упорно-радіальним підшипником серії 234000, який встановлений у передній опорі.

Посадочні розміри шпинделя під підшипники у всіх варіантах однакові: 100 мм – у передній опорі і 90 мм – у задній опорі. Розвинуті опори двох варіантів виконання ШВ, а також скорочена на 10-20 % “база” (відстань між опорами шпинделя) забезпечує більш високі динамічні показники конструкцій, що підтверджено результатами їх досліджень.

Метою динамічного розрахунку є отримання певних показників та характеристик ПС верстата у формі статичних деформацій, спектра власних частот, мод коливань на основних резонансних частотах, а також величин амплітуд змушених коливань верстата в зоні різання від зовнішнього навантаження силами різання (діючими як сили різання).

Слід зазначити, що система КОМПАС-3D не має власного модуля розрахунку за МКЕ. Тому для здійснення такого розрахунку використовувалась система CosmosWorks.

Програмний комплекс SolidWorks/CosmosWorks широко застосовується для автоматизованого проектування, розрахунків за МКЕ й оптимізації різних конструкцій.

Однак для цієї 3D-моделі розрахунку в програмі CosmosWorks ускладнені з таких причин: 1) власні формати систем КОМПАС-3D і SolidWorks взаємно не підтримуються; 2) при застосуванні загальних обмінних форматів втрачаються параметричні зв'язки (дерево побудови) і більшість атрибутів (матеріали, кольори й інші); 3) імпортовані об'єкти не можна редагувати; 4) детальну модель складно розбити на кінцеві елементи, а її розрахунок є досить тривалим (“непідйомним”). Тому для динамічного розрахунку в програмі CosmosWorks 3D-моделі спрощувались і перебудовувались у системі SolidWorks.

При спрощенні 3D-моделі основним критерієм була адекватність моделі, тобто відповідність її параметрів реальній конструкції верстата. Спрощення виконувалось на основі досвіду попередніх чисельних розрахунків динаміки ПС верстатів. Одночасно виконувалось укрупнення елементів через поєднання дрібних деталей з іншими для збереження масово-інерційних і жорсткісних параметрів. Окремі дрібні елементи не враховувались, якщо це практично не впливало на результати розрахунку.

Спрощена 3D-модель ПС металорізального верстата IP500ПМФ4 побудована в програмі SolidWorks. Її загальний вигляд показаний на рисунку 3. На рисунку 4 також наведена спрощена модель КШВ (силовий варіант).

У програмі CosmosWorks для розбиття об'ємних тіл на кінцеві елементи використовуються тривимірні кінцеві елементи – тетраедри з ребрами, що апроксимуються лінійними чи параболічними функціями. Вони дозволяють забезпечити високу точність розрахунків і наближеність результатів до параметрів реальних об'єктів. При цьому створюється гетерогенна мережа кінцевих елементів з різними за розмірами елементами. При аналізі збірних конструкцій побудова мережі визначається структурою контактних граничних умов.

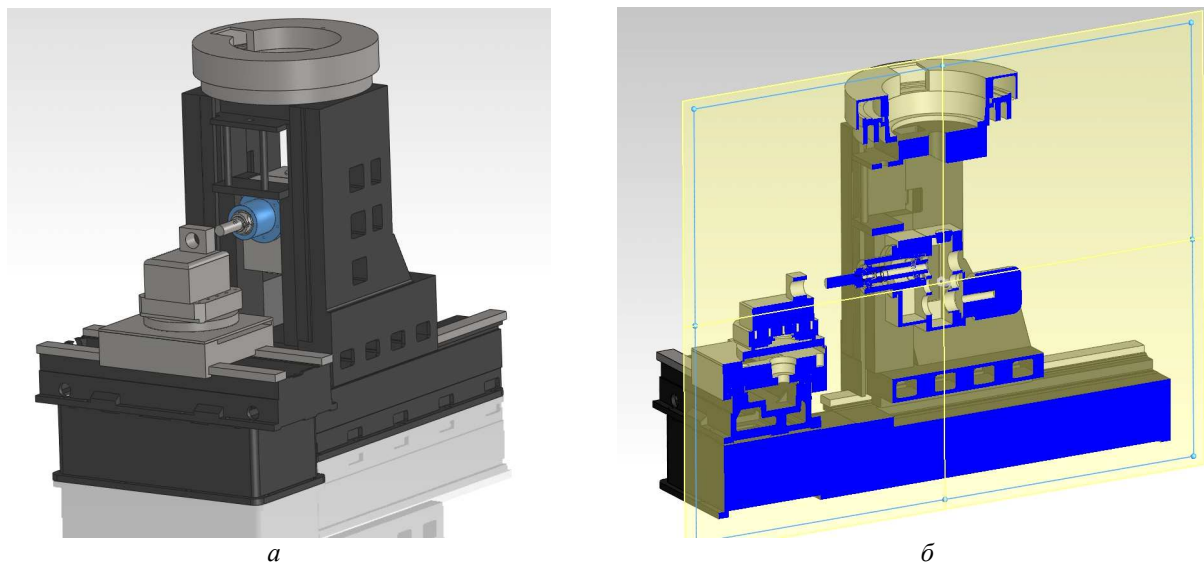


Рис. 3. Спрощена 3D-модель металорізного верстата IP500ПМФ4:
а – 3D-модель верстата (в ізометрії); б – 3D-модель у розрізі (площиною симетрії)

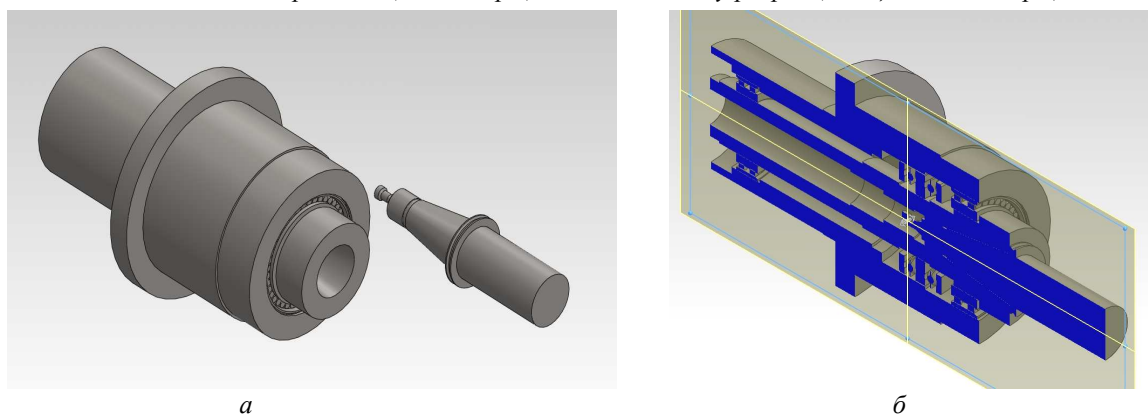


Рис. 4. Спрощена 3D-модель КШВ (з оправкою): а – загальний вид; б – вид у розрізі

Пакет CosmosWorks характеризується широкими функціональними можливостями по розрахунку й аналізу складних збірних конструкцій. Збірні одиниці можуть містити вузли з будь-якою кількістю деталей з різними властивостями матеріалів і характеристик. Можна задавати різну щільність мережі кінцевих елементів і її нерівномірність. Також існує можливість ручного розбиття мережі й ущільнення її в місцях концентрації напружень.

У пакеті підтримуються всі типи граничних умов (навантажень), у тому числі інерційні і гравітаційні. Для стиків деталей вирішується контактна задача для 3D-тіл з невідомою межею контакту. Моделювання збірних конструкцій виконується із завданням контактних граничних умов різних типів, враховуючи контактні граничні умови з тертям. Демпфірування в конструкції задається переважно по Релею, або як модальне.

Програма має розширену функціональність при обробленні результатів розрахунків. Передбачена збільшена візуалізація деформованого стану як звичайна, так і на фоні вихідної моделі, або в перетинах. Також можливо створити анімацію результатів розрахунків.

При розрахунках у пакеті CosmosWorks розв'язуються різноманітні задачі аналізу конструкцій. Зокрема, в цій роботі на різних етапах її виконання застосовувались такі види досліджень:

- статичні дослідження, в яких обчислювались переміщення, сили реакції, навантаження, напруги й розподіл запасу міцності конструкції;
- частотні дослідження, де розраховувались власні частоти й асоційовані форми коливань конструкції;

– динамічні дослідження, в яких обчислювались реакції моделі, викликані прикладеними навантаженнями (раптово, або мінливими згодом, чи по частоті).

Методика

Згідно з МКЕ описувана область (об'єкт) розбивається на підобласті, топологічно пов'язаних між собою, причому усередині підобластей характеристики, що враховуються, задаються простими функціями. Процес розподілу моделі на малі частини забезпечує створення мережі кінцевих елементів. При цьому вихідний об'єкт, як континуальна система з розподіленими параметрами і нескінченною кількістю ступенів волі, апроксимується сукупністю багатьох підсистем (кінцевих елементів) з кінцевою кількістю ступенів волі, з'єднаних між собою в окремих точках (вузлах). Як правило, для дискретизації на елементарні підобласті (кінцеві елементи) об'єкта, як об'ємного тіла, використовуються тетраедри (або інші фігури) із гранями, що описуються лінійними чи параболічними функціями координат. У кожному з кінцевих елементів невідома функція апроксимується поліномом невисокого ступеня (зазвичай до 6-го), який визначається його коефіцієнтами. Ці коефіцієнти можуть бути знайдені через значення функції у вузлах кінцевих елементів. Значення функції в будь-якій точці елемента інтерполюється зі значень у вузлах елементів.

Для кожного кінцевого елемента обчислюється матриця зв'язків між вузлами, що описують кінцевий елемент. Складається загальна система алгебраїчних рівнянь, що описують об'єкт у цілому, при цьому враховуються граничні умови (стан вузлів по краях області дискретизації) і початкові умови. Розв'язок цієї системи дає значення шуканої функції в усіх вузлових точках мережі кінцевих елементів. При цьому чим більше елементів і чим краще вони описують задані властивості об'єкта, тим точніше виконується апроксимація. При розрахунках можливо проводити параметричну оптимізацію конструкції.

Послідовність динамічного розрахунку верстатів у програмі CosmosWorks (з оптимізацією конструкції) представлена у вигляді алгоритму, який показаний на рисунку 5.

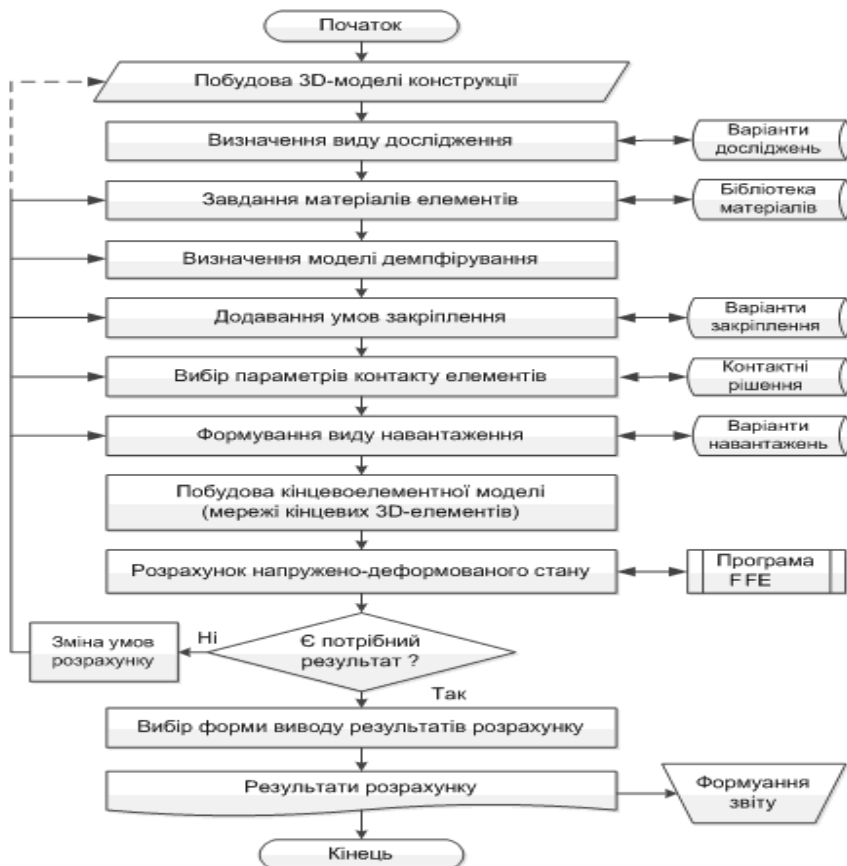


Рис. 5. Типова послідовність динамічного розрахунку за МКЕ

Розрахунки

З метою відпрацювання розрахункових моделей спочатку були проведені окремі динамічні дослідження КШВ на кулькових та роликових опорах.

Приклад розрахункової моделі для силового варіанта КШВ (на роликових 2-рядних підшипниках серії 3182100) показаний на рисунку 6. Закріплення КШВ виконувалось по фланцю корпусу (як і при розміщенні на верстаті). Навантаження здійснювалось радіальною силою 1000 Н на консолі оправки (в зоні різання). При динамічних розрахунках визначались переміщення (деформації), власні частоти і форми коливань КШВ.

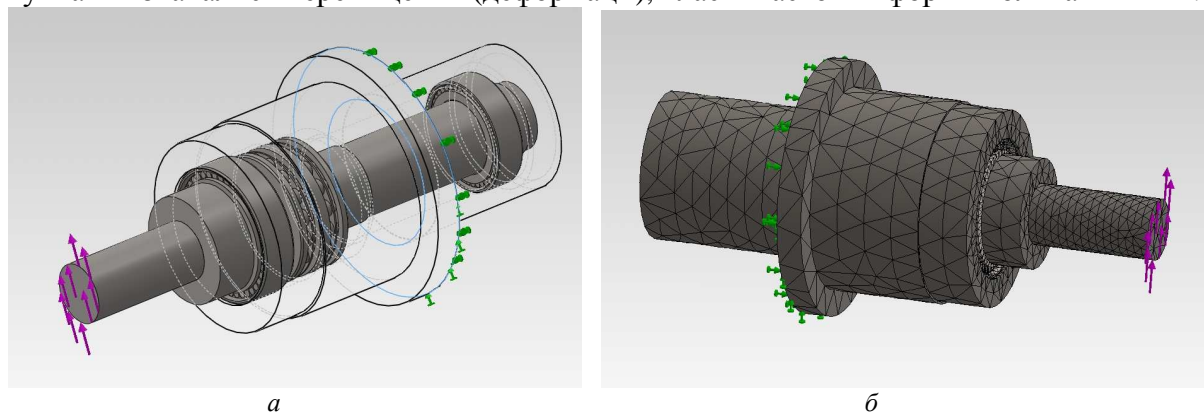


Рис. 6. Розрахункові 3D-моделі КШВ: а – з прозорим корпусом; б – мережа кінцевих елементів

Для прикладу на рисунку 7 показані результати динамічного розрахунку силового варіанта КШВ (на підшипниках серії 3128000).

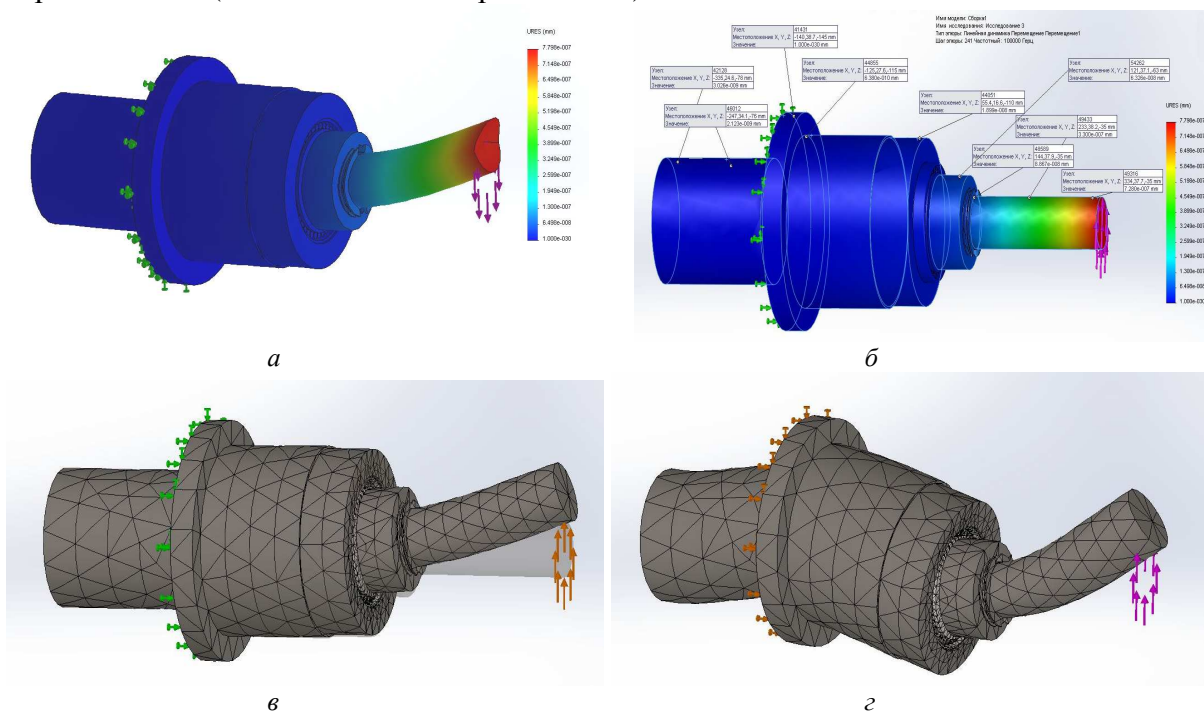


Рис. 7. Результати розрахунку силового КШВ: а – статичні деформації; б – зондування деформацій вздовж шпинделя; в – форма коливань на частоті 304 Гц; г – форма коливань на частоті 1657 Гц

У процесі досліджень змінювались різні параметри КШВ, зокрема діаметр і довжина шпинделя, жорсткість його опор (підшипників), виліт консолі й оправки та інші.

При розрахунках КШВ у програмі CosmosWorks виводились форми коливань шпинделя на основних резонансних частотах (рисунок 7, в, г), які зображені в збільшеному вигляді (шкала деформації 0.0982118) для наочності.

У результаті проведених досліджень були відпрацьовані розрахункові динамічні моделі КШВ та отримані необхідні статичні та динамічні характеристики і показники різних конструкцій.

Розглянуті варіанти КШВ вбудовувались у конструкцію верстата, як і оригінальний ШВ. Подальші динамічні розрахунки виконувались вже для повної ПС верстата.

Розрахункова модель верстата IP500ПМФ4 представлена на рисунку 8, а. Закріплення моделі відповідає встановленню верстата на бетонну основу. Навантаження в зоні різання здійснювалось силами 1000 Н, прикладеними як на консолі оправки, так і на оброблювальній деталі (реакція сили) в різних напрямках.

На рисунку 8, б показана мережа кінцевих елементів повної пружної системи верстата, а на рисунках 8, в, г – розміщення КШВ у робочій зоні та мережа його кінцевих елементів (як фрагмент повної мережі верстата).

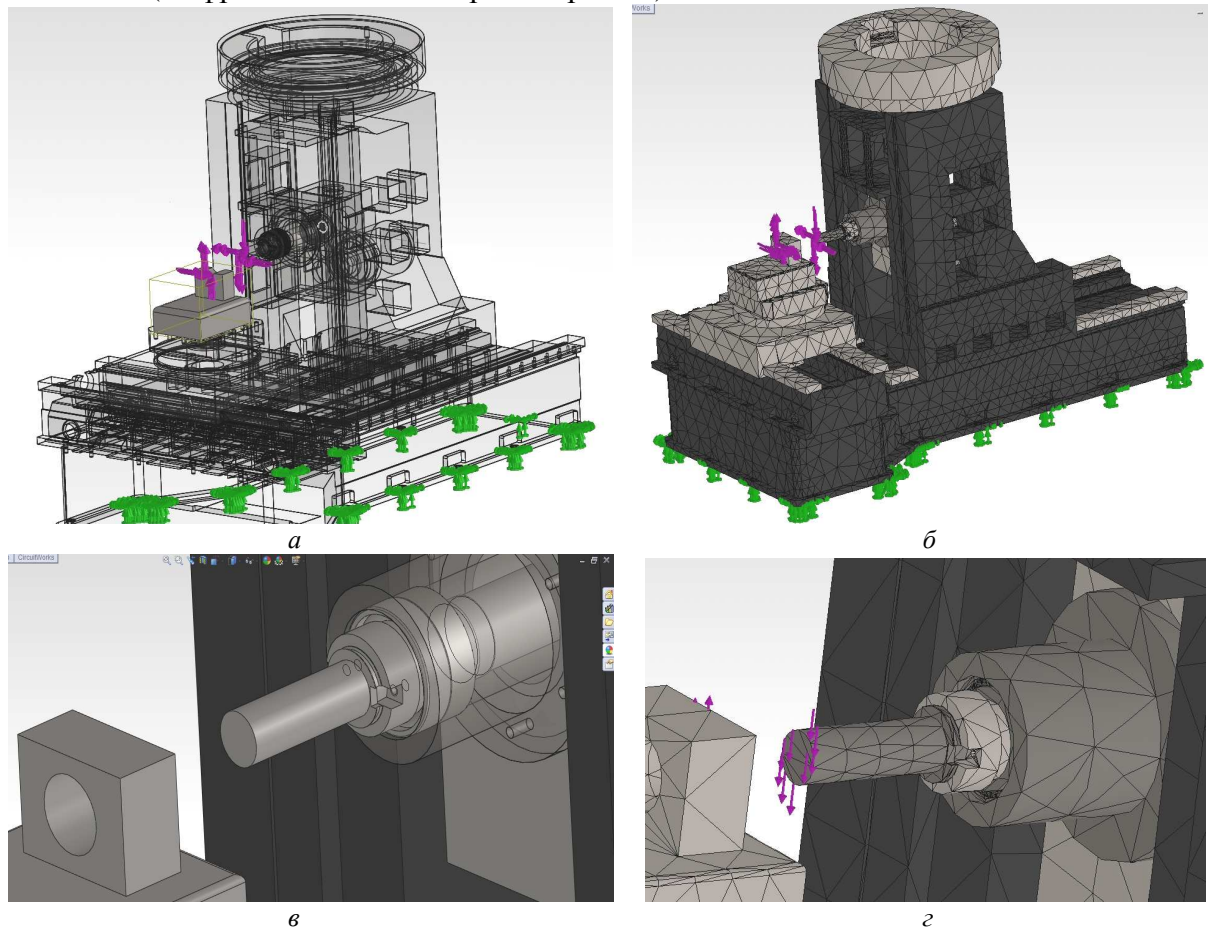


Рис. 8. Розрахункова 3D-модель ПС верстата IP500ПМФ4:

а – з прозорими корпусними деталями; б – мережа кінцевих елементів верстата;

в – розміщення ШВ у робочій зоні; г – мережа кінцевих елементів ШВ

Динамічний розрахунок верстата IP500ПМФ4 здійснювався в програмі FFEPlus з пакета CosmosWorks. Параметри і результати розрахунку наведені на рисунку 9 у вигляді таблиць.

Свойства исследования

Имя исследования	Исследование 2
Тип анализа	Линейный динамический анализ (Гармонический)
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Количество частот	50
Тип решающей программы	FFEPlus
Мягкая пружина:	Выкл
Несовместимые параметры связи	Автоматические
Термический параметр	Включить тепловые нагрузки
Температура при нулевом напряжении	298 Kelvin
Включают эффекты давления жидкости из SolidWorks Flow Simulation	Выкл
Нижний частотный предел	0 Hz
Верхний частотный предел	100000 Hz
Количество частот	50
Интерполяция	Логарифмическая
Папка результатов	Документ SolidWorks (D:\SW_my\SW-model-IR500 - Расч_модель+ШУ_2рол_подш)

Единицы измерения

Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m ²

Массовое участие (Нормализовано)

Номер режима	Частота(Герц)	Направление X	Направление Y	Направление Z
1	41.625	0.00064313	0.25729	0.00071487
2	55.337	0.24172	0.0010342	0.0010975
3	106.32	0.00037728	0.0083208	4.6928e-005
4	149.5	0.1112	0.00011002	0.0077386
5	164.25	0.0086766	0.0095556	0.34591
6	182.68	0.00018069	0.072137	0.0091744
7	199.12	0.12301	0.00060977	0.025271
8	223.67	0.00012815	0.11944	0.00043914
9	231.15	0.00043645	0.0060313	0.010936
10	251.26	0.012352	0.002325	0.00028314
11	256.68	9.4915e-005	0.0012319	3.2282e-007
12	261.79	0.00063618	0.0061866	2.2732e-005
13	280.99	0.00036913	0.00027651	0.0013263
14	296.75	5.2571e-005	0.0012552	0.012023
15	307.49	5.3904e-005	0.016509	0.00019383
...

Рис. 9. Параметры и результаты розрахунку

На рисунке 10 показаны статичные деформации та формы колебаний верстата ИР500ПМФ4 на резонансных частотах ПС верстата. Порівняння деформацій на цих частотах з попередніми розрахунками по моделі верстата з зосередженими параметрами (рисунок 11) показали практичне співпадіння результатів, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

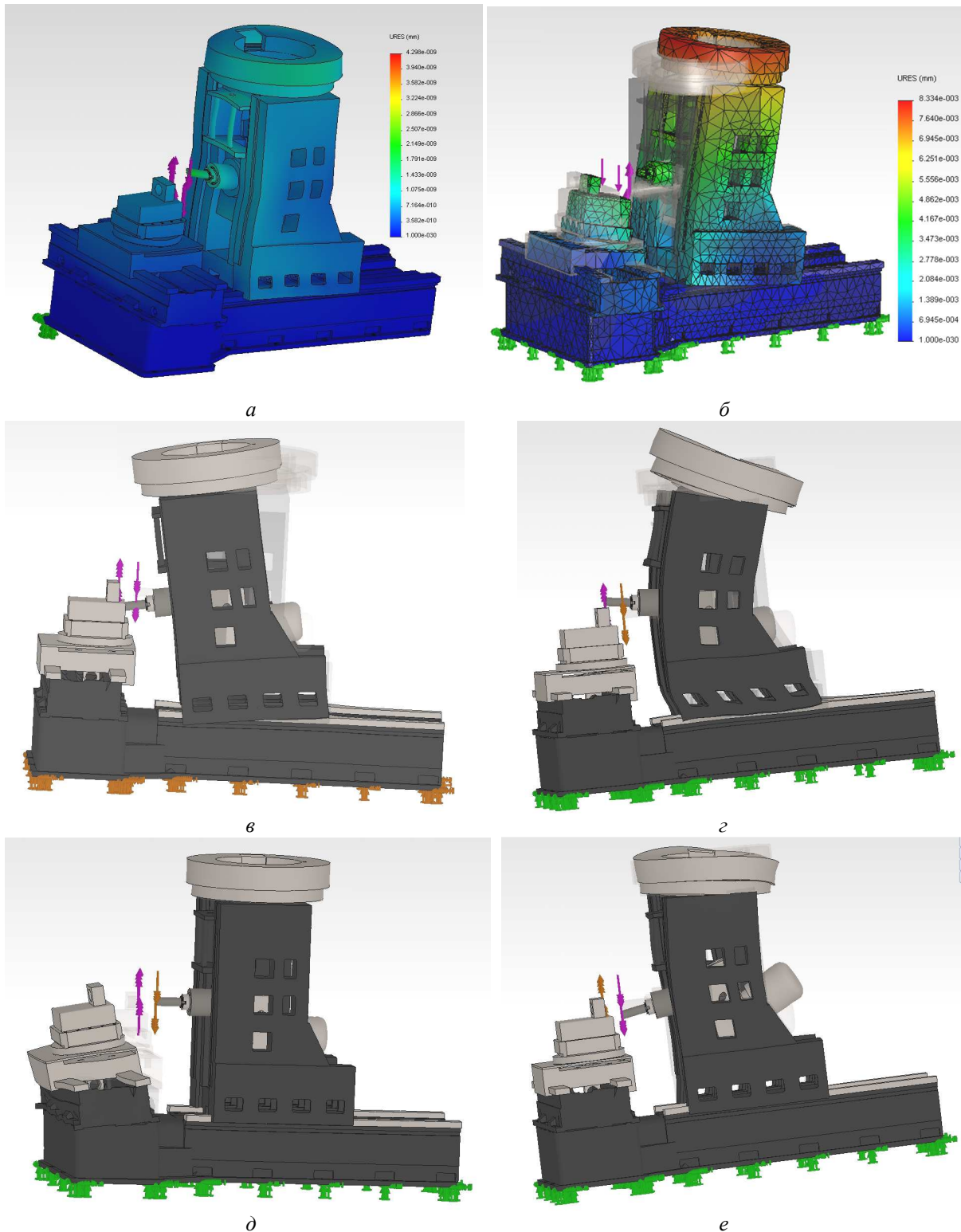


Рис. 10. Статичні деформації (а) і форми коливань верстата IP500ПМФ4 на резонансних частотах 41Гц (б), 55Гц (в), 199Гц (г), 307Гц (д) та 401Гц (е)

На основі динамічних розрахунків КШВ і верстата встановлено, що частка динамічної податливості КШВ у динамічній податливості верстата становить до 60-80 % на резонансних частотах, які визначаються пружною системою КШВ (у діапазоні 300-800 Гц).

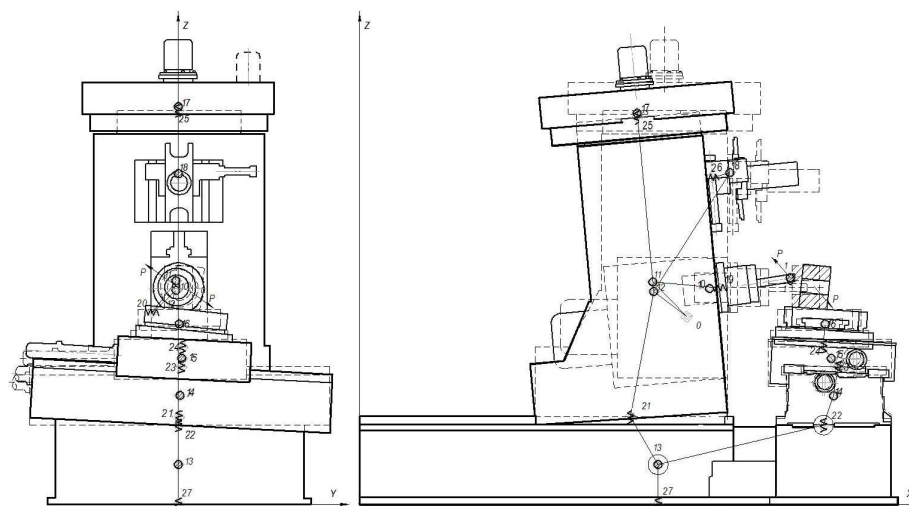


Рис. 11. Форми коливань верстата IP500ПМФ4 на резонансній частоті 54Гц, розраховані по моделі з зосередженими параметрами

Висновки і пропозиції. Проектування нових металорізальних верстатів доцільно виконувати в системах САПР з розробкою 3D-моделей конструкцій. Це дає можливість проведення подальших розрахунків вихідних показників і моделювання з метою оптимізації. При цьому статичні і динамічні розрахунки верстатів та їх вузлів можна виконувати як традиційними методами, так і методом кінцевих елементів.

Розроблена методика динамічного розрахунку верстата з використанням 3D-моделей конструкцій дозволяє отримати необхідні статичні і динамічні показники пружної системи верстата, зокрема статичну жорсткість, власні частоти коливань, форми коливань верстата на основних резонансних частотах.

Наведені рекомендації щодо застосування цієї методики розрахунку дозволяють отримувати достовірні динамічні показники пружних систем різних верстатів і їх вузлів.

Розроблена методика динамічних розрахунків може бути застосована у спеціалізованих пакетах САПР металорізальних верстатів не тільки для оцінювання динамічної якості конструкцій, але і для їх оптимізації.

Список використаних джерел

1. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Расчет динамических характеристик упругих систем станков с ЧПУ : методические рекомендации / Е. В. Хлебалов, Т. С. Воробьева, Г. Я. Чумбуридзе, А. Д. Шустиков ; под ред. В. А. Кудинова. – М. : ЭНИМС, 1976. – 98 с.
3. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – М. : Машиностроение, 1978. – 199 с.
4. Кирилин Ю. В. Методика расчета виброустойчивости станков / Ю. В. Кирилин // СТИН. – 2005. – № 1. – С. 3-6.
5. Кирилин Ю. В. Расчет методом конечных элементов динамических характеристик несущей системы специального колесорасточного станка / Ю. В. Кирилин, Н. В. Еремин // Станки и инструмент. – М. : Машиностроение, 2009. – № 10. – С. 8-12.
6. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И. П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 333 с.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975.
8. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика / Г. Крон. – М. : Наука, 1972. – 544 с.
9. Кудинов В. А. Поузловой анализ динамических характеристик упругой системы станка / В. А. Кудинов, В. М. Чуприна. – М. : Станки и инструмент, 1989. – № 11. – С. 8-11.
10. Алямовский А. А. CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.