

УДК 621.9.2

І. А. Бойко^{1,2}, канд. техн. наук В. В. Солоха², д-р техн. наук Л. Й. Івченко²¹АО «Мотор Січ», ²Запорізький національний технічний університет; м. Запоріжжя

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ 5-КООРДИНАТНОГО ОБРОБНОГО ЦЕНТРУ

Проведено динамічний аналіз 5-координатного обробного центру. Визначено 6 ведучих частот і форм власних коливань, що лежать в діапазоні від 0 до 170 Гц. Проведено дослідження впливу зміни положення рухомих вузлів верстата, фізико-механічних властивостей складових елементів технологічної системи, варіантів встановлення верстата на частоту власних коливань обробного центру, та амплітуду коливань збурення переднього кінця шпинделя.

Ключові слова: модальний аналіз, частота власних коливань, амплітуда.

Постановка задачі

Широке застосування багатокоординатних високошвидкісних обробних центрів, пов'язане із необхідністю обробки складнопрофільних поверхонь і зменшенням кількості операцій механічної обробки у технологічному процесі виробництва, призводить до появи нових вимог до технологічного обладнання.

Застосування принципів високошвидкісної обробки спричиняє необхідність використання обладнання у широкому діапазоні частот обертання шпинделя, а також зумовлює значне підвищення швидкості лінійних і кругових переміщень робочих органів верстата, що, в першу чергу, відобразиться на трибовузлах обладнання, вимоги до яких в області забезпечення плавності переміщень, точності позиціонування, реверсування руху вузлів, підвищуються, оскільки, в наслідок таких процесів, виникають коливання, які негативно впливатимуть на якість і точність обробки.

Колівання вузлів верстата, під час роботи, призводить як до погіршення якості оброблених поверхонь, так і до прискорення процесів зношування, а також руйнування різального інструменту. Тому будь яка задача динаміки зводиться в першу чергу до визначення частот власних коливань (ЧВК), з-поміж яких, за допомогою гармонічного аналізу, визначаються частоти, на яких коливання переднього кінця шпинделя матимуть найбільші значення.

Необхідність проведення динамічного аналізу виникає як на етапі проектування нового обладнання, так і під час модернізації для збільшення технологічних можливостей існуючого.

Мета статті

На базі розробленої математичної моделі верстата провести модальний і гармонічний аналіз, визначити вплив різних чинників динамічної системи на частоту власних коливань обробного

центру, та амплітуду коливань збурення переднього кінця шпинделя і поворотного – круглого стола.

Методика і результати дослідження

Оцінка динамічної якості 5-координатного обробного центру проводиться методом скінчених елементів (МСЕ) за допомогою модального і гармонічного аналізу конструкції. Модальний аналіз дозволяє визначити частоти і форми власних коливань елементів системи, або системи в цілому [3–5]. Гармонічний аналіз показує відгук системи на дію гармонічної сили (сили різання) і показує, яка ЧВК і в якій мірі впливатиме на точність і якість обробки.

Аналіз динамічної якості обробних центрів умовно можна поділити на наступні етапи:

- 1) Розробка геометричної моделі і її оптимізація.
- 2) Створення математичної моделі: призначення властивостей матеріалів; встановлення обмежень на лінійні переміщення; призначення типів і властивостей взаємодії контактних елементів; генерація скінчено-елементної сітки.
- 3) Розрахунок частот власних коливань поворотного столу.
- 4) Проведення гармонічного аналізу. Визначення ведучих модальних частот і форм коливань.
- 5) Визначення і аналіз засобів впливу на частоти власних коливань системи верстата.
- 6) Висновки.

Аналіз частот власних коливань проведено для 5-координатного обробного центру Ricomax 820 VERSA, що складається із станини, траверси, каретки, що переміщується вздовж траверси за віссю Y, шпиндельного вузла, який переміщується по каретці вздовж осі Z та поворотного столу (лінійна вісь X) (рис. 1).

За базу приймаємо модель, де рухомі вузли (шпindelний вузол, каретка і поворотний стіл) розташовані посередині осей, вздовж яких вони переміщуються.

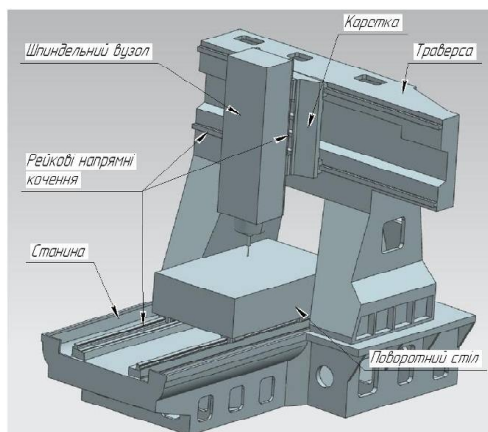


Рис. 1. Геометрична модель 5-координатного обробного центру

Поворотний стіл, динамічний аналіз якого наводиться в роботі [6], був замінений прямокутним паралелепіпедом, вага якого, через призначення відповідної густини, відповідає вазі реального вузла. Шпindelний вузол також було змодельовано спрощено. Оскільки шпindelний вузол і поворотний стіл не є безпосередньо об'єктами дослідження, а виступають лише як зосереджені маси, що переміщуються вздовж відповідних осей, то для того, щоб не відволікатися на коливання цих елементів, їх модуль пружності було значно збільшено.

Властивості матеріалів, з яких виготовлені вузли верстата наведені у таблиці 1.

Скінчено-елементна модель складається з 92991 елементів, з'єднаних 178150 вузлами.

Окремі деталі з'єднані між собою контактними скінченими елементами, встановленими в зафіксоване положення («bonded»).

Верстат встановлюється на три опори, які сприймають навантаження від 2700 кг до 4300 кг. Ці опори сприймають відносно велике навантаження від ваги верстата, через що можна вважати, що в місцях їх контакту зі станиною переміщення будуть мінімальними, або близькими до нуля. Тому в цих місцях задаються нульові переміщення за трьома осями.

Виходячи з того, що гранична частота обертання шпинделя складає 14000 об/хв, то максимальна частота збурення сягатиме 933Гц [6]. В даному діапазоні лежить 85 ЧВК. Більшість отриманих ЧВК лежить в діапазоні частот, що відповідають високошвидкісному різанню, яке характеризується зняттям малого припуску на великій швидкості і з малими силами різання, а амплітуди коливань на цих частотах будуть достатньо малими. Тому, пропонується розглядати частоти обертання шпинделя до 2500 об/хв, на яких відбувається силове різання інструментом великого діаметру і зйомом відносно великого припуску. Досліджуваний діапазон лежатиме в межах від 0 до 170Гц. В даному діапазоні знаходиться 8 ЧВК, наведених у таблиці 2.

Отриману першу частоту можна вважати достатньо низькою (приблизно відповідає 550 об/хв для чотирикутої фрези). Це означатиме, що система буде відкликатися на силове різання на середніх і низьких частотах обертання шпинделя. На цих частотах обертання характерна обробка титанових, нержавіючих і жароміцних сплавів із зняттям припуску в діапазоні від 0,5–5 мм.

Враховуючи замкнутість системи ВПІД, амплітуду коливань збурення, як відгук на дію гармонічної сили, необхідно визначати як для переднього кінця шпинделя, так і для поворотного столу, на якому встановлюється деталь і пристосування.

Отриману першу частоту можливо вважати достатньо низькою (приблизно відповідає 550 об/хв для чотирикутої фрези). Це означатиме, що система буде відкликатися на силове різання на середніх і низьких частотах обертання шпинделя. На цих частотах обертання характерна обробка

Таблиця 1 – Властивості елементів верстата, що моделюються

Деталь	Матеріал	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Густина ρ , кг/м ³
Рейкові напрямні	Вуглецева сталь	211	0,3	7812
Каретки напрямних	Вуглецева сталь	211	0,3	7812
Шпindel	Модельний матеріал	2200	0,3	5508
Стіл	Модельний матеріал	2200	0,3	5112
Станина	СЧ20	110	0,28	7200
Траверса	СЧ20	110	0,28	7200
Каретка	СЧ20	110	0,28	7200

Таблиця 2 – Частоти власних коливань 5-ти координатного обробного центру

№ частоти	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	37,36	44,74	77,6	109,75	125,8	139,9	162,14	175,38

титанових, нержавіючих і жароміцних сплавів зі зняттям припуску в діапазоні від 0,5–5 мм.

Враховуючи замкнутість системи ВПІД, амплітуду коливань збурення, як відгук на дію гармонічної сили, необхідно визначати як для переднього кінця шпинделя, так і для поворотного столу, на якому встановлюється деталь і пристосування.

До центру циліндра, що імітує різальний інструмент, прикладається сила, яка складається з трьох векторів, направлених вздовж осей системи координат геометричної моделі, кожен з яких дорівнює 100Н. Визначалося переміщення в точці різання внаслідок коливань елементів пружної системи верстата, як відгук на дію гармонічної сили, що імітує силу різання. Демпфірування системи встановлюється на рівні 2 %.

На рисунках 2 і 3 наводяться максимальні переміщення переднього кінця шпинделя (рис. 2) і поворотного столу (рис. 3) за осями X, Y, Z. Оскільки поворотний стіл змодельовано умовно, як тіло з високим модулем пружності, то амплітуду коливань пропонується знаходити для однієї з кутових точок столу, приймаючи, що значення амплітуди в цих точках повинні бути максимальними. Порівнюючи амплітуди коливань збурення, варто відзначити, що біля переднього кінця шпинделя вони значно більші, у порівнянні з коливаннями поворотного столу, для якого максимальні значення припадають на перші шість частот і не перевищують 1 мкм. Максимальні амплітуди коливань збурення переднього кінця шпинделя припадають на частоти f_1 , f_2 і f_6 , сягаючи 3 мкм за окремими осями.

На першій частоті спостерігаються згинні коливання, що проявляються у розгойдуванні траверси навколо осі Y (рис. 4, а), центр якої проходить приблизно через дві задні опори, що встановлені під станиною. Максимальна амплітуда коливань буде спостерігатися при переміщенні шпиндельного вузла в найвище положення за віссю Z. Друга частота характеризується розхитуванням траверси навколо осі X (рис. 4, б), що стримується опорами з обох боків станини, і відбувається навколо осі передньої опори. Як і на першій ЧВК, максимальна амплітуда коливань збурення спостерігається на передньому кінці шпинделя.

Крутильні коливання траверси навколо осі Z спостерігаються на третій ЧВК (рис. 5, а), при цьому амплітуда коливань за віссю X і Y буде збільшуватися при переміщенні шпиндельного вузла вздовж осі Y, по мірі віддалення від центру кручення. На четвертій ЧВК (рис. 5, б) відбуваються яскраво виражені поздовжні переміщення траверси і станини вздовж осі Z із деяким крученням траверси в площині XY. При переміщенні шпиндельного вузла вздовж осі Y, ближче до точ-

ки зміни інструмента, амплітуда коливань зростатиме.

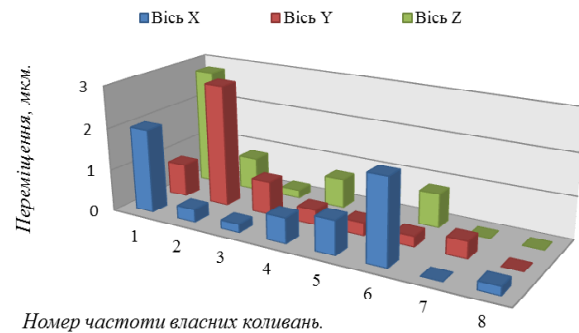


Рис. 2. Амплітуда коливань збурення від гармонійно діючої сили для переднього кінця шпинделя

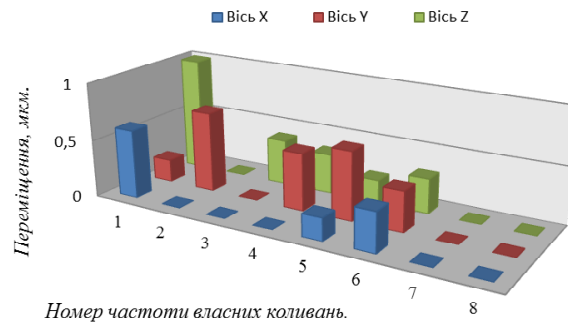


Рис. 3. Амплітуда коливань збурення від гармонійно діючої сили для поворотного столу

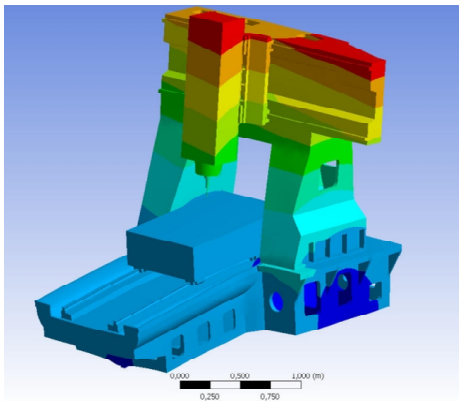
З метою оцінки впливу положення вузлів верстата на зміну частоти власних коливань, були змодельовані варіанти граничних переміщень рухомих вузлів за осями X, Y, Z. Максимальна відстань між крайніми положеннями склала: вісь X – 820мм; вісь Y – 700мм; вісь Z – 450мм.

Виходячи з результатів розрахунку (табл. 3), варто відзначити низький ступінь впливу переміщення шпиндельного вузла і поворотного столу на частоту власних коливань. Переміщення поворотного столу за віссю X та шпинделя за віссю Z і Y призводить до зміни ЧВК в межах від 0 до 3 %. Виключення становить лише переміщення шпинделя в точку зміни інструмента, де найбільше зменшення спостерігається на третій ЧВК і становить 9 %.

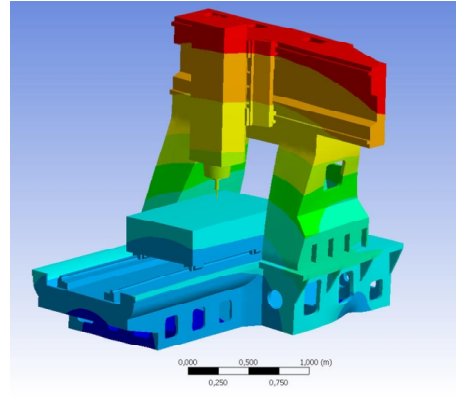
Оскільки шпиндельний вузол і поворотний стіл виступають як зосереджені маси, що переміщуються вздовж базових деталей верстата та мають штучно підвищену жорсткість, то такий низький процент зміни ЧВК може бути зумовлений малою вагою рухомих вузлів, тому існує

необхідність оцінити вплив їх ваги на ЧВК. Для цього густина шпиндельного вузла і поворотного столу була спочатку зменшена, а потім збільшена у два рази (таблиця 4). При зменшенні ваги рухомих вузлів спостерігається зростання ЧВК, а при збільшенні ваги – зменшення.

Зміна ваги шпиндельного вузла суттєво впливає на величину усіх шести ЧВК верстата. Зміна ж ваги поворотного столу яскраво виражена лише для f_4 , f_5 і f_6 і становить від 8 до 18,7 %.

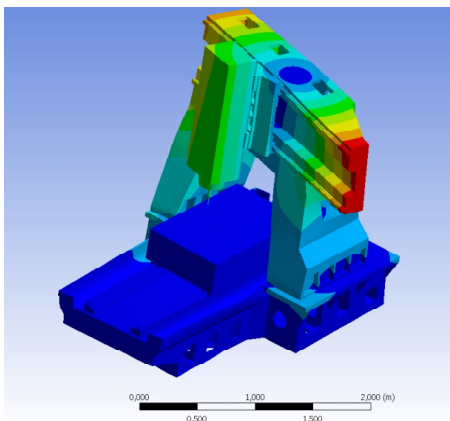


a

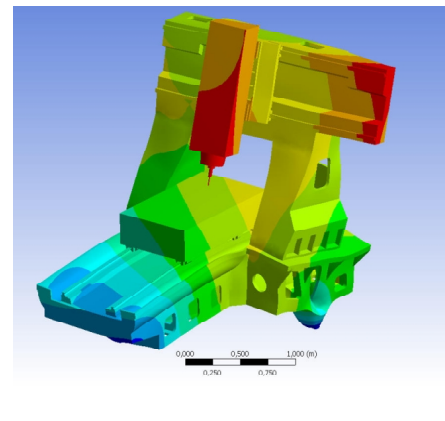


б

Рис. 4. Частота власних коливань f_1 та f_2 : $a - f_1 = 37,36$ Гц; $б - f_2 = 44,74$ Гц

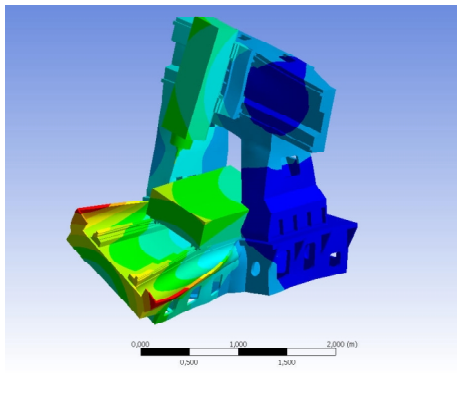


a

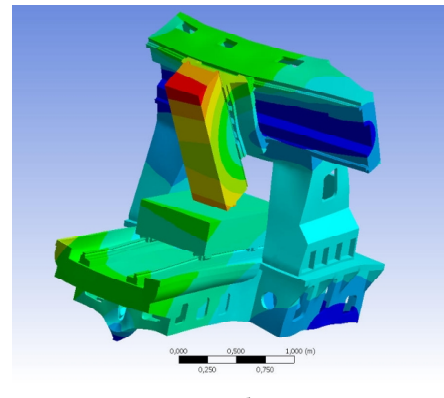


б

Рис. 5. Частота власних коливань f_3 та f_4 : $a - f_3=77,61$ Гц; $б - f_4 = 109,75$ Гц



a



б

Рис. 6. Частота власних коливань f_5 та f_6 : $a - f_5 = 125,88$ Гц; $б - f_6 = 139,9$ Гц

Таблиця 3 – Вплив зміни положення рухомих вузлів на частоту власних коливань

Вісь	Положення вузла	Частота власних коливань, Гц					
		f1	f2	f3	f4	f5	f6
Базове положення		37,35	44,74	77,61	109,7	125,8	139,9
X	Переднє	36,2	44,2	76,8	110,3	125	135,8
	Заднє	35,8	44,52	77,35	109,9	125,6	140,3
Y	Зліва	37,45	44,23	73,1	110,2	125,5	139,1
	Справа	36,9	44,34	77,8	109,2	125,2	141
	Точка зміни інструменту	37,15	44,28	71,2	105,7	123,2	137,1
Z	Верхнє	37,9	36,2	77,8	109,5	126	139,9
	Нижнє	36,8	36,1	77,3	109,7	125,5	139,8

Таблиця 4 – Вплив зміни ваги шпиндельного вузла і поворотного столу на ЧВК верстата

Варіанти встановлення опор	Частота власних коливань, Гц					
	f1	f2	f3	f4	f5	f6
Встановлення на 5 опор	46,4	51,3	83,8	122,7	148,4	162,5
Зміна частоти відносно базової конструкції, %	24	14	8	12	18	16
Жорстке закладання	52,9	57,895	89,9	134,73	176,4	210,4
Зміна частоти відносно базової конструкції, %	41	29	15,8	22	40	50

Для повної оцінки і аналізу впливу елементів верстата на ЧВК системи, пропонується додаткове дослідження впливу зміни жорсткості деталей несучої системи верстата за рахунок подвійного збільшення і зменшення модуля пружності матеріалів, з яких вони виготовлені. Подібний аналіз дозволить впливати на ЧВК і їх амплітуду на етапі конструкторсько-технологічного проектування.

Оскільки шпиндельний вузол і поворотний стіл від початку приймалися як абсолютно жорсткі тіла, то в даному аналізі вплив зміни їх жорсткості не досліджувався.

Із попереднього розрахунку траверсу і станину можна вважати основними елементами системи, що коливаються, на досліджуваних ЧВК.

Результати дослідження (табл. 5) показують суттєвий вплив зміни жорсткості траверси і станини на ЧВК. Зміна жорсткості траверси найбільше впливала на другу, третю, четверту і шосту ЧВК, досягаючи зміни у 52 %. Максимальний вплив для усіх 6-ти досліджуваних ЧВК показала станина (від 28 до 59 %). Каретка шпинделя майже не впливає на загальноверстатні ЧВК, отже й не бере участі у їх формуванні.

Розглядаючи ЧВК верстата, було встановлено, що згинні коливання на деякій частоті відбуваються безпосередньо навколо осей, що проходять через опори, на які встановлюється верстат. Простота встановлення верстата на три опори переважила факт появи ЧВК в середньому і малому діапазоні частот обертання шпинделя, оскільки верстат, в першу чергу, розраховано на роботу з високими обертами. Встановлення додаткових опор дозволить збільшити кількість місць на нижній поверхні станини з нульовими переміщеннями, що, в свою чергу, повинно зменшити амплітуду коливань станини (або її піддатливість). Однак кількість опор повинна бути чітко обумовлена на необхідному рівні, оскільки, при

збільшенні їх кількості, навантаження, що сприймає кожна опора, буде зменшуватися, а, отже, при досягненні певного рівня навантаження, переміщення місць з'єднання опор і станини нульовими вважати не можна.

Ще одним варіантом підвищення жорсткості станини може бути жорстке приєднання станини до опор, які будуть встановлені у бетонний фундамент. В даному випадку, чим більше опор – тим вищими повинні бути ЧВК і нижчою амплітуду коливань, але процедура встановлення верстата значно ускладнюється і виникає небезпека впливу на точність та якість обробки коливань від встановленого поруч обладнання.

Для аналізу впливу встановлення додаткових опор на ЧВК та їх амплітуду, пропонується дослідити варіанти встановлення верстата на п'ять опор і при повному жорсткому закладанні станини верстата (рисунок 7), що може бути досягнуто підливкою бетону під станину.

Виходячи з таблиці 6, встановлення верстата на 5 опор дозволяє суттєво підвищити ЧВК верстата, причому найвагоміше підвищення спостерігається на частотах з найбільшими амплітудами коливань (f1, f2, f5, f6) і сягає 24 %. Подібне підвищення сумірне до підвищення жорсткості станини у два рази (таблиця 5). Жорстке закладання станини призводить до збільшення ЧВК в межах від 16 до 50 %.

Однак, введення додаткових обмежень на переміщення, призводить не тільки до підвищення ЧВК верстата, а і до зміни форми та амплітуди деяких коливань. Аналізуючи вплив на частоти і форми власних коливань введення додаткових опор, або жорсткого закладання станини, необхідно відзначити, що такі заходи суттєво збільшують жорсткість станини, частково позбавляючи, або зменшуючи її можливості здійснювати колівальний рух.

Таблиця 5 – Вплив зміни жорсткості базових деталей на ЧВК

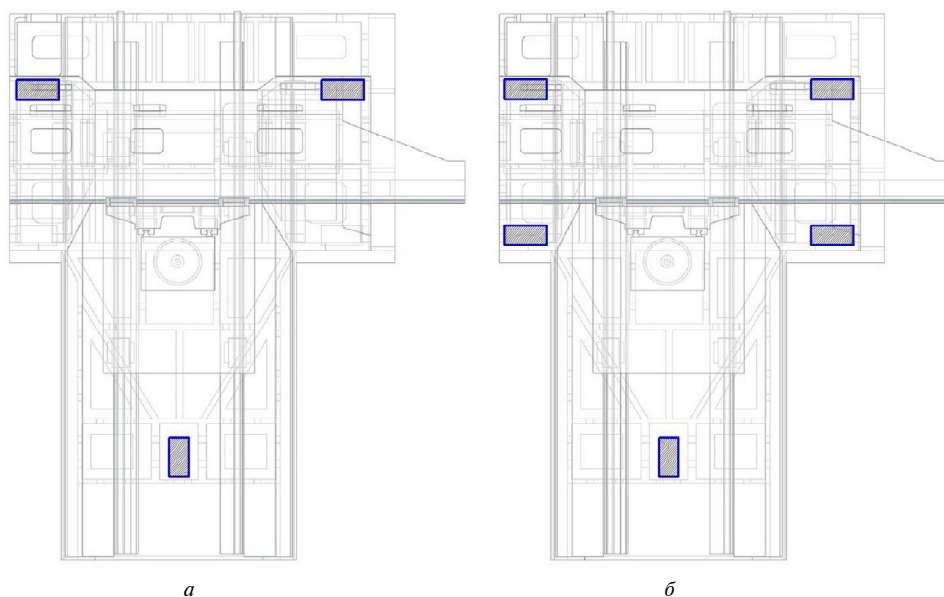
Елемент	E, ГПа	Частота власних коливань, Гц					
		f1	f2	f3	f4	f5	f6
Траверса	55	32,94	37,818	61,93	94,459	109	122,46
	220	40,55	50,98	94,67	118,88	133,04	162,07
	Зміна, %	23	34	30,2	52	22	32
Станина	55	29,05	36,2	67,5	84,7	95,2	115,97
	220	46,1	53,35	86,66	130,49	151,33	171,1
	Зміна, %	58,6	47,3	28	54	59	47,5
Каретка шпинделя	55	37,35	44,7	77,32	109	125,1	138,24
	220	37,38	44,76	77,85	110,2	126,28	141
	Зміна, %	0	0	0	1	1	1,9

Таблиця 6 – Частоти власних коливань 5-координатного обробного центру, встановленого на 5 опор і при жорсткому закладанні

Варіанти встановлення опор	Частота власних коливань, Гц					
	f1	f2	f3	f4	f5	f6
Встановлення на 5 опор	46,4	51,3	83,8	122,7	148,4	162,5
Зміна частоти відносно базової конструкції, %	24	14	8	12	18	16
Жорстке закладання	52,9	57,895	89,9	134,73	176,4	210,4
Зміна частоти відносно базової конструкції, %	41	29	15,8	22	40	50

При встановленні на 5 опор, форми коливань не змінюються, при цьому спостерігається досить значне (рис. 9) зниження амплітуди коливань, у порівнянні із базовою конструкцією, за усіма осями. Зменшення амплітуди, наприклад для f1 та f2, сягає більш ніж 50 % від первісної. Але для f5 відбувається деякий «перерозподіл» амплітуди коливань (напряму її дії) між осями координат, збільшуючи амплітуду за віссю X і, незначно, Y. Це може відбуватися за рахунок зміни переважаючого напрямку коливань між осями, або переміщення центру крутильних і згинних коливань.

При жорсткому закладанні станини верстата спостерігається значне зменшення амплітуди коливань на перших чотирьох ЧВК. На п'ятій ЧВК матимемо зростання амплітуди коливань вздовж трьох осей за рахунок зміщення центру крутильних коливань. На шостій ЧВК, взагалі, відбувається зміна осі коливань, яка повертається на 90° в площині XY (рис. 10). Для поворотного столу встановлення додаткових обмежень призводить до зменшення амплітуди коливань значно нижче 1 мкм.

**Рис. 7.** Схема розташування опор *a* – при встановленні на три опори; *б* – при встановленні на п'ять опор). Вид зверху

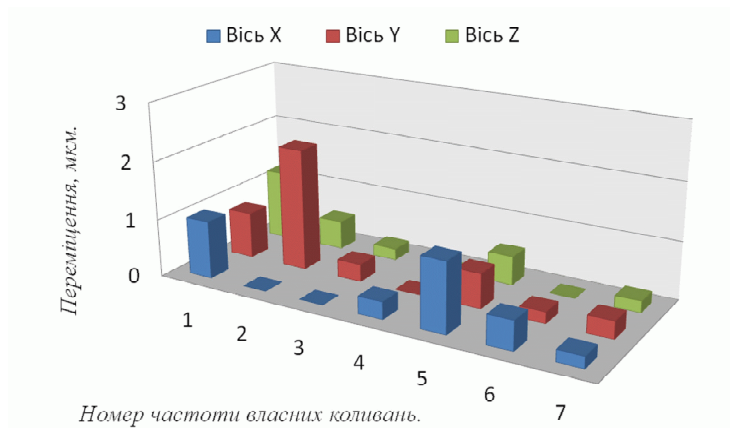


Рис. 8. Амплітуда коливань збурення від гармонічно діючої сили при встановленні на 5 опор

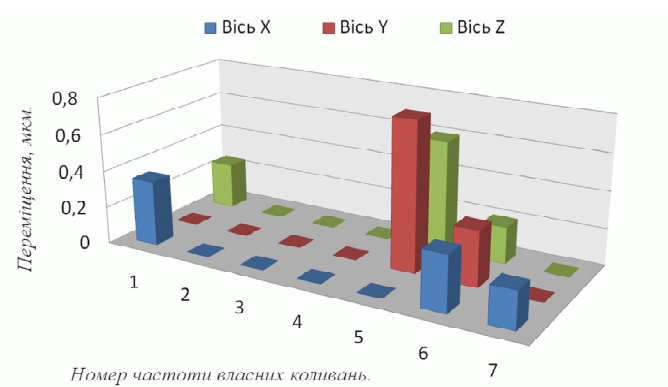


Рис. 9. Амплітуда коливань збурення від гармонійної сили при жорсткому закладанні

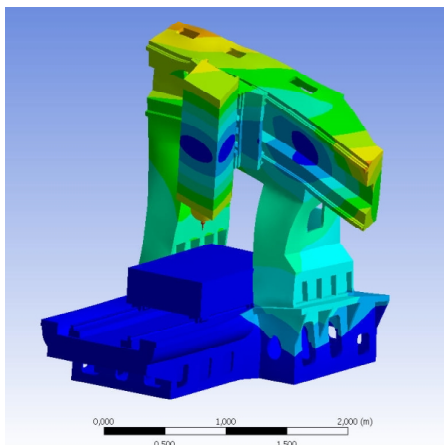


Рис. 10. Частота власних коливань $f_6 = 210,4$ Гц при повному закладанні

Висновки і пропозиції

В діапазоні робочих частот обертання шпинделя знаходиться 85 ЧВК верстата. Найбільший вплив на точність обробки матимуть частоти $f_1 = 37,359$ Гц, $f_2 = 44,74$ Гц, $f_3 = 77,616$ Гц, $f_4 = 109,75$ Гц, $f_5 = 125,88$ Гц, $f_6 = 162,16$ Гц. Перша частота достатньо низька і характерна для режимів роботи верстата при обробці жароміцних,

титанових, нержавіючих сталей і сплавів, що вирізняються високими силами різання. Коливання, що виникають на цих частотах, можуть суттєво погіршити показники якості та точності обробки.

Амплітуди коливань збурення переднього кінця шпинделя значно більші, ніж у поворотного столу, для якого максимальні значення не перевищують 1 мкм. Найбільші амплітуди коливань збурення переднього кінця шпинделя припадають на частоти f_1 , f_2 і f_6 , сягаючи 3 мкм за окремими осями.

Переміщення рухомих вузлів верстата (шпиндельного вузла і поворотного столу) суттєво не впливає на ЧВК верстата. Найбільша зміна ЧВК приходить на точку зміни інструменту і становить 9 % відносно базової моделі.

Зміна ваги поворотного столу слабо впливає на ЧВК верстата і є максимальною тільки на f_4 , f_5 і f_6 , в той час, як зміна ваги шпиндельного вузла, досить суттєво змінює ЧВК в діапазоні від 8 до 16 % на усіх досліджуваних частотах.

Вагоме збільшення ЧВК верстата спостерігається при збільшенні жорсткості станини та траверси. Траверса виступає як основний елемент, що коливається на усіх частотах, які розглядаються, а станина, за рахунок з'єднання із траверсою, своєю жорсткістю безпосередньо впливати-

ме на амплітуду коливань переднього кінця шпинделя, в залежності від напрямку коливань.

Встановлення верстата на п'ять опор дозволило суттєво зменшити амплітуду коливань переднього кінця шпинделя і є найбільш простим методом збільшення вібростійкості верстата. Повне закладання станини є найбільш дієвим засобом по збільшенню ЧВК і зменшенню амплітуди коливань, але може призвести до зміни напрямку деяких коливань.

Вплив переміщення рухомих органів верстата в крайні положення на величину амплітуди коливань переднього кінця шпинделя потребує додаткових досліджень.

Проведення динамічного аналізу конструкції багатоцільових верстатів на етапі конструкторсько-технологічного проектування дозволяє попередньо спрогнозувати несприятливі умови роботи, внести конструктивні зміни та оцінити їх вплив на динамічну якість верстата.

Список літератури

1. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — М. : Машиностроение, 1976. — 359 с.: ил.
2. Орликов М. Л. Динамика станков / М. Л. Орликов. — К. : Вища школа, 1989. — 272 с.: ил.
3. Shil-Geun Kim. Analysis of Dynamic Characteristics and Evaluation of Dynamic Stiffness of a 5-Axis Multi-tasking machine tool by using FEM and Exiter test/ Shil-Geun Kim, Sung-Hyun Jang // International conference on Smart Manufacturing Application. — 2008. — P. 565–569.
4. Dhupia J. Dynamics of arch-type reconfigurable machine tool / J. Dhupia, B. Powalka, R. Katz // International journal of Machine Tools and Manufacture. — 2007. — № 47. — P. 326–334.
5. Patwari A. Dynamic Modal Analysis of Vertical Machining Centre Components / A. Patwari, W. Faris // Advances in Acoustics and Vibration. — 2009. — P. 1–10.
6. Бойко І. А. Динамічний аналіз поворотного стола 5-координатного обробного центру/ І. А. Бойко, В. В. Солоха, Л. Й. Івченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». — 2014. — № 1(73). — С.134–143.

Поступила в редакцію 21.01.2015

Бойко И.А., Солоха В.В., Ивченко Л.Й. Динамический анализ 5-координатного обрабатывающего центра

Проведен динамический анализ 5-координатного обрабатывающего центра. Определены 6 ведущих частот и форм собственных колебаний, лежащих в диапазоне от 0 до 170 Гц. Проведено исследование влияния изменения положения подвижных узлов станка, физико-механических свойств составных элементов технологической системы, вариантов установки станка на частоту собственных колебаний обрабатывающего центра, а также амплитуду колебаний возбуждения переднего конца шпинделя.

Ключевые слова: модальный анализ, частота собственных колебаний, амплитуда.

Boyka I., Solokha V., Ivshenko L. Dynamic analysis of 5-axis milling centre

Dynamic analysis of the 5-coordinate machining center is carried out. Defined 6 leading frequencies and forms of natural vibrations which lying in the range from 0 to 170 Hz. Investigated the changing effect of the movable machine components position, mechanical properties of the technological system elements, option of the machine installation to the natural frequency of the machine and the perturbation vibration amplitude of the spindle forward end.

Key words: modal analysis, frequency of natural vibrations, amplitude.