

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ЯКОСТІ БАГАТОЦІЛЬОВИХ ВЕРСТАТІВ В ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Вступ

На сучасному етапі розвитку машинобудування широке застосування багатокоординатних високошвидкісних багатоцільових верстатів (БВ), призводить до необхідності забезпечення високих показників динамічної якості (якості і точності обробки) технологічного обладнання, яке використовується у всьому робочому діапазоні частот обертання шпинделя. Останнє є наслідком необхідності обробки великої номенклатури наявних конструкційних матеріалів: від композитів і алюмінію, до жароміцних сплавів, які належать класу важкооброблюваних. Саме при обробці жароміцних сплавів виникають значні проблеми із забезпеченням заданих показників шорсткості обробки поверхонь, точності обробки, стійкості різального інструменту і працездатності верстата в цілому, викликані значними вібраційними конструкції верстата, які виникають під час різання.

Аналіз літературних джерел [1–6] показав, що наявні дослідження динамічної якості як БВ, так і їх складових елементів, в першу чергу, спрямовані на визначення частот обертання шпинделя, які необхідно оминати для запобігання виникнення явища резонансу – збігу частоти власних коливань (ЧВК) конструкції верстата і частоти збудження від різання зуба різального інструменту в заготовку. При цьому доцільність оминання визначених ЧВК залежно від амплітуди коливань (АК) переднього кінця шпиндельного вузла (ШВ) на визначеній частоті, а також вплив на ЧВК зміни різального інструменту і інструментальної оправки в процесі обробки не аналізується.

Використання сучасних методів дослідження динамічної якості багатоцільових верстатів вимагає розробки нових методик аналізу і подальшого використання результатів досліджень, на основі яких розробляти заходи технологічного і експлуатаційного характеру, що враховуватимуть умови роботи, а також особливості виробництва, що є безумовно актуальною науково-технічною проблемою. Одним із таких заходів, наприклад, є процедура призначення режимів різання.

Постановка задачі

На базі проведених досліджень динамічної якості складових елементів високошвидкісного багатоцільового верстата необхідно розробити методику визначення інтервалів частот власних коливань технологічного обладнання, які слід оминати при призначенні режимів різання, а також розробити методику призначення режимів різання, яка включатиме в себе низку заходів, спрямованих на забезпечення динамічної якості верстата під час експлуатації.

Інтервали частот коливань, що формуватимуться залежно від величини ЧВК складових елементів верстата і які необхідно оминати при призначенні режимів різання для запобігання явища резонансу, спрощено називатимемо інтервали частот збудження коливань (ІЧЗК)

Під призначенням режимів різання мається на увазі підбір, або розрахунок швидкості різання, чи величини частоти обертання шпинделя. Частота, з якою зуб різального інструменту врізається в заготовку, називатимемо частотою збудження коливань (ЧЗК).

Методика визначення інтервалів частот збудження коливань

Розробка методики здійснюється на базі аналізу результатів дослідження динамічної якості складових елементів високошвидкісного багатоцільового верстата Ricomax 825 VERSA виконаних в роботах [7–10].

На першому етапі аналізуються величини ЧВК і їх форми, а також амплітуди коливань (АК) складових елементів БВ. Відбираються ЧВК, що входять в робочий діапазон частот обертання шпинделя, який для обраного обладнання становить 14000 об/хв, що відповідатиме частоті збудження коливань від різання леза фрези в заготовку на рівні 933 Гц для чотиризубої фрези (формула 1). З виділених ЧВК відбирають частоти з АК, більшими за певну гранично допустиму межу, яка приймається на рівні 0,5 мкм.

$$f_{\kappa} = \frac{S^* z}{60}, \quad (1)$$

де S – частота обертання шпинделя, об/хв; z – число зубів ріжучого інструменту, шт.

Визначено [10], що в робочий діапазон частот обертання шпинделя попадає п'ять ЧВК шпиндельного вузла: $f_{\text{ув}1} = 325$ Гц, $f_{\text{ув}2} = 634,41$ Гц, $f_{\text{ув}3} = 634,45$ Гц, $f_{\text{ув}4} = 1113,5$ Гц, $f_{\text{ув}5} = 1135$ Гц. Оскільки коливання на другій і третій, а також четвертій і п'ятій ЧВК ШВ за рахунок симетричності шпиндельного вузла є парними і відбуваються у двох взаємно-

перпендикулярних площинах, а також практично співпадають за величиною частоти коливань, то їх допускається об'єднати в одну ЧВК ($f_{шв2,3} = 634$ Гц, $f_{шв4,5} = 1113$ Гц). Виходячи із форм власних коливань шпindelного вузла на частоті $f_{шв4,5} = 1113$ Гц збудження коливань відбувається безпосередньо у парі ріжучий інструмент – оправка. Враховуючи широкий спектр застосовуваних оправок і ріжучого інструменту, що суттєво відрізняються як геометричними параметрами (вильотом, діаметром), так і фізико-механічними властивостями матеріалів із яких вони виготовлені, зміна ЧВК на $f_{шв4,5}$ внаслідок зміни ріжучого інструменту між технологічними переходами може бути суттєвою, тому існує необхідність розрахунку величини ЧВК ШВ в залежності від інструментальної оправки і ріжучого інструменту, що використовуються на даному технологічному переході.

За результатами динамічного аналізу несучої системи БВ [8] визначено, що в діапазоні частот обертання шпindelля, що розглядається, знаходиться 85 ЧВК. Величина амплітуди коливань між окремими частотами може відрізнятися в два і більше рази. Якщо АК на рівні 3 мкм вважаються великими, то менші за 0,5 мкм не впливатимуть на якість і точність обробки, тому при призначенні режимів різання необхідно оминати резонансні частоти з урахуванням деякого граничного діапазону (в межах $\pm 10\%$ від величини резонансної частоти) відсутня.

Враховуючи результати гармонічного розрахунку тільки на трьох ЧВК спостерігаються амплітуди коливань, що перевищують 0,5 мкм і приймаються до подальшого аналізу: $f_{nc1} = 37,36$ Гц, $f_{nc2} = 44,74$ Гц і $f_{nc6} = 139,9$ Гц.

Тим не менш отримані в роботі [8] графіки залежності АК від положення ШВ за осями X, Y і Z ілюструють значну залежність АК переднього кінця шпindelного вузла від форми власних коливань несучої системи БВ. Тому процедура відбору ЧВК несучої системи БВ, що їх необхідно оминати, має доповнюватись аналізом зміни АКЗ при переміщенні рухомих вузлів в межах робочої зони верстата. Суттєва зміна АК при переміщенні ШВ вздовж робочої зони верстата спостерігається на частотах $f_{nc3} = 77,6$ Гц, а також $f_{nc5} = 125,8$ Гц.

Так частоти f_{nc3} і f_{nc5} також необхідно оминати, однак з деякими виключеннями. Для частоти f_{nc5} максимальними АКЗ є в крайньому нижньому положенні ШВ за віссю Z, отже застосовуючи спеціальні «подушки», є можливість перенести зону обробки якомога далі від планшайби, тим самим знизивши АК при роботі з частотами обертання шпindelля близький до f_{nc5} .

Натомість для частоти f_1 ситуація протилежна. Найменшими коливання будуть при найнижчому положенні ШВ за віссю Z. В цьому випадку найбільш прийнятним буде використання інструментальних оправок і фрез з мінімальним вильотом, а також пристосувань з якомога меншою висотою.

За результатами дослідження динамічної якості поворотного стола верстата Ricomax 825 VERSA [7] визначено, що серед 19 ЧВК, що входять в робочий діапазон частот обертання шпindelля, найбільший вплив на показники точності і якості обробки матимуть шість ЧВК: $f_{nc1} = 170,6$ Гц, $f_{nc2} = 180,3$ Гц, $f_{nc3} = 218$ Гц, $f_{nc5} = 395,2$ Гц, $f_{nc6} = 437$ Гц, $f_{nc7} = 439,5$ Гц.

Було встановлено, що поворот моста в діапазоні від 0 до 90° (обертання за віссю A) впливає на величину ЧВК поворотного стола несуттєво, а максимальна різниця в значеннях ЧВК між двома положеннями моста не перевищує 10%.

Враховуючи близькість за значеннями шостої і сьомої ЧВК поворотного стола умовно об'єднуємо їх в одну $f_{nc6,7} = 437$ Гц.

За результатом попереднього аналізу сформовано масив з тринадцяти ЧВК складових елементів БВ (табл. 1), які необхідно оминати при призначенні режимів різання.

Таблиця 1 – Перелік ЧВК складових елементів БВ які необхідно оминати при призначенні режимів різання

f_{nc1} , Гц	f_{nc2} , Гц	f_{nc3} , Гц	f_{nc5} , Гц	f_{nc6} , Гц	f_{nc1} , Гц	f_{nc2} , Гц
37,36	44,74	77,6	125,8	139,9	170,6	180,3
f_{nc3} , Гц	$f_{шв1}$, Гц	f_{nc5} , Гц	$f_{nc6,7}$, Гц	$f_{шв2,3}$, Гц	$f_{шв4,5}$, Гц	
218	325	395,2	437	634	1113	

Для визначення верхньої межі одного з інтервалів частот коливань, які необхідно оминати при призначенні режимів різання, величина ЧВК збільшується, а для визначення нижньої межі – зменшується на 5–10% від номінального значення ЧВК (чим більша ЧВК тим менший діапазон інтервалу частоти коливань).

Оскільки межі оминання окремих ЧВК або суміжні, або частково перетинаються, то зручно об'єднати їх в один діапазон. Наприклад межі оминання частот f_{nc1} і f_{nc2} межують, тому для зручності перший діапазон оминання приймемо $f_1 = 33–48$ Гц. Також перетинаються межі частот f_{nc5} і f_{nc6} , f_{nc5} і $f_{nc6,7}$, а також f_{nc1} , f_{nc2} і f_{nc3} , тому діапазони оминання зручно прийняти як $f_3 = 115–150$ Гц, $f_4 = 160–230$ Гц, $f_6 = 375–450$ Гц. Отримані частотні інтервали занесено в табл. 2.

Етапи визначення інтервалів частот збудження коливань представлені у вигляді блок-схеми на рис. 1.

Таблиця 2 – Перелік інтервалів частот коливань, які рекомендовані для оминання при призначенні режимів різання

f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f_4 , Гц	f_5 , Гц	f_6 , Гц	f_7 , Гц	f_8 , Гц
33–48	70–84	115–150	160–230	310–340	375–450	600–660	1065–1165

Методика підбору і призначення режимів різання при розробці керуючої програми

Вихідними даними для розробки керуючої програми і призначення режимів різання виступають: інтервали частот збудження коливань (табл. 2), геометричні параметри різального інструменту і інструментальної оправки, їх фізико-механічні властивості, кількість зубів на фрези, геометрія і марка матеріалу оброблюваної деталі.

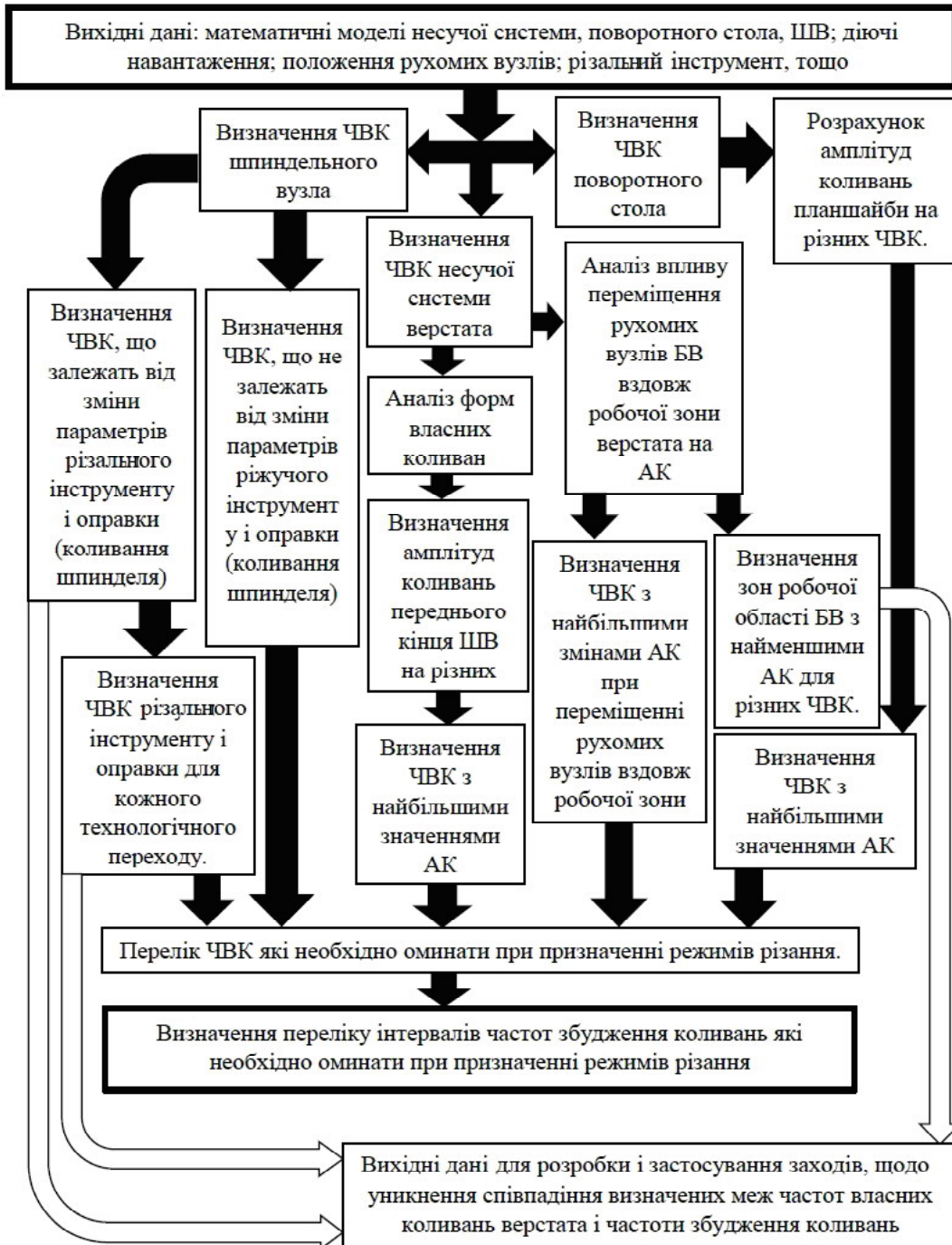


Рис. 1. Блок-схема визначення інтервалів частот збудження коливань

При розробці керуючої програми першим кроком є визначення схеми і послідовності обробки, де ключовими показниками виступають точність і якість обробки. Для визначення схеми обробки аналізується заготовка, габаритні розміри деталі і оброблюваних елементів, радіуси округлення, марка матеріалу, властивості застосовуваного технологічного обладнання, технічні умови тощо.

На базі визначеної схеми обробки призначається різальний інструмент і підбирається необхідне для його встановлення інструментальне оснащення, а також виконується попереднє призначення режимів різання за рекомендаціями інструментальних каталогів, літератури з теорії різання, або довідників технолога-машинобудівника чи інструментальника.

Величину ЧВК підібраних інструментальної оправки і різального інструменту, для кожного технологічного переходу, пропонується визначати за методикою, яка наводиться в роботі [5]. Ця методика базується на визначенні величини питомої жорсткості і подальшого отримання величини ЧВК через співставлення з еталонними показниками, або за допомогою заздалегідь побудованого графіку залежності між величинами ЧВК і питомою жорсткістю. З отриманої ЧВК інструментальної оправки і ріжучого інструменту, через використання методики, що наводиться вище, визначається ІЧЗК, який для кожної пари ріжучий інструмент-оправка буде своїм і відповідатиме інтервалу f_8 в табл. 2.

Частота збудження коливачів (f_k) від роботи різального інструменту визначається за формулою 1 через підстановку попередньо призначеної частоти обертання. Отримані частоти коливачів збудження порівнюються із інтервалами частот збудження коливачів, наведеними в табл. 2, а також визначених ЧВК застосовуваних ріжучого інструменту і оправок.

У випадку неспівпадіння розрахованої ЧЗК з одним із ІЧЗК, призначена частота обертання шпинделя для даного ріжучого інструменту приймається.

У випадку співпадіння розрахованої ЧЗК з одним із ІЧЗК, пропонується застосування наступних заходів:

- 1) При співпадінні ЧЗК з будь-яким із визначених інтервалів частот, рекомендованих для оминання (табл. 2):
 - змінити ЧЗК за рахунок варіювання частотою обертання шпинделя, в межах рекомендованої величини швидкості різання при обробці заданої марки матеріалу;
 - зміна параметрів ріжучого інструменту (діаметру інструменту, матеріалу ріжучої частини, кількості зубців тощо), які впливатимуть на вихідну величину частоти обертання шпинделя через зміну рекомендованої величини швидкості різання;
- 2) При збігу ЧЗК з інтервалом частот збудження коливачів, які відносяться до ЧВК несучої системи верстата, пропонується впливати на величину АК через вибір сприятливих зон обробки на основі аналізу форм власних коливачів несучої системи верстата [8, 9]:
 - варіювання вильотами різального інструменту і інструментальної оправки;
 - зміна висоти пристосування за рахунок використання спеціальних «подушок», або виготовлення спеціальних пристосувань [12];
 - розміщення пристосування з оброблюваною деталлю в межах робочої зони верстата.

Разом з вище наведеним слід враховувати якість обробки поверхонь, яку необхідно досягти при обробці конкретної поверхні. Наприклад при чорновій обробці поверхні з регламентованою шорсткістю Ra 6,3–12.5, ЧВК, на якій АК мають значення на рівні 1–3 мкм, забезпечуватимуть заданий показник шорсткості.

Висновки

Розроблено методику визначення інтервалів частот збудження коливачів, які необхідно оминати при призначенні режимів різання, з метою забезпечення необхідних показників динамічної якості верстата, а саме точності і якості обробки. Розроблена методика базується на результатах динамічного аналізу складових елементів БВ, а також дослідженні впливу переміщення рухомих вузлів БВ вздовж робочої зони, що може мати суттєвий вплив на амплітуду коливачів переднього кінця шпиндельного вузла.

Розроблено методику призначення режимів різання, яку доповнено рекомендаціями технологічного і експлуатаційного характеру, щодо забезпечення необхідних показників точності і якості обробки при попаданні призначеної частоти обертання шпинделя в один з інтервалів частот збудження коливачів, на основі результатів динамічного аналізу складових елементів БВ.

Підприємству-виробнику обладнання, для забезпечення якісного підбору режимів різання експлуатантом технологічного обладнання, з метою забезпечення необхідних показників динамічної якості БВ в процесі обробки деталей і вузлів, пропонується виконувати динамічний аналіз складових елементів верстата або натурні дослідження на готових виробах і заносити до інструкції з експлуатації такі результати розрахунків: ЧВК складових елементів БВ; інтервали частот збудження коливачів; графіки залежності АК за трьома осями від положення шпиндельного вузла для різних ЧВК верстата [9]; графік залежності ЧВК від показника питомої жорсткості, і також ваги і вильоту оправки і інструменту [11].

Список літератури

1. Modeling and modal analysis of tool holder-spindle assembly on CNC milling machine using FEA / J. Wang, B. Wu, Y. Hu and etc. // Applied mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 157–158. – P. 220–226.
2. Badrawy Sinan. Dynamic Modeling and Analysis of Motorized Milling Spindles for Optimizing the Spindle Cutting Performance /

- Sinan Badrawy. – 2009. – Режим доступа : <http://www.nanotechsys.com/images/PDFs/DynamicModelingand -Analysis.pdf>. – Дата доступа : 10.10.2014.
3. Syath Abuthakeer S. Dynamic characteristics analysis of high speed motorized spindle / S. Syath Abuthakeer, P. V. Mohanram, G. Mohan Kumar // Annals of faculty engineering Hunedoara – International Journal of engineering. – 2011. – Vol. 9. – P. 219–224.
 4. Hareesha. Static and Dynamic Analysis of a CNC Milling Spindle / Hareesha // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 2. – P. 222–228.
 5. Improvement on a CNC Gantry Machine Structure Design for Higher Machining Speed Capability / A. D. Sarhan, S. R. Besharaty, J. Akbaria, M. Hamdi // Int. Journal of mechanical, Aerospace, Industrial, mechatronic and Manufacturing Engineering. – 2015. – Vol. 9 (4). – P. 572–576.
 6. Myers A. Finite element analysis of the structural dynamics of vertical milling machine / A. Myers, D. G. Ford, Q. Xu // Transactions on Engineering Sciences. – 2003. – Vol. 44. – P. 431–440.
 7. Бойко І. А. Динамічний аналіз поворотного стола 5-ти 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.
 8. Бойко І. А. Динамічний аналіз 5-ти координатного обробного центру / І. А. Бойко, В. В. Солоха, Л. Й. Івченко // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 98–105.
 9. Бойко І. А. Оцінка впливу положення рухомих вузлів 5-ти координатного обробного центру на амплітуду коливань збудження переднього кінця шпинделя / І. А. Бойко, В. В. Солоха, Л. Й. Івченко // Вестник двигателестроения. – 2015. – №1. – С. 118–121.
 10. Бойко И. А. Разработка математической модели и модальный анализ шпиндельного узла высокоскоростного обрабатывающего центра / И. А. Бойко // Вестник Гомельского гос. техн. университета им. П. О. Сухого. – 2016. – №4 (67). – С. 13–21.
 11. Бойко І. А. Використання показника питомої жорсткості при визначенні частот власних коливань шпиндельного вузла багатоцільового верстата : у 2 т. Т 1. / І. А. Бойко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали VIII міжнародної наук.-практ. конф. – Чернігів : ЧНТУ. – 2018. – С. 170–171.
 12. Патент №127066, МПК В23Q 3/00 (2006.01) / Спосіб закріплення заготовки для обробки складно-фасонних деталей / А. С. Заяц, І. А. Бойко, О. А. Сидоренко ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство «Мотор Січ» ; № u 201802473 ; заявл. 12.03.2018; надр. 10.07.2018.

Одержано 12.07.2018

© **Бойко І. А., д-р техн. наук Івченко Л. Й.**

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

Boiko I., Ivshchenko L. Ensuring the dynamic quality of multipurpose machines during exploitation period
