

О.О. Штегін, асист.
Л.Г. Полонський, проф.
О.І. Талько, студ.

Житомирський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ ПРИ ОБРОБЦІ КІНЦЕВИМИ СФЕРИЧНИМИ ФРЕЗАМИ

Проведено дослідження низькочастотних коливань технологічної системи при обробці кінцевою сферичною фрезею нахиленої поверхні. Проаналізований вплив нелінійних компонентів процесу різання на зміну динамічного стану системи. Показаний вплив низькочастотних вібрацій на початку процесу різання на перехід технологічної системи до усталеного коливального стану з частотами, близькими до частоти власних коливань. Запропоноване пояснення механіки процесу переходу динамічної системи від одного стану до іншого. Проведені багатофакторні експериментальні дослідження, що включали обробку нахиленої поверхні з різними значеннями частоти обертання шпинделя, припуску, напрямку руху подачі (знизу вгору та згори вниз), схеми різання (зустрічної та попутної). Аналіз експериментальних досліджень показав, що процес низхідної обробки за зустрічною схемою різання втрачає динамічну стійкість за тих режимів різання, за яких висхідна попутна обробка залишається динамічно стійкою.

Ключові слова: *вібрації при різанні; кінцеві сферичні фрези; верстати з ЧПК; вейвлет-аналіз.*

Вступ. Процес різання є складним термодинамічним процесом, який супроводжується коливаннями різної природи, що мають різний, здебільшого негативний, вплив на кінцевий результат обробки. Фрезерування є процесом переривчастим, що вносить додатковий вплив на виникнення вібрацій при різанні. У той час як при точінні головними складовими частотного спектра вібрацій є частоти власних коливань системи (першої моди та мод вищих порядків), при фрезеруванні резонансні явища є значно складнішими для аналітичного опису, оскільки візання та вихід зубів фрези вносять нові гармоніки в частотний спектр.

При обробці різанням порядок частот власних коливань технологічної системи (ТС) складає близько 1 кГц. Частота проходження зуба кінцевої фрези є меншою (так, наприклад, для високошвидкісної обробки двозубою фрезею при частоті обертання шпинделя 15000 об/хв. частота проходження зуба буде 0,5 кГц). На сучасних металообробних верстатах з ЧПК на етапі чистової обробки просторово-складних поверхонь деталей переважно використовуються кінцеві сферичні фрези. Унаслідок малих значень припуску при обробці кінцевими сферичними фрезами час різання може бути на порядок менший часу холостого руху зуба фрези при її обертанні, а нормальна часу стружкоутворення може бути навіть меншою періоду коливань ТС на частотах власних коливань. У поєднанні зі складними термомеханічними процесами, що мають місце безпосередньо в зоні різання, загальна динаміка процесу різання кінцевими сферичними фрезами характеризується суттєвими нелінійними явищами, впливом яких на результат обробки не можна нехтувати. З цих причин, виникнення вібрацій при різанні кінцевими сферичними фрезами потребує окремого детального вивчення, зокрема у низькочастотному діапазоні (з частотами, меншими частоти проходження зуба фрези).

Мета роботи. Вивчити вплив зміни кута упередження, частоти обертання шпинделя та величини припуску на виникнення низькочастотних вібрацій при обробці кінцевими сферичними фрезами з різними напрямками різання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання виникнення вібрацій при фрезеруванні вивчається в роботах як вітчизняних, так і іноземних учених, серед яких Ю.М. Внуков [1–3], В.О. Залого, Д.В. Криворучко, Ю.В. Петраков, Y.Altıntaş, P.V. Bayly, E.Budak, T.Inspergrer, В.Р. Mann, G.Stépan та багатьох інших. Регенеративна природа виникнення та розвитку вібрацій при різанні є на сьогодні загальноприйнятою теорією (у вітчизняній літературі зустрічається термін «різання по сліду»). Сутність регенеративних коливань зводиться до того, що непостійність глибини різання, що виникає внаслідок суперпозиції поточної траєкторії руху різальної кромки та сліду від попереднього руху, спричиняє коливання сили різання. Таким

чином, коливання виникають і підтримуються протягом усієї обробки. У випадку фрезерування при певних співвідношеннях частоти обертання шпинделя та частот власних коливань ТС амплітуда вібрацій збільшується, що свідчить про динамічно нестійкий коливальний стан системи. Даний механізм виникнення вібрацій та втрати динамічної стійкості системи для випадку фрезерування кінцевою фрезою з циліндричним торцем детально описаний Е. Budak і Y. Altıntaş [4], а також експериментально підтверджений ними [5]. Діаграми динамічної стійкості, отримані аналітичним або напіваналітичним (чисельним) шляхом, дозволяють з певною точністю передбачити динамічно стійкий процес фрезерування на площині параметрів «частота обертання шпинделя» та «осьова глибина різання» [4, 5]. Проте більш складні випадки, як випадок фрезерування кінцевою фрезою зі сферичним торцем, потребують урахування більшої кількості змінних — швидкості різання, глибини різання, кута контакту між зубом фрези та зрізуваним шаром тощо [6].

У випадку високошвидкісної обробки при малих значеннях радіальної глибини різання (наприклад, обробка тонкостінних деталей бічною частиною кінцевої фрези) суттєво збільшується вплив нелінійних складових при виникненні вібрацій, втрата динамічної стійкості може відбуватися через біфуркацію подвоєння періоду або біфуркацію Андронова–Хопфа, система може перейти до усталеного хаотичного стану [7–14].

Неможливість точного попереднього вибору режимів різання, які забезпечать динамічно стійкий процес обробки просторово-складної поверхні на всіх її ділянках призводить до необхідності моніторингу динамічного стану ТС безпосередньо в процесі різання [15–18]. Особливо складним з точки зору аналізу динамічного стану ТС є випадок високошвидкісної обробки кінцевою сферичною фрезою при зміні кута упередження (кута між нормаллю до оброблюваної поверхні та віссю фрези) [19]. У такому випадку вібрації ТС мають відслідковуватися, зокрема, у діапазоні частот, що на порядок менші частот власних коливань ТС.

Викладення основного матеріалу. Як відомо, нестационарність динамічного стану ТС є наслідком термомеханічних процесів, що відбуваються в зоні різання, а саме нагрівання елементів ТС, зміна коефіцієнтів тертя та загасання. Великі значення швидкості різання посилюють нелінійні впливи зазначених факторів на динамічний стан ТС. При обробці кінцевою сферичною фрезою кут контакту між фрезою та заготовкою ϕ_c , який визначається як різниця між кутом виходу зуба фрези ϕ_e та кутом врізання зуба фрези ϕ_s , нелінійно залежить від радіуса фрези r , ширини різання a_e (величини зміщення фрези відносно попереднього проходу), радіального припуску на обробку a_p та кута упередження ξ [20]. Унаслідок цього ТС піддається додатковим нелінійним впливам при зміні a_p , a_e та ξ .

Динамічна модель процесу різання в узагальнених координатах q може бути описана системою рівнянь (1):

$$\begin{cases} [M]\ddot{q}(t) + [C]\dot{q}(t) + [D(q)] + [K]q(t) = P_c(t); \\ [M]\ddot{q}(t) + [C]\dot{q}(t) + [K]q(t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Перше рівняння в системі справедливе, коли відбувається видалення припуску. Це нелінійне диференціальне рівняння. Друге рівняння є лінійним диференціальним рівнянням загасаючих коливань; воно справедливе, коли всі зуби фрези здійснюють холостий обертальний рух (видалення припуску не відбувається). $[M]$, $[C]$ і $[K]$ є, відповідно, матрицями мас, загасань та жорсткостей. $[D(q)]$ є матрицею нелінійних компонентів процесу різання. Навіть у випадку динамічної системи з одним ступенем вільності розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) можливий лише чисельними методами. Система рівнянь (1) для динамічної системи з одним ступенем вільності в напрямку осі y матиме вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{y}(t) + 2\zeta_s \omega_n \dot{y}(t) + d(\dot{y}) + \omega_n^2 y(t) = \frac{P_y(t)}{m}; \\ \ddot{y}(t) + 2\zeta_s \omega_n \dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

У системі рівнянь (2) ζ_s — модальний коефіцієнт загасання; ω_n — модальна радіальна частота власних коливань системи; $P_y(t)$ — складова сили різання, що діє в напрямку осі y (вона є сумою статичної складової та динамічної складової — збурень); m — модальна маса

системи; $d(\dot{y})$ – нелінійна складова загасання коливань, яка визначається за рівнянням (3) для нелінійного коефіцієнта загасання ζ_n :

$$d(\dot{y}) = \zeta_n [\dot{y}(t)]^k \quad (3)$$

Для різних значень показників степеню k чисельні розв'язки системи рівнянь (2) матимуть різний вигляд.

Для виділення низькочастотних коливань із загального спектра вібросигналу може бути розкладений шляхом вейвлет-перетворення. Ідея вейвлет-аналізу сигналу полягає у його почерговому порівнянні з деякою фінітною функцією на різних масштабах. Така фінітна функція зветься материнським вейвлетом. У якості материнських вейвлетів можуть використовуватися вейвлети різних сімейств – Хаара, Добеші, Гауса, Мейєра, Морле та ін.; при обробці різанням вейвлети Добеші дозволяють розкласти сигнал для виділення частоти вібрацій у найменшу кількість ітерацій. Під час порівняння ділянки вібросигналу з материнським вейвлетом методом найменших квадратів визначаються коефіцієнти декомпозиції на різних рівнях розкладання сигналу. Так, було встановлено, що при вейвлет-аналізі вібросигналу із використанням материнського вейвлету Добеші db4 частотам власних коливань ТС відповідають 2–3 рівні декомпозиції, а частотам проходження зуба фрези відповідають 4–5 рівні декомпозиції.

Схема експериментальної установки

Експериментальні дослідження проводилися на трьохосовому фрезерному верстаті моделі Victor VC-85 з системою ЧПК Fanuc 0i-MD для системи з умовно одним ступенем вільності. Фрезерування заготовки з конструкційної сталі марки Сталь 45 здійснювалося твердосплавною монолітною двозубою кінцевою сферичною фрезою $d_\phi = 8$ мм моделі JS532080D1B.0Z2-NXT фірми Seco Tools, затиснутою в цанговому патроні типу BT40-ER32-100. Виліт фрези складає $l_\phi = 32$ мм.



Рис. 1. Схема експериментальної установки

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 1. Заготовка (3) з похилою оброблюваною поверхнею розміщується на підкладці (5), піддатливій в напрямку осі y . До даної підкладки через штифт М5 прикріплений перетворювач п'єзоелектричний вібрвимірювальний (4) моделі ДН-4-М1. Верхнє значення вимірювального діапазону даного перетворювача складає 12,6 кГц.

Дана експериментальна установка дає змогу дослідити суттєво нелінійні ефекти при фрезеруванні кінцевими сферичними фрезами. При проведенні тестів з величинами глибини різання, які є типовими для обробки даним типом фрез у виробничих умовах, внаслідок коливань при певних значеннях амплітуди заготовка випадковим чином виходить з контакту із зубом фрези. Очікується, що більшою мірою такий ефект спостерігатиметься при зустрічній

обробці, оскільки за такої схеми при раптовому виході зуба фрези з тіла заготовки відбуватиметься різка зміна величини амплітуди коливань.

Метою проведення експериментів є дослідження стійкості процесу фрезерування кінцевою сферичною фрезою поверхні, нахиленої під кутом ξ по відношенню до осі y . При цьому рух подачі здійснюється під кутом ξ по відношенню до осі y за зустрічною схемою різання у висхідному та у низхідному напрямках. Перед здійсненням тестових проходів до торців піддатливої підкладки (5) прикріплюються пластини для підвищення жорсткості і попередньо виконуються підготовчі проходи необхідної глибини для забезпечення зустрічної схеми різання при тестових проходах.

При фрезеруванні значення подачі було сталим для всіх тестів і складало $s_z = 0,10$ мм. При цьому значення кута нахилу оброблюваної поверхні $\xi = 52^\circ 30'$. Значення глибини різання для різних тестів лежать в діапазоні від 0,10 мм до 0,50 мм. Значення швидкості обертання шпинделя n для різних тестів лежать в діапазоні від 5852 об/хв. до 8008 об/хв. Значення ширини різання для кожного тесту визначалося як $a_e = r\sqrt{1-K^2}$, де $K = 1 - \frac{a_p}{r}$.

Аналіз отриманих результатів. Виміряне значення модальної радіальної частоти власних коливань ТС складало $\omega_n = 9689$ рад/с. Порівняємо чотири тести, дані по яким наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

№	ξ	a_p , мм	a_e , мм	n , об/хв	Напрямок різання	Схема різання
1	$52^\circ 30'$	0,40	1,744	6636	згори вниз	зустрічна
2	$52^\circ 30'$	0,40	1,744	7584	згори вниз	зустрічна
3	$52^\circ 30'$	0,50	1,936	6636	згори вниз	зустрічна
4	$52^\circ 30'$	0,50	1,936	7584	згори вниз	зустрічна

Частота обертання 6636 об/хв. співвідноситься з частотою власних коливань системи як 1:7, а частота обертання 7584 — як 1:6,1. Таким чином, для тестів № 1 та № 3 мають спостерігатися резонансні явища, у той час як для тестів № 2 та № 4 вони повинні мати слабше виражений характер.

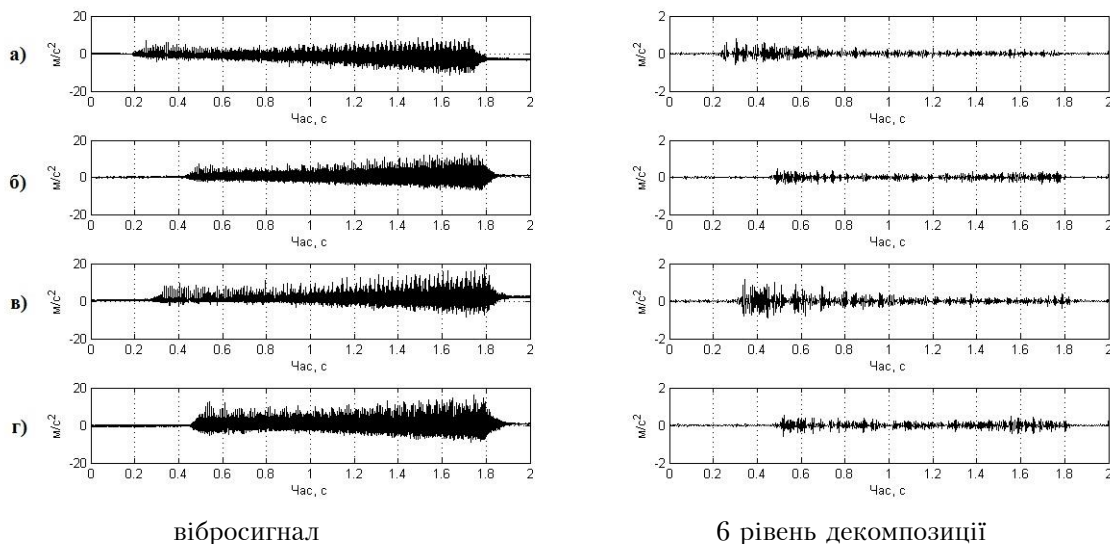


Рис. 2. Вібраційні сигнали та відповідні декомпозиції 6 рівня

На рисунку 2 зображені вібросигнали та відповідні їм 6 рівні декомпозиції для тесту № 1 (рис. 2 а), № 2 (рис. 2 б), № 3 (рис. 2 в) та № 4 (рис. 2 г), отримані вейвлет-перетворенням з материнським вейвлетом Добеші db4. У даному випадку 6 рівень декомпозиції відповідає

частоті обертання фрези. Як видно з графіків, на початку сигналів, особливо у тестах № 1 (рис. 2 а) та № 3 (рис. 2 в), спостерігаються значні збурення у низькочастотному діапазоні. В подальшому ці збурення зникають, натомість збільшується амплітуда на початкових вібраційних сигналах, на частотах, що відповідають частоті власних коливань ТС. Проте втрата динамічної стійкості у низькочастотному діапазоні характеризується значним впливом на якість обробки, про що свідчить аналіз обробленої поверхні.

З точки зору математичної моделі (2) даний ефект може описуватися нелінійною складовою (3) при $k \in (-1;0)$. Механіка даного процесу переходу від низькочастотних вібрацій до вібрацій з частотою, близькою до частоти власних коливань системи, може бути такою: на початку процесу різання при врізанні зуба фрези домінують пластичні деформації в зоні різання, так що власне зняття припуску може навіть не відбуватися через взаємне відтискання фрези та заготовки. По мірі накопичення енергії коливань системою збільшується амплітуда коливань, що видно з вібросигналів. У певний момент амплітуда коливань компенсує малі значення припуску, і в зоні різання починають домінувати пружні деформації – система переходить до усталеного коливального стану з частотами, близькими до частот власних коливань ТС (параметричні коливання).

Висновки. Експериментальні дослідження проводилися з прямуванням подачі знизу догори за попутною схемою різання та згори донизу за зустрічною схемою різання. Втрата динамічної стійкості оцінювалася за наявністю домінуючих резонансних гармонік в частотно-часовому спектрі вібросигналу, а також за наявністю/відсутністю вібраційного сліду на обробленій поверхні. Процес вихідної попутної обробки залишався динамічно стійким в діапазоні значень частот обертання шпинделя від 5852 об/хв. до 8008 об/хв. При аналізі низхідної зустрічної обробки було помічено, що на початку різання на поверхні утворювався значний вібраційний слід, який зникав по проходженні $\sim 0,7$ с. При цьому в спектрі сигналу на даній ділянці були відсутні домінуючі гармоніки на частотах, близьких до частоти власних коливань ТС. Сам вібросигнал на цій ділянці мав порівняно малу амплітуду. Розкладання сигналу через вейвлету-перетворення з материнським вейвлетом Добеші db4 дав змогу виявити суттєві низькочастотні коливання ТС на 6 рівні декомпозиції, аналіз спектра показав домінуючі гармоніки, що відповідали приблизно 0,25 та 0,50 частоти обертання шпинделя. Це однозначно свідчить про хаотичний стан динамічної системи (перехід до хаотичного стану через каскад біфуркацій). Перехід від цього стану до усталеного коливального стану з домінуючими гармоніками, близькими до частоти власних коливань ТС може бути пояснений накопиченням коливальної енергії всередині системи через нелінійний компонент (3) в математичній моделі (2) при $k \in (-1;0)$.

Список використаної літератури:

1. Влияние угла наклона винтовой режущей кромки концевой цилиндрической фрезы на уровень возбуждения вибраций при обработке тонкостенной детали / Ю.Н. Внуков и др. // Резание и инструменты в технологических системах. – 2014. – № 84. – С. 43–50.
2. Опробование усовершенствованной технологии подготовки и нанесения демпфирующей среды на моноколеса ГТД при концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков и др. // Вісник двигунобудування. – 2015. – № 1.
3. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков и др. // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2015. – № 10. – С. 3–13.
4. Budak E. Analytical prediction of chatter stability in milling – part I: general formulation / E. Budak, Y. Altintas // Journal of Dynamic Systems. – 1998 : Measurement, and Control. – № 120 (1). – Pp. 22–30.
5. Budak E. Analytical prediction of chatter stability in milling – part II: application of the general formulation to common milling systems / E. Budak, Y. Altintas // Journal of Dynamic Systems. – 1998 : Measurement, and Control. – № 120 (1). – Pp. 31–36.

6. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling. *Journal of manufacturing science and engineering* / Y.Altintas, E.Shamoto, P.Lee, E.Budak. – 1999. – № 121 (4). – Pp. 586–592.
7. *Wiercigroch M.* Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting / M.Wiercigroch, E.Budak // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* – 2001. – № 359 (1781). – Pp. 663–693.
8. Effects of radial immersion and cutting direction on chatter instability in end-milling / *P.V. Bayly, B.P. Mann, T.L. Schmitz, D.A. Peters, G.Stepan, T.Insperger* // In ASME 2002 international mechanical engineering congress and exposition. – 2002. – Pp. 351–363.
9. Stability prediction for low radial immersion milling / *M.A. Davies, J.R. Pratt, B.Dutterer, T.J. Burns* // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 2002. – № 124 (2). – Pp. 217–225.
10. *Campomanes M.L.* An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions / M.L. Campomanes, Y.Altintas // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 2003. – № 125 (3). Pp. 416–422.
11. *Stépán G.* Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect / *G.Stépán, R.Szalai, T.Insperger* // *Nonlinear Dynamics of Production Systems.* – 2004. – Pp. 111–128.
12. *Stepan G.* Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes / *G.Stepan, T.Insperger, R.Szalai* // *International Journal of Bifurcation and Chaos.* – 2005. – № 15 (09). Pp. 2783–2798.
13. *On stability prediction for milling* / J.Gradišek, M.Kalveram, T.Insperger, K.Weinert, G.Stépán // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2005. – № 45 (7). – Pp. 769–781.
14. *On stability prediction for low radial immersion milling* / *J.Gradišek, E.Govekar, I.Grabec, M.Kalveram, K.Weinert* // *Machine Science and Technology.* – 2005. – № 9 (1). – Pp. 117–130.
15. *On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine* / *Z.Yao, D.Mei, Z.Chen* *Journal of Materials Processing Technology.* – 2010. – № 210 (5). – Pp. 713–719.
16. *Tangjitsitcharoen S.* Analysis of chatter in ball end milling by wavelet transform / *S.Tangjitsitcharoen.* – In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET).* – 2012. – № 71. – p. 1075.
17. *Chatter detection in milling machines by neural network classification and feature selection* / *M.Lamraoui, M.Barakat, M.Thomas, M. El Badaoui* // *Journal of Vibration and Control.* – 2015. – № 21 (7). – Pp. 1251–1266.
18. *Cao H.* Chatter identification in end milling process based on EEMD and nonlinear dimensionless indicators / H.Cao, K.Zhou, X.Chen // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2015. – № 92. Pp. 52–59.
19. *Sun C.* Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling / C.Sun, Y.Altintas // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2016. – № 106. – Pp. 89–97.
20. *Штегін О.О.* Визначення кутів врізання та виходу при обробці похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами / *О.О. Штегін* // *Вісник Житомирського державного технологічного університету / Серія: Технічні науки.* – 2014. – № 3 (70). – С. 62–67.

References:

1. Vnukov Ju. N. i dr. (2014), «Vlijanie ugla naklona vintovoj rezhushhej kromki koncevoj cilindricheskoj frezy na uroven' vobuzhdenija vibracij pri obrabotke tonkostennoj detali», *Rezanie i instrumenty v tehnologicheskix sistemah*, Vol. 84, pp. 43–50.
2. Vnukov Ju. N. i dr. (2015), «Oprobovanie usovershenstvovannoj tehnologii podgotovki i nanesenija dempfirujushhej sredy na monokolesa GTD pri koncevom frezerovanii», *Visnik dvigunobuduvannja*, Vol. 1.

3. Vnukov Ju. N. i dr. (2015), «Razrabotka metodiki ocenki urovnja avtokolebaniy tonkostennoj detali pri ee koncevom frezerovanii», *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni*, Vol. 10, pp. 3–13.
4. Budak, E., & Altintas, Y. (1998), «Analytical prediction of chatter stability in milling – part I: general formulation», *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 120 (1), pp. 22–30.
5. Budak, E., & Altintas, Y. (1998), «Analytical prediction of chatter stability in milling – part II: application of the general formulation to common milling systems», *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 120 (1), pp. 31–36.
6. Altintas, Y., Shamoto, E., Lee, P., & Budak, E. (1999), «Analytical prediction of stability lobes in ball end milling», *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 121 (4), pp. 586–592.
7. Wiercigroch, M., & Budak, E. (2001), «Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 359 (1781), pp. 663–693.
8. Bayly, P.V., Mann, B.P., Schmitz, T.L., Peters, D.A., Stepan, G., & Insperger, T. (2002), «Effects of radial immersion and cutting direction on chatter instability in end-milling. In ASME 2002 international mechanical engineering congress and exposition», American Society of Mechanical Engineers, pp. 351–363).
9. Davies, M.A., Pratt, J.R., Dutterer, B., & Burns, T.J. (2002), «Stability prediction for low radial immersion milling», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124 (2), pp. 217–225.
10. Campomanes, M.L., & Altintas, Y. (2003), «An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125 (3), pp. 416–422.
11. Stépán, G., Szalai, R., & Insperger, T. (2004), «Nonlinear dynamics of high-speed milling subjected to regenerative effect», *Nonlinear Dynamics of Production Systems*, pp. 111–128.
12. Stepan, G., Insperger, T., & Szalai, R. (2005), «Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes», *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 15 (09), pp. 2783–2798.
13. Gradišek, J., Kalveram, M., Insperger, T., Weinert, K., Stépán, G., Govekar, E., & Grabec, I. (2005), «On stability prediction for milling», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45 (7), pp. 769–781.
14. Gradisek, J., Govekar, E., Grabec, I., Kalveram, M., Weinert, K., Insperger, T., & Stepan, G. (2005), «On stability prediction for low radial immersion milling», *Machine Science and Technology*, Vol. 9 (1), pp. 117–130.
15. Yao, Z., Mei, D., & Chen, Z. (2010), «On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210 (5), pp. 713–719.
16. Tangjitsitcharoen, S. (2012), «Analysis of chatter in ball end milling by wavelet transform», *In Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), Vol. 71, p. 1075.
17. Lamraoui, M., Barakat, M., Thomas, M., & El Badaoui, M. (2015), «Chatter detection in milling machines by neural network classification and feature selection», *Journal of Vibration and Control*, 21 (7), pp. 1251–1266.
18. Cao, H., Zhou, K., & Chen, X. (2015), «Chatter identification in end milling process based on EEMD and nonlinear dimensionless indicators», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 92, pp. 52–59.
19. Sun, C., & Altintas, Y. (2016), «Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 106, pp. 89–97.
20. Shtehin, O.O. (2014), Vyznachennya kutiv vrizannya ta vykhodu pry obrobtsi pokhylykh poverkhon sferychnymy kintsevimi frezamy, [Definition of start and exit angles in ball end milling of inclined surfaces], Visnyk ZHDTU, Reporter of ZSTU, Vol. 3 (70), pp. 62–67.

ШТЕГІН Олексій Олександрович – асистент кафедри технологій машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- верстати з ЧПК;
- вібрації в металообробці.

ПОЛОНСЬКИЙ Леонід Григорович – професор кафедри технологій машинобудування Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням.

ТАЛЬКО Олександр Ігорович – студент факультету інженерної механіки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- верстати з ЧПК.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2016.