

УДК 621.9.011

В.С. Антонюк, д-р техн. наук, Н.В. Гнатейко, канд. техн. наук,
О.В. Катрук, Київ, Україна

ДИНАМІЧНІ РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ОБРОБЛЮВАНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ

Розглянуто причини динамічних явищ при фрезеруванні у вигляді коливального процесу різання багатомасової, пружно дисипативної системи верстата. Виявлено умови виникнення передрезонансних і резонансних явищ, їх механізм і енергетичний рівень, дія та вплив на динамічну стійкість технологічної оброблювальної системи. Отримані результати дозволяють проаналізувати резонансні динамічні явища при механічній обробці, визначити основні характеристики процесу фрезерування та підвищити його надійність.

Рассмотрены причины динамических явлений при фрезерной обработке в виде колебательного процесса резания многомассовой, упруго диссипативной системы станка. Выявлены условия возникновения передрезонансных и резонансных явлений, их механизм и энергетический уровень, действие и влияние на динамическую устойчивость технологической обрабатывающей системы. Полученные результаты позволяют проанализировать резонансные динамические явления при механической обработке, определить основные характеристики процесса фрезерования и повысить его надежность.

It's considered causes of dynamic phenomena at the milling in the form of cutting vibration process of multimass elastically dissipative system of machine. There is found the conditions of before rezonans and resonance phenomena occurrence, their mechanism and the energy level, the action and the influence on the dynamic stability of the technological machining system. Given results allow us to analyze the resonance dynamic phenomena at machining, to find out the basic characteristics of the milling process and increase its reliability.

Вступ. Розвиток сучасного машинобудування значною мірою пов'язаний з підвищенням вимог до експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів і, відповідно, застосуванням при їх виробництві матеріалів з високими фізико-механічними властивостями. При цьому, вимоги, що пред'являються до процесу їх виготовлення, передбачають поєднання високої продуктивності обробки з високою стійкістю та надійністю різального інструменту, що обумовлює актуальність проведення комплексних досліджень закономірностей процесу контактної взаємодії різального інструменту з оброблюваним матеріалом.

Постановка проблеми. Відомо, що процес фрезерування супроводжується динамічними явищами, які впливають на процес різання, стійкість інструменту і якість обробленої поверхні. Основною причиною виникнення коливань технологічної оброблювальної системи є

нестационарність процесу різання [1–5].

Виникнення вібрацій у процесі різання від резонансних явищ виступає значною перепоною для підвищення продуктивної обробки деталей на верстатах. Ця проблема ускладнюється ще й тим, що важко передбачити у кожному випадку, який з параметрів режиму обробки і в яку сторону (зменшення або збільшення) потрібно регулювати для забезпечення стабільності процесу обробки [6].

Існує тенденція підвищення продуктивності механічної обробки шляхом інтенсифікації режимів різання, що призводить до значного зростання сили різання та навантаження на елементи технологічної оброблюваної системи. В таких умовах додатково підвищується ймовірність перевантаження найбільш навантажених ланцюгів та вузлів і навіть виходу з ладу верстата і інструмента.

Використання кінцевих фрез при фрезеруванні корпусних деталей складної форми призводить до виникнення вібрацій і, як наслідок, до погіршення якості поверхні та точності розмірів. При цьому найбільш нежорстким ланцюгом технологічно оброблюваної системи є інструмент, причому конфігурація оброблюваних поверхонь деталі і їх розміри, як правило, не дозволяють застосувати більш жорсткі інструменти, так як діаметр і довжина інструменту при обробці кінцевими фрезами, визначаються конструктивними параметрами оброблюваних деталей.

Відомо, що при механічній обробці спостерігаються два види коливань: вимушені і такі, що самозбуджуються. Вимушені коливання з'являються через періодичності дії збурюючої сили різання. Вони можуть виникнути внаслідок: переривчастого характеру процесу різання; дисбалансу складових верстата, деталі і інструменту; дефектів в механізмах верстата; нерівномірності припуску заготовки на обробку та її зміщення при закріпленні [2–3].

Особливо важливим є визначення впливу динаміки окремих складових технологічної оброблюваної системи на умови виникнення передрезонансних і резонансних явищ, їх механізм і енергетичний рівень, дія та вплив на динамічну стійкість технологічної оброблюваної системи.

Поставлену задачу можна вирішити шляхом математичного моделювання динамічних коливальних процесів в технологічній оброблювальній системі при фрезеруванні.

Мета дослідження. Виконати аналіз динамічних резонансних явищ процесу фрезерування на основі математичного моделювання технологічної оброблюваної системи.

Викладення основного матеріалу. При різанні збудником автоколивань являється неоднозначна квазіперіодична сила різання і наявності пружних

деформацій, а причинами нестабільності сили різання є зміна припуску Δl , твердості матеріалу ΔHB , періодичність стружкоутворення T_p , тертя інструменту і деталі, а також вплив зовнішніх факторів тощо. За наявності в системі контакту «деталь-інструмент» самозбудження, малі коливання посилюється до деякої сталої величини з амплітудою, при якій настає рівновага між енергією, що підтримує коливання, і енергією розсіювання.

Причиною появи динамічних процесів в технологічній оброблюваній системі, як відомо, являється змінна за величиною і квазіперіодична за часом динамічна складова сили різання $\Delta P_d(\tau)$, що виникає через змінні в часі збурюючі характеристики процесу різання. Встановлено [7], що найбільший вплив на величину $\Delta P_d(\tau)$ при фрезеруванні має варіація глибини різання $\Delta l(\tau)$, де основну роль грають зміщення заготовки при її встановленні і закріпленні в пристосуванні верстата та її геометричні похибки виготовлення. Це викликає зміну припуску і сили різання, що приводить до появи динаміки сили різання $\Delta P_y(\tau)$, діючою з частотою обертання шпинделя в секунду ω_d .

Проте існує ще декілька додаткових збурюючих періодичних сил різання таких як нерівномірність ширини і глибини фрезерування, періодичність врізання і виходу кожного зуба фрези, неоднорідності міцності матеріалу, періодичність стружкоутворення T_p , періодичності зміни сил тертя F_{Tp} , як фрикційно-релаксаційні процеси тертя в зоні контакту інструменту з деталлю і так далі.

Тоді загальну змінну силу у напрямі осі Y-Y, яка найбільше впливає на якість обробки, можна представити у вигляді (1,2,4) з урахуванням тимчасового чинника:

$$P_y(\tau) = P_{cp} + \Delta P_{dy}(\tau) \sin \omega_d \tau + \sum_{i=1}^n C_{pi} \cos(\omega_d \tau i + \varphi_i), \quad (1)$$

де P_{cp} – середнє значення сили різання, визначуване по відомій залежності; C_{pi} – силові коефіцієнти змінних додаткових складових сил різання нижчих порядків, в долях енергетичного рівня від головної динамічної складової сили різання в напрямі нормалі $\Delta P_{dy}(\tau)$; у міру їх зменшення за величиною і число яких n ; $\omega_d \tau$ – часова фаза зміни основної періодичності зміни $\Delta P_{dy}(\tau)$; φ_i – фазові зміщення векторів додаткових динамічних сил різання відносно осі Y, які формують весь інший високочастотний спектр коливань

сили різання $\Delta P_y(\tau)$; i – порядковий їх номер за убаванням енергетичного впливу на динаміку різання.

Такий динамічний режим роботи процесу різання в залежності від часу обробки τ і величини припуску $\Delta t(\tau)$, запишемо як:

$$T_p \frac{d^2 P_y(\tau)}{d\tau^2} + P_y(\tau) = -K_p(\tau)Y, \quad (2)$$

де Y – величина пружного відносного коливання деталі і різального інструменту; $K_p(\tau)$ - коефіцієнт жорсткості різання, що визначається як:

$$K_p(\tau) = \frac{P_y(\tau)}{t(\tau)}. \quad (3)$$

При обробці глибина різання $t(\tau)$ періодично міняється ($\pm \Delta\tau$), що також змінює і силу різання, то $K_p(\tau)$ є також величиною змінною; T_p - час стружкоутворення, як показали дослідження, змінюється зі зміною ω_d і визначає більш високі спектри частот коливань процесу механічної обробки.

Динамічний коливальний режим $P_y(\tau)$ викликає періодичні, пружні, відносні переміщення деталі і інструменту на величину Y , що призводить до появи пружних коливань елементів технологічної оброблювальної системи і виникненню вторинного динамічного коливального режиму в цій пружно-дисипативній механічній системі у вигляді автоколивального процесу. Він описується рівнянням [8]:

$$M \frac{d^2 Y}{d\tau^2} + H \frac{dY}{d\tau} + CY = f_{Tp} P_y(\tau), \quad (4)$$

де M – відповідно приведена маса системи; H - її дисипативно-демпфуючі характеристики; C - її жорсткість; f_{Tp} – коефіцієнт тертя при різанні металу.

Функціональна залежність динаміки технологічної оброблювальної системи у вигляді динамічного оператора W_{YCC} як пружної системи верстата, від основних її показників (4.5) матиме вигляд:

$$W_{YCC} = f(M; H; C; P_y(\tau)). \quad (5)$$

З цього виходить, що автоколивальний процес в технологічній оброблювальній системі збурюються і підтримується квазіперіодичною зміною силою різання $\Delta P_y(\tau)$ та одночасно багато в чому визначається динамічними постійними характеристиками цієї системи M, H і C .

Дослідження коливальних динамічних режимів процесу механічної обробки і технологічної оброблювальної системи, і їх фазово-частотних характеристик (ФЧХ) дозволили зробити наступні висновки:

1. ФЧХ процесу механічної обробки багато в чому визначаються частотою обертання шпинделя ω_d і в процесі обробки можуть мінятися в широкому діапазоні при переході від напівчистових до чистових процесів.

2. При механообробці інструмент зношується і тупиться, через це змінюється T_p і f_{Tp} і ФЧХ процесу механічної обробки поступово зміщуються в область низьких частот.

3. ФЧХ технологічно оброблювальної системи багато в чому визначаються динамічними постійними пружно-дисипативна системи, як M , H і C , що обумовлює її певну інертність до зміни ФЧХ процесу механічної обробки при роботі.

Визначення причин виникнення резонансних явищ. Сама технологічна оброблювана система є багатоеlementною системою зі своїми m_i , c_i і h_i , які мають свій вплив на систему і спотворюють динаміку автоколивань. Усі ці елементи технологічної оброблюваної системи при роботі залежні до своїх ФЧХ і свого обмеження власної частоти вільних коливань:

$$\omega_{oi} = \sqrt{\frac{c_i}{m_i}}. \quad (6)$$

При зміні ФЧХ процесу механічної обробки завжди неминучі випадки, коли динамічні характеристики ω_{di} (1) процесу різання можуть співпадати за частотою і фазою з ω_{oi} , як $\omega_{di} \approx \omega_{oi}$, що призводить до появи резонансу в оброблювальній системі.

Розглянемо механіку і фізику виникнення такого явища при механічній обробці на прикладі одного з елементів пружної технологічної оброблюваної системи. Якщо такий елемент з масою m вивести із стану рівноваги на відстань Y і відпустити, то він почне здійснювати пружні коливання і у кінці кожного ходу на нього діятимуть дві сили:

- сила інерції руху, яка за другим законом Ньютона рівна mY'' (друга похідна сили на прискорення);
- сила пружності системи cY .

За принципом Даламбера у кінці ходу сума діючих на таке тіло сил рівна 0:

$$mY'' + cY = 0. \quad (7)$$

Перетворивши рівняння отримуємо:

$$Y'' + \frac{c}{m} Y = 0. \quad (8)$$

Прийнято замінювати відношення $\frac{c}{m}$ через частоту власних коливань

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \text{ досліджуваного тіла.}$$

У результаті отримуємо рівняння:

$$Y'' + \omega_0^2 Y = 0. \quad (9)$$

При накладенні на такий елемент збурюючої квазіперіодичної сили, що коливається $P_Y(\tau)$ (1), у якій основна частота коливання ω_d , то отримуємо рівняння рівноваги сил за Даламбером у будь-який момент часу

$$P_Y(\tau) \sin \omega_d \tau - cY - mY'' = 0 \quad (10)$$

або

$$mY'' + cY = P_Y(\tau) \sin \omega_d \tau. \quad (11)$$

Отримана рівність є неоднорідною, оскільки права його частина не дорівнює нулю. Його можна вирішувати окремими випадками. Розглянемо випадок з умовою, коли елемент з масою m знаходиться на початку руху з координатою Y_0 . Тоді при дії на нього збурення з частотою $\omega_d \tau$ отримуємо рівняння руху такого тіла:

$$Y = Y_0 \sin \omega_d \tau, \quad (12)$$

де Y_0 – представляє амплітуду вимушених коливань і вона вибирається з умови задоволення рівняння (11). Двічі продиференціювавши (12) визначимо прискорення такого коливального руху:

$$Y'' = -Y_0 \omega_d^2 \sin \omega_d \tau. \quad (13)$$

Підставивши (12) і (13) у вираз (11) отримуємо:

$$-mY_0 \omega_d^2 \sin \omega_d \tau + cY_0 \sin \omega_d \tau = P_Y(\tau) \sin \omega_d \tau. \quad (14)$$

Після скорочень і перетворень у результаті маємо:

$$cY_0 - mY_0\omega_d^2 = P_Y(\tau). \quad (15)$$

Це дозволяє знайти амплітуду Y_0 таких вимушених коливань елементів пружної технологічної оброблюваної системи:

$$Y_0 = \frac{P_Y(\tau)}{c - m\omega_d^2}. \quad (16)$$

Замінивши c і m через $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$, знаходимо:

$$Y_0 = \frac{P_Y(\tau)}{c(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_0^2})}. \quad (17)$$

З отриманого результату виходить, що при таких коливаннях із збуренням з частотою ω_d амплітуда їх Y_0 , при наближенні ω_d до частоти власних коливань ω_0 елементу пружної системи, почне швидко збільшуватися і втягуватися в резонансне явище. Коли виникне особливий випадок при $\omega_{di} \approx \omega_{oi}$, тоді $Y \rightarrow \infty$. Проте через наявності в системі дисипативних чинників амплітуда таких певних коливань має певну межу. Але енергетичний рівень таких коливань дуже великий і призводить до втрати динамічної стабільності процесу механічної обробки і технологічної оброблюваної системи.

Досліджуємо такий енергетичний рівень резонансу. Кінетична енергія руху таких коливань елементу з масою m визначається за виразом:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{dY_i}{d\tau} \right)^2. \quad (18)$$

Аналіз (17) і (18) показує, що при незмінних c - пружності, m - маси тіла і частоти ω_d амплітуда коливань Y_i росте швидко. Отже, для задоволення рівності, росте з такою ж швидкістю і швидкість переміщення v , причому за квадратичною залежністю і кінетична енергія такого резонансного явища може рости до великих значень, що може привести до втрати якості процесу механічної обробки і надійності технологічної оброблюваної системи.

При механічній обробці усі ці чинники представляють велику вірогідність появи резонансних явищ при збігу частоти коливань ω_{di} і ω_{oi} .

Окрім головного динамічного вектора $P_d(\tau)$, діючого з частотою ω_d , в $P_Y(\tau)$ присутні збудники динаміки сили різання малих порядків (1), що мають цілий спектр збуджуючих систему частот ω_{di} вищих порядків. До того ж сама оброблювальна система є багатомасовою, багатоелементною, пружною системою зі своїми m_i , що мають свої різні частоти власних коливань ω_{0i} . При затупленні різального інструменту увесь частотний спектр сили різання $P_Y(\tau)$ зміщується в область низьких частот.

Висновки. В роботі розглянуто умови виникнення передрезонансних і резонансних явищ при фрезеруванні, їх механізм і енергетичний рівень, дія та вплив на динамічну стійкість технологічної оброблювальної системи. Використовуючи результати даної роботи можна проаналізувати резонансні динамічні явища при механічній обробці, визначити основні характеристики процесу фрезерування та підвищити його надійність.

Список використаної літератури: 1. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: учеб. пособие / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с. 2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с. 3. Кудинов В.А. Автоколебания на низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании / В.А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1997. – № 2. – С. 16–22. 4. Мельничук П.П. Динаміка процесу торцевого фрезерування при зношуванні різальних елементів / П.П. Мельничук, Я.А. Степчин // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2012. – № 2 (61). – С. 33 – 40. 5. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю.В. Петраков – К.: УкрНДЦАТ, 2004. – 396 с. 6. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик. – К.: Техніка . 1991. – 152 с. 7. Попов В. И. Динамика станков. / В.И. Локтев – К.:Техника, 1975. – 183 с. 8. Гнатейко Н.В., Румбешта В.О. Методика керування динамікою обробної механічної системи. / В.О. Румбешта // Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2002, №6. – С.55-58.

Надійшла до редколегії 02.07.13