

УДК 620.179.14(088.8)

І. М. Діордіца, В. І. Скицюк, канд.техн.наук.

Національний технічний університет України "КПІ", м. Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТОРКАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ДО ДЕТАЛІ НА ОСНОВІ ВІБРОАКУСТИЧНИХ ЯВИЩ

Розглянуто дві основні тісно пов'язані з металообробкою проблеми: визначення моменту торкання різального інструменту до поверхні деталі з метою визначення координат поверхні з максимальною точністю; поточний контроль стану металообробки, а саме інструменту як основної формоутворювальної сутності.

Ключові слова: торкання, інструмент, точність.

Вступ

Для забезпечення високої точності виготовлення прецизійних деталей та зниження їх собівартості, потрібне промислове устаткування з можливістю компенсації геометричних похибок, що реєструються вимірювальною технікою в режимі реального часу. Вимірювання геометричної похибки та її компенсації в механообробці описано в [1]. Результати засвідчили, що основне завдання системи контролю торкання інструменту до деталі полягає в забезпеченні співвідношення якості – простота.

З огляду на зазначене потрібна постановка такого завдання та шляхів його розв'язання: визначення математичного апарату завдання з отримання правильної форми об'єкта обробки; математичний апарат корегування форми деталі для отримання геометрично правильних форм; апаратурне забезпечення побудови технологічного процесу вимірювання форми та її корегування.

Чутливий елемент системи торкання контролю різального інструменту до деталі та його властивості.

Для реалізації контролю торкання різального інструменту до деталі вибрали чутливий елемент на базі п'єзоелектричного резонатора. Віброакустичні чутливі елементи за конструкційною здатністю відчують коливальні рухи поверхні. Такі коливальні рухи утворюються за умови взаємного тертя інструменту та виробу або різання. Серед найбільш поширених конструкцій чутливих елементів перше місце посідає застосування п'єзоелектричного ефекту, друге – електромагнітний принцип. Обидві конструкції мають інерційний елемент, з'єднаний з чутливою системою, тобто п'єзоелементом, або індукційною котушкою, що розміщується у сталому магнітному полі. За конструкційними особливостями система первинного чутливого елемента має чітко обумовлений резонансний ефект і, як наслідок, велику нерівномірність АЧХ (амплітудно частотна характеристика) [2, 3]. Вихідна напруга такого перетворювача:

$$E = \frac{d\delta F}{\varepsilon_2 \varepsilon_0 Q}, \quad (1)$$

де δ – відстань між електродами; F – діюча сила; ε_2 – відносна діелектрична проникливість п'єзоелектричної речовини; ε_0 – діелектрична стала; Q – площа електродів.

Якщо діюча сила F має синусоїдальний характер зміни, тобто – $F = F_m \sin \omega t$, ЕРС змінюється за так самим законом, тобто – $E = E_m \sin \omega t$. Характеристики такого чутливого елемента зображено на рис. 1.

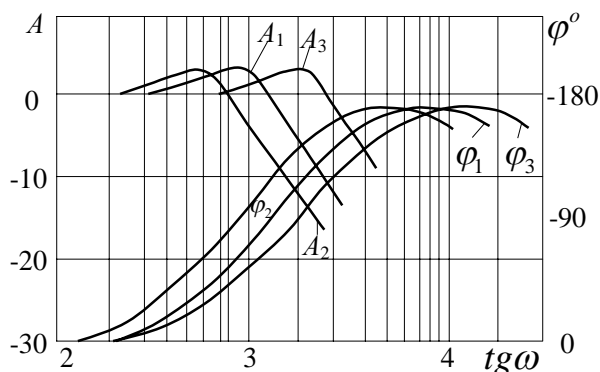


Рис. 1. АФЧХ (амплітудно фазово-частотна характеристика) п'єзоелемента у прямому режимі залежно від коефіцієнту форми

Особливість використання такого типу чутливих елементів полягає в можливості легко монтувати їх на нерухомих інструментах та деталях, наприклад, Sound Checker [4]. Ця система торкання пасивна. Аналогічний прилад був створений на кафедрі виробництва приладів НТУУ "КПІ", але зі значними відмінностями («Майстер-9»). Основна відмінність полягає в тому, що цей прилад має два канали реєстрації торкання: електромагнітний та віброакустичний, тобто система двопараметрична. Окрім виходу «торкання» для ЧПК (числове програмне керування) система має вихід «різання», тобто відрізняє просте тертя від робочого процесу. Сутність

роботи такої системи торкання полягає в тому, що сигнал чутливого елемента потрапляє на кілька смушкових фільтрів, які шляхом порівняння вихідних амплітуд (фільтрів) дають можливість оцінити якість процесу. До переваг таких чутливих елементів належить можливість надійного контролю процесу металообробки, низька чутливість матеріалів, до недоліків довготривалість (1–10 мс) визначення моменту торкання. Приклад такого принципу роботи наведено в [5].

Еквівалентну провідність віброчутливого елемента визначаються за формулою

$$Y = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{j\omega C_k}{1 - \omega^2 L_k C_k + j\omega C_k R_k} = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{\omega^2 C_k^2 R_k + j(1 - \omega^2 L_k C_k)\omega C_k}{(1 - \omega^2 L_k C_k)^2 + \omega^2 C_k^2 R_k^2}$$

Для ідеального п'єзорезонатора $R_0 = \infty, R_k = 0$ провідність нескінченно підвищується за умови $1 - \omega^2 L_k \tilde{N}_k = 0$, тобто при частоті $\omega_k = 1/\sqrt{L_k C_k}$, що є частотою послідовного резонансу. Ця частота визначається виключно параметрами введеного динамічного контуру і тому збігається з визначеною (1) за формулою:

$$\omega_k = 2\pi f_k + \frac{\pi}{h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}},$$

або частотою механічного резонансу.

Провідність ідеального п'єзорезонатора нескінченно знижується за умови

$$j\omega C_0 + \frac{j\omega C_k}{1 - \omega^2 L_k C_k} = 0,$$

тобто при частоті, $\omega_p = \sqrt{\frac{1 - C_k/C_0}{L_k C_k}}$ або частоті паралельного резонансу (іноді її називають частотою антирезонансу). Відносна різниця між частотами послідовного і паралельного резонансів $(\omega_p - \omega_k)/\omega_k = C_k/(2C_0)$.

При побудові п'єзорезонансного елемента до нього такі вимоги: висока добротність, висока чутливість до вимірюваної величини, низька чутливість до чутливих елементів, можливість збудження коливань тільки на одній частоті, тобто моночастотність. Ці вимоги забезпечуються насамперед вибором типу матеріалу п'єзоелемента.

Загальний модуль комплексної чутливості $|S(j\omega)|$ визначає АЧХ, тобто залежність чутливості від частоти (див. рисунок 1):

$$S(\lambda) = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^2 + 4\lambda^2\beta^2}},$$

де $\lambda = \frac{\omega}{\omega_0}$, $\beta = \frac{k}{2\omega_0 m}$.

ω – плинна частота; ω_0 – частота резонансу; k – коефіцієнт демпфування; m – інерційна маса (додаткова).

Фазу сигналу чутливого елемента визначають так:

$$\varphi = \arctg \frac{2\lambda\beta}{\lambda^2 - 1}.$$

У п'єзоелектричних перетворювачах використовуються кварц та різні типи п'єзокераміки. Значення п'єзомодулів, що визначають чутливість найпоширеніших типів перетворювачів, для п'єзокерамічних матеріалів діелектричну проникність ε і температуру, що відповідає точкам Кюрі θ_c наведено в таблиці.

Значення п'єзомодулів приведені для різних п'єзокерамічних матеріалів

Матеріал	$\theta_c, ^\circ C$	$\varepsilon, од.$	П'єзомодуль, пКл/Н		
			-d31	-d33	-d15
ТБ-1	120	1400	45-78	100-190	260
ТБК-3	105	1200	43	77	240
ТБКС	160	450	27	77	112
ЦТС 19	290	1400	119	282	380
ЦТС21	410	550	27	67	-
ЦТС 22	330	800	50	100	-
ЦТС 23	280	1050	100	200	-
ЦТС 24	280	1050	100	200	-
ЦТС 300	330	1100	95	280	341
ЦТБС-1	250	3200	220	470	-
НБС-1	265	1600	67	167	-
НБС-3	270	1800	40	100	-
(K0,5 Na0,5) NbO3	420	420	49	160	-

У дослідях застосовували перетворювач на базі матеріалу ЦТС-19. З урахуванням наведеного розглянемо математичні принципи побудови системи торкання на базі п'єзоелектричного елемента.

Математичні засади побудови віброакустичної системи контролю торкання (СКТ).

Для побудови системи акустичної СКТ використали можливість розкладу корисного сигналу в ряд Фур'є за такою залежністю:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \dots$$

Оскільки питома вага кожної частини цього спектру безпосередньо пов'язана з процесом, що відбувається в технологічній оброблювальній системі, для реєстрації моменту торкання різального інструменту до деталі необхідно здійснювати фрагментарний смуговий контроль. Основна причина такого розв'язання завдання реєстрації торкання полягає в тому, що віброакустичний чутливий елемент реагує на всі віброакустичні процеси, які відбуваються з металооброблювальним обладнанням.

Для того щоб зареєструвати сигнал торкання за запропонованим способом необхідно, виконати такі умови: у межах спектральної смуги амплітуди від A_i до A_{i+n} повинні перевищувати $0,707A_{\max}$ для певної частини спектру; фази від φ_i до φ_{i+n} гармонічних сигналів повинні максимально збігатись; для кількох вибраних смуг спектру повинні приблизно збігатись амплітуди та фази.

Перша з цих умов простіша, тому що виконується визначенням амплітудного порогу для певної смуги частот і не пов'язана з її шириною, тобто Δf . У такому разі друга умова, а саме збіжність фаз від φ_i до φ_{i+n} визначається так:

$$\sin(i\omega t + \varphi_i) = 1, \quad \sin[(i+n)\omega t + \varphi_{i+n}] = 1 \quad (2)$$

або

$$i\omega t + \varphi_i = \frac{\pi}{2}, \quad (i+n)\omega t + \varphi_{i+n} = \frac{\pi}{2}.$$

Після підстановки $i\omega = f_i$ та $(i+n)\omega = f_{i+n}$ у (2) та низки перетворень отримуємо таку залежність:

$$\Delta f = f_{i+n} - f_i = \frac{1}{2\pi t}(\varphi_{i+n} - \varphi_i). \quad (3)$$

Вираз (3) показує, що навіть за ідеальних умов, тобто однакової амплітуди і частоти (як межовий випадок), але за різних фаз для надійної одночасної реєстрації цих сигналів необхідно, щоб різниця між фазами не перевищувала $\pm \frac{\pi}{2}$. У такому разі смуга частот

визначається частотами f_n та f_s , різниця фаз яких не перевищуватиме $\pm \frac{\pi}{2}$. Мінімальна

амплітуда не повинна бути меншою від $\frac{\sqrt{2}}{2}$ максимальної амплітуди у смугі вибраної частоти. Відповідних вимог слід дотримуватися також між вибраними смугами частот.

Забезпечити це співвідношення у вузькій частотній смугі неможливо, тому було вибрано шлях максимального розширення частотного діапазону в одночасно необхідно було вирішити питання про межі фільтрації корисного сигналу, тобто властивості фільтрів як засобу реалізації зазначеної математичної бази.

Оскільки спектр частот, що підлягає обробленню є низькочастотний, для оброблення корисного сигналу застосували активні RC-фільтри. Вплив цих фільтрів дуже важливий оскільки вирішує дві основні проблеми щодо СКТ інструменту до деталі, а саме:

– реалізацію процесу окремлення смуги частот необхідної для визначення факту торкання;

– реалізацію вагових можливостей смуги частот щодо визначення швидкодії системи торкання.

Використовували активні RC-фільтри, що належать до класу лінійних електричних ланцюгів із зосередженими та постійними в часі параметрами. Зв'язок між вхідною та

вихідною напругами таких ланцюгів у загальному випадку є передавальною функцією вигляду:

$$T(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} = K \frac{\prod_{i=1}^m (p - z_i)}{\prod_{i=1}^n (p - p_i)},$$

де $p = \sigma + i\omega$ – комплексна змінна; $U_{\text{вх}}(p)$, $U_{\text{вих}}(p)$ – відображення за Лапласом вхідної і вихідної напруги; a_i , b_i – вагові коефіцієнти, що залежать від параметрів елементів ланцюга; K – масштабний множник.

Величина $n > m$ є порядком ланцюгів; при $n > 2$ активні фільтри (АФ). Корені p_i характеристичного рівняння $D(p) = 0$ є полюсами передавальної функції ланцюга (полюсами передавання), корені z_i рівняння $N(p) = 0$ – нулями передавальної функції (нулями передавання). Для визначення ланцюгів характеристичний поліном $D(p)$ є строгим поліномом Гурвиця, тобто всі полюси передавання розміщені в лівій півплощині комплексної змінної p . У загальному випадку полюси p_i комплексні: $p_i = \sigma_p \pm i\omega_p$, тобто характеризуються частотою та добротністю $Q_0 = \omega_0 / 2\sigma_p$. Аналогічно визначають частоту ω_z і добротність Q_z нулів передавання.

Характеристики лінійного ланцюга визначаються коефіцієнтами передавальної функції a_i , b_i та її полюсами і нулями. АЧХ становить залежність модуля передавальної функції від частоти:

$$T(\omega) = |T(i\omega)| = \frac{|N(i\omega)|}{|D(i\omega)|} = K \frac{\prod_{i=1}^m |i\omega - z_i|}{\prod_{i=1}^n |i\omega - p_i|}$$

Якщо коефіцієнт передавання ланцюга у смузі пропускання приблизно дорівнює деякому постійному значенню T_0 , АЧХ фільтру зручно уявити у вигляді залежності відносного згасання від частоти:

$$a(\omega) = 20 \lg[T_0 / T(\omega)].$$

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) становить залежність аргументу передавальної функції від частоти:

$$\varphi(\omega) = \arg\{N(i\omega)\} - \arg\{D(i\omega)\} = \sum_{i=1}^m \arg(i\omega - z_i) - \sum_{i=1}^n \arg(i\omega - p_i).$$

Тобто у загальному випадку передавальна функція ланки за напругою має вигляд:

$$T(p) = K \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{p^2 + b_1 p + b_0} = K \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{p^2 + (\omega_0 / Q_0) p + \omega_0^2},$$

де a_2, a_1, a_0, b_1, b_0 – коефіцієнти; ω_0, Q_0 – відповідно модуль частоти та добротність пари комплексно-зв'язаних полюсів (при $Q_0 > 0,5$); K – масштабний множник.

З огляду на поставлене завдання найвірогіднішим для використання є фільтри високої частоти (ФВЧ).

Основні функції ФВЧ такі:

– частотна:

$$\omega_m^2 = \frac{\omega_0^2}{1 - 1/(2Q_0^2)};$$

– частотна залежність передавальної функції:

$$T(\omega_m) = \frac{KQ_0}{\sqrt{1 - 1/(4Q_0^2)}}.$$

Для визначення швидкодії необхідно знати сталу часу фільтру τ_ϕ , що тісно пов'язана з добротністю Q_o залежністю:

$$\tau_\phi = \frac{Q_o}{\pi f_o} = \frac{2Q_o}{\omega_o}. \quad (4)$$

Параметр τ_ϕ визначальний щодо визначення часу t_T , необхідного для аналізу СКТ. Оскільки для цього можна використовувати кілька фільтрів, бажано, щоб цей параметр був для них однаковий. Вибирати величини τ_ϕ необхідно так, щоб існував баланс порівняно з добротністю Q_o та частотою f_o . Як видно з (4), що більше значення Q_o , яке відповідає якості фільтрування, то більше значення τ_ϕ . Цей недолік систем фільтрів неможливо усунути лише підвищенням частоти f_o , оскільки одночасно працюють кілька блоків.

Висновки

За даними досліджень, з побудови ефективної системи віброакустичної діагностики, для верстатів токарної групи з ЧПК достатньо п'єзоакселерометра чутливістю $\rho \geq 100 [мВ/г]$, власною частотою 50 – 100 кГц і розбиття діапазону відгуку ТОС (технологічна обробляюча система) за допомогою смугових фільтрів на чотири частки. Одна з цих смуг – до 10кГц та 50 – 100кГц у сукупності з ЦАП і компараторами призначена для визначення моментів (координат) торкання інструменту та заготовки і запуску системи діагностики. Контактна зона інструменту та заготовки є активним віброакустичним джерелом, що впливає на режим роботи ТОС, викликаючи відповідні сигнали, які вимірює акселерометр. У свою чергу, це уможливорює діагностування якості оброблення, знос і руйнування різального інструменту, здійснювати його розмірне налаштування. Результати дослідження показали істотну зміну спільної картини спектру відгуків у часі, тобто зі зносом різального інструменту. Спектр має певні частотні резонанси складові в ТОС, які є найбільш чутливими індикаторами стану процесу різання. Низькочастотні складові до 3 кГц зазвичай містять також шуми верстата, але вони найчутливіші до зміни параметрів процесу різання та найінформативніші для діагностики.

Рассмотрены две основные тесно связанные с металлообработкой проблемы: определение момента касания режущего инструмента поверхности детали в целях определения координат поверхности с максимальной точностью; текущий контроль состояния металлообработки, а именно инструмента как основной формообразующей сущности.

Ключевые слова: касание, инструмент, точность.

In the article two basic problems are considered close related to metal-workingness: determination of moment of touch a tool piece with the surface of detail with the purpose of determination of co-ordinates of surface with maximal exactness; current control of the state of metal-workingness, namely instrument as basic shape-generating essences.

Key words: touch, instrument, exactness.

Література

3. Скицюк В.І., Дюрдіца І.М. Вимірювання форми деталі у статичному стані та лінійному детермінованому русі різального інструмента // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. –Київ. 2005. – Вип.29. – С.68-74.
4. Кабалдин Ю.Г. Виброакустический способ контроля износа режущего инструмента // Вестн. К. – Ам. гос.техн.ун-та. – 1995г. – № 1.- С. 13-15.

5. Армарего И.Дж.А. Р.Х. Браун. Обработка металлов резанием М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
6. Daishowa seiki co., ltd. fa Dept. catalog № 52, 1998.
7. Скицюк В.І., Ковальчук О.П. Патент на корисну модель № 59356, Україна, МПК G08B 21/00, G01B7/008. Пристрій контролю торкання різального інструмента поверхні деталі при токарній обробці. Заявл. 05.11.2010. Опубл. 10.05.2011.

Надійшла 01.06.12

УДК 621.924.093

В. В. Бурыкин, канд. техн. наук

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ОПЫТ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РАЗРЕЗАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ДЛЯ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрен опыт резания заготовок из ПКНБ гидроабразивной струей. Приведены результаты металлографических исследований и влияния технологических факторов гидроабразивной обработки на шероховатость поверхности реза. Изготовлены опытные пластины для металлорежущего инструмента.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, шероховатость поверхности.

Развитие технологии машиностроения существенно зависит от технического уровня инструментального производства. Требования к инструменту постоянно повышаются, так как с развитием техники появляются изделия из новых материалов высокой твердости и прочности. Основным условием производства высококачественного и долговечного инструмента является выбор инструментального материала, соответствующего назначению и возникающим нагрузкам при эксплуатации.

Особый интерес относительно эффективности применения в промышленности представляет инструмент, оснащенный режущими пластинами из поликристаллов на основе кубического нитрида бора (ПКНБ). Эти поликристаллы обладают высокой твердостью, прочностью, износостойкостью, теплопроводностью, стабильностью физических свойств и структуры при температуре до 1100 °С.

Оснащенные ПКНБ режущие инструменты обрабатывают материалы из закаленных сталей, высокопрочных и отбеленных чугунов, износостойких наплавленных и напыленных покрытий твердостью до 60–65 HRC и позволяют получать обработанную поверхность шероховатостью Ra 0,2–1,0 при высокой производительности.

Долговечность инструмента зависит не только от свойств материала режущих элементов, определяемых технологией изготовления, но и в значительной степени от свойств их поверхностного слоя. Простые по конструкции режущие пластины оказались весьма чувствительны к условиям обработки, что приводит к повышенным затратам на их эксплуатацию из-за выкрашиваний и поломок режущего лезвия. В этой связи качество поверхностного слоя инструмента зависит, прежде всего, от технологии формообразования профиля режущего лезвия и его финишной обработки. Создание эффективной технологии режущего инструмента из сверхтвердых материалов, которая позволит интенсифицировать процесс разрезания заготовок, является первоочередной задачей машиностроительного комплекса.