

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

УДК 621.9.06.014

І. В. Луців, В. Н. Волошин, В. М. Буховець
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОХИБОК КОМПЛЕКСНОГО САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОГО ОСНАЩЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ ОБРОБЛЮВАНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

© Луців І. В., Волошин В. Н., Буховець В. М., 2016

Запропоновано аналітичну модель оцінки впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення на вихідну точність оброблюваних поверхонь, яка ґрунтується на варіаційному методі розрахунку точності машин. Проведено оцінку впливу похибок комплексного самоналагоджувального оснащення, які виникають у результаті силової дії з боку процесу різання та затиску, на вихідну точність оброблюваних циліндричних поверхонь консольно закріплених деталей.

Ключові слова: точність, самоналагоджувальне оснащення, аналітична модель, векторний баланс, формоутворювальна система верстата.

The paper deals with the analytic model suitable to evaluate the errors impact on the output surface accuracy in the machining process using the integral self-adjusting machine tool equipment. This model is based on the variation simulation method of machines precision calculation. The impact evaluation of accessories errors of force action from the cutting process as well as clamping is developed. This evaluation substantially considers the output accuracy of the machined cylindrical surfaces of the console fixed parts.

Key words: accuracy; self-adjusting equipment; analytic model; vector balance; machine tool geometry forming system.

Постановка проблеми Технологічна система лезової обробки забезпечує взаємозв'язок між заданими характеристиками об'єктів і факторів, що діють у процесі різання, власне процесом складної механіко-фізичної взаємодії заготовки і лез інструментів (різанням) і результуючими параметрами обробки. Результуючі параметри визначають ефекти та показники обробки. Серед останніх доцільно вирізняти первинні (точність деталі, якість поверхні, продуктивність обробки, надійність системи), від яких значною мірою залежать інтегральні показники (енергоємність, економічність та інші) [1].

Для ефективного керування процесом лезової обробки з метою забезпечення її ефективності, тобто необхідних значень вказаних інтегральних показників, доцільно застосовувати комплексне оснащення адаптивного типу [2], яке складається із підсистеми адаптивного затискання заготовки і підсистеми самоналагодження процесу обробки заготовки. Керованими параметрами для підсистеми адаптивного затискання заготовки є зусилля затиску; діапазон затиску; жорсткість та демпфування процесу; кількість зон затиску тощо. Керованими ж параметрами для підсистеми самоналагодження багатолезової обробки адаптивного типу є жорсткість технологічної обробної системи; швидкість подачі; швидкість осциляції лез; навантаження і властивості демпфування;

структура міжлезових зв'язків тощо. В результаті можна істотно збільшити продуктивність обробки, відповідно забезпечивши її необхідну точність.

Точність отримання деталі певної форми та розмірів забезпечується формоутворювальною системою верстата. Важливими ланками формоутворювальної системи верстата, які суттєво впливають на вихідну точність верстата, є шпindelь разом із затискним пристроєм і затиснутою в ньому заготовкою та супортна група із елементами багатолезового оснащення. З урахуванням викладеного актуальним є розроблення аналітичної моделі оцінки впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення на вихідну точність оброблюваних поверхонь на верстаті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та мета роботи. Завдання розрахунку точності технологічної оброблювальної системи, як одне із актуальних для вирішення проблеми керування точністю, оцінки точності верстата на стадії проектування, встановлення окремих параметрів, що визначають точність обробки тощо, розглянуто у багатьох наукових роботах, у яких використані різні наукові підходи. Серед них можна виділити метод розрахунку сумарної похибки обробки, який ґрунтується на побудові еквівалентної схеми технологічної оброблювальної системи з подальшим приведенням координат точок різальної кромки інструменту до системи координат, побудованої на технологічних базах заготовки [3]. Принципово іншим методом, який дозволяє побудувати баланс точності верстата з урахуванням численних джерел похибок, є варіаційний [4]. Використання в ньому фундаментальної властивості похибок – їх дуже малої величини порівняно із номінальним розміром – дає змогу отримати аналітичні вирази, які пов'язують в явному вигляді вхідні й вихідні характеристики точності верстата. Цей метод потребує визначення матриць узагальнених похибок формоутворювальних рухів вузлів верстата.

Теоретичні основи визначення узагальнених похибок формоутворювальних ланок, як результат різних складових (деформаційних зміщень, коливань ланок та їх пружних опор, температурних деформацій ланок), наведено в роботах [5, 6]. У роботі [7] подана методика визначення похибки затискного патрона, яка виникає внаслідок деформації консольно закріпленої заготовки та контактної деформації стиків, на вихідну точність оброблюваної циліндричної поверхні.

Складові комплексного самоналагоджувального оснащення є підланками таких важливих формоутворювальних ланок, як шпindelний вузол та супортна група, що безпосередньо беруть участь у формоутворенні поверхонь. Тому їх похибки повинні враховуватися в загальному балансі точності технологічної оброблювальної системи.

Мета роботи – розроблення аналітичної моделі оцінювання впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення, які виникають в результаті дії сил різання та нерівномірності сил затискання в результаті поперечного заклинювання заготовки в затискних елементах у разі затиску, на вихідну точність оброблюваних на верстаті поверхонь.

Векторний баланс вихідної точності циліндричної поверхні деталі, зумовленої похибками складових комплексного самоналагоджувального оснащення. В основу побудови моделі покладено варіаційний метод розрахунку точності [3], який дозволяє скласти баланс вихідної точності верстата. Векторний баланс точності токарного верстата

$$\Delta \vec{r}_0 = \sum_{i=0}^3 A_{0,i} \varepsilon_i A_{i,3} \vec{r}_3 = \varepsilon_0 A_1^6 A_2^3 A_3^1 \vec{r}_3 + A_1^6 \varepsilon_1 A_2^3 A_3^1 \vec{r}_3 + A_1^6 A_2^3 \varepsilon_2 A_3^1 \vec{r}_3 + A_1^6 A_2^3 A_3^1 \varepsilon_3 \vec{r}_3, \quad (1)$$

де $\varepsilon_i (i=0, 1, 2, 3)$ – матриця повної похибки положення i -ї ланки формоутворювальної системи; A_1^6, A_2^3, A_3^1 – матриці, що описують, відповідно, обертання шпindelя, переміщення поздовжнього і поперечного супортів; $\vec{r}_3 = |0 \ 0 \ 0 \ 1|^T$ – радіус-вектор вершини різця.

Елементами матриці повної похибки положення i -ї ланки формоутворювальної системи [4–6] є:

$\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ – малі лінійні переміщення (лінійні похибки положення) системи S_i вздовж осей X_i, Y_i, Z_i відповідно; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – малі повороти (кутові похибки положення) тієї ж системи відносно осей X_i, Y_i, Z_i відповідно.

Для оцінки впливу похибок затискного пристрою із заготовкою та різцевих блоків багатолезового самоналагоджувального оснащення на похибки оброблюваної деталі приймаємо похибки всіх решти ланок і підланок формоутворювальної системи і їх відносні переміщення абсолютно точними. Основні типи похибок, які виникають у затискних пристроях та багатолезовому інструментальному оснащенні, наведені на рис. 1. Основними причинами появи малих зміщень і малих поворотів у затискному пристрої під час оброблення заготовки багатолезовим оснащенням є: зміщення у місцях спряжень заготовки і затискних елементів та у стиках деталей затискного пристрою внаслідок контактної податливості в результаті дії сил затиску; похибка встановлення заготовки у затискному пристрої, спричинена її поперечним і поздовжнім заклинюванням у затискних елементах під час затискання. Малі лінійні зміщення різцевих блоків у радіальному напрямку викликані контактними деформаціями в стиках різцевих блоків багатолезового оснащення під дією радіальних складових сил різання.



Рис. 1. Похибки складових комплексного самоналагоджувального оснащення

Тоді отримаємо залежність для визначення похибки положення точок оброблюваної поверхні, яка за формулою (1) описується вектором:

$$\Delta \bar{r}_0 = \varepsilon_0 A_1^6 A_2^3 A_3^1 \bar{r}_3 + A_1^6 A_2^3 A_3^1 \varepsilon_3 \bar{r}_3. \quad (2)$$

Підставивши в (2) відповідні матриці та перемноживши їх за правилами матричного аналізу, отримаємо вектор похибок:

$$\Delta \bar{r}_0 = \begin{pmatrix} -(\gamma_0 R + \delta_{y3}) \sin \varphi + \delta_{x3} \cos \varphi + \beta_0 \cdot z + \delta_{x0} \\ \delta_{x3} \sin \varphi + (\gamma_0 R + \delta_{y3}) \cos \varphi - \alpha_0 \cdot z + \delta_{y0} \\ -\beta_0 \cdot R \cdot \cos \varphi + \alpha_0 \cdot R \cdot \sin \varphi + \delta_{z0} + \delta_{z3} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де R – віддаль від осі обертання заготовки до вершини різців різцевих блоків багатолезового оснащення.

Оцінку вихідної точності циліндричної поверхні деталі, зумовлену похибками складових комплексного самоналагоджувального оснащення, проведено за відхиленням радіуса циліндра у заданій точці від номінального [3]. Граничними оцінками можуть слугувати дві величини коливання діаметра: в заданому перерізі та в будь-якому перерізі.

Векторний баланс точності для циліндричної поверхні деталі в нормальному напрямку [3] визначають за залежністю:

$$\Delta r_n = \Delta \bar{r}_0 \cdot \bar{n}, \quad (4)$$

де $\bar{n} = (\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad 0 \quad 0)^T$ – вектор одиничної нормалі.

Підставивши значення $\Delta \bar{r}_0$ у (4), отримаємо:

$$\Delta r_n = (\beta_0 z + \delta_{x0} + \delta_{x3} \cos \varphi) \cos \varphi - (\alpha_0 z + \delta_{y0} + \delta_{x3} \sin \varphi) \sin \varphi. \quad (5)$$

Із рівняння (5) випливає, що на точність циліндричної поверхні в заданому перерізі або в будь-якому перерізі впливають тільки зміщення вздовж осей X і Y та кути повороту навколо цих осей. Для визначення цих зміщень та кутів повороту використано аналітичний апарат, оснований на використанні принципу малої похибки порівняно з абсолютними розмірами вузлів [5, 6].

Методика визначення елементів матриць похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення. Деталь, защемлену в кулачках, можна розглядати як жорстке циліндричне тіло, яке спирається на дискретні пружні односторонні опори, що моделюють приведену радіальну жорсткість стиків затискних елементів (рис. 2). Визначаючи матрицю повної похибки положення системи заготовки в затискному пристрої, приймаємо такі припущення: зміщення і кути повороту елементів системи малі; власна жорсткість елементів затискного пристрою набагато більша від контактної жорсткості стиків; лінійна залежність зміщень від навантаження в діапазоні діючих зусиль.

Умова рівноваги системи (рис.2) [6]:

$$C \cdot \bar{\Delta} = \bar{F}, \quad (6)$$

де C – симетрична порядку 6×6 матриця жорсткості; $\bar{\Delta} = (\delta_{x0}, \delta_{y0}, \delta_{z0}, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)^T$ – вектор узагальненої похибки системи координат деталі в результаті контактних деформацій стиків; $\bar{F} = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T$ – вектор узагальненого навантаження.

Елементи матриці жорсткості C обчислюють за формулою:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^N c_k R_{ik} R_{jk}, \quad (7)$$

де c_k – жорсткість k -ї опори, $k = 1, 2, \dots, N$; $R_k = (a_{xk}, a_{yk}, a_{zk}, m_{xk}, m_{yk}, m_{zk})^T$ – вектор узагальнених координат і напрямків зміщень точки k -ї опори; a_{xk}, a_{yk}, a_{zk} – компоненти одиничного вектора напрямку осі k -ї опори \bar{a}_k ; m_{xk}, m_{yk}, m_{zk} – компоненти одиничного вектора \bar{m}_k .

Елементи вектора узагальненого навантаження \bar{F} матимуть значення: $F_z = 0$; $F_x = -T_1 \cos \varphi - T_2 \cos(\varphi + 120^\circ) - T_3 \cos(\varphi + 240^\circ)$; $F_y = -T_1 \sin \varphi - T_2 \sin(\varphi + 120^\circ) - T_3 \sin(\varphi + 240^\circ)$; $M_x = 0$; $M_y = 0$; $M_z = 0$, де T_1, T_2, T_3 – зусилля затискання затискними елементами.

Вихідні дані для розрахунку вектора похибок $\bar{\Delta}$ наведені в таблиці.

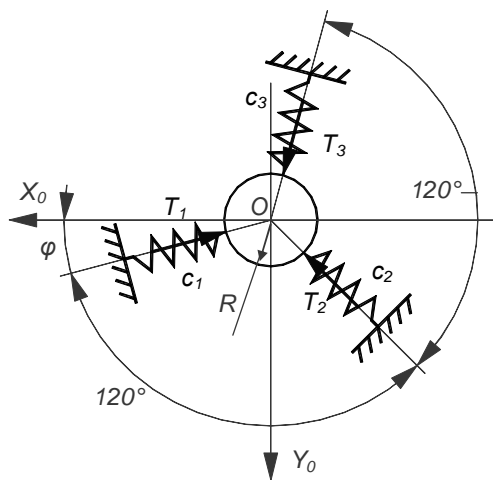


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення зміщень затискного пристрою в результаті дії нерівномірних сил затиску

Тоді за залежністю (7) елементи матриці жорсткості С:

$$c_{11} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{xk}^2 = c_1 \cos^2 \varphi + c_2 \cos^2(\varphi + 120^\circ) + c_3 \cos^2(\varphi + 240^\circ);$$

$$c_{22} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{yk}^2 = c_1 \sin^2 \varphi + c_2 \sin^2(\varphi + 120^\circ) + c_3 \sin^2(\varphi + 240^\circ);$$

$$c_{12} = c_{21} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{xk} a_{yk} = c_1 \cos \varphi \sin \varphi + c_2 \cos(\varphi + 120^\circ) \sin(\varphi + 120^\circ) + c_3 \cos(\varphi + 240^\circ) \sin(\varphi + 240^\circ)$$

Решта елементів матриці жорсткості С дорівнюють нулю.

Вихідні дані для розрахунку вектора похибок $\bar{\Delta}$

Номер опори	Точка прикладання			Вектор напрямку			Жорсткість	Момент осьової опори		
	x_k	y_k	z_k	a_{xk}	a_{yk}	a_{zk}		m_{xk}	m_{yk}	m_{zk}
1	$R \cos \varphi$	$R \sin \varphi$	0	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	0	c_1	0	0	0
2	$R \cos(\varphi + 120^\circ)$	$R \sin(\varphi + 120^\circ)$	0	$\cos(\varphi + 120^\circ)$	$\sin(\varphi + 120^\circ)$	0	c_2	0	0	0
3	$R \cos(\varphi + 240^\circ)$	$R \sin(\varphi + 240^\circ)$	0	$\cos(\varphi + 240^\circ)$	$\sin \varphi$	0	c_3	0	0	0

Система рівнянь для визначення малих лінійних і кутових зміщень внаслідок поперечного заклинювання заготовки в затискному пристрої:

$$\begin{cases} c_{11}\delta_{x0} + c_{12}\delta_{y0} = -T_1 \cos \varphi - T_2 \cos(\varphi + 120^\circ) - T_3 \cos(\varphi + 240^\circ) \\ c_{21}\delta_{x0} + c_{22}\delta_{y0} = -T_1 \sin \varphi - T_2 \sin(\varphi + 120^\circ) - T_3 \sin(\varphi + 240^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

Із цієї системи рівнянь визначаються малі лінійні зміщення деталі δ_{x0} , δ_{y0} . У разі поперечного заклинювання кутові зміщення $\alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 0$.

Вирівнювання і компенсація зусиль різання у разі багатолезової обробки на основі використання адаптивного міжінструментального зв'язку засобами керування дає змогу суттєво вплинути на деформації технологічної системи. Так, під час дволезового паралельного токарного оброблення за методом поділу подачі різці перебувають в одному перерізі зрізу, зусилля різання вирівняні й деформації власне заготовки усунуті. Тому мале лінійне зміщення для паралельної дволезової обробки, викликане деформаціями різцевих блоків під дією радіальних складових сил різання, визначають за залежністю [1]: $\delta_{x3} = P_x / 2j_{cn}$, де j_{cn} – приведена жорсткість переднього (заднього) супорта різцевого блока в радіальному напрямку (по осі X). З урахуванням залежності для радіальної складової сили різання за взаємодії різця з деталлю мале лінійне зміщення для паралельної дволезової обробки визначимо за залежністю:

$$\delta_{x3} = C_{p_y} \cdot t^{x_{p_y}} \cdot s^{y_{p_y}} \cdot V^{n_y} \cdot K_y / 2j_{cn} \quad (9)$$

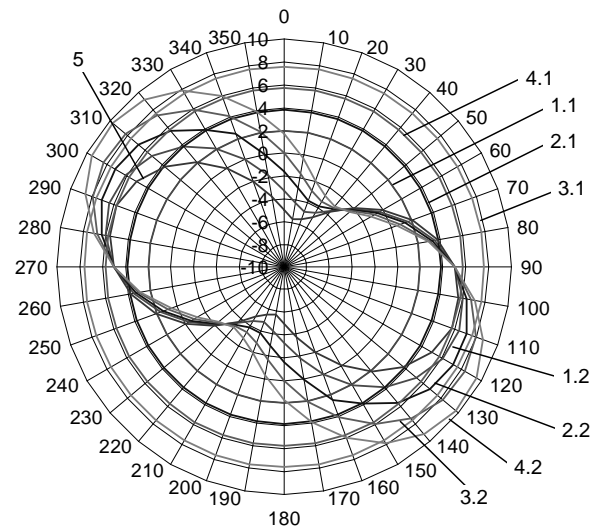
Результати моделювання впливу похибок комплексного самоналагоджувального оснащення на вихідну точність циліндричної поверхні. Точність циліндричної поверхні оцінено за відхиленням радіуса циліндра вздовж твірної за різних кутових положень затискних елементів за допомогою ЕОМ. Радіальна складова сила різання варіювалася в діапазоні від 100 до 400 Н, приведена жорсткість переднього (заднього) супорта різцевого блока в радіальному напрямку становила 30 Н/мкм, а приведені радіальні жорсткості затискних елементів були прийняті 100 Н/мкм. Розглядали два варіанти: радіальні зусилля затиску затискними елементами дорівнювали $T_1 = T_2 = T_3 = 10$ кН; радіальні зусилля затиску затискними елементами були різними, тобто $T_1 = 10$ кН, $T_2 = 9$ кН, $T_3 = 9,5$ кН (поперечне заклинювання заготовки).

У результаті моделювання встановлено, що у разі збільшення радіальної складової сили різання максимальне відхилення радіуса зростає (рис. 3), що пояснюється збільшенням малих лінійних зміщень, спричинених деформаціями різцевих блоків. Так, внаслідок збільшення P_x від

100 Н до 400 Н за рівних сил затиску максимальне значення Δr_n збільшилося із 1,9 до 7, 6 мкм, а за нерівних сил затиску – від 6,4 до 9,7 мкм. При цьому спостерігається зменшення розкиду Δr_n зі збільшенням P_x для рівномірного затискання і затискання із різними силами затиску (поперечне заклинювання). Як видно із рис. 3, нерівномірність сил затиску кулачками затискного пристрою призводить як до збільшення, так і до зменшення номінального радіуса обробки на величину Δr_n у певних кутових положеннях. Величина кута додатних і від'ємних значень Δr_n становить $\pi/2$ за відсутності сили різання. За дії сили різання P_x зменшення чи збільшення радіуса обробки на Δr_n залежатиме від різниці сил затиску кожним кулачком, що визначатиметься положенням системи затискання відносно вихідного положення.

Рис. 3. Відхилення радіуса циліндра вздовж твірної за різних кутових положень затискних елементів:

1.1, 2.1, 3.1, 4.1 – за радіальної складової сили різання відповідно 100 Н, 200 Н, 300 Н, 400 Н та рівних сил затиску кулачками $T1 = T2 = T3 = 10$ кН; 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 – за радіальної складової сили різання відповідно 100 Н, 200 Н, 300 Н, 400 Н та силах затиску кулачками $T1 = 10$ кН; $T2 = 9$ кН; $T3 = 9,5$ кН; 5 – викликане тільки затискним пристроєм за сил затискання кулачками $T1 = 10$ кН; $T2 = 9$ кН; $T3 = 9,5$ кН



Висновки

1. На основі варіаційного методу розрахунку точності машин розроблена аналітична модель, яка дала змогу оцінити вплив похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення, що виникають в результаті силової дії з боку процесу різання та сил затиску, на вихідну точність оброблюваних циліндричних поверхонь консольно закріплених деталей.
2. Отримані залежності для визначення малих лінійних зміщень і кутів повороту, викликаних поперечним заклинюванням заготовки в затискному патроні, та малих лінійних зміщень, спричинених деформаціями різцевих блоків під дією радіальних складових сил різання.
3. Отримані відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по куту повороту, що враховують малі лінійні зміщення і кути повороту, викликані поперечним заклинюванням заготовки в затискному патроні, та малі лінійні зміщення, спричинені деформаціями різцевих блоків під дією радіальних складових сил різання.
4. За результатами моделювання встановлено постійність відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі за довжиною у певних кутових положеннях затискного пристрою, що свідчить про доцільність застосування багатолезового самоналагоджувального оснащення.

1. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: монографія / [Кузнецов Ю. М., Луців І. В., Шевченко О. В., Волошин В. Н.]. – К.–Тернопіль: Тернограф, 2011. – 692 с. 2. Дванадцятий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей . – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – 216 с. 3. Базров Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с. 4. Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с. 5. Портман В. Т. Классификация и синтез расчетных моделей механики станков / В. Т. Портман // Станки и инструмент – 1988. – № 3. – С. 12–15. 6. Ивахненко А. Г. Предпроектные исследования металлорежущих систем: монография / А. Г. Ивахненко, В. В. Куц. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2013. – 188 с. 7. Зажимные механизмы и технологическая оснастка для высокоэффективной токарной обработки: монография / [Кузнецов Ю. Н., Драчев О. И., Луців І. В. и др.]; под ред. Ю. Н. Кузнецова. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 480 с.