

**Циба Т.Є.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шевченко В.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В АВТОМАТИЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

*Основний напрям, за яким зараз просувається виробництво в усьому світі, це автоматизація. Все, що раніше виконувалося самою людиною, її функції, не тільки фізичні, але й інтелектуальні, поступово переходять до техніки, яка сама виконує технологічні цикли і здійснює контроль за ними. Роль людини в багатьох галузях уже зводиться лише до контролю за автоматичним виробництвом.*

*Загалом під поняттям «управління технологічним процесом» розуміють сукупність операцій, необхідних для пуску, зупинки процесу, а також підтримки або зміни в потрібному напрямку фізичних величин. Технологічні процеси окремі машини, агрегати, апарати, пристрої, комплекси машин і апаратів, якими необхідно управляти, в автоматизації називають об'єктами управління або керованими об'єктами. Керовані об'єкти дуже різні за своїм призначенням.*

*Автоматизація технологічного процесу – це сукупність методів і засобів, призначена для реалізації системи або систем, що дозволяють здійснювати управління технологічним процесом без участі людини, або залишають за людиною право прийняття найбільш відповідальних рішень. Зазвичай у результаті автоматизації технологічного процесу створюється система управління технологічними процесами.*

*Часткова автоматизація має місце, коли в автоматичному режимі здійснюється одна операція або окремих цикл виробництва. При цьому допускається обмежена участь в ньому людини. Найчастіше часткова автоматизація має місце, коли процес протікає дуже швидко для того, щоб сама людина могла брати в ньому повноцінну участь, при цьому досить примітивні механічні пристрої, що зводяться в рух за допомогою електричного обладнання, на відміну від них, справляються.*

*Автоматизація зазвичай застосовується на вже діючому обладнанні, є доповненням до нього. Однак найбільшу ефективність воно показує, коли включено в загальну систему автоматизації з самого початку, тобто розробляється, виготовляється і встановлюється як її складова частина.*

*У цій роботі розглядається система автоматичної розмірної настройки ріжучого інструменту та підвищення точності обробки деталей в автоматичному виробництві.*

**Ключові слова:** автоматизація, автоматичне налаштування, датчик дотику, розмірне налаштування.

**Вступ.** У ході автоматичного виробництва в приладобудуванні основним параметром є точність обробки поверхні деталі, для досягнення якої встановлюються оптимальні налаштування обробки деталей. Зараз еталоном якості в цій галузі є використання верстатів з ЧПУ. Будь-який процес механообробки на верстатах супроводжується рядом похибок, що приводять до неточності виготовлення деталей.

**Постановка задачі.** Вивчивши процес обробки, можна зробити висновок, що втрати величини переміщення через наявність зазорів у ходових елементах верстата, а також втрати базових точок зміни холостих ходів супорта на робочі викликають випадкову похибку до 10 мкм за один

цикл обробки. Наявність таких значних похибок погіршує точність обробки деталей, що в разі обробки деталей підвищеної точності є просто неприпустимим.

Тому метою цієї роботи є розробка системи автоматичної корекції і налагодження верстатів з ЧПК, яка б змогла забезпечити високу точність обробки деталей, скоротити час проведення операції налагодження, зменшити кількість бракованих деталей.

### Пристрій та принцип роботи

На підставі досліджень встановлено, що дія раніше перерахованих причин похибок має незалежний характер і за величиною впливу приблизно рівна, за винятком похибки від

зношування інструментів. Більшість з факторів мають випадковий характер, і викликані ними похибки мають підсумуватися як випадкові величини. Тому сумарну величину похибки виготовлення деталей на верстатах з ЧПК можна оцінити приблизно по формулі:

$$\delta_{\Sigma} = (\overline{\delta_0} + \overline{\delta_{вим}} + \overline{\delta_{\rho}}) + \sqrt{K_1^2 \delta_{cm}^2 + K_2^2 \delta_{noz}^2 + K_3^2 \delta_{n.o}^2 + K_4^2 \delta_{\rho}^2}, \quad (1.1)$$

де  $\delta_i$  – полігон розподілу похибок або їх можливі максимальні відхилення зумовлені дослідженнями; перша сума похибок у дужках – сума систематичних похибок, що мають певний вектор напрямку; сума під коренем являє собою сумарний випадковий складник похибки;  $K_1, K_2$  і т.д. – коефіцієнти обліку закону розподілу похибок.

Зважаючи на те, що ГВС в основному застосовуються в дрібносерійному й серійному виробництві, де під час виникнення випадкових похибок проявляються асиметричні закони їхнього розподілу, коефіцієнти  $K_1, K_2, \dots, K_n$  можна приймати рівними 1,25. Тоді:

$$\delta_{\Sigma} = (\overline{\delta_0} + \overline{\delta_{вим}} + \overline{\delta_{\rho}}) + K \sqrt{\delta_{cm}^2 + \delta_{noz}^2 + \delta_{n.o}^2 + \delta_{\rho}^2} \quad (1.2)$$

Зіставляючи вираження похибок будь-якого циклу роботи ГВС і сумарної похибки (1.2) [9], можна уточнити похибку обробки на  $i$ -му циклі.

Похибка налагодження:

$$\overline{\delta_0} = \overline{\delta_{вим}} + \overline{\delta_{n.o}}. \quad (1.3)$$

Похибка від зношування інструмента  $\overline{\delta_{вим}} = m_i + a_i$ , де  $m$  – число відпрацьованих циклів даним інструментом.

Похибка установки інструмента в робоче положення для різання:

$$\overline{\delta_i} = (\overline{\delta_{cm_i}} + \overline{\delta_{noz_i}} + \overline{\delta_{\rho_i}}) \quad (1.4)$$

Похибка самого процесу різання:

$$\overline{\varepsilon_i} = \overline{\delta_{n.o_i}} + \overline{\delta_{\rho_i}}. \quad (1.5)$$

На підставі отриманих висновків можна одержати вираження для визначення поточної похибки обробки на  $i$ -му циклі:

$$\delta l_i = (\overline{\delta_{вим}} + \overline{\delta_{n.o}}) + m_i a_i + (\overline{\delta_{cm}} + \overline{\delta_{noz}} + \overline{\delta_{\rho}})_i + \overline{\delta_{n.o_i}} + \overline{\delta_{\rho_i}}. \quad (1.6)$$

Оскільки величина  $\delta l$  по всій довжині деталі різна, за характеристику точності береться її максимальне значення. Точність процесу обробки звичайно оцінюється відносною похибкою:

$$\delta_{від} = \delta l / l_0. \quad (1.7)$$

Якщо як приклад утворення такої похибки обробки розглянути процес точіння деталі на ГВС, то похибка отриманого діаметра деталі характеризується відхиленням дійсного радіуса  $R_d$  від номінального  $R_0$ , яке, відповідно, буде:

$$\delta R = R_0 - R_d. \quad (1.8)$$

У той же час дійсне значення розміру  $R_d$  є не постійним в різних місцях деталі й може бути виражене так:

$$R_d = \rho_{cp} + \delta \rho(z) + \delta \rho(\psi), \quad (1.9)$$

де  $\rho_{cp}$  – середній радіус-вектор дійсного розміру, характеристика середнього значення профілю деталі як результат рівня установки інструмента під час цього циклу проходить спочатку обробку розглянутої поверхні;  $\delta \rho(z)$  і  $\delta \rho(\psi)$  – векторні збільшення дійсного радіуса-вектора по довжині деталі (уздовж осі  $Z$ ) і по куту її повороту у поперечному перерізі.

Зміна розміру  $R_d$  по ходу обробки проявляється у вигляді різних геометричних відхилень формованої поверхні від ідеальної циліндричної: хвилястість, гранність, овальність, конусність, бочкоподібність й інші похибки форми (ДЕРЖСТАНДАРТ 24642-81).

Різниця номінального і середнього дійсного розмірів

$$R_0 - \rho_{cp} = \delta_R \quad (1.10)$$

являє собою детермінований постійний складник похибки обробки цієї поверхні, а величина  $\delta_R$  – її змінні складники.

Відповідно до сталого поняття отриманий після обробки профіль поверхні деталі є результатом сумарного впливу на нього як попередньо встановлених під час настроювання устаткування певних організаційно-керуючих параметрів процесу обробки, обраних по величині з умови одержання найвищої його точності, так і такі, що завжди мають місце і обурюють шкідливі фактори, що погіршують точність обробки. Вплив таких факторів під час проведення процесу обробки має різний характер. Частина з них робить систематичний вплив, що обурює, на процес формування профілю деталі й викликає детерміновану складову похибку, а інші мають змінний або стохастичний характер [3].

Виходячи із цих передумов і враховуючи, що вплив змінних факторів викликає різні гармонійні коливальні переміщення вершини інстру-

мента в пружній технологічній обробній системі, отриману й утворену з погрішностями поверхні деталь можна представити у вигляді гармонійного ряду Фур'є. Вираження утворюючої циліндричної поверхні деталі уздовж її осі Z при гострінні, або траєкторія переміщення вершини різця щодо деталі буде мати вигляд:

$$X(z) = X_{cp} + \sum_1^n \delta X_k \cos(k\varphi + \varphi_k), (k = 1, 2, \dots n), \quad (1.11)$$

де  $X(z)$  – поточна координата профілю деталі або вершини інструмента під час роботи уздовж осі Z – Z ;  $X_{cp}$  – середня лінія профілю як рівень настроювання інструмента на даному циклі;  $\delta X_k$  – різні гармонійні зміни координати від різних, що обурюють, n гармонік, які сумовуються у порядку убування ступеня впливу або зростання порядкового номера гармоніки k ;  $\varphi_k$  – початкові фазові зрушення гармонік.

Описати прямолінійну утворюючої поверхні обробленої деталі або траєкторію переміщення вершини обробного інструмента щодо деталі по координаті X уздовж її осі Z – Z можна за допомогою ряду Тейлора. Розкладаючи рівняння прямої лінії в ряд Тейлора, у першому наближенні одержуємо:

$$X(z) = X_0 + z \tan \alpha + \delta X_0 + \delta z \tan \alpha + \frac{z\delta\alpha}{\cos^2 \alpha}, \quad (1.12)$$

де  $(X_0 + Z \tan \alpha)$  – нульовий член ряду, що відображає номінальне значення одержуваного розміру на початку деталі, і його подальша зміна уздовж її осі Z, якщо  $\alpha \neq 0$ . При  $\alpha > 0$  можна одержати конусну поверхню й т.д.;  $\delta X_0$  – систематична похибка процесу як зсув рівня настроювання, або похибка позиціонування вершини інструмента в початкових умовах даного циклу;  $\delta Z \tan \alpha$  відхилення профілю як змінний, монотонно мінливий складник похибки, що викликає неузгодженість необхідної лінії профілю з дійсною його траєкторією при  $\alpha \neq 0$ ;  $z\delta\alpha/\cos^2 \alpha$  періодична похибка як різні відхилення профілю по куту  $\alpha$ , що приводять до утворення випадкових похибки і похибки форми: хвилястість, гранність і так далі.

Якщо в даній операції виробляється одночасно й обробка торця (попереднє його підрізування для створення вихідної вимірювальної бази, що звичайно робиться під час роботи на верстатах ГВС), то у рівняння можна включити додаток  $X\delta\alpha/\sin^2\alpha$  як член ряду, що враховує биття даного торця за наявності перекосу осі деталі в момент її закріплення у верстаті.

Наведені вираження (1.11) і (1.12) хоча й дають можливість одержувати математичну модель тра-

єкторії переміщення вершини інструмента, але не розкривають структури виробничої похибки, що утворюється. Розглянемо утворення такої похибки по стадіях роботи ГВС в умовах виробництва.

Загальну похибку обробки  $\delta L$  якого-небудь розміру на ГВС як відхилення від номіналу  $L_0$  виходить на i-м циклі, можна представити у вигляді:

$$\delta l_i = \delta l_0 + \delta_i, \quad (1.13)$$

де  $\delta L_0$  – детермінований постійний складник похибки, зумовлений загальним зсувом вихідного настроєчного розміру  $L_n$  на дану обробку щодо номіналу  $L_0$  під час попереднього настроювання верстата на операцію

$$\delta l_n = l_0 - l_n, \quad (1.14)$$

розглянуту тут як вихідний рівень відхилення початку процесу механообробки партії деталей, зумовленого характеристиками процедури настроювання ГВС на виробництві.

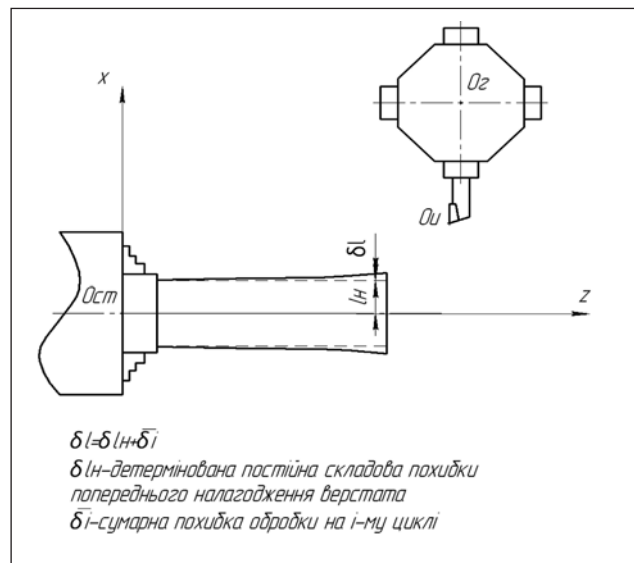


Рис. 1. Похибка виготовлення деталі точінням на ГВС

У цьому випадку це методичний структурний складник загальної похибки, що зумовлена методикою настроювання верстатів, і похибкою настроювання їх на розмір;  $\delta_i$  – загальна похибка обробки i-го циклу як сумарна поточна змінна похибка даного процесу (рис. 1) [2].

За багаторазового відтворення процесу обробки розглянутої поверхні деталей на ГВС завжди виникає змінна похибки  $\lambda_i$  установки робочої вершини інструмента на вихідну позицію перед початком кожного циклу як зсув рівня настроювання  $L_{ni}$  з первісного:  $L_n$  :

$$\bar{\lambda} = L_n - L_{ni} \quad (1.15)$$

У процесі проведення самої механообробки завжди виникає похибка обробки – змінний складник  $\varepsilon_i$ , характерний для даного циклу як випадковий складник процесу. Причинами появи цього складника є пружні деформації технологічної системи через періодичну зміну сил різання, вібраційні явища, що супроводжують цей процес, тощо. Тоді поточна похибка  $i$ -го циклу [3]

$$\bar{\Delta}_i = \bar{\lambda}_i + \bar{\varepsilon}_i \quad (1.16)$$

Якщо проаналізувати похибку  $\bar{\lambda}_i$ , то можна зробити висновок, що зсув рівня установки вершини обробного інструмента від первісного рівня настроювання відбувається за рядом причин. Так, під час механообробки завжди існує знос інструмента, величина якого може порівняно швидко досягти значення допуску на деталь, оброблювану на даній операції, при збереженні інструментом своєї працездатності. Таке розмірне зношування інструмента має пряму залежність від числа проведених циклів обробки й може залежно від параметрів процесу бути охарактеризоване певним систематичним збільшенням – трендом  $\bar{\alpha}_i$  як характеристикою зношування інструмента за один цикл.

Одночасно під час механічної обробки в зоні різання виникають різні теплові процеси через інтенсивне тертя інструмента й деталі, а також у місцях тертя рухливих елементів верстата, теплові потоки викликають температурні деформації системи, міняючи взаємне розташування елементів обробної системи, і вносить тим самим додаткові похибки.

Установка різального інструменту в певну позицію – стартову точку на початку кожного циклу – супроводжується завжди зсувами через неточність спрацьовувань системи переміщень робочих органів верстата, їхніх пружних деформацій у крапках стику й наявності зазорів.

Ці причини викликають змінну похибку установки інструмента у робоче положення  $\delta_i$ , що має нелінійну за часом залежність. Тоді загальна сумарна похибка обробки буде мати структуру на кожному циклі:

$$\delta l_i = \Delta_0 + \bar{\alpha}_i + \bar{\delta}_i + \bar{\varepsilon}_i, (1 < i \leq n), \quad (1.17)$$

де  $\bar{\lambda}_i = \bar{\alpha}_i + \bar{\delta}_i$  – погрішність настроювання обробної системи на  $i$ -м циклі роботи.

Як видно з отриманих рівнянь, величина похибки може бути істотною, що вимагає вжи-

вання певних заходів з підвищення точності процесу обробки на ГВС, розробки і впровадження методів керування якістю процесу.

Існує кілька методів такого керування якістю, які можна віднести до трьох напрямів:

1. Попереднє цілеспрямоване варіювання параметрами процесу механообробки під час проектування технологічного процесу. До таких заходів можна віднести підбір відповідних режимів обробки; певної схеми обробки; відповідної схеми закріплення заготовки на верстаті; найбільш підходящої послідовності переходів і проходів; більше жорстких баз тощо.

Але цей метод пасивного керування якістю малоефективний, оскільки ґрунтується на малодостовірних, апріорних даних без обліку реальних умов обробки.

2. Керування якістю за рахунок періодичного введення в процес обробки коригувального керуючого впливу – вектора, що компенсує похибку під час допомоги керуючої програми ЧПК.

Знаючи структуру технологічної похибки (1.6) і встановивши деякі величини її складників для різних варіантів роботи ГВС, можна розробити відповідну модель зміни такої похибки по ходу процесу обробки партії деталей і створити алгоритм введення у КП певного вектора компенсації для підвищення вихідної точності. Такий метод зараз широко застосовується на ряді виробництв. Він ефективніше попереднього пасивного методу, ставиться до активних методів, але точність спрацьовування не завжди висока і надійність забезпечення точності не гарантована, оскільки такий метод не враховує реальної ситуації процесу різання, маючого часто різкі і досить значні відхилення від середньостатистичних норм.

3. Активне керування якістю за рахунок розробки і впровадження автоматичних систем керування характеристиками механообробки. За своїми можливостями вони підрозділяються на наступні види:

- а) системи керування точністю обробки;
- б) системи торкання, що визначають момент початку обробки під час торкання інструмента і деталі;
- в) системи автоматичного розмірного настроювання різального інструменту на верстаті;
- г) системи визначення попереднього стану процесу обробки, що страхують ГВС від великих поломок;
- д) системи автоматичної діагностики процесу механообробки визначальний ступінь працездатності й надійності процесу;

е) адаптивні системи самонастроювання і саморегулювання, що працюють за оптимальним алгоритмом точності й надійності процесу механообробки, включаючи і його постійну діагностику [3].

**Висновки.** Як показує практика, перші системи більш прості, але їхні можливості обме-

жені. Останні системи більш універсальні, мають більші можливості, але засоби їхньої реалізації вимагають глибокого пророблення інформативності параметрів процесу, їхнього дешифрування й розробки на цій основі складних алгоритмів керування за допомогою процесорної техніки.

#### Список літератури:

1. Остаф'єв В. А., Тимчик Г. С., Шевченко В. В. Адаптивна система управління. *Механізація і автоматизація управління*. Київ, №1, 1983. с. 18–20.
2. Шевченко В. В. Контроль стану ріжучого інструменту з допомоги електричних сигналів. *Збірник наукових праць V науково-технічної конференції Приладобудування: можливості та перспективи*. (Київ, 25–26 квітня 2006 р.). Київ, 2006. С. 112–113.
3. Шевченко В. В. Система контролю процесу обробки деталей в умовах «безлюдній технології» / В. В. Шевченко, І. В. Капінос, Д. О. Грабовський. *Прогресивні технології і прилади*. Луцк. 2011. С. 142–143.

#### Tsiba T.E., Shevchenko V.V. INCREASING THE ACCURACY OF PARTS WORKING IN AUTOMATIC MANUFACTURING

*The main direction in which production is being promoted worldwide is automation. Everything that was previously performed by the man himself, his functions, not only physical but also intellectual, are gradually moving to technology, which itself performs technological cycles and exercises control over them. The role of man in many industries is now limited to the control of automatic production. In the general case, the term “process control” refers to the set of operations required to start, stop the process, as well as maintain or change in the desired direction of physical quantities.*

*Processes separate machines, units, apparatus, devices, complexes of machines and apparatus that need to be managed, in automation are called control objects or managed objects. Managed objects are very different in purpose. Process automation is a set of methods and tools designed to implement a system or systems that allow you to manage the process without human involvement, or leave the person the right to make the most responsible decisions. As a rule, as a result of process automation, a process control system is created. Partial automation occurs when one operation or a separate production cycle is performed in automatic mode. However, a limited participation of a person is allowed.*

*Often, partial automation takes place when the process is very fast in order for the person himself to be able to participate fully in it, with rather primitive mechanical devices being propelled by electrical equipment, unlike them coping. Automation, as a rule, applies to existing equipment, is an addition to it. However, it is most effective when it is included in the overall automation system first – immediately developed, manufactured and installed as part of it. This paper discusses the system of automatic dimensional adjustment of the cutting tool and improving the precision of machining of parts in automatic production.*

**Key words:** Automation, auto tuning, touch sensor, dimensional tuning.