

УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ОБРОБКИ В ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

Пуховський Євген Степанович

доктор технічних наук

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

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7843-0922

puhovskije50@gmail.com

Фролов Володимир Костянтинович

кандидат технічних наук

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

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-3697-286X

v.k.frolov@gmail.com

Приходько Василь Петрович

кандидат технічних наук

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

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-1852-3777

privas0718@gmail.com

Бецко Юрій Михайлович

старший викладач

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

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-7283-2207

betsko.uri@gmail.com

На сучасних верстатах з ЧПК, які становлять основу технологічного обладнання гнучких виробничих систем (ГВС), вирішені проблеми автоматизації практично всіх операцій, окрім операцій первинного налаштування інструменту та коректування його рівня. Необхідність організації в складі ГВС окремих постів для налаштування інструменту, базування та закріплення деталей в значній мірі перешкоджає переходу до безлюдного виробництва. В цих умовах наймовірнішими постають проблеми створення системи автоматичного управління точністю обробки (САУТО) в ГВС (Balakshin B.S. (1973); Nevelson M.S. (1982); Solomentcev U.M., Basin A.M., (1974); *International Journal of Automation Technology*, (2014)).

В промисловості накопичено значний досвід створення САУТО при обробці на універсальних верстатах і, особливо, на верстатах для фінішних операцій. Розповсюдження цього досвіду на дрібносерійне виробництво, де використовуються верстати з ЧПК, стримується труднощами створення ефективних вимірювальних пристроїв для фіксації первинної інформації та приладів перетворення одержаних сигналів. В якійсь мірі ці труднощі долаються за рахунок використання датчиків контакту, лазерної техніки та мікропроцесорів, здатних приймати та перетворювати первинні сигнали управляючого впливу на процес обробки (Komissarov V.I., Leontiev V.P., (1985); Sveda J., (2022)).

Відомо, що процес механічної обробки зазвичай не може бути описаним детермінованими методами, тому що характеристики вхідних сигналів технологічної системи не тільки змінюються в часі, але й залишаються неконтрольованими (Dushinsky V.V., Puhovsky E.S., Radchenko S.G., (1977); Puyovsky E.S., (2021); Antony Swic, (2014)). Тому синтез САУТО для таких нестабільних процесів повинен виконуватись з урахуванням статичної нестійкості, що породжує невизначеність. В цих умовах надзвичайно актуальною є проблема створення таких адаптивних систем управління точністю обробки, які спроможні змінювати структуру управління в залежності від результатів поточної оцінки якості управління.

В статті поставлено завдання розробки структури САУТО, визначення параметрів управління, каналів зворотного зв'язку та шляхів забезпечення заданої точності обробки.

Мета роботи: Розробка автоматизованої системи управління точністю обробки в умовах взаємопов'язаного програмно-керованого обладнання гнучких виробничих систем.

Ключові слова: точність, управління, критерій, гнучка виробнича система, механічна обробка, адаптивна система.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.8>

Викладення основного матеріалу. Головною метою САУТО є зменшення відхилень від заданих розмірів та форми оброблюваних заготовок. Передбачення очікуваного відхилення розмірів та введення поправки на взаємне розташування деталі та інструменту згідно цього передбачення дозволяє ліквідувати відхилення та виключити брак при обробці деталі. Помилки в передбаченні похибок обробки в основному пов'язані з їх стохастичною природою. В реальних умовах практично всі фактори, які впливають на відхилення розмірів, змінюються в процесі обробки деталі випадковим чином. Основними причинами цієї зміни є знос механізмів, неоднорідність матеріалу заготовки, знос інструменту, нестационарність механізмів верстата та процесу різання. Таким чином при дослідженні динамічних властивостей верстатів та при створенні динамічної моделі обробки необхідно розглядати цю систему з урахуванням випадкового та невизначеного характеру факторів, що впливають на точність обробки. Нестационарні процеси різання найпростіше реалізуються на верстатах з ЧПК, які забезпечують обробку з режимами, які змінюються по заданим законам. Адаптивне різання забезпечує оптимізацію процесу за рахунок режимів обробки в залежності від конкретних умов формування в кожній точці оброблюваної деталі.

В залежності від типу управляючого впливу САУТО можуть бути поділені на три види: стабілізуючі системи, які підтримують постійний управляючий параметр системи різання; програмні системи, які змінюють управляючий параметр у відповідності з заданою закономірністю та слідкуючі системи, що змінюють управляючий параметр в залежності від невідомого наперед значення змінної величини на вході автоматичної системи (Balaksyin B.S., (1973); Makarov I.M., Rakhmankulov V.Z., Nazareto V.M., (1986); Qingchun, Qinghua, (2020)).

При розробці САУТО найважливішим є вибір критерію оптимальності, який забезпечує найбільш просту та ефективну схему регулювання. Автоматичне регулювання дозволяє отримати максимальну продуктивність при допустимих значеннях параметрів точності та якості поверхні. Реалізація систем управління по економічним критеріям дуже складна, тому в якості регулюючого параметра приймають один з фізичних показників процесу різання. Розповсюджені системи, які регулюють процес різання шляхом зміни подачі або швидкості різання в залежності від зміни сили різання, крутного моменту на шпинделі верстата, температури в зоні різання, ефективної потужності приводу, вібрацій в динамічній системі, рівня шуму, силових навантажень на підшипникові вузли шпинделя і т. і.

Багатофакторний характер процесів в зоні різання не дозволяє отримати один універсальний критерій для всіх операцій та видів обробки. Але для певного типу операцій, діапазону первинних параметрів один з показників може з деякою похибкою відображати сукупність дій багатьох фізичних явищ та застосовуватись як критерій автоматичного регулювання. Зазвичай використовують узагальнений критерій, який може бути представлений в наступному виді:

$$K = \min \sum d_i (G_i - G_{i \text{нк}}) / (G_{i \text{нг}} - G_{i \text{нк}})$$

де $G_{i \text{нк}}$, $G_{i \text{нг}}$ – найкраще та найгірше значення G_i якості виконання операції при наявності тільки лінійних обмежень; d_i – вагові коефіцієнти.

Такі залежності дозволяють визначити фізичні критерії по основним показникам вторинних параметрів, таких як точність обробки, якість поверхні та стійкість інструменту. Найчастіше в якості параметра регулювання вибирають одну зі складових сили різання, температуру в зоні різання або пружні деформації системи верстата. Універсальним є економічний критерій, проте представити всі умови обробки деталі через цю функцію неможливо. Тому поряд з критерієм оптимізації в адаптивну систему вводять визначені для конкретної оброблюваної деталі та обладнання технічні обмеження.

Імовірнісний характер процесу механічної обробки, отримання точності та шорсткості поверхні дає можливість вибирати в якості законів зміни управляючих критеріїв стохастичні моделі, отримані на основі експериментальних досліджень. В промисловості накопичено величезний досвід по статистичним дослідженням оброблюваності різних матеріалів, вивченню способів та засобів отримання точності і якості поверхні. Використання таких моделей, як математичного забезпечення адаптивних систем управління точністю обробки надзвичайно ефективне.

Впровадження числового управління верстатами викликало появу пошукових адаптивних систем, які забезпечують в результаті автоматичного пошуку економічно оптимальних умов різання по всій довжині обробки деталі. Пошукова система визначає швидкість зносу інструменту, виконує статистичну обробку даних, обчислює оціночну функцію оптимальності і перебирає можливі поєднання параметрів режимів різання з метою знаходження екстремальних. На основі цього виконується управління приводами верстата.

Системи автоматичного регулювання процесом різання підтримують постійними оптимальні умови виготовлення деталі (без участі оператора), чи змінюють по заданому закону один або кілька параметрів обробки. Оптимізація процесу різання забезпечує екстремум одного із вторинних параметрів при досягненні допустимих значень основних. В багатьох випадках є ефективним застосування системи адаптивного управління з одночасним регулюванням кількох параметрів. В такій системі канали регулювання впливають один на одного, а управління процесом різання полягає у виборі критерія оптимальності, найважливішого для оптимізації процесу різання.

При адаптивному управлінні з метою підвищення точності обробки регулюють розмір статичного налагодження та стабілізують розмір його динамічного компонента. Поправку на розмір динамічного налагодження вносять шляхом зміни режимів різання, а саме подачі інструмента, жорсткості пружної системи верстата, геометрії різця, що дозволяє підвищити точність і продуктивність обробки. В САУТО верстатів з ЧПК велику увагу приділяють пошуку надійних та універсальних рішень

для вимірювальних пристроїв і значно менше – алгоритмам перетворення результатів вимірювання в коригуючі сигнали. Використання мікропроцесорної техніки робить задачу алгоритмічного забезпечення автоматичного управління точністю на верстатах з ЧПК дуже актуальною, тому що мікропроцесори дають можливість використання найбільш ефективних алгоритмів САУТО без додаткового ускладнення, як пристроїв ЧПУ, так і САУТО. В цьому полягає основна особливість управління точністю на верстатах з ЧПУ (Poduraev V.N., (1977); Timiriazev V.A., (1983)).

При обробці деталей в ГВС малими партіями необхідно мати в складі САУТО універсальний вимірювальний пристрій, що здатен доставляти всю інформацію про розміри і форму заготовок та деталей на будь-якому етапі обробки. Вимірювання деталей в ГВС проводять або без зняття деталі з верстата, поза процесом різання, або зі зняттям деталі з верстата – на спеціальній вимірювальній позиції та в процесі різання. Найчастіше використовують вимірювання без зняття деталі з верстата шляхом виділення в технологічному процесі контрольної операції. У такому випадку верстат з ЧПУ перетворюється у вимірювальну машину. Датчик контакту, який використовується для вимірювання, зберігається в інструментальному магазині, має стандартний конічний хвостовик, за допомогою якого він закріплюється в шпинделі верстата по команді пристосування ЧПУ (ПЧПУ) при виконанні контрольної операції.

Основною метою вимірювання деталі або інструменту є забезпечення точності виготовлення деталі або партії деталей. Ефект від використання САУТО залежить від точності вимірювання відхилення розміру в процесі обробки. Корекція положення інструмента розраховується до початку циклу обробки по результатам вимірювання раніше оброблених деталей. Точність корекції залежить від параметрів технологічного процесу, від досконалості алгоритмів обчислення корекцій та від точності вимірювання індикатором контакту. Цикл управління точністю закінчується автоматичним внесенням перед обробкою наступної деталі розрахованої корекції в управляючу програму. Застосування мікропроцесорів та універсальних первинних датчиків в умовах малосерійного багатонаменклатурного виробництва дозволяє звести задачу побудови САУТО для верстатів з ЧПУ до розробки математичного забезпечення управління точністю. Вибір операцій, які реалізують автоматичне управління точністю обробки, та їх послідовність визначаються кількістю деталей в партії, вимогами до точності форм і розмірів деталей, способом базування та параметрами технологічної системи.

При створенні програм корекції повинна враховуватись достовірна апіорна інформація, пов'язана, наприклад, з характеристиками Жорсткості оброблюваних деталей та вузлів верстата, систематичними похибками в кінематичній системі верстата, зміною розмірного зносу інструменту та таке інше.

Розробка математичного забезпечення управління точністю вимагає побудови математичних моделей залежності точності від технологічних факторів (Dushin-

sky V.V., Puhovsky E.S., Radchenko S.G., (1977); Reshetov D.N., Portman V.T., (1986)). Моделі використовуються для розробки алгоритмів обчислення корекції по результатам вимірювань. Алгоритм функціонування системи управління точністю є формалізоване представлення процесів управління, в тому числі процедури вибору оптимальної послідовності операцій управління. Математичне забезпечення управління точністю дозволяє значно розширити можливості систем автоматичної підготовки управляючих програм та поліпшити якість самих програм.

Досягнення точності обробки деталей в ГВС залежить від різноманітних розмірних зв'язків, які визначають взаємне статичне та динамічне положення деталі і вузлів технологічного обладнання. До технологічних завдань управління точністю обробки в ГВС відносяться контроль за ходом виконання технологічного процесу і управління точністю обробки деталей на основі корекції відхилень, статичне та динамічне налаштування технологічної системи, управління процесами різання в процесі обробки з урахуванням стану верстата, інструмента, заготовки та характеру процесу різання, автоматичне визначення стану ріжучого інструменту і необхідності його заміни; діагностика ріжучого інструменту та стану металорізального і транспортного обладнання.

Точність обробки в ГВС у великій мірі визначається складною системою просторових зв'язків, які формуються на різних етапах технологічного процесу при проходженні деталі по позиціям обробного обладнання. Формування розмірних зв'язків починається на етапі установки та базування на супутник транспортної системи. Розмірне налагодження верстата полягає в досягненні необхідної точності відносного положення деталі, інструмента, супутника і пристосування в координатній системі верстата. Управління позиційними зв'язками верстатів дозволяє суттєво підвищити точність обробки шляхом компенсації просторових відхилень, зумовлених геометричною точністю обладнання та інших систематичних факторів, що виникають в процесі обробки.

На етапі статичного налагодження при створенні управляючої програми, коли відсутні теплові і динамічні деформації та навантаження, відхилення виконавчих органів верстата визначається в основному точністю їх виготовлення та позиціонування. Досягнення необхідного розміру статичного налагодження забезпечується шляхом одночасного переміщення кількох вузлів верстата по різним управляючим координатам. Проте, в будь-якій точці робочої зони верстата мають місце просторові відхилення, зумовлені похибкою геометричної точності обладнання. Ці відхилення формуються на етапі статичного налагодження в процесі позиціонування робочих органів верстата у відповідності з заданою управляючою програмою. Компенсація похибок статичного налагодження верстата здійснюється шляхом введення в управляючу програму корекції по відповідним координатам верстата. Корекції можуть також бути введені в управляючу програму для компенсації любых похибок, що виникають в процесі обробки. При цьому корекція вноситься в програму безпосередньо перед обробкою наступної деталі. Такий спосіб корек-

ції дозволяє оперативно по ходу обробки вносити зміни в текст любого кадру програми управління верстатом. При цьому корекція повинна виконуватись таким чином, щоб не порушувати неперервність процесу обробки. При розробці програми корекції враховуються функціональні коефіцієнти, які визначають вплив поточних координат на величину корекції, характеристики відхилень, породжених тепловими деформаціями та розмірним зносом інструменту, а також похибки установки деталі, супутника та інструмента. Інформацію отримують від датчиків, які визначають поточні розташування інструмента, супутника та деталі.

Управління позиційними зв'язками дозволяє підвищити точність статичного налагодження верстатів з ЧПУ, а використання мікропроцесорів дає можливість реалізувати цей спосіб управління у вигляді програмної процедури корекції.

В процесі обробки деталі на верстаті виникають похибки динамічного налагодження, які проявляються в зміщенні координатної системи верстата, що пов'язана з поверхнями ріжучого інструменту. Сили різання та сили інерції разом з силами закріплення деталі та інструменту створюють систему динамічних технологічних розмірних зв'язків. В результаті взаємодії цих сил відбувається зміна положення допоміжних баз деталей. Ці зміни визначають просторові відхилення вузлів пружної системи верстата, що в значній мірі впливає на точність обробки. Управління технологічним процесом на етапі динамічного налагодження передбачає рішення комплексу задач, пов'язаних з управлінням точністю обробки, регулюванням режимів різання, визначенням стану ріжучого інструменту та моменту його заміни. Найбільш ефективно рішення вказаних задач здійснюється шляхом адаптивного управління. Як правило, управління режимами обробки забезпечує стабілізацію зусиль в силових вузлах верстата та зменшує відхилення розміру динамічного налагодження в 1,5 – 2 рази (Timiriazev V.A., (1983)).

Обробка деталі в ГВС, обладнання якої пов'язано між собою функціонально, відрізняється додатковими складнощами в порівнянні з окремо працюючим верстатом. Для досягнення точності обробки на взаємопов'язаному обладнанні ГВС необхідні додаткові заходи, які враховують особливості гнучкого виробництва. В ГВС базування деталей виконується на спеціальних пристроях – супут-

никах, разом з якими деталь переміщується між технологічним обладнанням. Значна кількість супутників, працюючих одночасно в ГВС породжує проблеми їх точного повторного базування на столах різних верстатів. Виникаючи при цьому похибки залежать не тільки від точності позиціонування супутників, але і точності їх виготовлення. Додатковими джерелами, що розширюють поле розсіювання похибок установки супутників, є постійна зміна місця базування супутника, забруднення та знос направляючих елементів, використання нераціональних схем базування. Супутники повинні зберігати зносостійкість базуючих поверхонь на протязі довгого часу. Для усунення деяких з вказаних похибок сучасні конструкції супутників виконуються з гладкими прямолінійними поверхнями, за рахунок чого спеціальні очищувачі, розташовані на супутнику, можуть якісно очистити базові поверхні стола верстата. З цією метою використовують обдув місць базування стисненим повітрям або омивання фільтрованою змащувально-охолоджуючою рідиною. Щоб уникнути вказаних недоліків стараються обробити заготовку з одної установки при базуванні її по необробленим поверхням. При цьому заготовка закріплюється на супутнику і разом з ним переходить від верстата до верстата.

Технологічні процеси в ГВС повинні будуватися на типових технологічних схемах обробки елементів форми, які обробляються по стандартним циклам. При виборі послідовності стандартних циклів необхідно приймати до уваги досягнення необхідної точності та скорочення затрат допоміжного часу на заміну інструменту.

Висновки. На основі досліджень розроблена автоматизована система управління точністю обробки на верстатах з ЧПК у складі гнучких виробничих систем. Визначені параметри системи управління та канали зворотнього зв'язку для забезпечення заданої точності обробки на обладнанні ГВС. Беручи до уваги багаточисельні похибки процесу різання, похибки повторного базування супутників та ріжучого інструменту, точність його налагодження, можна стверджувати, що на взаємопов'язаному обладнанні ГВС точність обробки буде значно менше, ніж на окремо працюючих верстатах. Застосування різних заходів, які зменшують сумарні похибки обробки, а також використання адаптивних систем управління точністю дозволяє отримувати деталі високої точності в автоматичному циклі обробки

Бібліографічні посилання:

1. Adaptivnoe upravlenie stankami (1973), (pod redaktsiyei B.S. Balakshina). [Adaptive management of machines]. М., Mashinostroenie, – 688 s., (In Russian).
2. Dushinskiy V.V., Puhovskiy E.S., Radchenko S.G.,(1977), Optimizatsiya tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii. [Optimization of technological processes in mechanical engineering]. К., Tekhnika, – 176 s. (In Russian).
3. Komissarov V.I., Leontiev V.P., (1985), Tochnost, proizvoditelnost i nadegnost v sisteme proektirovaniya tehnologicheskikh protsessov. [Accuracy, performance and reliability in the process design system]. М., Mashinostroenie, 225 s. (In Russian).
4. Nevelson M.S., (1982), Avtomaticheskoe upravlenie tochnosti obrabotki na metalloregutzhich stankah. [Automatic control of machining accuracy on metal-cutting machines]. – L., Mashinostroenie, – 176 s. (In Russian).
5. Poduraev V.N., (1977), Avtomaticheskii reguliruemie i kombinirovannie protsessi rezaniya. [Automatic control and combined cutting processes]. – М., Mashinostroenie, – 304 s. (In Russian).
6. Puhovskiy E.S., (2021), Proektuvannia verstatnikh system gnuchkogo virobnitstva. [Design of machine systems of flexible production]. К., NTUU (KPI), – 222 s. (In Ukrainian).

7. Reshetov D.N., Portman V.T., (1986), *Tochnost metallorezguztih stankov.* [Precision of metal-cutting machines]. M., – Mashinostroenie, – 336 s. (In Russian).
8. Solomentzev U.M., Basin A.M., (1974), *Optimizatsiya protzessa obrabotki s pomotzu adaptivnogo upravleniya iznosom instrumenta.* [Optimization of the machining process with adaptive tool wear control]. – *Stanki i instrument* No. 8. s. 21–22. (In Russian).
9. Timiriazhev V.A., (1983), *Upravlenie tochnosti gibkikh tekhnologicheskikh system.* [Precision management of flexible manufacturing systems]. – M., NIIMASH, 63 s. (In Russian).
10. *Upravlenie robototekhnicheskimi sistemami i avtomatizirovannimi proizvodstvami.*, (1986), [Control of robotic systems and automated production]. – Makarov I.M., Rakhmankulov V.Z., Nazaretov V.M. i dr. M., *Vissaya shkola.*, 160 s. (In Russian).
11. Antoni Swic., (2014), *Accuracy Control in Machining of Low Rigidity Shafts.* *Applied Mechanics and Materials.* (Vol 613) pp. 357–367.
12. G 187 Accuracy Control (Group 00), HAAS F1 Team, (2018), *Official Machine Tool.*
13. *In-Process and On-Machine Measurement of Machining Accuracy for Process and Product Quality Management.*, (2014), A Rewier. *International Journal of Automation Technology.*
14. Qingchun X., Qinghua Z., (2020), *Development Trend of NC Machining Accuracy Control Technology for Aeronautical Structural Parts.* *World Journal of Engineering and Technology.* – vol.8 , No. 3, August.
15. Sweda J. *Increasing Machining Accuracy based on CNC.*, (2022), – MDPI.

Pukhovskiy Ye. S., *Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

Frolov V. K., *Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

Prykhodko V. P., *Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

Betsko Yu. M., *Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

Management of processing accuracy in flexible production systems

On modern CNC machines, which form the basis of technological equipment of flexible manufacturing systems (FMS), the problems of automation of almost all operations are solved, except for the operations of the initial adjustment of the tool and adjustment of its level. The need to organize separate posts as part of the FMS to configure the tool, base and fix parts largely hinders the transition to uninhabited production. In these conditions, the problems of creating an automatic processing accuracy control system (APACS) in the FMS are incredibly important (Balakshin B.S., (1973); Nevelson M.S., (1982); Solomentsev Y.M., Basin A.M., (1974); International Journal of Automation Technology, (13)).

The industry has gained considerable experience in creating APACS, when processing on universal machines and, especially, on machines for finishing operations. The dissemination of this experience into small-scale production, where CNC machines are used, is hampered by the difficulty of creating effective measuring devices for fixing primary information and conversion devices for the received signals. To some extent, these difficulties are overcome through the use of contact sensors, laser technology and microprocessors capable of receiving and converting the primary signals of the control effect on the processing process (Komissarov V.I., Leontiev V.P., (1985); Sweda J., (2022)).

It is known that the process of machining usually cannot be described by deterministic methods, because the characteristics of the input signals of the technological system not only change over time, but also remain uncontrolled (Dushinsky V.V., Puhovsky E.S., Radchenko S.G., (1977); Puhovsky E.S., (2021); Antony Swic, (2014)). Therefore, the synthesis of APACS for such unstable processes should be carried out taking into account static instability, which generates uncertainty. In these conditions, the problem of creating such adaptive processing accuracy management systems that can change the management structure depending on the results of the current assessment of management quality is extremely relevant. The article sets the task of developing the structure of APACS, determining control parameters, feedback channels and ways to ensure a given accuracy of processing.

Purpose of work: *Development of an automated processing accuracy management system in the conditions of interconnected software-controlled equipment of flexible production systems.*

Key words: *accuracy, control, criterion, flexible manufacturing system, machining, adaptive system.*