

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Гордєєв Андрій Сергійович**

**УДК 621.941.0.15:681.5**

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ І  
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ**

спеціальність 05.02.08 - Технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Технології і управління якістю в машинобудуванні” Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,  
Арпентьєв Борис Михайлович,  
Українська інженерно-педагогічна академія,  
м. Харків, завідувач кафедри технології і  
управління якістю в машинобудуванні.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
Зенкін Анатолій Семенович,  
Київський національний університет технології та  
дизайну, м. Київ, завідувач кафедри метрології,  
стандартизації, сертифікації

доктор технічних наук, професор,  
Карпусь Владислав Євгенович,  
Військовий інститут внутрішніх військ, м. Харків, професор ка-  
федри інженерної механіки

доктор технічних наук, професор,  
Михайлов Олександр Миколайович,  
Донецький національний технічний університет,  
м. Донецьк, завідувач кафедри технології машинобудування

Провідна організація: Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”, кафедра технології машинобу-  
дування Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться "20" квітня 2006 р. у 14-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д  
64.050.12 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний институт" за адре-  
сою: 61002, м. Харків. вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету  
"Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розіслано "03" березня 2006 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.А. Пермяков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Найважливішою умовою ефективної діяльності промислових підприємств в економічних обставинах, що склалися, є забезпечення оптимального поєднання показників якості і надійності продукції, що випускається. Міжнародні стандарти якості ІСО 9000 для реалізації цієї умови передбачають комплекс заходів різного рівня і функціонального призначення, які включають етапи розробки, забезпечення, виготовлення і реалізації.

Одними з основних напрямків досліджень при створенні таких систем є моделювання параметрів і характеристик технологічних процесів (ТП) механічної обробки й адаптивне керування точністю формоутворення. Робота в цьому напрямку дозволить виявити енергетичні, інформаційні і динамічні параметри процесу, необхідні для його керування, і спрогнозувати ресурсні характеристики деталі в процесі її експлуатації. Фундаментальні розробки в галузі математики й обчислювальної техніки пропонують нові методи обробки даних, зокрема, з використанням нейронних мереж.

Створення принципово нових систем керування якістю механічної обробки, які враховують стохастичні складові технологічних систем (ТС), є актуальною проблемою. Її вирішення дозволить підвищити якість механічної обробки, прогнозувати якість ТП на етапі науково-дослідницької роботи, проектувати технологічне устаткування на основі принципово нових підходів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до держбюджетної теми "Наукові основи створення високоякісних технологій та обладнання в механоскладальному виробництві" 02-01 ДБ №ДР0102U001859, що розробляється в рамках Постанови Кабінету Міністрів України від 11 липня 2001 року №2623-III "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки", і наукової тематики кафедри "Технології і управління якістю в машинобудуванні" Української інженерно-педагогічної академії ГБ №2/3 "Удосконалювання системи якості технологій і метрологічного забезпечення". Здобувач брав безпосередню участь у виконанні НДР як керівник теми або відповідальний виконавець.

**Мета роботи і завдання досліджень.** Створення принципово нових систем прогнозування і забезпечення якості лезової обробки, що враховують стохастичні складові технологічних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Проаналізувати випадкові процеси, що відбуваються в ТС, запропонувати їхню класифікацію з позицій гармонійного аналізу.
2. Розглянути енергетичні й інформаційні аспекти ТС для виявлення принципів енергозберігаючої і продуктивної лезової обробки.
3. Дослідити розмірні і часові взаємозв'язки при формуванні якості механічної обробки, що дозволяють синтезувати комплексний показник якості як функцію експлуатаційних характеристик.

4. Використати методи гармонійного аналізу та нейронних мереж для рішення завдань прогнозування якості механічної обробки.

5. Запропонувати і дослідити модель інформаційного ресурсу систем автоматичного керування точністю механічної обробки.

6. Виконати дослідно-промислові розробки по створенню систем керування точністю обробки і програмного забезпечення для імітаційного моделювання ТС.

*Об'єкт досліджень.* Технології і системи керування якістю й ефективністю лезової обробки.

*Предмет досліджень.* Системи прогнозування і забезпечення якості лезової обробки.

*Методи досліджень.* Теоретичні дослідження базуються на положеннях технології машинобудування, спектрального і гармонійного аналізів ТП, теорії марківських процесів, імітаційного моделювання і симплексної оптимізації. Експериментальні дослідження виконувалися, базуючись на теорії планування експериментів, побудови факторних планів і статистичної обробки даних, сучасної вимірjuвальної апаратури і розробленого дослідно-промислового устаткування.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На підставі досліджень технологічних процесів лезової обробки і висуненої концепції про гармонійний характер зміни якості виробів, що виготовляються, розроблена система прогнозування і забезпечення якості, при цьому отримані такі нові результати.

1. Встановлено, що зміна в часі якісних параметрів оброблених поверхонь підпорядковується полігармонійному закону. При цьому спільна дія таких технологічних факторів як нерівномірність припуску, неоднорідність оброблюваного матеріалу і похибка базування викликають коливання ТС. Між режимом лезової обробки і характеристиками полігармонійного процесу існує тісний кореляційний зв'язок.

2. Запропоновано класифікацію випадкових похибок з позицій гармонійного аналізу, яка виявляє структурні зв'язки ТС лезової обробки і є методологічною основою для побудови прогнозних моделей. Одержана математична модель зміни в часі таких параметрів якості, як точність, шорсткість і хвилястість оброблених поверхонь. Модель описує еволюцію ТС як суму полігармонійного процесу (двокомпонентної гармоніки) і вузькосмугового гаусівського шуму. Характеристики полігармонійного процесу (амплітуда, частота, фазовий стан) відрізняються стійкістю в рамках окремо взятого верстата, а гаусівський шум має характер стаціонарних послідовностей, що мало змінюють свої характеристики, якщо параметри процесу обробки залишаються номінально незмінними.

3. Доведено, що ТС лезової обробки мають велику інерційність механізму формування похибок. Виходячи з цього, одержано рівняння реакції ТС на зовнішнє збурення. З урахуванням приналежності процесів механічної обробки до регулярних ланцюгів Маркова, розроблено методологію

їх використання для прогнозування якості продукції, що виготовляється, при відсутності попередніх даних.

4. Запропоновано енергетичний критерій якості лезової обробки, що враховує ентропію процесу як міру інертності технологічної системи і полігармонійні характеристики як функцію режимів різання. Енергетичний критерій використано як оцінну функцію при проведенні параметричної оптимізації для виключення резонансних зон, що погіршують якість лезової обробки. Запропонований критерій дозволяє враховувати збуджуючі дії, що змінюються в часі.

5. Розроблена прогноуюча система забезпечення якості лезової обробки, яка заснована на принципах незмінності ентропії та стабільності статистичних характеристик збудувань у ТС. Надійність прогнозу інформації досягнута за рахунок дублювання методу згортки полігармонійного процесу нейронними мережами. Експериментально встановлено, що похибка прогнозу при такому підході менша 16% дисперсії процесу при 5%-ному рівні значущості одержаних результатів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено інженерну методику розрахунку режимів лезової обробки, яка забезпечує задану якість і підвищену надійність ТП; запропоновано також принципові конструкторські і технологічні рішення по створенню надійних систем забезпечення якості обробки з дублюючою системою; розроблено програмне забезпечення для систем ЧПК токарних верстатів.

У результаті виконаних досліджень розроблено і передано на виробництво апаратне забезпечення якості виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згорання. Розроблено програмне забезпечення для системи ЧПК токарних верстатів, що дозволяє мінімізувати розсіювання розмірів, а також величину хвилястості при механічній обробці. Дано рекомендації щодо поєднування систем ЧПК і систем керування точністю обробки, які засновані на заміні мікро-ЕОМ "Електроніка - НЦ 31" і "2P22" на мікро-ЕОМ старшого покоління.

Передано на виробництво система прогнозування якості лезової обробки. Система містить дублюючі ланки на основі нейронної мережі. Даний підхід дозволяє визначати умови вибору і призначення режимів різання, технологічних і вимірювальних баз, проводити структурну оптимізацію, що в сукупності підвищує якість виготовлення виробів і підвищує їхні експлуатаційні характеристики. Результати дисертаційної роботи використовуються при постановці спеціальних навчальних курсів для студентів і магістрів спеціальності "Технологія машинобудування" і є складовою частиною звітів госпдоговірних і держбюджетних НДР, виконаних в УПА.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові розробки отримані здобувачем самостійно. Теоретичні й експериментальні дослідження, розробка алгоритмів програмного забезпечення, побудова моделей виконані здобувачем самостійно. Постановка задачі й обговорення наукових результатів виконані разом з науковим консультантом і частково з співавторами публікацій. Ступінь учас-

ті здобувача у виконанні госпдоговірних і держбюджетних робіт зазначена окремо в кожному звіті. У більшості з них здобувач був керівником теми або відповідальним виконавцем.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи повідомлені й обговорені на конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція "Прогресивні технології і системи машинобудування" (Севастополь, 1998), Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004), X міжнародна науково-технічна конференція "Машинобудування і техносфера XXI століття" (Севастополь, 2003), II Міжнародна науково-практична конференція "Ринок технологій: проблеми і шляхи рішення" (Київ, 2004), XI міжнародна науково-технічна конференція "Машинобудування і техносфера XXI століття" (Севастополь, 2004), II Міжнародна науково-технічна конференція "Важке машинобудування "Проблеми та перспективи розвитку" (Краматорськ 2004).

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені в 25 наукових працях, серед яких 23 наукові статті у фахових виданнях ВАК України.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, шести розділів і 5 додатків. Повний обсяг дисертації 383 аркушів, у тому числі 45 ілюстрацій по тексту, 14 ілюстрацій на 14 арк., 6 таблиць по тексту, 3 таблиці на 3 арк., 218 використаних літературних джерел на 15 арк., 5 додатків на 63 арк.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведена загальна характеристика роботи.

**У першому розділі** розглянуто сучасний стан досліджуваної проблеми на основі вітчизняних і закордонних джерел інформації, сформульовано мету і поставлено завдання досліджень. Показано, що сучасні дослідження є логічним продовженням робіт таких учених, як Балакшин Б.С., Соколовський А.П., Кован В.М., Єгоров М.Е., Маталін А.А., Колев К.С., Бородачов Н.А., Рижов Е.В., Хусу А.П., Вітенберг Ю.Р. і ін., що вирішували завдання підвищення якості і ефективності механічної обробки.

Аналіз літературних джерел показав, що можливості підвищення якості механічної обробки при використанні сучасних методів обмежені часткою систематичної складової сумарної похибки обробки, тобто може реалізуватися тільки "допусковий" метод керування якістю (метод Тейлора).

При переході від "допускового" керування якістю до керування по відхиленню від номіналу потрібен принципово новий підхід до синтезу ТС, а саме використання додаткової інформації - ін-

формації про збурюючі фактори, що діють у поточному циклі обробки, який може корегуватися. На відміну від інформації про відхилення розмірів, що при автоматичному підналагодженні використовується із запізненням, принаймні на один цикл, інформація про збурюючі впливи може бути використана без запізнення (тобто, до початку коригувального циклу обробки).

Керування по збурюванню здійснити складніше, ніж автоматичне підналагодження, тому що воно значно чутливіше до відхилень від розрахункових умов. Рішення цього завдання можливе при системному аналізі механізму формотворення при лезовій обробці, тобто дія факторів, що збурюють, повинна розглядатися в динаміці і взаємовпливі. Наприклад, вплив зносу інструмента, теплових деформацій, автоколивань на якість обробки повинні враховуватися не відокремлено один від одного, у взаємодії.

Виходячи з висунутого концептуального положення про стабільність статистичних характеристик збурювань у ТС, автор пропонує керувати системою в цілому, а не окремими її складовими.

**В другому розділі** наведено спектральний аналіз якості механічної обробки. Ця розробка необхідна для подолання труднощів при проектуванні нестационарних систем. При цьому вирішується завдання по виявленню закономірностей розсіяння якісних показників при лезовій обробці; на основі гармонійного аналізу класифікуються фактори, що впливають на вихідну якість виробів; будується математична модель лезової обробки, розглянутої як полігармонійний процес.

Для формулювання завдань, пов'язаних із проектуванням і вибором методів розрахунку систем керування механічною обробкою, необхідно зупинитися на фізичній суті самого ТП і встановити причини і закономірності явищ, якими він супроводжується. Об'єктом керування є верстат разом із процесом різання.

При обробці матеріалів різанням виникають численні збурювання різного походження і тривалості. До них належать наприклад: збурювання, що протікають повільно, такі, як зношування базових елементів верстата; збурювання середньої тривалості, пов'язані зі зношуванням самого інструмента; збурювання, що протікають швидко, зокрема коливання окремих елементів верстата, які викликані різними причинами. Крім робочих процесів на ТС впливають сили інерції не врівноважених обертових деталей або вузлів, які здійснюють поступальний рух, сили ваги вузлів і заготовки, зусилля по закріпленню деталей, теплові джерела і, нарешті, поштовхи і коливання, передані ззовні через фундамент або ті, що виникають в самій системі через неточність зачеплення зубчастих коліс і інших похибок виготовлення деталей або складання верстата.

Кожен конкретний процес характеризується своїм випадковим сполученням збурювань, що впливають на нього, і випадковістю отриманих значень точності. Різні збурювання викликають і різні порушення процесу обробки, що призводять до зниження точності і якості поверхневого шару, підвищеному зношенню металорізного інструмента тощо.

Виходячи з цього, було висунене припущення, а саме: якщо на вході ТС діють коливальні процеси, то на виході повинна спостерігатися їх суперпозиція. Іншими словами, розсіяння якісних показників лезової обробки в часі повинно мати приховану періодичність.

Щоб переконатися, що точність обробки, так само як хвилястість і шорсткість, мають сховану періодичність, були побудовані крапкові діаграми чорнової обробки деталей типу "поршень", які було піддано кореляційному аналізу (рис.1а).

На рис.1.б побудовано графік нормованої кореляційної функції за експериментальними даними.

$$\rho(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y_{i+\tau} - \bar{y})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (y_{i+\tau} - \bar{y})^2 \right]}} \quad (1)$$

де  $y_i$  - поточне значення;  $\bar{y}$  - середнє арифметичне значення вибірки.

При розгляді графіка  $\rho_x(\tau)$  можна зробити такі висновки. Існує ергодичний процес, тому що зміни кривої відбуваються поблизу осі  $\tau$ . Наявність значних ділянок негативних значень  $\rho_x(\tau)$  свідчить про коливальний характер випадкового процесу, який представлено даною реалізацією.

Проведений аналіз крапкових діаграм розсіяння діаметральних розмірів при токарній обробці з використанням кореляційних перетворень і ланцюгів Маркова підтверджує припущення про полігармонійний характер розсіяння якісних показників оброблених поверхонь.

У такій інтерпретації на вхід процесу формоутворення подається інформація про відносне вібро розміщення між інструментом і заготовкою, а на виході з'являється похибка обробки. Таким чином, кожен вид похибки знаходиться у строго визначених частотних діапазонах.

Збурювання можуть бути як періодичними, так і неперіодичними. З огляду на це положення було розроблено класифікацію технологічних факторів з позиції гармонійного аналізу (табл.1). З таблиці видно, що фактори, які визначають якість лезової обробки мають полігармонійну природу. Це означає, що вони не є строго випадковими і підлягають прогнозуванню. Даний факт доцільно використовувати для прогнозування якості механічної обробки.

Можна стверджувати, що між параметрами точності обробки і відносних вібро розміщень інструмента і заготовки існує нелінійна залежність, яка може бути інтерпретована кусково-монотонною функцією, що є інформаційною основою для прогнозування процесу різання і його керування.

Це дало підставу розглядати розсіювання розмірів у часі як хвилю з визначеною довжиною й амплітудою. Факт збільшення поля розсіювання розмірів згодом підтверджує припущення, що якість обробки партії деталей носить характер резонансної хвилі - збільшується амплітуда і зменшується довжина хвилі.



Визначимо цю хвилю як технологічну. Вона, як і всі інші хвилі, характеризується амплітудою ( $A$ ), довжиною ( $l$ ), часом існування ( $\tau$ ) і кутом напрямку ( $\rho$ ) (рис.2). Під часом існування мається на увазі час від моменту початку обробки до виходу параметрів за встановлені межі (зокрема за межі поля допуску на розмір).

Функція, що представлена на рис.2, є кусково-монотонною і має верхню  $X_m$  і нижню  $X_k$  обвідну:

$$f(\tau) = (\alpha\tau + b) + \tau^2 \sin \frac{1}{C_T}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  - тангенс кута нахилу технологічної хвилі (інтенсивність зсуву рівня якості);  $b$  - початковий рівень якості;  $C_T$  - коефіцієнт, що характеризує надійність технологічного процесу.

Якщо перейти до розгляду суми полігармонійного процесу й вузькосмугового шуму, то випадковий процес  $x(\tau)$  можна представити у вигляді моделі:

$$\begin{cases} x(\tau) = x_T(\tau) + x_W(\tau) + x_R(\tau) + U(\tau); \\ x_T(\tau) = (\alpha\tau + b) + \tau^2 \sin \frac{1}{C_T} + \frac{G}{0.59 \cdot 10^6} en^2 \cos(n\tau) + 10C_p t^x s^y v^n K_p; \\ x_W(\tau) = \frac{D_{обр}}{2} + s \cdot n \cdot tg\alpha + e\rho \sin(n\tau); \\ x_R(\tau) = A_R(\tau) \cos(\omega_0\tau + \varphi(\tau)). \end{cases} \quad (4)$$

де  $C_T$  - коефіцієнт, що характеризує надійність технологічного процесу;  $\alpha$  - початковий рівень настройки ТП;  $b$  - інтенсивність зсуву рівня настройки;  $\tau$  - час механічної обробки;  $n$  - частота обертання шпинделя;  $s$  - подача;  $t$  - глибина різання;  $e$  - погрішність базування;  $\rho$  - просторові відхилення;  $s \cdot n \cdot tg\alpha$  - вираз, що характеризує відхилення розташування профілю;  $D_{обр}$  - оброблюваний діаметр;  $G$  - постійна величина;  $C_p, K_p, x, y$  - відповідно коефіцієнти і показники ступенів;  $U(\tau)$  - невраховані "шуми".

Наведена модель дозволяє докладно аналізувати поведінку технологічної системи й особливо її еволюцію в часі. Модель відповідає усім властивостям системи, а саме:

1. Система рівнянь (4) - це цілісний комплекс взаємозалежних елементів (у 3-є рівняння входить елемент  $D_{обр}$ , а це не що інше, як точність обробки  $x(\tau)$ , 2-є рівняння враховує глибину різання  $t$ , зміна якої визначається хвилястістю  $x_W(\tau)$  і величиною мікронерівностей  $x_R(\tau)$ ).

2. Система має визначену структуру, що допускає виділення ієрархії елементів, тобто структура системи (4) така, що її елементи мають стосовно неї властивості підсистем.

Отримана модель має теоретичну цінність і може бути використана для імітаційного моделювання процесу формування якісних характеристик оброблюваних поверхонь.

У третьому розділі розробляються принципи прогнозування якості лезової обробки. Реалізація керування збурювання можлива, якщо між збурюваннями на вході і сигналами на виході системи керування існує більш-менш стійка залежність. Необхідно, щоб ця залежність була відома і щоб самі збурювання могли бути вчасно виміряні. Тому зупинимося на оцінці зв'язків між випадковими факторами (збурюваннями), що породжують похибку обробки, і самими похибками розмірів на виході системи верстат-пристрій-інструмент-заготовка (ВПІЗ).

В реальних умовах ряд факторів, що впливають на якість лезової обробки (зношування інструмента, коливання припуску і твердості, зміна температури елементів системи ВПІЗ тощо), звичайно містять постійні або низькочастотні складові. У лінійній системі низькочастотні складові на вході перетворюються у відповідні складові на виході без зміни частоти. Систему ВПІЗ у розглянутій задачі можна представити інерційною ланкою, тому що частоти власних коливань усіх компонентів ВПІЗ сучасних верстатів у 10-15 разів вищі від частоти коливань виконавчих приводів подачі і головного руху робочих механізмів.

Для визначення динамічних властивостей, ТС може бути представлена у вигляді лінійної ланки з деякою статистичною характеристикою («білий» шум) і включеною паралельно гармонійною ланкою.

Знайдемо реакцію ТС на багаточастотний зовнішній вплив. Для цього використовуємо диференціальне рівняння

$$\ddot{u} + u + 2\varepsilon\mu\dot{u} + \varepsilon u^2 = F_1 \cos \omega_1 \tau + F_2 \cos(\omega_2 \tau + \varphi), \quad (5)$$

де  $\mu$  - деяка позитивна постійна, котра являє собою відношення стійкості системи ВПІЗ до зовнішніх впливів;  $\varepsilon$  - безрозмірна величина, що характеризує ступінь нелінійності системи;  $F_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\varphi$  - відповідно амплітуда, частота і фазовий стан полігармонійного процесу.

При розв'язанні даного рівняння параметри  $F_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\varphi$  визначаються експериментальним шляхом за допомогою спектрального аналізу. Подальше рішення є функцією незалежної змінної  $t$  і параметра  $e$ , тобто  $u=f(t;e)$ .

Оскільки відносні зсуви між інструментом і заготовкою можна представити як суперпозицію постійних складових і полігармонік, а похибки форми деталі також суперпозицією окремих гармонік, виникає можливість ідентифікації між собою відповідних гармонік кожного з цих масивів з метою прогнозування якості лезової обробки за результатами аналізу статистичних даних.

Такий підхід належить до методів прогнозування з детермінованими основами, згідно з якими прогнозований параметр  $x(\tau)$  визначається моделлю (4).

Аналіз моделі показує, що для визначення характеру і величини похибки обробки необхідно: 1) виміряти віброзміщення інструмента щодо заготовки; 2) представити отриману інформацію у ви-

$$P_n = \begin{array}{c|cccccc} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \\ \hline S_1 & 0.02 & 0.28 & 0.29 & 0.19 & 0.19 & 0.03 \\ S_2 & 0.03 & 0.07 & 0.48 & 0.21 & 0.17 & 0.04 \\ S_3 & 0.03 & 0.12 & 0.11 & 0.43 & 0.29 & 0.02 \\ S_4 & 0.01 & 0.09 & 0.44 & 0.17 & 0.27 & 0.02 \\ S_5 & 0.01 & 0.07 & 0.22 & 0.52 & 0.15 & 0.03 \\ S_6 & 0.07 & 0.09 & 0.18 & 0.26 & 0.35 & 0.05 \end{array}$$

гляді гармонійного ряду; 3) зробити квантування гармонік за частотними діапазонами у відповідності зі значеннями граничних частот; 4) розрахувати похибки, що утворяться в кожному частотному діапазоні; 5) розрахувати сумарні похибки.

З огляду на вище викладене, прогнозування якості лезової обробки пропонується проводити з використанням методів імітаційного керування.

Точну імітацію розсіяння розмірів при механічній обробці звичайно одержати неможливо. Ступінь наближення характеризується відносною точністю необхідного результату. У нашому випадку імітація коливань параметрів точності нашттовхується на труднощі вибору еквівалентних умов процесу обробки. Зупинимось на деяких підходах у рішенні поставленої задачі. Вважаємо, що в нашому розпорядженні є записи експериментальних випадкових коливань (крапкові діаграми). Характеристиками досліджуваних процесів є одномірний закон розподілу ймовірностей амплітуд коливань або моментні функції цих амплітуд.

Особливість імітаційного підходу полягає, насамперед, у виборі об'єкту моделювання не як власне ТП, а як процесу керування ним. Як наслідок, задача імітаційного керування вирішується не як задача побудови математичної моделі технологічного об'єкта, а як задача побудови математичної моделі процесу керування об'єктом.

Однієї з основних задач моделювання будь-яких процесів є проблема знаходження часу досягнення границь заданого інтервалу. Для рішення подібних задач використовуються ланцюги Маркова.

Проаналізувавши точкові діаграми розсіяння дійсних розмірів при токарній обробці, можна зробити наступні висновки: 1) процес може піти з однієї зони в протилежну, наприклад: з позитивної у бік негативної (перехід  $A_0 \Rightarrow A_1$ ), або навпаки (перехід  $A_1 \Rightarrow A_2$ ) (рис.3); 2) процес може продовжити рух в тому ж напрямі (перехід  $A_2 \Rightarrow A_3$ ); 3) процес може залишатися на досягнутому рівні (перехід  $A_3 \Rightarrow A_4$ ); 4) процес може виходити за межі допуску, але тут же повертатися в допустимі межі (переходи  $A_4 \Rightarrow A_5 \Rightarrow A_6$ ).

Експериментальні дослідження дозволяють довести належність процесів механічної обробки до ергодичних регулярних ланцюгів Маркова і одержати перехідну матрицю:

Визначення перехідної і граничної матриць, а також інших характеристик Марківського лан-

цюга, дозволило прогнозувати похибку виготовлення деталей. Недоліком є ряд допущень, що призводять до помилки прогнозування очікуваного відхилення. Так, ланцюги Маркова ефективні при стаціонарному ергодичному процесі, де всі статистичні характеристики не змінюються у часі. У протилежному випадку прогноз буде менш точним.

При формуванні керування з регульованою глибиною передісторії розглядається ділянка передісторії  $S$ , охоплювана інтервалом регульованої ширини, причому далекий (стосовно поточного такту) кінець інтервалу може встановлюватися на бажаному такті, тобто може вводитися в розгляд не повна передісторія, а її частина, визначена шириною інтервалу  $l$ .

Встановлюючи різну ширину інтервалу, можна одержати різні стратегії імітаційного керування. Так, при  $l=0$  глибина передісторії скорочується до поточного стану і здійснюється керування за поточним станом ТП. Якщо прийняти  $l=\tau$ , то встановлюється інтервал із шириною, що змінюється - один кінець інтервалу фіксується на векторі вихідного стану, а другий збігається з поточним тактом  $i$ , отже, інтервал розширюється одночасно із збільшенням номера такту ТП. У цьому випадку здійснюється керування з повною передісторією, накопиченою до поточного такту. При фіксованому  $l$  інтервал "ковзає" разом з ходом технологічного процесу, перекриваючи на будь-якому такті  $\tau > l$ . У цьому випадку здійснюється керування з фіксованою глибиною передісторії.

Експериментальні дослідження, які проведені в роботі, показали, що дві гармонійні хвилі укладаються в інтервалі 30-50 тактів. Збільшення довжини передісторії істотно не поліпшує якості імітаційної моделі і навіть може її погіршити (рис.4). Це пояснюється зростаючим впливом неврахованих випадкових викидів.

Таким чином, для полігармонійного процесу глибина передісторії встановлюється фіксованою. При цьому обраний інтервал повинен давати можливість виявляти задане число схованих періодичностей.

Комп'ютерне моделювання ТП лезової обробки і порівняння одержаних результатів з виробничими даними, показують, що якість прогнозу задовільна на 12-14 тактів вперед (рис.5).

На рис.6 зображений алгоритм імітаційного керування якістю лезової обробки з фіксованою глибиною передісторії. При користуванні даним алгоритмом, п.п. 1-3 виконуються тільки на етапі наладки ТП.

**У четвертому розділі** розроблена методологія оптимізації режимів механічної обробки за критерієм якості. Досліджується зв'язок між точністю, хвилястістю і шорсткістю оброблених поверхонь, схованою енергією деформування поверхневих шарів з однієї сторони і потужністю різання - з другої. Отримано обмеження на потужність лезової обробки за критерієм забезпечення заданої якості оброблюваних поверхонь. Доведено економічну доцільність і високий ступінь адекватності використання нейронних мереж при оптимізації ТП.

Основними причинами, що визначають вид і похибку обробки, є вихідна похибка обробки, збурювання, що впливають на процес різання, збурювання, що впливають на технологічне устаткування. Параметри інших елементів ТС є похідними від названих.

Для одержання інформації про полігармонійний процес кожне джерело збурювань повинно мати свій датчик і свій канал керування. Однак такі системи навряд чи будуть перспективними. Кількість збурювань, що впливають на ТС, дуже велика, і вони різні за характером і часом протікання. Для керування кожним із збурювань потрібен свій датчик, свій контур і свій критерій, що ускладнює систему і робить її ненадійною при експлуатації. Така система завжди залишається локальною, тому що неможливо охопити весь спектр збурювань, що впливають на ТС.

Особливістю полігармонійної інформації є її узагальнений характер, що містить одночасно дані як про всі види похибок, так і про всі види збурювань.

Полігармонійна інформація дозволяє управляти розмірною похибкою і низькочастотною складовою похибки форми. Схема такого керування передбачає вимір дійсних розмірів оброблених поверхонь, прогнозування точності обробки за результатами вимірів і вироблення сигналу підналагодження, пропорційного до утворюваної похибки.

Відмінність пропонованої схеми керування від існуючої полягає у використанні лише одного джерела інформації і керування в реальному масштабі часу лише тими збурюваннями, частота коливань яких ідентифікується в даний момент із частотою відносних віброзміщень інструмента і заготовки. Інакше кажучи, спочатку прогнозується величина похибки, що утвориться, потім діагностується причина (збурювання), що викликала цю похибку, після чого виробляється підналагоджувальний імпульс, спрямований на зменшення впливу даного збурювання.

У більшості випадків немає необхідності цілком усувати збурювання, тому що у визначених частотних діапазонах збурювання невеликої величини можуть грати і позитивну роль, зменшуючи сумарну похибку. Це можна пояснити наступними двома причинами. Як доведено численними дослідженнями, замикаюча ланка, будь-якого розмірного ланцюга є вектором, що представляє собою суму різноспрямованих векторів окремих ланок ланцюга. Різні збурювання неоднозначно впливають на різні ланки ланцюга, змінюючи їхню величину і напрямок, в результаті чого може виникнути ситуація, при якій збурювання так змінить величину і напрямок однієї або декількох ланок розмірного ланцюга, що сумарна похибка зменшиться. Інформаційною основою розглянутої системи керування є гармонійні процеси ТС. У такому випадку з'являється можливість створення системи комплексного керування якістю механічної обробки. Одмінною рисою такої системи є те, що верстат практично стає інваріантним до зовнішніх збурювань, оскільки вони усуваються і компенсуються при обробці.

Керування якістю лезової обробки по збурюванню має на увазі розробку керуючого критерію.

Використовуючи той факт, що повна енергія  $E$  гармонійних коливань пропорційна квадратові амплітуди  $A$  коливань і інертності ТП  $H(m)$ , маємо:

$$E = \frac{H_{(m)} \cdot \omega^2 \cdot A^2}{2}, \quad (6)$$

де  $H_{(m)}$ - ентропія ТС;  $\omega_i$  - частота коливань  $i$ -ої гармоніки;  $A_i$  - амплітуда коливань  $i$ -ої гармоніки.

Інертність виявляється в тому, що процес змінює свій напрямок поступово і тим повільніше, чим менша його ентропія, що є мірою інертності тіла.

Множина ймовірностей  $P_m$  визначається законом розподілу випадкової величини. Оскільки точність обробки описується нормальним законом розподілу, рис.7 ілюструє зміну величини ентропії в залежності від ступеня налагодження ТП:  $H_{(m)}$  тим менша, чим якісніша обробка.

Цільова функція процесу точіння має такий вигляд:

$$E_i = \frac{H_{(m)i} \cdot \omega_i^2 \left( \frac{T_i}{K_{Ti}} - \varepsilon_i \right)^2 \cdot K_{Ni}}{2} \quad (7)$$

Графічні обмеження потужності полігармонійного процесу за критерієм якості механічної обробки представлені на рис.8.

В автоматизованому виробництві на процес різання покладено завдання функціонального забезпечення на технологічному устаткуванні необхідної точності форми і розмірів оброблених поверхонь із заданим фізико-механічним станом поверхневого шару. Вибираючи оптимальне співвідношення зовнішньої і внутрішньої оптимізації, можна говорити про оптимізацію керування обробкою різанням.

Зовнішня оптимізація процесу різання заснована на оптимізації насамперед робочих режимів (подача, швидкість і глибина різання). Точно визначити поточні параметри процесу важко, тому необхідно враховувати їх через впливи, що збурюють та впливають на процес. Якщо створити умови, які викличуть зміну в часі впливів, що збурюють, то оптимізація процесу підтримкою режимів на визначеному рівні логічно переходить у безперервну або внутрішню оптимізацію.

Внутрішня оптимізація процесу заснована на динамічній інтерпретації процесу і враховує дії, що збурюють та змінюються в часі. Модель (4) враховує складові сили різання, що викликають зсув елементів ТС.

Часто при визначенні зсувів елемента ТС обмежуються урахуванням тільки однієї радіальної складової сили різання  $P_y$ . Випишемо із моделі (4) рівняння, що описує точність обробки:

$$X_T(\tau) = (a\tau + b) + \tau^2 \sin \frac{1}{C_T} + \frac{G}{0.59 \cdot 10^6} e \cdot n^2 \cos(n \cdot \tau) + 10C_p t^x s^y v^n K_p, \quad (8)$$

Функціональна залежність (8) не дозволяє в реальному вигляді оцінити вплив режиму обробки на якість геометричних параметрів деталі. Причинами появи відхилень форми і розташування елементарної поверхні є не тільки геометричні відхилення вихідної заготовки, але і відхилення параметрів системи, фізико-механічних властивостей заготовки і режиму обробки (змінними можуть бути не тільки глибина різання, але також подача і швидкість різання). Вплив факторів, що збурюють, враховується рівнянням:

$$u = \alpha \cdot \cos(\tau + \beta) + \frac{A_1}{1 - \omega_1^2} \cos(\omega_1 \cdot \tau) + \frac{A_2}{1 - \omega_2^2} \cos(\omega_2 \cdot \tau + \varphi) + \varepsilon \{ \}. \quad (9)$$

Оскільки останній доданок  $\varepsilon \{ \}$  на два порядки менший від суми перших трьох, то ним можна знехтувати.

Тоді з огляду на вищесказане, а також на те, що  $u = x_T(t)$ , можна записати:

$$\alpha \cdot \cos(\tau + \beta) + A_\Sigma = \tau^2 \sin \frac{1}{C_T} + \frac{G}{0.59 \cdot 10^6} e \cdot n^2 \cos(n \cdot \tau) + 10C_p t^x s^y v^n K_p. \quad (10)$$

Як видно з аналізу отриманих результатів (рис.9), для прийнятих умов обробки збільшення рівня глибини різання і подачі призводить до лінійного збільшення амплітуди і частоти полігармонійного процесу. Великий вплив на розсіювання розмірів має швидкість різання. Це пояснюється наявністю резонансів першого і другого порядків. При збігу частоти вимушених коливань із власною частотою динамічної системи верстата амплітуда нерівностей оброблених поверхонь різко зростає. Виявлено, що для виключення даного ефекту заготовку необхідно обробляти на частотах обертання шпинделя, що знаходяться не ближче ніж 0,75-1,25 від власних частот коливань верстата.

Власні коливання супорта знаходяться в межах від 9 до 100 Гц, а величини загасання - від 0,042 до 0,338 Гц. Складовими є вимушені, зумовлені нерівноваженістю деталі, що обертається, і головні коливання. Вони утворюють різні форми кривої сумарного коливання, що залежать від

співвідношення їхніх частот, амплітуди і величини зміщення фаз.

Частота коливань супорту залежить від режимів різання і знаходиться в межах від 3,3 до 197 Гц. Амплітуда його коливань залежить від швидкості різання. Подача практично впливає тільки на амплітуду першого головного коливання в напрямку  $X$ , що підвищується при її збільшенні. Збільшення глибини різання підвищує амплітуду коливань супорту для обох головних коливань у всіх напрямках.

Розглянемо обробку деталі типу "поршень" на гідрокопіювальному верстаті мод 1Н713. Поршень встановлюється на розтискну оправку. Обробка виконується різцями ВК8. При чорновому точінні встановлюється наступний режим обробки: швидкість різання  $v = 254$  м/хв, подача  $s = 0,16$  мм/об, глибина різання  $t = 2,25$  мм. Оброблюваний діаметр  $D = 81$  мм. На рис.10 зображено графік, з якого видно, що при швидкостях  $v=251,7$  і  $253,05$  м/хв (відповідно вузли  $a$  і  $b$ ) відсутні явища резонансу. На цих швидкостях різання підвищується точність обробки і зменшується величина хвилястості і шорсткості. Однак при швидкостях  $v=251$  і  $252,1$  м/хв (відповідно вузли  $c$  і  $d$ ) спостерігаються явища резонансу.

На підставі аналізу резонансних зон встановлено, що при зближенні або збігу частот вимушених і головних коливань їх амплітуда підвищується. Низькочастотні вібрації при роботі з малими швидкостями різання виникають через багаточастотний резонанс, що полягає у збігу частот вимушених і головних власних коливань систем супорту і деталь-бабка. При зближенні цих частот інтенсивність вібрацій зростає. Вимушені коливання обумовлюються нерівномірністю обертання заготовки і процесом різання, частоти їх залежать від режиму обробки. Система ВПЗ має кілька частот головних коливань, отже у процесі різання виникають кілька резонансних станів цієї системи. Підвищення якості механічної обробки можливе шляхом знаходження резонансних зон, що дозволяють цілеспрямовано усувати вібрації шляхом зміни режимів різання. Зміною режимів обробки досягається зміна частоти вимушених коливань.

Якість математичної моделі процесу різання металів і, в першу чергу, її вірогідність залежить від вибору технічних обмежень, що найбільшою мірою визначають описаний процес. Виділимо найбільш важливі технічні обмеження з позиції полі-гармонійної моделі процесу різання при точінні. Перший блок - це блок обмежень, що враховує якість механічної обробки (точність, шорсткість, хвилястість). Другий блок - блок технічних обмежень. До них належать: можливості різального інструмента; потужність електродвигуна приводу головного руху; задана продуктивність верстата; найменша і найбільша швидкості різання і подача, що допускаються кінематикою верстата; міцність і твердість різального інструмента.

Вирішуючи завдання оптимізації ТП, застосовуємо метод декомпозиції. На першому рівні вирішується завдання оптимізації конкретних операцій при заданих значеннях "вхідних" і "вихід-



них" показників якості. На другому рівні - завдання оптимального розподілу заданих діапазонів цих показників з використанням результатів рішення на першому рівні.

**У п'ятому розділі** представлені результати експериментів. Завдання експериментів - з'ясування правомірності деяких припущень, прийнятих у теоретичних дослідженнях, визначення вірогідності теоретично отриманих результатів шляхом їхнього порівняння з незалежними експериментальними даними, а також відпрацювання алгоритму керування точністю обробки і визначення надійності прогнозування якості ТП механічної обробки.

Експериментальні дослідження проводилися на ВАТ "АВТРАМАТ" (м. Харків), на заводі "ХТЗ" (м. Харків), АТ "Потенціал". Об'єктом дослідження були поршні двигунів внутрішнього згоряння, вали, втулки і гільзи.

Поршні, що виготовляються з алюмінієвого сплаву АЛ-25 і АК12М2Мg, оброблялися на верстаті с ЧПУ 16К20Ф3, а також на гідрокопіювальному верстаті 1Н713. При чорновій і чистовій обробці поршень установлювався на розтискну оправку. Обробка виконувалась різцями ВК8. Геометричні характеристики різального інструмента такі: головний кут в плані  $\phi=45$ ; кут нахилу різальної крайки  $\lambda=0$ ; радіус при вершині  $R=2$  мм; радіус округлення різальної крайки, що ріже,  $r=0,05$  мм. При чорновому точінні були встановлені наступні режими обробки: швидкість різання  $V=254$  м/хв, подача  $S=0,16$  мм/об, глибина різання  $t=2,25$  мм. Оброблюваний діаметр  $D=81$  мм, довжина обробки  $L=133$  мм. Режим обробки залишався незмінним при обробці всіх досліджуваних деталей. Чистове точіння виконувалося при наступних режимах обробки: швидкість різання  $V=224$  м/хв; подача  $S=0,1$  мм/об; глибина різання  $t=0,35$  мм. Оброблюваний діаметр  $D=80_{-0,09}$ , довжина обробки  $L=125_{-0,5}$  мм.

Обробка гільз циліндра виконувалась на токарному багаторізцовому напівавтоматі 1А730 (при обробці зовнішніх і торчових поверхонь) і вертикально-розточувальному верстаті РА-171. Чорнова обробка отвору проводилася зенкером Р-05-2824-0.1 079.8-0.05. При цьому був установлений наступний режим обробки: швидкість різання  $V=22,2$  м/хв; подача  $S=0,9$  мм/об; глибина різання  $t=0,75$  мм. Вимірювання виконувались індикаторним нутроміром НІ 50-100-1. Чистова обробка отвору виконувалась алмазним різцем, при постійному режимі різання: швидкість різання  $V=270$  м/хв; подача  $S=0,18$  мм/об; глибина різання  $t=0,75$  мм. Вимірювання виконувались спеціальним пристосуванням з ціною поділу 0,001 мм.

Для підвищення ступеня об'єктивності результатів прогнозу використовується процедура верифікації, що може виконуватися декількома різними способами. Істотні можливості в прогнозуванні, керуванні й удосконалюванні різних систем відкриває використання аналітичних технологій. Різновидом аналітичних технологій є нейронні мережі.

База даних для нейронної мережі, що підготовлена автором, дозволяє швидко й ефективно про-

водити оптимізацію за критерієм якості обробки. База даних підготовлена з урахуванням періодичності системи ВПЗ. Перевірка адекватності розрахунків дала наступні статистичні величини: дисперсія достовірності, обчислена за результатами дослідів,  $\sigma_x^2=0,00821$ ; дисперсія коефіцієнтів полігармонійної моделі  $\sigma_0^2=0,00042$ . Довірчий інтервал  $\Delta b_i$  коефіцієнтів складає  $\Delta b_i = \pm t \sigma_0 = \pm 3,18 \cdot 0,00042 = \pm 0,001336$ . Тут  $t=3,18$  - табличне значення критерію Стюдента при 5%-ному рівні значущості. Перевірка адекватності полігармонійної моделі проводилася по F-критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості.

Обробка експериментальних даних підтвердила наявність прихованих періодичностей при лезовій обробці як зовнішніх поверхонь, так і внутрішніх. Також була підтверджена адекватність прогнозів точності на основі полігармонійної моделі лезової обробки.

**У шостому розділі** говориться про практичну реалізацію результатів досліджень. Завдання даного розділу полягає в узагальненні отриманого в результаті виконаних досліджень матеріалу і промислового досвіду та формулювання на цій основі технологічних принципів створення систем автоматичного керування точністю обробки. Також представлено результати промислового використання технологій і устаткування, методики розрахунку їхньої економічної ефективності.

Для розповсюдженого протягом ряду років програмно-технічного забезпечення дистанційного керування верстатами з ЧПК від IBM PC реалізована можливість завантаження програм великого обсягу, що значно перевищують обсяги пам'яті пристроїв ЧПК верстатів, у динамічному режимі. Особливістю таких програмно-технічних засобів є можливість керування верстатами з усіма відомими як вітчизняними, так і закордонними типами пристроїв ЧПК. До пристрою ЧПК верстатів приєднуються контролери з клавіатурою й індикатором, що сполучаються кабелем типу "кручена пара" із програмувальним мультиплексором за схемою "зірка". Мультиплексор, у свою чергу, комутується з останнім портом IBM PC. У динамічному режимі, необхідному при роботі з програмами великого обсягу, мережне забезпечення керування верстатами в режимі поділу часу передає сегменти керуючих програм на контролери. Максимальний розмір переданих сегментів обмежується обсягами оперативної пам'яті використовуваних контролерів. Поточний розмір переданих сегментів встановлюється програмним забезпеченням автоматично відповідно до завантаження верстатів і частотою звертання за одержанням інформації.

Блок зв'язку ЕОМ вищого рангу призначено для послідовного обміну інформацією між ЧПК й ЕОМ (субблок SB-976 3.082. 976 E3). Блок може працювати у двох режимах: прийому інформації (асинхронне введення інформації); видачі інформації (асинхронне виведення інформації).

Сьогодні на українських підприємствах в загальному парку устаткування є велика кількість верстатів, що піддані моральному зносу іншого роду. При такому зносі устаткування його подальша

експлуатація технічно цілком можлива, але економічно не доцільна. В цих умовах для прискорення темпів відновлення устаткування і підвищення ефективності виробництва важливого значення набуває модернізація діючого устаткування, тобто удосконалення його конструкції.

Собівартість модернізації верстата визначається за окремими статтями витрат відповідно до "Методичних матеріалів по плануванню, обліку і калькулюванню собівартості продукції на підприємствах машинобудування і металообробки".

Розрахунок економічної ефективності виконано на підставі інструкції МУ 2.5-81 "Визначення економічної ефективності металорізальних верстатів із ЧПК". Як показують розрахунки, модернізація металорізальних верстатів за рахунок їхнього оснащення сучасними системами керування якістю обробки, поєднана з капітальним ремонтом, є економічно доцільною.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми, що полягає в розробці нових принципів прогнозування і забезпечення якості лезової обробки, заснованих на полігармонійному характері процесу функціонування ТС. Результатом роботи є наукові і методологічні положення щодо аналізу полігармонійних процесів ТС, підходи і принципи прогнозування якості продукції, що випускається, зниження енергетичних і інформаційних витрат у процесі виробництва.

Висновки і результати досліджень сформульовані в наступних положеннях.

1. Запропонована класифікація технологічних факторів з позицій гармонійного аналізу, яка дозволяє оцінити ступінь їх впливу на якість готової продукції. Встановлено, що основні фактори, які впливають на якість лезової обробки, носять періодичний або майже-періодичний характер, а зміна в часі якісних параметрів оброблених поверхонь підпорядковується полігармонійному закону. При цьому відповідно до розробленої теорії, точність обробки описується низькочастотними складовими, хвилястість - високочастотними, а шорсткість "білим шумом". Запропонована класифікація дозволяє виявляти структурні зв'язки ТС лезової обробки і є методологічною основою для побудови прогнозних моделей.

2. Встановлено, що випадкові фактори такі як нерівномірність припуску, неоднорідність оброблюваного матеріалу, похибка базування при взаємодії між собою утворюють періодичні коливання. При цьому виникають високочастотні коливання, що діють тільки в циклі обробки, і низькочастотні коливання, що мають ефект післядії. Між режимом різання і параметрами якості лезової обробки існує нелінійна залежність, яка може бути визначена функцією в частотних діапазонах. Ко-

жен вид похибки утворюється збуреннями строго певного частотного діапазону, що є інформаційною основою для діагностики процесу різання і його керування.

3. Отримано математичну модель зміни в часі, яка може бути використана для імітаційного моделювання процесу формування якісних характеристик оброблюваних поверхонь. Ця модель є суперпозицією коливань полігармонійного характеру і вузькосмугового гаусівського шуму. Характеристики полігармонійного процесу відрізняються стійкістю у рамках окремо взятого верстата, а гаусівський шум має характер стаціонарних послідовностей, що мало змінюють свої характеристики, якщо параметри процесу обробки залишаються номінально незмінними.

4. Одержано рівняння реакції ТС на зовнішнє збудження при механічній обробці. Встановлені числові значення ступеня нелінійності ТС і відносна величина стійкості ТС до зовнішніх дій. Отримана залежність дозволяє імітувати і аналізувати поведінку ТС залежно від зміни величини і характеру зовнішніх дій.

5. Встановлено, що збільшення глибини різання і подачі призводить до лінійного збільшення амплітуди і частоти полігармонійного процесу. Великий вплив на розсіювання параметрів якості при лезовій обробці має швидкість різання. Виявлені резонансні зони, в яких спостерігається погіршення якості лезової обробки. Отримана аналітична залежність щодо вибору режимів різання, які дозволяють вийти із зони резонансу, внаслідок чого підвищується стійкість і якість обробки.

6. Запропоновано енергетичний критерій якості механічної обробки, що враховує ентропію процесу як міру інертності ТС. Інертність виявляється в тому, що якісні характеристики лезової обробки змінюються поступово і тим повільніше, чим менша ентропія. Якість обробки регламентується величиною ентропії і коефіцієнтом запасу точності. З урахуванням того, що між енергією полігармонійного процесу і потужністю різання існує прямо пропорційний зв'язок, отримані обмеження на потужність різання. Дані обмеження використовуються при параметричній оптимізації режимів різання за критерієм якості обробки.

7. Створена система, яка дозволяє прогнозувати процес лезової обробки. Вона складається з двох взаємозалежних модулів – основного і дублюючого. В основному модулі прогнозування здійснюється з використанням методу згортання. Основний модуль дозволяє на заданому рівні значущості визначати значення вихідних показників якості лезової обробки і завчасно корегувати режими обробки. За основу дублюючого модуля беруться нейронні технології. Використання нейронних мереж як дублюючої підсистеми дозволяє враховувати умови конкретного виробництва, тобто проектувати ТП механічної обробки цільовим напрямком.

Ґрунтуючись на приналежності процесів механічної обробки до регулярних ланцюгів Маркова, розробили методологію їх використання для прогнозування якості виготовленої продукції при відсутності попередніх даних.

Використання запропонованої прогнозуючої системи підвищує точність прогнозу і зменшує трудомісткість обчислень.

Перевірка адекватності розрахунків дала наступні статистичні величини: дисперсія достовірності, обчислена за результатами дослідів,  $\sigma_x^2=0,00821$ ; дисперсія коефіцієнтів полігармонійної моделі  $\sigma_0^2=0,00042$ . Довірчий інтервал  $\Delta b_i$  коефіцієнтів складає  $\Delta b_i = \pm t \sigma_0 = \pm 3,18 \cdot 0,00042 = \pm 0,001336$ . Тут  $t=3,18$  - табличне значення критерію Стюдента при 5%-ному рівні значущості. Перевірка адекватності полігармонійної моделі проводилася по F-критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості.

8. Створено промислову технологію, яка заснована на використанні металорізального устаткування з ЧПК й автоматичної системи забезпечення якості механічної обробки. Реалізована можливість завантаження програм великого обсягу, що значно перевищують обсяги пам'яті пристроїв ЧПК верстатів, у динамічному режимі. До пристрою ЧПК верстатів приєднуються контролери з клавіатурою й індикатором, що сполучаються кабелем типу "кручена пара" із програмувальним мультиплексором за схемою "зірка". У динамічному режимі, необхідному при роботі з програмами великого обсягу, мережне забезпечення керування верстатами в режимі поділу часу передає сегменти керуючих програм на контролери. Поточний розмір переданих сегментів встановлюється програмним забезпеченням автоматично відповідно до завантаження верстатів і частотою звертання за одержанням інформації.

Техніко-економічні переваги нової технології зумовлені підвищенням продуктивності механічної обробки, підвищенням якості продукції, що випускається, і скороченням витрат на заробітню платню.

9. Запропонована технологія пройшла дослідно-промислові випробування на ВАТ "АВТРАМАТ" і ВАТ Завод "Потенціал" при обробці поршнів Д245-1004021 двигунів внутрішнього згоряння і кілець торчових ущільнень заглибних електродвигунів на токарних верстатах із ЧПК 16К20Ф3. У результаті зменшилося розсіювання діаметральних розмірів при токарній обробці в 2,5-3 рази; зменшено час технологічної підготовки виробництва на 23%; економія від впровадження результатів роботи складає 23640-56000 грн./рік (у цінах 2003 г).

## СПИСОК ПРАЦЬ, ЩО ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М., Куцын А.Н. Энергосбережение при проектировании технологических процессов машиностроительного производства. /Високі технології в машинобудуванні.

Зб. наукових праць ХДПУ. – Харків: ХДПУ, 1998. – С.98-101.

Здобувачем розглянуті принципи проектування енергозберігаючих технологічних процесів.

2. Гордеев А.С., Трищ Р.М. Рассеяние размеров во времени при точении. /Прогресивні технології та системи машинобудування. Зб. наукових праць.- Донецьк: ДонДТУ, 1998. -Вип.6. – С.200-203.

Здобувачем встановлено, що розсіювання дійсних розмірів при механічній обробці описується кусочно-монотонною функцією.

3. Гордеев А.С., Трищ Р.М. Стабилизация точности обработки. /Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - Вып.45. – С.44-45.

Здобувачем розроблена методологія використання апарата Марківських ланцюгів для прогнозування якості механічної обробки.

4. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М., Трищ Р.М. Алгоритм системы управления точностью обработки. /Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - Вып.54. – С.7-11.

Здобувачем розглянуті питання практичного прогнозування якості механічної обробки з використанням ланцюгів Маркова.

5. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М., Трищ Р.М. Повышение запаса точности при механической обработке. /Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып.78. - С.55-56.

Здобувачем розроблені принципи підвищення запасу точності при механічній обробці.

6. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М. Волновые процессы и качество при механической обработке. /Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. - Вып.6. - С.123-126.

Здобувачем встановлено, що в результаті взаємодії випадкових факторів, властивих системі ВППЗ, виникають гармонійні коливання.

7. Гордеев А.С. Спектральный анализ систем механической обработки. /Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2002. - Вып.19. – С. 37-43.

Здобувачем запропонована класифікація якісних параметрів технологічних систем з позицій гармонійного аналізу.

8. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М. Идентификация технологических систем. /Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запорожжє: ЗНТУ, 2002. - №1.-С.93-96.

Здобувачем розглянуті методи кусочної апроксимації, що дозволяють одержувати ефективні моделі технологічних процесів.

9. Гордеев А.С. Энергетический критерий качества механической обработки. /Надійність ін-

струменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2002. - Вип.12. – С.171-177.

Здобувачем розроблено енергетичний критерій якості лезової обробки, що використовується як цільова функція при проведенні параметричної оптимізації.

10. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М. Системна методологія вивчення процесів механічної обробки. /Прогресивні технології та системи машинобудування. Зб. наукових праць.- Донецьк: ДонДТУ, 2002. -Вип.23. – С.71-76.

Здобувачем узагальнена методологія вивчення полігармонійних процесів у машинобудуванні.

11. Гордеев А.С. Феноменологический подход в управлении качеством механической обработки. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. - №5. – С.17-24.

Здобувачем розглянуті питання використання нейронних мереж для аналізу факторних планів у технологічних дослідженнях.

12. Гордеев А.С. Имитационное управление качеством механической обработки. //Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал НТУ „ХПІ”. - 2003. - №1. - т.2. – С.204-207.

Здобувачем розроблено алгоритм імітаційного прогнозування якості механічної обробки.

13. Гордеев А.С., Грицай М.А. Управляемость технологических процессов полигармонического типа. /Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003. - Вип.8. - т.1. – С.39-44.

Здобувачем розглянуті методи фільтрації вихідних збурювань і їхній зв'язок з якістю лезової обробки.

14. Гордеев А.С. Оптимизация полигармонических процессов механической обработки. /Прогресивні технології та системи машинобудування. Зб. наукових праць.- Донецьк: ДонДТУ, 2003. -Вип.25. – С.82-86.

Здобувачем виявлені резонансні зони, що впливають на якість оброблених поверхонь.

15. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М. Полигармоническая модель качества механической обработки. /Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2003. - Вип.14. – С.171-177.

Здобувачем розроблена полігармонійна модель якості механічної обробки.

16. Гордеев А.С., Куцын А.Н. Частотный анализ системы СПИД. /Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Зб. наукових праць. - Харків: НТУ „ХПІ”, 2003.-№16. – С.127-132.

Здобувачем встановлено, що точність обробки в даному циклі пов'язана з випадковими погрішностями, що діяли в попередніх циклах.

17. Гордеев.А.С., Арпентьев Б.М. Применение нейронных сетей при оптимизации технологических процессов. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. - №1. – С.17-

24.

Здобувачем розроблена методологія проведення технологічних експериментів з використанням нейронних мереж.

18. Гордеев А.С., Дерке А.В. Явления резонанса технологической системы. /Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наукових праць. - Краматорськ: ДДМА, 2004. – Вип.16.–С.102-109.

Здобувачем проведена внутрішня оптимізація технологічної системи.

19. Гордеев А.С., Дерке А.В. Построение трехмерных моделей с использованием аналитических технологий. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. - №2. – С.8-10.

Здобувачем розроблена процедура побудови керуючих програм для верстатів із ЧПК на основі включення до складу ПУ передпроцесора, що виконує геометричні і технологічні розрахунки.

20. Гордеев А.С., Дерке А.В. Прогнозирование качества технологических систем. /Високі технології в машинобудуванні: Зб. наукових праць НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004. – Вип.2(9). – С.63-67.

Здобувачем запропонована методика прогнозування якості функціонування технологічних систем з використанням методів кусочної апроксимації.

21. Гордеев А.С., Дерке А.В. Реализация принципа “шесть сигма” в технологии машиностроения. /Прогресивні технології та системи машинобудування. Зб. наукових праць.- Донецьк: ДонДТУ, 2004. -Вип.26. – т.1. - С.174-178.

Здобувачем розглядаються методи практичного впровадження сучасних принципів забезпечення якості механічної обробки.

22. Гордеев А.С. Современные принципы управления качеством в технологии машиностроения. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. - №3. – С.62-65.

Здобувачем розроблено алгоритм імітаційного керування якістю механічної обробки.

23. Гордеев А.С. Повышение качества механической обработки путем минимизации рассеяния скрытой энергии поверхностных слоев. //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. - №5. – С.23-25.

Здобувачем розглянуто вплив енергії деформування зовнішніх шарів на якість оброблених поверхонь.

24. Гордеев А.С., Арпентьев Б.М. Системный подход при решении задач энергосбережения в технологии машиностроения. //Сб. трудов Харьковского института социального прогресса. – Харьков: ХИСИ, 1998. - Вып.3. – С.97-100.

Здобувачем виявлені взаємозв'язки між енергоємністю механічної обробки і якістю оброблених поверхонь.



25. Гордеев А.С., Дерке А.В. Обработка термопластичных материалов. / „Рынок технологий: проблемы и пути решения”. Материалы II-ой Международной научно-практической конференции. – К.: УкрИНТЭИ, - 2004. – С.89-90.

Здобувачем розроблено технологічний процес обробки термопластичних матеріалів на шести координатному промисловому роботі.

## АНОТАЦІЇ

*Гордеев А.С. Технологічні основи прогнозування і забезпечення якості лезової обробки. - Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 - технологія машинобудування. - Національний технічний університет “ХПІ”, Харків, 2006.

Дисертація присвячена розв’язанню науково-технічної проблеми, яка полягає в створенні принципово нових систем прогнозування і забезпечення якості лезової обробки, що враховують стохастичні складові технологічних систем.

На підставі дослідження процесів, що протікають у технологічних системах лезової обробки з використанням гармонійного аналізу випадкових похибок, запропонована полігармонійна модель технологічних процесів для прогнозування якості виготовленої продукції. Розроблено класифікацію похибок лезової обробки, що дозволяє вирішувати основні завдання аналізу технологічних процесів у присутності адитивного гаусівського шуму (узагальненої дії некорельованих процесів).

Розроблено принципи імітаційного керування якістю механічної обробки двох типів: керування Марківського типу за поточним станом (керування без пам’яті) і керування з регульованою глибиною передісторії. Розроблено енергетичний критерій якості, що враховує ефект суперпозицій похибок формоутворення поверхонь, у відповідності до лезової обробки на одній, окремо взятій операції. При цьому запропонована така ієрархія: точність обробки описується низькочастотними складовими, хвилястість - високочастотними, а шорсткість являє собою «білий шум».

У результаті проведених досліджень розроблена і передана на виробництво система забезпечення якості виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згоряння, а також система прогнозування якості лезової обробки. Система містить дублюючі ланки на основі нейронної мережі.

**Ключові слова:** якість механічної обробки, технологічні системи, спектральний аналіз, полігармонійні процеси, імітаційна модель, нейронні мережі, прогнозування.

*Гордеев А.С. Технологические основы прогнозирования и обеспечения качества лезвийной обработки. - Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. - Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, 2006.

Диссертация посвящена решению крупной научно-технической проблемы, которая состоит в создании принципиально новых систем прогнозирования и обеспечения качества лезвийной обработки, учитывающих стохастические составляющие ТС.

На основании исследования процессов, лезвийной обработки, с использованием гармонического анализа случайных погрешностей, предложена полигармоническая модель ТП с прогнозируемым качеством изготавливаемой продукции.

Разработана классификация погрешностей лезвийной обработки с позиций гармонического анализа, которая позволяет решать основные задачи анализа технологических процессов в присутствии аддитивного гауссовского шума (обобщенного действия некоррелированных процессов).

Из анализа полученных результатов следует, что для принятых условий обработки повышение глубины резания и подачи приводит к линейному увеличению амплитуды и частоты полигармонического процесса. Большое влияние на рассеяние размеров оказывает скорость резания. Выявлены скорости резания, при которых отсутствуют явления резонанса. На этих скоростях резания повышается точность обработки и уменьшается величина микронеровностей и шероховатости. Таким образом, повышение качества механической обработки упирается в проблему более точного управления частотой вращения исполнительных механизмов технологического оборудования.

Разработаны принципы имитационного управления качеством механической обработки двух типов: управление Марковского типа по текущему состоянию (управление без памяти) и управление с регулируемой глубиной предыстории.

Экспериментальные исследования позволяют доказать принадлежность процессов лезвийной обработки к эргодическим регулярным цепям Маркова. Были определены переходная и предельная матрицы, а также других характеристик Марковской цепи, что позволило прогнозировать ошибку изготовления деталей.

Для полигармонического процесса глубина предыстории устанавливается фиксированной. При этом выбранный интервал должен давать возможность выявлять заданное число скрытых периодичностей. Увеличение длины предыстории существенно не улучшает качества имитационной модели и даже может ее ухудшить. Это объясняется возрастающим влиянием неучтенных случайных выбросов.

Разработан энергетический критерий качества, учитывающий эффект суперпозиций погрешностей формообразования поверхностей, применительно к лезвийной обработке на отдельно взятой операции. При этом составлена следующая иерархия: точность обработки описывается низко-

частотными составляющими, волнистость - высокочастотными, а шероховатость представляет собой «белый шум».

В результате проведенных исследований разработана и передана на производство система обеспечения качества изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания. Определены периоды колебаний, их амплитуды и влияние на эти параметры режимов обработки. Разработано программное обеспечение для системы ЧПУ токарных станков, позволяющее минимизировать рассеяние размеров, а также величину волнистости при механической обработке. На производство передана так же система прогнозирования качества лезвийной обработки Система содержит дублирующие звенья на основе нейронной сети.

**Ключевые слова:** качество механической обработки, технологические системы, спектральный анализ, полигармонические процессы, имитационная модель, нейронные сети, прогнозирование.

*Gordeev A.S. Technological bases of prognosis and providing quality of edge working. - Manuscript.*

The dissertation on competition of a scientific degree of Dr.Sci.Tech. on a speciality 05.02.08 - technology of mechanical engineering. - National technical university "KPI", Kharkov, 2006.

The dissertation is devoted to the decision of a large scientific and technical problem which consists in creation of essentially new control systems by quality of the machining, taking into account stochastic making technological systems. On the basis of research of the processes proceeding in technological systems, with use frequency the analysis of casual errors, the polyharmonious model of synthesis of technological processes with predicted quality of made production is offered.

Principles of imitating quality management of machining of two types are developed: management Markov of type on the current condition (management without memory) and management with adjustable depth of background. Definition of transitive and limiting matrixes, and also other characteristics Markov circuits will allow to predict a mistake of manufacturing of details.

As a result of the carried out researches the system of maintenance of quality of manufacturing of pistons of engines of internal combustion is developed and transferred on manufacture, and also the system of designing of technological processes under the given operational characteristics is transferred on manufacture. The system contains duplicating parts on a basis networks.

**Key words:** quality of machining, technological systems, the spectral analysis, polyharmonious processes, imitating model, networks, forecasting.