

ЗАСТОСУВАННЯМ ЧУТТЄВОЇ СТАТИСТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ В МАШИНОБУДУВАННІ

Тріщ Р.М.¹, Грінченко Г.С.², Катрич О.О.¹, Яковлев М.Ю.³,
Багаєв І.О.², Мірошник Є.І.¹

¹*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"*

²*Українська інженерно-педагогічна академія*

³*Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки
Збройних Сил України*

Інформація про авторів:

Тріщ Роман Михайлович (Trishch Roman): ORCID: 0000-0002-9503-8428; e-mail: trich_@ukr.net, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, 61000, Україна

Грінченко Ганна Сергіївна (Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@upr.edu.ua кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Катрич Олег Олександрович (Katrych Oleh): ORCID: 0000-0002-5749-6006; e-mail: o.katrich@kernel.ua, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", докторант кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, 61000, Україна.

Яковлев Максим Юрійович (Yakovlev Maxym): ORCID: 0000-0002-3009-0719; e-mail: myug2015@gmail.com, Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки Збройних Сил України, Харків, 61000, Україна

Багаєв Ігор Олександрович (Bahayev Ihor): ORCID: 0000-0002-9101-5114.; e-mail: i.a.bagayev@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мірошник Євген Іванович (Miroshnyk Yevhen): ORCID: 0009-0008-5391-1066; e-mail: y.i.miroshnyk@khai.edu, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, 61000, Україна

В статті розглянуто підходи до оцінювання моделі точності виготовлення деталей з позиції адекватності. Для перевірки адекватності моделі пропонується використовувати чуттєву характеристику. На масових експериментах перевірено гіпотезу про відповідність законів розподілу певним видам механічної обробки. Проаналізовано та виокремлено основні проблеми при виробництві деталей, а саме чинники, що впливають на якість процесів. Так, врахування всіх чинників є складною задачею, що вирішується за допомогою застосування на практиці параметрів розсіювання дійсних розмірів, які вивчають за допомогою законів розподілу. Визначення розсіювання дійсних розмірів у виробничих процесах використовує закони розподілу для аналізу та прогнозування відхилень. Це допомагає удосконалити точність обробки та забезпечити високу якість виготовлених деталей. В статті запропоновано використання чутливої "λ-характеристики" для оцінки адекватності моделі точності виготовлення у зв'язку з тим, що традиційні критерії згоди не завжди гарантують достатню адекватність. Використання "λ-характеристики" дозволяє отримати більш точний опис закону розподілу. Запропонована методика використання "λ-характеристики" виявляється перспективною для застосування в промисловості, враховуючи деталізовану інформацію, яку надає "λ-характеристика".

Ключові слова: оцінювання якості, точність технології, адекватність, закон розподілу, механічна обробка

Trishch R., Hrinchenko H., Katrych O., Yakovlev M., Bahaiev I., Miroshnyk Ye.
“Application of a sensory statistical characteristic for quality assessment in mechanical engineering”

The article considers approaches to evaluating the model of parts manufacturing accuracy from the standpoint of adequacy. To check the adequacy of the model, it is proposed to use a sensory characteristic. The hypothesis about the conformity of the distribution laws to certain types of machining is tested on mass experiments. The main problems in the production of parts, namely the factors that affect the quality of processes, are analysed and highlighted. Thus, considering all factors is a complex task that can be solved by applying in practice the parameters of scattering of actual dimensions, which are studied using the laws of distribution. Determining the scatter of true dimensions in manufacturing processes uses distribution laws to analyse and predict deviations. This helps to improve machining accuracy and ensure high quality of manufactured parts. The article proposes the use of a sensitive “ λ -characteristic” to assess the adequacy of the manufacturing accuracy model, since traditional agreement criteria do not always guarantee sufficient adequacy. The use of the “ λ -characteristic” allows to obtain a more accurate description of the distribution law. The proposed methodology for using the “ λ -characteristic” appears to be promising for use in industry, given the detailed information provided by the “ λ -characteristic”.

Keywords: quality assessment, technology accuracy, adequacy, distribution law, machining

Постановка проблеми та її зв’язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Ключовим елементом успішної економічної діяльності України на світовому ринку є виробництво конкурентоспроможної продукції, особливо в галузях, які традиційно забезпечують експорт. Машинобудування виступає як стратегічно важлива галузь промисловості в країні, оскільки його розвиток є визначальним для якості продукції в інших галузях національної економіки. Сучасне машинобудування має за мету виготовлення високоякісної та конкурентоспроможної продукції, при цьому якість виробу залежить від якості підготовчих процесів, обробки, монтажу, тобто повинні забезпечувати якість всіх технологічних процесів.

Найважливішим показником якості в технології машинобудування є точність механічної обробки. Фактична точність залежить від безлічі різних чинників, серед яких є якість та точність обладнання, якість інструментів, стабільність процесу, системи вимірювання і контролю, умови робочого середовища, а також тривалість роботи і знос інструменту. Результат дії цих факторів спрогнозувати дуже важко, але результатом впливу чинників є розсіювання дійсних розмірів, яке вивчають за допомогою законів розподілу. Крім того, вивчення розсіювання дійсних розмірів у виробничих процесах використовує закони розподілу для аналізу та прогнозування відхилень. Це допомагає удосконалити точність обробки та забезпечити високу якість виготовлених деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Точність механічної обробки важлива в технології машинобудування і може бути визначена рядом чинників, які можуть впливати на точність механічної обробки, так наприклад:

- якість та точність самого обладнання, такого як верстати, фрезери, токарні, мають прямий вплив на результат обробки;
- якість інструментів, використовуваних у процесі обробки, включаючи свердла, фрези, токарні ножі, грати, може впливати на точність і якість обробки;
- контроль та управління параметрами процесу, такими як швидкість обертання, подача інструменту, глибина різь і температура, є важливими для забезпечення стабільності та точності обробки;
- використання точних систем вимірювання та контролю для перевірки розмірів в процесі обробки допомагає виявляти будь-які відхилення та коригувати їх;

- фактори робочого середовища, такі як температура, вологість і стійкість до коливань, можуть впливати на точність обладнання та процесу механічної обробки;
- час роботи та стан інструменту можуть впливати на його точність та здатність зберігати геометричні характеристики.

Врахування цих чинників допомагає покращити точність виробничих операцій і забезпечити високу якість виготовлених деталей. Закони розподілу, можуть використовуватися для вивчення розсіювання дійсних розмірів та оцінки ступеня варіації у виробничих процесах.

Вирішення питань забезпечення якості та точності виробничих операцій розглядається з різних позицій сучасними дослідниками. Так, у працях [1, 2] обговорюються методи автоматичного налаштування, що ґрунтуються на припущенні про лінійний характер зміщення налаштувань інструменту щодо поверхні деталі. Головною метою використання цих методів є зменшення розсіювання розмірів деталей до певного значення. Це досягається шляхом періодичної корекції положення інструменту в тих випадках, коли розміри деталей перетинають межу допуску. Між границями налаштувань знаходиться зона нечутливості. Інформація про розміри всередині цієї зони не використовується для керування, що призводить до того, що такі методи не забезпечують досягнення максимальної точності обробки або використовуються при виготовленні деталей з грубою якістю точності.

У роботі [3] представлений метод пульсуючого підналагодження, в якому обидві межі налаштувань об'єднані в одну, що призводить до усунення зони нечутливості. Підналаштування виконуються на кожному кроці імпульсом, який є постійним за величиною та змінним за знаком. Цей метод надає найповнішу компенсацію систематичної складової та сприяє зростанню випадкової складової похибки механічної обробки. Надалі розвиток автоматичних методів підналагодження спрямований на досягнення максимальної точності механічної обробки в конкретних умовах. При цьому зберігається запропонована для пульсуючого підналагодження об'єднана межа налаштувань, яка, як правило, знаходиться в середині поля допуску. Підвищення ефективності підналагодження досягається за допомогою застосування налаштувального імпульсу, який змінюється як за знаком, так і за величиною.

У роботі [4] детально розглядається оптимальне підвищення точності обробки за допомогою компенсації випадкового зміщення налаштувань, незалежно від наявності лінійного тренду (який у деяких випадках може і відсутній). У цьому дослідженні використовуються методи статистичного прогнозування. Далі, у роботі [1], проведено науковий аналіз, заснований на теорії оптимальних систем. Таким чином, попередні (як раніше відомі, так і нові) висновки у галузі оптимального автоматичного підналагодження дають можливість компенсувати як лінійний тренд, так і випадкове зміщення налаштувань. Проте слід зауважити, що алгоритми автоматичного підналагодження в усіх цих дослідженнях були розроблені з обмеженими властивостями вихідного процесу, вираженими у його статистичних характеристиках.

У роботах [1, 5] параметри алгоритму підналагодження пов'язані з класом випадкового процесу, що моделює послідовність розмірів заготовок, оброблених без підналагодження. В цих дослідженнях розглядалися процеси з незалежними прирощеннями, стаціонарні процеси з певною кореляційною функцією або дельта-корельовані випадкові послідовності, які накладалися на лінійний тренд і таке інше. У роботах [5-7] були прийняті апріорно відомі параметри лінійного тренду. Таким чином, у більшості випадків, завдання синтезу систем автопідналагодження розв'язується за умови наявності повної апріорної інформації.

Далі розвиток автоматичних методів підналагодження, передусім, пов'язаний з розширенням можливостей алгоритмів, а саме їх універсалізацією для одночасної компенсації довільних трендів та випадкових зміщень налаштувань. У цьому контексті важливо, щоб система автоматичного підналагодження залишалася ефективною в усьому

діапазоні можливих значень параметрів некерованого процесу, включаючи його тренди та кореляційні функції.

Одним з можливих шляхів вирішення цього завдання, як відомо, є надання системі управління адаптивних властивостей. У наявності таких властивостей структура чи параметри алгоритму можуть змінюватися відповідно до оцінки якості результатів управління [8-10]. Цей підхід був використаний у роботах [11,12], де параметри алгоритму коригуються відповідно до поточної оцінки дисперсії розмірів деталей, оброблених з використанням підналагодження, та у роботі [13], де коригування алгоритму (або самоналаштування системи автоматичного підналагодження) відбувається на основі величини відхилень від нуля поточних значень коефіцієнта кореляції між розмірами "підналагоджених" деталей.

Як вже вказувалося раніше, одним з ключових показників якості є точність [14-17]. Під час збірки основні технічні вимоги зводяться до досягнення точності у положенні, обертанні, лінійному переміщенні та інших рухомих частин вузлів і деталей щодо базових поверхонь. Точність визначення відносного положення деталей, особливо в тих випадках, коли на оброблюваній деталі відсутні виступаючі борти, залежить від точності функціонування складального механізму. Максимальні результати в розв'язанні комплексної задачі точності, продуктивності та економічності виробництва продукції (машин і приладів) зазвичай досягаються при врахуванні трьох основних позицій, що охоплюють всі етапи виробництва та експлуатації: конструкторсько-експлуатаційної, технологічної і метрологічної.

Знання закону розподілу дуже важливе для розв'язання практичних задач у технології машинобудування, бо це дає змогу розв'язувати безліч практичних задач за умов повної апріорної визначеності, і це основна умова для розв'язання цих задач за малими вибірками. Також, за відомого закону розподілу значно спрощується метод розв'язання практичних задач за рахунок застосування параметричних критеріїв, які забезпечені методично і табульовані. Останнім часом у машинобудуванні накопичилася велика кількість статистичного матеріалу, який показував, що існують різні закони розподілу і залежать вони від точності (квалітету) механічної обробки [18, 19].

Метою роботи є підвищення точності виготовлення деталей на основі оцінки адекватності моделі точності виробництва деталей.

Виклад основного матеріалу

На практиці, для оцінки закону розподілу, використовують критерії згоди Пірсона, Колмогорова, Мізеса та ін., але згода не означає адекватність, тому бажано крім критеріїв згоди для перевірки моделі на адекватність використовувати чутливі характеристики.

Справді, спростування гіпотези в жодному разі не означає логічного спростування, так само як і підтвердження гіпотези не спричиняє логічного доказу справедливості гіпотези. Справді, спростування гіпотези може статися і в разі, коли гіпотеза справедлива, але, оскільки ε досить мало, то на практиці вважається, що цією можливістю можна знехтувати. Підтвердження гіпотези може здійснитися і в разі, якщо наша гіпотеза невірна, тому її необхідно перевірити за допомогою інших засобів перевірки.

Необхідно зазначити, що всі критерії згоди, які застосовують (Пірсона, Колмогорова, Мізеса та низку інших), отримано в разі повністю визначеного гіпотетичного розподілу за умови, що обсяг випробувань $n \rightarrow \infty$. На практиці параметри розподілів невідомі і їх оцінюють за вибіркою. Тому граничний розподіл, який використовується для критерію згоди, залежить від прийнятого методу оцінки параметрів. Завдання знаходження граничного при розподілу тільки для величини χ^2 за наявності параметрів, що оцінюються за вибіркою, було розглянуто Фішером, який показав за вельми загальних умов χ^2 , за істотними обмеженнями, що граничним при $n \rightarrow \infty$ розподілом величини, якщо невідомі параметри

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$, що оцінюються за вибіркою за методом максимальної правдоподібності, є розподіл χ^2 з $(r-1-k)$ ступенями свободи.

Зазначимо, що якщо невідомі параметри оцінюються іншими методами, то граничний при $n \rightarrow \infty$ розподіл величини χ^2 буде, взагалі кажучи, відмінним від χ^2 - розподілу. Зауважимо, що метод максимальної правдоподібності для багатьох розподілів дає зміщені оцінки параметрів розподілу. Тому тут також виникає помилка в оцінці та в твердженні.

Отже, з вище сказаного випливає, що для перевірки на адекватність моделі, нам необхідні, крім критерію згоди, й інші характеристики. Однією з таких характеристик є λ - характеристика.

Форма кривої " λ - характеристика", встановлена за досвідченими даними, є однією з істотних підстав для вибору того чи іншого аналітичного типу функції розподілу. Цю характеристику широко застосовують у курсі теорії надійності. " λ - характеристика" - це інтенсивність відмов.

За визначенням " λ - характеристика" - це модуль темпу спадання функції надійності $\ell(t)$.

$$\lambda(t) = \left| \frac{d}{dt} \ln \ell(t) \right| = - \frac{\ell'(t)}{\ell(t)}$$

Під темпом кривої, як і в економіці, мається на увазі логарифмічна похідна цієї кривої.

Наведемо ще ймовірнісне визначення $\lambda(r)$.

Нехай $p(r, r + \tau)$ - умовна ймовірність відмов об'єкта у віці $(r, r + \tau)$ за умови його невідмови в $(0, \tau)$:

$$p(r, r + \tau) = \frac{F(r + \tau) - F(r)}{1 - F(r)}$$

$p(r)$ - можна назвати віковим коефіцієнтом відмови.

Тоді можна дати таке визначення: " λ - характеристика" - це межа відношення умовної ймовірності $p(r, r + \tau)$ до Δr , коли останнє прагне до нуля.

$$\lambda(r) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{p(r, r + \tau)}{\tau} = \frac{f(r)}{1 - F(r)}; \quad (1)$$

$\lambda(r)$ - безперервна в усіх точках, де безперервна густина $f(r)$. З виразу (1) випливає, що $\lambda(0) = f(0)$, $\lambda(r) > f(r)$, а максимум $\lambda(r)$, якщо він існує, досягається за більших r , ніж перший максимум $f(r)$.

Користуючись формулою (1) можна отримати, що функція розподілу $F(r)$ визначається через $\lambda(r)$ загальним виразом

$$F(r) = 1 - e^{-\int_0^r \lambda(x) dx} \quad (2)$$

тобто функція розподілу $F(r)$ повністю визначається " λ - характеристикою".

З визначення $\lambda(r)$ можна отримати нерівності:

якщо $[r, r + \tau]$ належить області зростання густини $f(r)$, то

$$\lambda(r) < \frac{1}{\tau} p(r, r + \tau) \quad (3)$$

а якщо області спадання, то

$$\lambda(r) > \frac{1}{\tau} p(r, r + \tau) \quad (4)$$

Якщо $f(r)$ - унімодальна (одночасна), то вираз (3) виконується в домодальному, а вираз (4) - у післямодальному значенні r .

Імовірності $p(r, r + \tau)$ можна безпосередньо виразити через "λ - характеристику":

$$p(r, r + \tau) = 1 - \frac{1 - F(r + \tau)}{1 - F(r)} = 1 - e^{-\int_r^{r+\tau} \lambda(x) dx} \quad (5)$$

Розглянемо питання побудови емпіричної "λ - характеристики".

Зі співвідношення (5) випливає, що

$$\bar{\lambda}_{r,\tau} = \frac{1}{\tau} \int_r^{r+\tau} \lambda(x) dx = -\frac{1}{\tau} \ln [1 - p(r, r + \tau)] \quad (6)$$

Вважаючи інтегральне середнє $\bar{\lambda}_{r,\tau}$ у виразі (6) рівним спостережуваному $\tilde{\lambda}_{r,\tau}$ і замінюючи p на \tilde{p} , отримаємо спроможну, хоча й зміщену, оцінку для "λ - характеристики":

$$\tilde{\lambda} = -\frac{1}{\tau} \ln [1 - \tilde{p}(r, r + \tau)] \quad (7)$$

Похибка, додаткова до статистичної, виникає при ототожненні $\tilde{\lambda}_{r,\tau} \cong \bar{\lambda}(r + 0,5\tau)$.

На практиці широко поширена оцінка, заснована на інших припущеннях

$$\bar{\lambda}(\tilde{n}) = \frac{F'(c)}{1 - F(c)} \cong \frac{F(r + \tau) - F(r)}{\tau [1 - F(c)]},$$

$$r < c < r + \tau, \quad c \cong r + 0,5\tau; \quad 1 - F(c) \cong 1 - 0,5[F(r + \tau) + F(r)]$$

$$\bar{\lambda}(r + 0,5\tau) \cong \frac{F(r + \tau) - F(r)}{\tau [1 - 0,5 (F(r + \tau) + F(r))]}, \quad (8)$$

або зручнішій формі в разі безпосередньо спостережуваних упорядкованих даних вибірки обсягу n .

$$\lambda(r_{(i)}) = \frac{n(r_{(i)})}{\left[n - \sum_{j=1}^{i-1} n(r_{(j)}) \right] (r_{(i)} - r_{(i-1)})} \quad (9)$$

У цій формі оцінку (8) можна подавати у вигляді:

$$\bar{\lambda}(r + 0,5\tau) \cong \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\tilde{p}(r, r + \tau)}{1 - 0,5 \tilde{p}(r, r + \tau)}, \quad (10)$$

Оцінка (10) також прийнятна, принаймні, для не дуже великих $r(i)$, якщо теоретична $\lambda(r)$ не є необмежено зростаючою.

Відомо, що оцінка "λ - характеристики" схильна до великих випадкових варіацій, особливо наприкінці випробувань, коли кількість об'єктів залишається невеликою. Тому для достовірної оцінки "λ - характеристики" необхідно мати у своєму розпорядженні велику вибірку.

Методика оцінювання розподілу

Підшипник кочення є найпоширенішим складальним вузлом у машинобудуванні і від його точності залежить якість машин. Крім цього, до деталей підшипника кочення (зовнішнє кільце, внутрішнє кільце, кульки або ролики) висуваються високі вимоги до точності їх виготовлення. Точність виготовлення деталей визначає клас точності підшипника. Для оцінки точності виготовлення деталей підшипників кочення проводилися дослідження на ВАТ "Харківський підшипниковий завод", де був проведений статистичний аналіз точності деталей, що обробляються, - кілець підшипника. Було проконтрольовано по 200 деталей різних квалітетів точності. Дійсні значення піддавалися оцінці на адекватність, застосовуючи критерій згоди Пірсона. Аналіз показав узгодженість розсіювання дійсних значень передбачуваним законам розподілу.

Методика оцінки моделі точності виготовлення на адекватність полягає в такому:

1. Будуються графіки теоретичної " λ - характеристики", використовуючи емпіричні значення, для різних законів розподілу:

для закону рівної ймовірності:

$$\lambda(x) = \frac{1}{b-x}, \quad a < x < b$$

для закону Сімпсона:

$$\lambda(x) = \begin{cases} \frac{4(x-a)}{(b-a)^2 - 2(x-a)^2}, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ \frac{2}{b-x}, & \frac{a+b}{2} < x < b \end{cases}$$

для нормального закону:

$$\lambda(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right)}{\int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right) dx}$$

2. Проводимо вимірювання дійсних розмірів деталей, виготовлених за певних умов, не змінюючи технології. Таких вимірювань має бути досить багато.

3. Вибудовуємо всі значення в порядку зростання, розбиваємо величину розмаху на $\sqrt[3]{n}$ інтервали і рахуємо частоту потрапляння в кожен інтервал.

4. За формулою (9) визначаємо емпіричне значення " λ - характеристики" для кожного інтервалу.

5. Порівнюємо емпіричні значення з теоретичними " λ - характеристиками" для різних законів розподілу.

Висновки

Знання закону розподілу дійсних розмірів деталей дуже важливе, тому що це спрощує розв'язання практичних завдань, пов'язаних з оцінкою, прогнозуванням і управлінням якістю виготовлення. Крім того, знання закону розподілу дає змогу розв'язувати практичні завдання за малими вибірками, що дуже важливо, особливо в серійному виробництві.

Пропонується для оцінки адекватності моделі точності виготовлення використовувати чутливу " λ -характеристику", тому що застосовувані критерії згоди не гарантують адекватності. Ця характеристика дає змогу точніше визначити закон розподілу. Запропонована методика застосування " λ - характеристики" дасть змогу її використовувати в промисловості.

Методика застосування " λ -характеристики" виявляється вельми перспективною для промисловості, оскільки вона пропонує більш точний та чутливий підхід до оцінки

адекватності моделі точності виробництва. За рахунок деталізованої інформації, яку надає "λ-характеристика", можна отримати більш глибоке розуміння закону розподілу, що важливо для вдосконалення та оптимізації виробничих процесів.

Використання "λ-характеристики" дозволяє уникнути недоліків, пов'язаних із застосуванням традиційних критеріїв згоди, і надає можливість враховувати більш різноманітні аспекти розподілу точності виробництва. Отже, впровадження цієї методики може призвести до значного покращення процесів контролю та управління точністю виробництва, що, в свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності та задоволенню високих стандартів якості в промисловості.

Список використаних джерел:

1. Vasiljev E. Modal synthesis of precision control systems / E. Vasiljev, E. Serdechnaya, A. Tavolzhanskij // E3S Web of Conferences. – 2020. – № 224 (13). – P. 01006. doi:10.1051/e3sconf/202022401006.
2. Vershinin, Y. High Dynamic Precision Control System / Y. Vershinin // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research. – 2018. – № 8. – P. 13–18. doi: 10.24247/ijeeerjun20182.
3. Zhang Qingying Computer vision applied in the precision control system / Qingying Zhang // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). – 2002. – № 15. – P. 87–89. doi: 10.3901/CJME.2002.01.087.
4. Rogin F. Automatic debugging of System-on-a-Chip designs / F. Rogin, R. Drechsler, S. Rulke // SOC Conference, IEEE. – Belfast, 2009. – № 11089089. – P. 333–336. doi:10.1109/SOCCON.2009.5398027.
5. Zhang S. Change impact analysis for Aspect J programs / S. Zhang, Z. Gu, Y. Lin, J. Zhao // Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Software Maintenance. – Beijing, 2008. – P. 87–96.
6. Prediction of Machining Accuracy for Vertical Lathes / M. Holub [et al.] // Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances. – 2013. – P. 41-48. doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
7. Automatic debugging of real-time systems based on incremental satisfiability counting / S. Andrei [et al.] // IEEE Transactions on Computers. – 2006. – № 55. – P. 830–842. doi:10.1109/TC.2006.97.
8. Винник В. Аналіз методів обробки криволінійних поверхонь кулачків розподільних валів орієнтованого інструментом / В. Винник // Технічні науки та технології. – 2019. – № 4(18). – С. 74-84. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-74-84.
9. Шорнікова С. Шорсткість поверхні як одна із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей. методи та засоби контролю / С. Шорнікова // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 13-20. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.5.2.
10. Технологічні проблеми виготовлення корпусних деталей хімічних машин та апаратів / Пуховський Є., Фролов В., Приходько В., Бецко Ю. // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2023. – № 4 (50). – С. 92-103. DOI: 10.32845/msnau.2022.4.13.
11. Зенкін А. Особливості створення верстатів для складання з'єднань з термодією / Зенкін А., Оборський І., Остапук Ю. // Технологія і техніка друкарства. – 2012. – С. 53-59. DOI: 10.20535/2077-7264.2(36).2012.32449.
12. Зенкін А. С. Технологія машинобудування / А. С. Зенкін, В. Д. Каразей, Є. О. Гобатюк, М. П. Мазур. – Львів : Новий світ_2000, 2009. – 358 с.
13. Метод віртуального базування деталей з формою, наближеною до форми заготовок / Планковський С. І., Цегельник Є. В., Минтюк В. Б., Задорожний С. М., Комбаров В. В. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 4. – С. 74-82. DOI: 10.32620/akt.2020.4.09.
14. Григор'єва Н. С. Прогнозування розвитку комп'ютерно-інтегрованого складального виробництва приладобудування / Григор'єва Н. С., Марчук І. В., Шабайкович В. Аю // Перспективні технології та прилади. – 2022. – С. 32-37. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-05.
15. Пасічник В. А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва : дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / В. А. Пасічник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2009. – 412 с.
16. Точність координувати отворів малого діаметру з напрямком різального інструменту / Бурдейна В. М., Грінченко Г. С., Артох С. М., Трищ А. Р. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2021. – № 2 (8). – С.9-14. Doi: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02>
17. Алгоритм проектування систем автоматичного управління точністю механічної обробки на верстатах з ЧПУ / Грінченко Г. С., Теслов О., Козлов М. С., Марченко О. О., Захаров С. О., Герасимов Є. В. // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 50-61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61
18. Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints / Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Hrinchenko H. // *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner ; Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_34

19. Ensuring the quality of fuel equipment joints in series production conditions by graded kitting / Kupriyanov O., Hrinchenko H., Strelchuk R., Kupriyanov M. // *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium Wmcaus*, 2022, AIP Conf. Proc. – 2023. – 2889, 030003. DOI:10.1063/5.0173115

References:

1. Vasiljev, E, Serdechnaya, E & Tavalzhanskij, A 2020, 'Modal synthesis of precision control systems', *E3S Web of Conferences*, no 224, Pp. 01006. doi:10.1051/e3sconf/202022401006.
2. Vershinin, Y 2018, 'High Dynamic Precision Control System', *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, no 8, Pp. 13–18. doi: 10.24247/ijeerjun20182.
3. Zhang Qingying 2002, 'Computer vision applied in the precision control system', *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, no 15, Pp. 87–89. doi: 10.3901/CJME.2002.01.087.
4. Rogin, F, Drechsler, R & Rulke, S 2009, 'Automatic debugging of System-on-a-Chip designs', *SOC Conference, IEEE*, no 11089089, Pp. 333–336. doi:10.1109/SOCCON.2009.5398027.
5. Zhang, S, Gu, Z, Lin, Y & Zhao, J 2008, 'Change impact analysis for Aspect J programs', *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Software Maintenance*, Pp. 87–96.
6. Holub, M [et al.] 2013, 'Prediction of Machining Accuracy for Vertical Lathes', *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*, Pp. 41-48. doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
7. Andrei, S [et al.] 2006, 'Automatic debugging of real-time systems based on incremental satisfiability counting', *IEEE Transactions on Computers*, no 55, Pp. 830–842. doi:10.1109/TC.2006.97.
8. Vynnyk, V 2019, 'Analiz metodiv obrobky kryvoliniinykh poverkhon kulachkiv rozpodilnykh valiv oriientovanyim instrumentom' [Analysis of methods for processing the cam profiles of distribution shafts with an oriented tool], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, no 4(18), Pp. 74-84. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-74-84.
9. Shornikova, S 2022, 'Shorstkist poverkhni yak odna iz osnovnykh heometrychnykh kharakterystyk yakosti poverkhni detalei. metody ta zasoby kontroliu' [The surface roughness as one of the primary geometric characteristics of surface quality of parts. Methods and means of control], *Tavriskiyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky*, no 5, Pp. 13-20. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.5.2.
10. Pukhovskiy, Y, Frolov, V, Prykhodko, V & Betsko, Y 2023, 'Tekhnolohichni problemy vyhotovlennia korpusnykh detalei khimichnykh mashyn ta aparatyv' [Technological issues in manufacturing casing parts for chemical machinery and apparatus], *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv*, no 4 (50), Pp. 92-103. DOI: 10.32845/msnau.2022.4.13.
11. Zenkin, A, Oborskiy, I, Ostapuk, Yu 2012, 'Osoblyvosti stvorennia verstativ dlia skladannia ziednan z termodiieiu' [Features of creating machines for assembling connections with thermal effect], *Tekhnolohiia i tekhnika druzarstva*, Pp. 53-59. DOI: 10.20535/2077-7264.2(36).2012.32449.
12. Zenkin, AC, Karazei, VD, Hobatiuk, YO & Mazur, MP 2009, *Tekhnolohiia mashynobuduvannia [Mechanical engineering technology]*, Novyi svit_2000, Lviv.
13. Plankovskiy, SI, Tsehelnik, YV, Myntiuk, VB, Zadorozhnyi, SM & Kombarov, VV 2020, 'Metod virtualnoho bazuvannia detalei z formoiu, nablyzhenoiu do formy zahotovok' [The method of virtual basing of parts with a shape approximating that of the blanks], *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia*, no 4, Pp. 74-82. DOI: 10.32620/akt.2020.4.09.
14. Hryhorieva, NS, Marchuk, IV & Shabaikovych, VA 2022, 'Prohnozuvannia rozvytku kompiuterno-intehrovanoho skladalnoho vyrobnytstva prykladobuduvannia' [Forecasting the development of computer-integrated assembly production in instrument making], *Perspektyvni tekhnolohii ta pryklady*, Pp. 32-37. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-05.
15. Pasichnyk, VA 2009, 'Osnovy kompiuterno-intehrovanoho mekhanoskladalnoho vyrobnytstva' [Fundamentals of computer-integrated mechanical assembly production], Dokt. tekhn. n. thesis, Kyiv.
16. Burdeina, VM, Hrinchenko, HS, Artiukh, SM & Trishch, AR 2021 'Tochnist koordynuvaty otvoriv maloho diametru z napriamkom rizalnoho instrumentu' [The precision of coordinating small diameter holes with the direction of the cutting tool], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, no 2 (8), Pp. 9-14. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02>
17. Hrinchenko, HS, Teslov, O, Kozlov, MS, Marchenko, OO, Zakharov, SO & Herasymov, YV 2022, 'Alhorytm proektuvannia system avtomatychnoho upravlinnia tochnistiu mekhanichnoi obrobky na verstatakh z ChPU' [Algorithm for designing precision control systems for mechanical processing on CNC machines], *Mashynobuduvannia*, iss 29, Pp. 50-61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61
18. Kupriyanov, O, Trishch, R, Dichev, D & Hrinchenko, H 2024, 'Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints' In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_34
19. Kupriyanov, O, Hrinchenko, H, Strelchuk, R & Kupriyanov, M 2023, 'Ensuring the quality of fuel equipment joints in series production conditions by graded kitting' *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium Wmcaus 2022, AIP Conf. Proc.* 2889, 030003. DOI: 10.1063/5.0173115

Стаття надійшла до редакції 09 грудня 2023 року.