

## АЛГОРИТМ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

© Грінченко Г.С.<sup>1</sup>, Теслов О.<sup>2</sup>, Козлов М.С.<sup>1</sup>, Марченко О.О.<sup>1</sup>, Захаров С.О.<sup>1</sup>, Герасимов Є.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Українська інженерно-педагогічна академія*

<sup>2</sup>*Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"*

### Інформація про авторів:

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

**Теслов Олександр Анатолійович (Теслов Александр Анатольевич, Teslov Oleksandr):** ORCID: 0000-0003-3673-9117; e-mail: trich\_@ukr.net, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, Харківська область, 61000, Україна.

**Козлов Максим Сергійович (Козлов Максим Сергеевич, Kozlov Maksym):** ORCID: 0000-0001-8954-268X; e-mail: max\_kozlov98@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Марченко Олександр Олексійович (Марченко Александр Алексеевич, Marchenko Oleksandr):** ORCID: 0000-0002-7469-0089; e-mail: marrkerr@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Захаров Сергій Олександрович (Захаров Сергей Александрович, Zakharov Serhii):** ORCID: 0000-0001-8192-9126; e-mail: zaharov.lex@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Герасимов Євген Вікторович (Герасимов Евгений Викторович, Herasymov Yevhen):** ORCID: 0000-0003-4026-2796; e-mail: zluger@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті запропоновано структурну схему системи управління точністю обробки для токарного верстата з числовим програмним управлінням (ЧПУ), застосовуючи для цього алгоритм керування, що ґрунтується на статистичному прогнозуванні. Схема системи управління можна застосувати до різних верстатів з різними системами ЧПУ, головна умова, щоби система ЧПУ дозволяла підключення сторонньої електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). В статті розглянуто на прикладі верстата 16К20Ф3 з допомогою системи управління ЧПУ 2Р22, застосування схеми управління точності та її математичне забезпечення, що включає у собі як алгоритми обчислення величин корекції, так і процедури вибору оптимальної послідовності. Окремо розглянуто етапи оцінювання точності та представлено докладні алгоритми «Оцінка помилки налаштування та довірчих меж» та «Визначення сфери дії незалежних випадкових факторів». В результаті проведених досліджень автоматичного підналагодження за алгоритмом управління точністю обробки виявлено, що вихідна послідовність розмірів деталей (тобто розмірів деталей, виготовлених з підналагодженням) має постійне середнє значення, мало відрізняється від заданого розміру, і кореляційну функцію незначно відмінну від нуля, що свідчить про повне вичерпання можливостей подальшого підвищення точності обробки методами автоматичної налагодження, тобто шляхом використання інформації про розміри раніше оброблених деталей.

**Ключові слова:** точність обробки, токарний верстат, системи управління точністю, автоматичне налагодження.

*Hrinchenko H., Teslov O., Kozlov M., Marchenko O., Zakharov S., Herasymov Ye.* “Design algorithm of systems for automatic control of mechanical processing accuracy on CNC machines”.

The article proposes a structural diagram of the processing precision control system for a CNC lathe, using a control algorithm based on statistical forecasting. The scheme of the control system can be applied to different machines with different CNC systems; the main condition is that the CNC system allows the connection of a third-party electronic computer (EC). Using the example of a 16K20F3 machine with the help of a 2P22 CNC control system, the application of the accuracy control scheme and its mathematical support, which includes both algorithms for calculating correction values and procedures for choosing the optimal sequence, is considered in the article. The stages of accuracy assessment are considered separately, and the detailed algorithms "Estimation of tuning error and confidence limits" and "Determination of the scope of independent random factors" are presented. As a result of the conducted research on automatic sub-tuning according to the processing precision control algorithm, it was found that the original sequence of part sizes (that is, the sizes of parts manufactured with sub-tuning) has a constant average value, slightly different from the specified size, and a correlation function slightly different from zero, which indicates a complete exhaustion of possibilities of a further increase in the accuracy of processing by automatic debugging methods, i.e. by using information about the dimensions of previously processed parts.

**Keywords:** machining accuracy, lathe, precision control systems, automatic debugging.

#### **Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Підвищення вимог до точності виготовлення деталей у процесі масового виробництва викликають необхідність застосування систем автоматичного регулювання розмірів, так як при фіксованому налаштуванні металорізальних верстатів існує деяке розсіювання розмірів деталей, яке характеризується значеннями миттєвого математичного сподівання та середнього квадратичного відхилення.

Застосування систем регулювання розмірів має сенс у тому разі, коли у процесі виробництва разом із випадковим розсіюванням розмірів спостерігається закономірне систематичне зміщення у часі розмірів деталей. Ця зміна розмірів є закономірною функцією від порядкового номера деталі. З метою збереження значення математичного сподівання в заданих межах, необхідно піддавати регулюванню рівень розмірного налаштування.

Систематична складова, як правило, не може бути визначена заздалегідь, але її величина для кожної деталі може бути оцінена на підставі статистичної обробки інформації результатів вимірювань попередніх деталей, що належать до тієї ж партії. На підставі такої оцінки можна провести регулювання обладнання для найбільш ефективного зменшення відхилення розміру даної деталі від заданого номіналу. Мета такого регулювання – утримання центру групування контрольованого розміру у заданому інтервалі.

При проектуванні систем автоматичного управління необхідно визначити спосіб формування імпульсу підналагодження для подачі команди виконавчому механізму верстата. Так, застосовуючи різні способи формування сигналів на підналагодження та варіюючи величинами регулювальних імпульсів, можна істотно змінити характер сумарного розподілу розмірів, майже не змінюючи зони розсіювання.

Відомо, що до сумарної похибки виготовлення циліндричної деталі входять: похибка налаштування; випадкова складова, яка пов'язана з внутрішньою мінливістю верстата і систематична складова похибки обробки, яка пов'язана зі зносом ріжучого інструменту, повільною зміною температури та ін. Тому для максимально точного прогнозування похибки механічної обробки та своєчасного введення поправки на взаємне положення інструменту і заготовлі необхідно застосовувати таку систему управління, яка зможе керувати цими трьома складовими похибки виготовлення деталі.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Автоматична підналагодження полягає у коригуванні положення інструменту на величину очікуваного відхилення розміру в циклі механічної обробки. Очікуване відхилення розміру, тобто коригуючий або підналагоджувальний імпульс, обчислюється за результатами вимірювань розмірів раніше оброблених деталей, із запізненням не менш ніж на один цикл обробки. Наявність випадкової складової у відхиленнях розмірів змушує використовувати для обчислення підналагоджувального імпульсу методи статистичного прогнозування. Ефективність автоматичної підналагодження значною мірою залежить від точності зазначеного прогнозування, що визначається за інших рівних умов досконалістю застосовуваного алгоритму. Тому синтез оптимальної системи автоматичного управління точністю обробки (САУТО) зводиться, зрештою, до синтезу алгоритму обчислення підналагоджувального імпульсу.

Існуючі методи вирішення завдань з вибору оптимального алгоритму підналагодження засновані на ймовірнісному підході до аналізу процесу автопідналагодження. Найбільш докладний виклад зазначених рішень міститься в роботах [1, 2], де більшість розглянутих методів автоматичного підналагодження засновані на використанні припущення про лінійний характер зміщення налаштування інструменту відносно поверхні деталі. Метою застосування зазначених методів є зменшення розсіювання розмірів деталей до заданої величини, яка досягається шляхом періодичної корекції положення інструменту в тих випадках, коли розміри деталей доходять до межі поля допуску. Між підналагоджувальними межами розташовується зона нечутливості. Інформація про розміри всередині цієї зони для керування залишається не використаною, тому такі методи не забезпечують досягнення максимальної точності обробки, або застосовуються при виготовленні деталей грубих квалітетів точності.

У роботі [3] викладається метод пульсуючого підналагодження, при якому обидві межі підналагодження зведені в одну, чим ліквідується зона нечутливості, а підналагодження здійснюється на кожному кроці імпульсом, постійним за величиною та змінним за знаком. Цей метод, забезпечує найбільш повну компенсацію систематичної складової та призводить до збільшення випадкової складової похибки механічної обробки.

Подальший розвиток методів автоматичного підналагодження пов'язаний із забезпеченням максимальної для даних умов точності механічної обробки. При цьому зберігалася запропонована для пульсуючого підналагодження суміщена підналагоджувальна межа (звичайно - середина поля допуску). Підвищення ефективності підналагодження досягалося з застосуванням підналагоджувального імпульсу, змінного як за знаком, так і у величині.

Оптимальне підвищення точності обробки за рахунок компенсації випадкового зміщення налаштування незалежно від лінійного тренду (його в ряді випадків може і не бути) розглянута в роботі [4], де використані методи статистичного прогнозування, а потім у роботі [1], виконаної на основі застосування теорії оптимальних систем. Таким чином, вже наявні (раніше відомі і нові) результати в галузі оптимального автоматичного підналагодження дозволяють компенсувати величину тренду або випадкове зміщення налаштування. Однак слід зазначити, що відповідні алгоритми автоматичного підналагодження у всіх зазначених вище роботах отримані при накладенні досить жорстких обмежень на властивості вихідного процесу у вигляді його статистичних характеристик.

У роботах [1, 5] параметри алгоритму підналагодження пов'язані з класом випадкового процесу, що апроксимує послідовність розмірів заготовок, оброблених без підналагодження. У вказаних роботах розглядалися процеси з незалежними прирощеннями, стаціонарні процеси з кореляційною функцією певного виду або дельта-корельовані

випадкові послідовності, накладені на лінійний тренд, і т. д.. У роботі [5] прийняті апріорно відомими параметри лінійного тренду. Таким чином, у більшості випадків, завдання синтезу систем автопідналагодження вирішується у припущенні наявності повної апріорної інформації.

Подальший розвиток методів автоматичної підналагодження пов'язано, в першу чергу, з розширенням можливостей (універсалізацією) алгоритмів, тобто з наданням їм здібностей компенсувати одночасно як довільні тренди, так і випадкові зміщення налаштування. При цьому система автоматичного підналагодження повинна залишатися прийнятною, у вказаному вище сенсі, у всьому діапазоні можливих значень параметрів некерованого процесу (його трендів та кореляційних функцій). Одним із шляхів вирішення такої задачі, як відомо, є надання системі управління адаптивних властивостей, за наявності яких структура (або параметри) алгоритму змінюються в залежності від оцінки якості результатів управління [6]. Цей шлях використаний у роботі [1], де параметри алгоритму уточнюються в залежності від поточної оцінки дисперсії розмірів деталей, оброблених з підналагодженням, та в роботі [7], де уточнення алгоритму (або самонавчання системи автоматичного підналагодження) проводиться за величиною відхилень від нуля поточних значень коефіцієнта кореляції між розмірами "підналагоджених" деталей.

Проте надання системі управління адаптивних властивостей супроводжується як істотним її ускладненням так і подорожчанням, що призводить до появи більш менш тривалих періодів неоптимальної роботи системи (періодів адаптації), протягом яких у ній здійснюються аналіз результатів підналагодження та підстроювання параметрів алгоритму. Тому застосування систем з адаптивними властивостями є крайнім випадком, коли доступні кошти не здатні забезпечити прийнятність системи автоматичного налагодження.

Провівши літературний огляд робіт, присвячених питанням забезпечення точності механічної обробки в машинобудуванні показав, що точність виготовлення деталей при точінні залежать від багатьох чинників, які поділяють на три категорії: систематичні постійні, систематичні закономірно змінювані та випадкові. Відомо, що при зміні хоча б одного з чинників згодом зазвичай призводить до не стаціонарності процесу. Однак, дослідження точності та методи забезпечення точності обробки при точінні проводилися з припущенням, що процес стаціонарний.

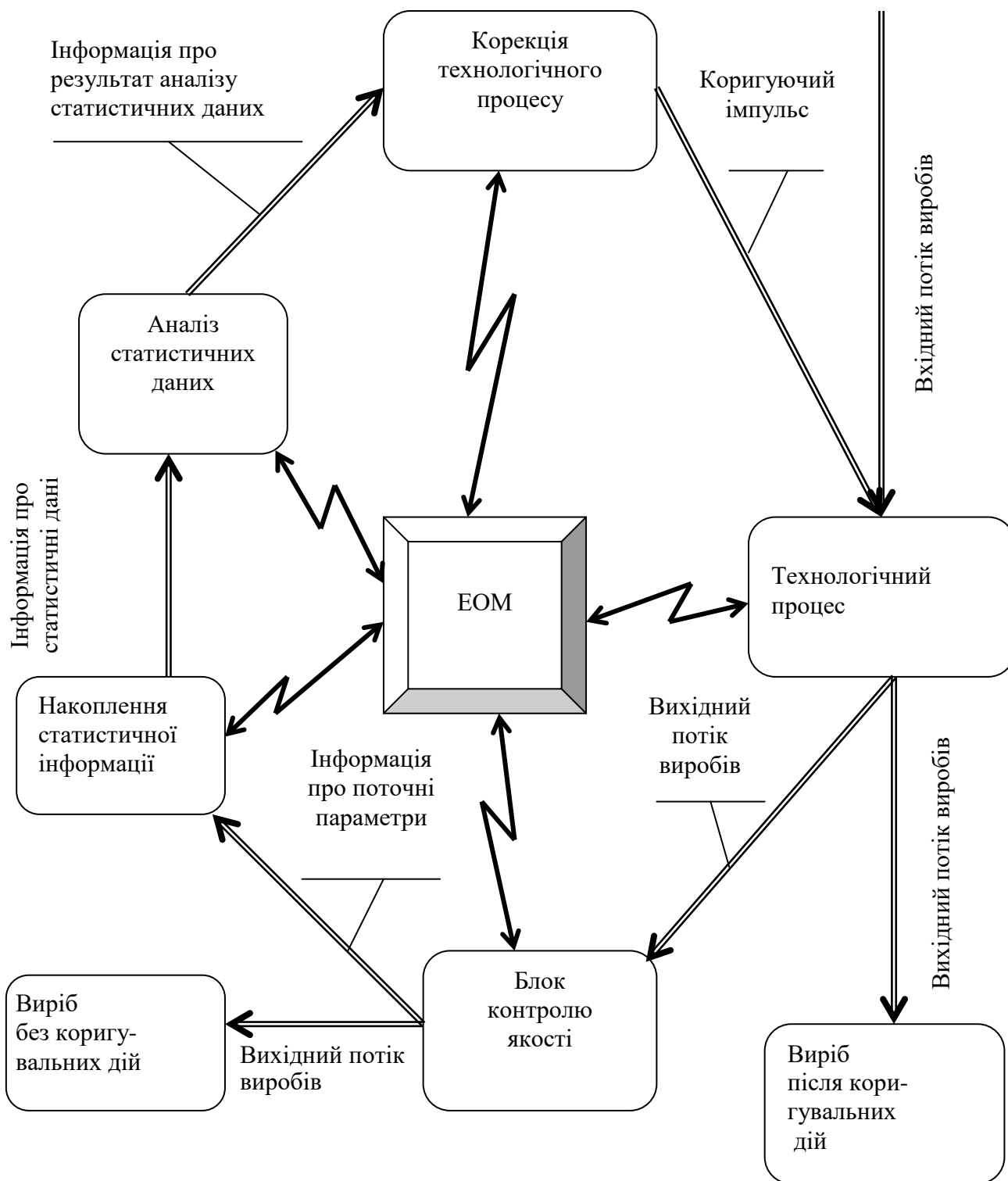
Більшість існуючих алгоритмів управління САУТО придатні лише для особливо стабільного виробництва, оскільки побудовані в припущенні, що характеристики факторів, що діють на вході технологічної системи (ТС), та сигналів, що виходять з неї, відомі та незмінні в часі, тобто має місце повна та апріорна визначеність. Найчастіше зазначені характеристики ТС невизначеним чином змінюються у часі, та й залишаються неконтрольованими. У зв'язку з цим синтез САУТО для нестабільних процесів має здійснюватися з урахуванням нестійкості вхідних параметрів.

**Метою роботи** є підвищення точності виготовлення деталей на основі прогнозування з застосуванням систем автоматичного управління точністю обробки.

### **Виклад основного матеріалу**

Запропонуємо структурну схему системи управління точністю обробки для токарного верстата з числовим програмним управлінням (ЧПУ), застосовуючи для цього алгоритм керування, що ґрунтується на статистичному прогнозуванні. У межах цієї статті обмежимося верстатом 16К20Ф3 з допомогою системи управління ЧПУ 2Р22, але таку схему можна застосувати до різних верстатів з різними системами ЧПУ, головна умова, щоби система ЧПУ

дозволяла підключення сторонньої електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). Сучасні ЕОМ з їхньою швидкодією дозволяють підключатися до систем верстатів з ЧПУ, і обробка статистичної інформації не впливає на продуктивність обладнання. Пропонується наступна структурна схема системи автоматичного управління точністю механічної обробки (рис. 1).



**Рис. 1** – Структурна схема системи автоматичного керування точністю обробки

Як відомо, програмне управління верстатами не передбачає автоматичної компенсації похибки механічної обробки від теплових деформацій, зносу інструменту та від неконтрольованих факторів на вході системи «верстат – пристосування – інструмент – деталь» (ВПД). Відповідні корекції а також початкове налаштування верстата на заданий розмір здійснюється вручну за результатами вимірювань традиційними засобами, що перешкоджає здійсненню повністю автоматизованого процесу обробки на верстатах з ЧПУ, який не потребує участі людини – оператора.

З метою автоматизації операцій вироблення та внесення до керуючої програми корекції розроблено систему автоматичного управління точністю обробки на верстатах з ЧПУ. Сучасні тенденції широкого застосування міні та мікро ЕОМ, у складі пристроїв ЧПУ, роблять завдання алгоритмічного забезпечення автоматичного управління точністю на верстатах з ЧПУ особливо актуальним, оскільки міні ЕОМ створюють можливість використання найбільш ефективних алгоритмів САУТО, без додаткового ускладнення як пристрою ЧПУ, так і САУТО. У цьому полягає перша і основна особливість управління точністю на верстатах з ЧПУ.

При відносно грубих вимогах до точності існуюча апріорна інформація може виявитися достатньою для прийняття остаточного рішення щодо вибору варіанту управління. Наприклад, миттєве розсіювання розмірів деталей істотно менше поля допуску виготовлення, можна застосувати підналагодження із заздалегідь заданим (постійним) коефіцієнтом корекції. При підвищенні вимог до точності, вірніше, при наближенні необхідної точності до граничних меж поля допуску, може знадобитися уточнення коефіцієнта корекції в процесі налагодження або вимірювання розміру. Тому математичне забезпечення управління точністю на верстатах з ЧПУ має включати у собі як алгоритми обчислення величин корекції, так і процедури вибору оптимальної послідовності.

Перший етап розробки такого математичного забезпечення вимагає складання математичних моделей похибок обробки для типових технологічних ситуацій, які є основою розробки алгоритмів обчислення корекції за результатами вимірювань. Для цього необхідно попередньо підготувати перелік та опис зазначених ситуацій. На наступному етапі розробляється алгоритм функціонування системи управління точністю, тобто складається формалізоване опис процесів управління, що включає процедури вибору оптимальної послідовності операцій управління. Ці два етапи є досить універсальними; їх результати не прив'язуються до будь-якої конкретної системи ЧПУ, що дозволяє в повному обсязі здійснювати автоматичне керування точністю.

Розглянемо докладно універсальний алгоритм керування точністю обробки. Цей алгоритм зображено у вигляді блок-схеми наведеної на рис.2.

Отже алгоритм складається з 14-ти поступових етапів та полягає у наступному:

1. Початок програми "Алгоритм управління точністю обробки".
2. Введення статистичних даних. Статистичними даними для певних умов технологічного процесу є вибірки вимірювань розмірів контрольованої поверхні деталей у порядку виготовлення між двома переналагодженнями. Для надійної оцінки потрібно 3-5 вибірок. Статистичні дані необхідно вводити як відхилень від середнього розміру деталі.
3. Підпрограма "Оцінка процесу на стаціонарність"; Оцінку процесу на стаціонарність провадимо двома критеріями: критерієм "серій" та критерієм "тренду", за методикою, запропонованою у [9].
4. Блок порівняння. Якщо процес стаціонарний, то перехід до блоку 5, якщо ні, то до блоку 8.

5. Побудова математичної моделі. У цьому блоці визначаються параметри перехідної матриці та будується перехідна матриця відповідно до методики [8].

6. Підпрограма "Прогнозування відхилення розміру на  $n$  кроків вперед". Відповідно до методики [10] визначається вектор рядок ймовірностей знаходження процесу в шести зонах поля розсіювання розмірів на  $n$  кроків вперед.

7. Підпрограма «Визначення часу досягнення меж поля допуску». Відповідно до методики [11] визначається математичне очікування та дисперсія виходу процесу за межі поля допуску.

8. Побудова математичної моделі похибки виготовлення.

9. Підпрограма «Визначення сфери дії незалежних випадкових факторів» (рис. 3). Відповідно до методики [12] визначається час тривалості технологічного процесу, протягом якого на похибку виготовлення не впливають систематичні фактори, а розсіювання розмірів визначається впливом випадкових факторів.

10. Введення вибірки без помилки налаштування. Для цього необхідно провести експеримент із вимірювання контрольованого розміру в спеціальних умовах, де помилка налаштування мінімальна або дорівнює нулю.

11. Підпрограма «Оцінка помилки налаштування та довірчих меж» (рис.4). Відповідно до методики [13] визначається помилка налаштування виготовлення деталей на розмір та її довірчих кордонів.

12. Підпрограма «Визначення величини похибки виготовлення кожної наступної деталі та часу досягнення меж поля допуску». Відповідно до методики [13] визначається величина систематичної складової, присутньої при обробці кожної наступної деталі.

13. Виведення результатів.

14. Кінець програми.

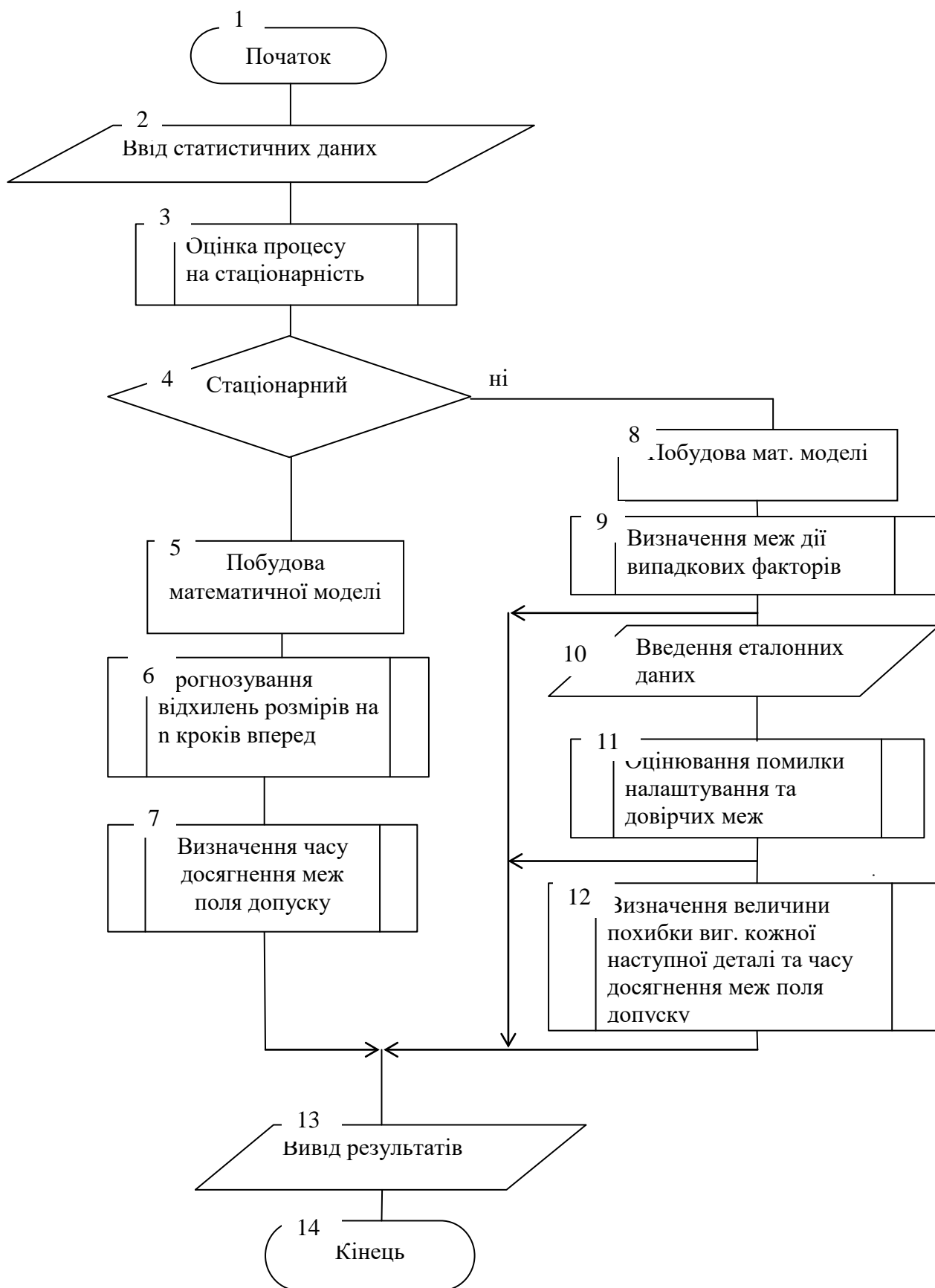
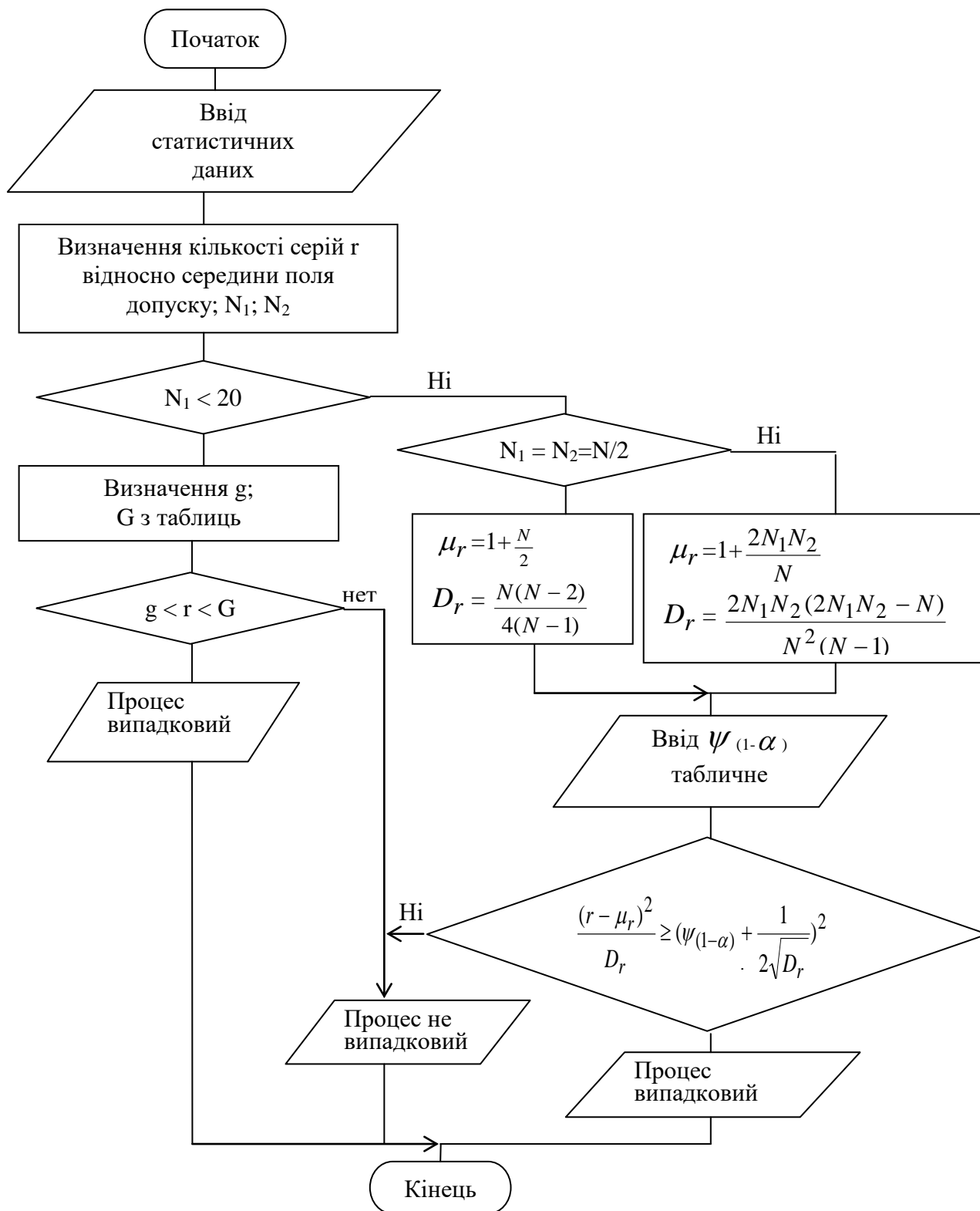


Рис. 2 – Універсальний алгоритм керування точністю обробки



Докладно алгоритми «Оцінка помилки налаштування та довірчих меж» та «Визначення сфери дії незалежних випадкових факторів» зображені у вигляді блок-схем на рис. 3 та рис. 4.



**Рис. 3** – Алгоритм визначення сфери дії незалежних випадкових факторів

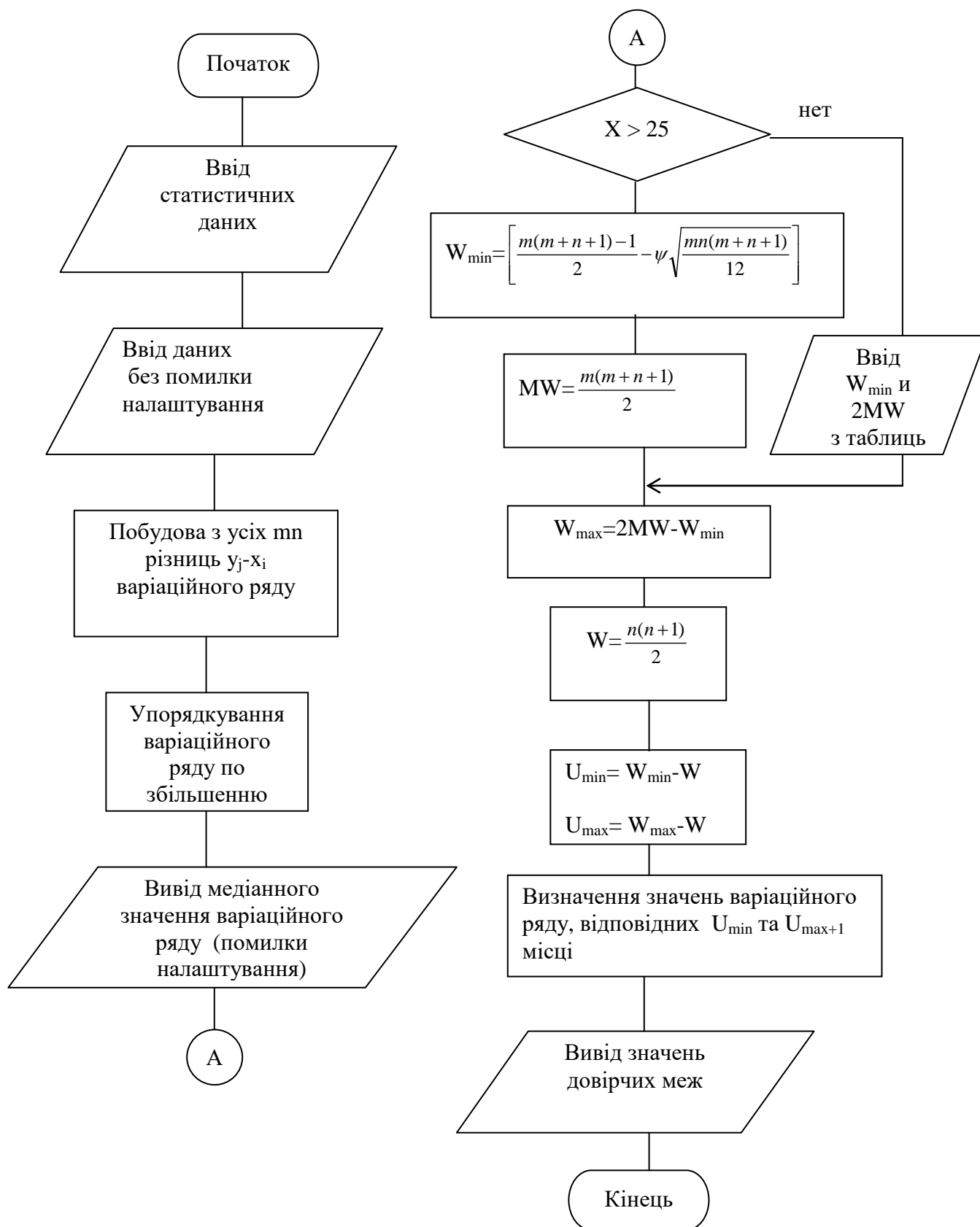


Рис. 4 – Алгоритм визначення помилки налаштування та її довірчих меж

### **Висновки**

Як випливає з викладеного матеріалу, в результаті автоматичного підналагодження за алгоритмом (рис.1) вихідна послідовність розмірів деталей (тобто розмірів деталей, виготовлених з підналагодженням) має постійне середнє значення, мало відрізняється від заданого розміру, і кореляційну функцію незначно відмінну від нуля. Ці характеристики вихідної послідовності – близькість до нуля середнього значення відхилень розмірів, є ознаками, повного вичерпання можливостей подальшого підвищення точності обробки, методами автоматичної налагодження, тобто. шляхом використання інформації про розміри раніше оброблених деталей. Було показано, що алгоритм (рис. 1) повністю компенсує ступінчасті зміни рівня від лінійного тренду.

Складання розвинуеного математичного забезпечення, крім безпосереднього результату – автоматичного забезпечення заданої точності на верстатах з ЧПУ, дозволяє суттєво розширити можливості систем автоматичної підготовки керуючих програм шляхом включення до цих систем етапів, пов'язаних з оптимальним програмуванням операцій управління точністю.

### **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/ijeerjun20182.
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. Оцінювання точності координованих отворів малого діаметру, виготовлених з направленням різального інструменту / В. М. Бурдейна [та ін.] // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2021. – № 2 (8). – С. 9–14. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.021.
9. Трищ Р. М. К вопросу автоматического управления точностью обработки / Р. М. Трищ // *Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб.* – Харьков : ХГПУ. – 1999. – № 54. – С. 227–229.
10. Арпентьев Б. М. Алгоритм системы управления точностью обработки / Б. М. Арпентьев, А. С. Гордеев, Р. М. Трищ // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Машиностроение*. – 1999. – № 54. – С. 7–11.
11. Трищ Р. М. Стабилизация точности обработки / Р. М. Трищ, А. С. Гордеев // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Новые решения в современных технологиях*. – 1999. – № 45. – С. 44–45.
12. Арпентьев Б. М. Повышение запаса точности при механической обработке / Б. М. Арпентьев, А. С. Гордеев, Р. М. Трищ // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Новые решения в современных технологиях*. – 2000. – № 78. – С. 55–56.
13. Трищ Р. М. Управление качеством с использованием методов непараметрической статистики / Р. М. Трищ, С. С. Федин // *Механіка та машинобудування*. – 2002. – № 1. – С. 179–183.

### **References:**

1. Vasiljev, E, Serdechnaya, E & Tavolzhanskij, A 2020, 'Modal synthesis of precision control systems', *E3S Web of Conferences*, no. 224 (13), 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*, Belfast, № 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 24th IEEE International Conference on Software Maintenance*, Beijing, pp. 87-96.
6. Holub, M, Michalicek, M, Vetiska, J & Marek, J 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, Chin, W, Cheng, A & Lupu, M 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. Burdeina, VM, Hrinchenko, HS, Artiukh, SM & Trishch, AR 2021, 'Otsiniuvannia tochnosti koordynovanykh otvoriv maloho diametru, vyhotovlenykh z napravlenniam rizalnoho instrumentu', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI, Seriya Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiyi politekhnichnyi universytet, Kharkiv, no. 2 (8), pp. 9-14. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.021.
9. Tryshch, RM 1999, 'K voprosu avtomaticheskoho upravleniya tochnosti obrabotky', *Rezanye y instrument v tekhnolohycheskykh systemakh. Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskyyi sbornyk*, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiyi politekhnichnyi universytet, Kharkiv, no. 54, pp. 227-229.
10. Arpentev, BM, Hordeev, AS & Tryshch, RM 1999, 'Alhorytm systemy upravleniya tochnosti obrabotky', *Vestnyk Kharkovskoho hosudarstvennoho polytekhnicheskoho unyversyteta: Mashynostroenye*, no. 54, pp. 7-11.
11. Tryshch, RM & Hordeev, AS 1999, 'Stabylyzatsiya tochnosti obrabotky', *Vestnyk Kharkovskoho hosudarstvennoho polytekhnicheskoho unyversyteta: Novye resheniya v sovremennkh tekhnolohiyakh*, no. 45, pp. 44-45.
12. Arpentev, BM, Hordeev, AS & Tryshch, RM 2000, 'Povyshenye zapasa tochnosti pry mekhanycheskoi obrabotke', *Vestnyk Kharkovskoho hosudarstvennoho polytekhnicheskoho unyversyteta: Novye resheniya v sovremennykh tekhnolohiyakh*, no. 78, pp. 55-56.
13. Tryshch, RM & Fedyn, SS 2002, 'Upravlenye kachestvom s yspolzovanyem metodov neparametrycheskoi statystyky', *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, no. 1, pp. 179-183.

Стаття надійшла до редакції 18 вересня 2022 року