

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ГЛАДКИХ КАЛІБРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ОТВОРІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ПРОЄКТУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

У статті вирішено актуальну науково-прикладну задачу алгоритмізації розрахунку гладких граничних калібрів, призначених для контролю отворів у машинобудуванні, із застосуванням сучасних цифрових методів проєктування. Обґрунтовано, що в умовах переходу до концепції «Індустрія 4.0» традиційні детерміновані методи розрахунку параметрів контрольного інструменту потребують доповнення імовірнісними моделями для забезпечення надійності геометричного контролю.

Авторами розроблено та формалізовано нормативний алгоритм визначення граничних розмірів прохідних і непрохідних калібрів, який базується на вимогах національних та міжнародних стандартів ДСТУ ISO 286 та ISO 1938-1. Алгоритм представлений у структурованій табличній формі, що дозволяє легко інтегрувати його в автоматизовані системи проєктування (CAD) та системи управління якістю на базі табличних процесорів. Особливу увагу приділено однозначності визначення меж допусків виготовлення та зношування прохідного калібру як базових параметрів для подальшого цифрового моделювання.

Наукова новизна роботи полягає в розробці ризик-орієнтованої імовірнісної моделі оцінки помилок атрибутивного контролю. На відміну від класичного підходу, де допуск на зношування розглядається як фіксований геометричний запас, запропонована модель враховує стохастичну природу технологічного процесу (варіацію розмірів деталей у партії) та випадковий характер зношування робочих поверхонь калібру. Використання функції нормального розподілу дозволило встановити математичний зв'язок між поточним станом калібру та ймовірністю пропуску браку (ризиком споживача).

Запропоновано авторську методику визначення експлуатаційного граничного зносу прохідного калібру, що базується на встановленні допустимого рівня ризику P_{FA}^* . Це дозволяє перейти від формального вилучення інструменту з експлуатації до обґрунтованого управління його ресурсом залежно від критичності контролюваного з'єднання та економічних чинників. Виконано економічну інтерпретацію результатів у контексті ризик-менеджменту згідно з принципами ДСТУ ISO 9001:2015, де показано вплив помилок контролю на сумарні витрати виробництва.

Практична апробація методики на прикладі розрахунку калібрів для контролю отвору 30H7 підтвердила, що ризик-орієнтований підхід забезпечує вищу надійність контролю в умовах дрейфу параметрів технологічного процесу. Результати дослідження можуть бути впроваджені на машинобудівних підприємствах для цифровізації метрологічного забезпечення та оптимізації витрат на контрольний інструментарій.

Ключові слова: гладкі граничні калібри; контроль отворів; алгоритмізація розрахунку; система допусків і посадок ISO; ризик-орієнтований підхід; імовірність помилки контролю; зношування калібрів; цифрове проєктування.

Вступ

Забезпечення точності геометричних параметрів деталей є однією з базових задач машинобудування, оскільки саме геометрична точність визначає взаємозамінність, працездатність і довговічність машин та механізмів. В умовах серійного та масового виробництва контроль геометричних параметрів повинен поєднувати достатню точність із високою продуктивністю, що зумовлює широке застосування атрибутивних методів контролю, зокрема із використанням гладких граничних калібрів [4, 5].

Особливу роль у системі геометричного контролю відіграють отвори, які формують відповідальні посадки та безпосередньо впливають на умови збирання і експлуатаційні характеристики вузлів машин. Контроль отворів у виробничих умовах найчастіше здійснюється за допомогою гладких граничних калібрів, що реалізують принцип «пройшов / не пройшов» і дозволяють швидко приймати рішення щодо придатності деталі без виконання повного вимірювання її геометричних параметрів [3, 4].

Проєктування гладких калібрів традиційно ґрунтується на системі допусків і посадок ISO, яка в Україні впроваджена національними стандартами ДСТУ ISO 286-1:2019 та ДСТУ ISO 286-2:2019. Зазначені стандарти регламентують положення полів допусків, граничні відхилення та правила

формування посадок, забезпечуючи уніфікацію розрахунків і взаємозамінність деталей у машинобудівному виробництві [1, 2, 3].

Вимоги до параметрів гладких граничних калібрів, зокрема допусків їх виготовлення та допустимого експлуатаційного зношування, встановлюються стандартом ISO 1938-1:2015, який застосовується в Україні як базовий міжнародний нормативний документ у сфері геометричних специфікацій виробів (GPS) [3]. Нормативні методики, засновані на зазначених документах, забезпечують формальну відповідність параметрів калібрів установленим вимогам і достатню відтворюваність результатів контролю в типових виробничих умовах.

Разом з тим практичний досвід експлуатації гладких калібрів свідчить, що нормативно-детермінований підхід не завжди дозволяє адекватно оцінити надійність геометричного контролю. Фактичні розміри деталей формуються під впливом випадкових чинників технологічного процесу, а зношування калібрів має стохастичний характер. Унаслідок цього однакові за нормативами калібри можуть забезпечувати різний рівень імовірності помилки контролю залежно від стану процесу виготовлення та умов експлуатації контрольного інструменту [5, 8].

Класичні нормативні методики не дають кількісної відповіді на питання про те, з якою ймовірністю можливий пропуск браку або хибне бракування придатних деталей. Водночас у сучасних системах управління якістю дедалі більшого значення набуває ризик-орієнтований підхід, відповідно до якого технічні рішення повинні оцінюватися з позицій імовірності небажаних наслідків та пов'язаних із ними економічних втрат [8, 10].

У межах системи GPS ризик-орієнтована логіка прийняття рішень формалізована стандартом ISO 14253-1:2017, який встановлює правила прийняття рішень за результатами контролю з урахуванням ризику виробника та споживача [6]. Методологічною основою такого підходу є концепція невизначеності вимірювань, викладена в керівництві GUM (JCGM 100), яке широко використовується для обґрунтування критеріїв прийняття рішень у метрології та контролі якості [7].

Хоча гладкі калібри не є вимірювальними засобами у класичному розумінні, логіка ризик-орієнтованого аналізу є повністю застосовною і до атрибутивного контролю. Зокрема, можливість кількісного пов'язання зносу калібру з імовірністю помилки контролю створює передумови для більш обґрунтованого управління ресурсом контрольного інструменту та підвищення ефективності системи контролю якості в цілому [8, 9].

У зв'язку з цим актуальною є задача поєднання нормативного проєктування гладких калібрів із алгоритмізованими та імовірнісними методами аналізу, які дозволяють не лише автоматизувати розрахунки, але й інтегрувати оцінку ризику помилки контролю та економічні аспекти експлуатації калібрів у єдину інженерну методику.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка алгоритмізованого методу розрахунку гладких калібрів для контролю отворів із використанням цифрових засобів проєктування та інтеграцією ризик-орієнтованої оцінки імовірності помилки контролю при зношуванні прохідного калібру.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз нормативних і теоретичних основ проєктування гладких калібрів відповідно до вимог ДСТУ ISO та міжнародних стандартів [1-4];
- формалізація нормативних залежностей для визначення граничних розмірів гладких калібрів [3, 4];
- розробка алгоритму розрахунку в табличній формі з орієнтацією на цифрову реалізацію [5, 9];
- побудова ризик-орієнтованої імовірнісної моделі оцінки помилки контролю з урахуванням зношування калібру [6-8];
- розробка методики визначення експлуатаційного граничного зносу на основі допустимого рівня ризику;
- економічна інтерпретація отриманих результатів з позицій ризик-менеджменту [8, 10].

Теоретичні та нормативні основи проєктування гладких калібрів

Гладкі граничні калібри належать до класу атрибутивних засобів контролю, які дозволяють приймати рішення щодо відповідності деталі встановленим вимогам без визначення числового значення контрольованого параметра. Такий підхід є характерним для серійного та масового виробництва, де пріоритетом є висока продуктивність контролю за умови достатньої надійності прийняття рішень [4, 5].

Методологічною основою застосування гладких калібрів є принцип Тейлора, згідно з яким прохідний калібр повинен перевіряти деталь за умовами максимальної матеріальності, тобто одночасно контролювати розмір, форму та взаємне розташування поверхонь, тоді як непрохідний калібр призначений для перевірки лише граничного розміру в окремому перерізі [3, 4]. Реалізація цього принципу забезпечує функціональну еквівалентність атрибутивного контролю з використанням калібрів та вимірювального контролю в межах установлених допусків.

Система допусків і посадок ISO є базою для проектування більшості елементів машинобудівних виробів. В Україні ця система впроваджена національними стандартами ДСТУ ISO 286-1:2019 та ДСТУ ISO 286-2:2019, які регламентують структуру полів допусків, значення граничних відхилень і правила формування посадок для отворів і валів різних квалітетів точності [1, 2]. Саме ці стандарти визначають граничні розміри отворів, що є вихідними даними для розрахунку параметрів гладких калібрів.

Вимоги до параметрів гладких граничних калібрів, зокрема до допусків їх виготовлення, геометричних характеристик і допустимого експлуатаційного зношування, встановлюються стандартом ISO 1938-1, який є складовою системи геометричних специфікацій виробів (GPS) [3]. У зазначеному стандарті допуск на зношування прохідного калібру вводиться з метою забезпечення його ресурсу та стабільності результатів контролю протягом експлуатації.

Нормативний підхід до проектування гладких калібрів має детермінований характер і ґрунтується на припущенні, що розміри контрольованих деталей перебувають у межах усталеного поля допуску без урахування статистичної природи технологічного процесу. У такому підході допуск на зношування калібру розглядається як фіксований геометричний запас, не пов'язаний безпосередньо з імовірністю помилки контролю [3, 5].

Разом з тим численні дослідження у сфері статистичного контролю якості показують, що фактичні розміри деталей у партії є випадковими величинами, які формуються під впливом зношування інструменту, температурних коливань, нестабільності режимів обробки та інших чинників [5, 9]. У таких умовах навіть за дотримання нормативних вимог до калібрів імовірність пропуску браку або хибного бракування може істотно змінюватися.

У межах сучасної концепції GPS геометричний контроль розглядається як задача прийняття рішень за наявності невизначеності. Стандарт ISO 14253-1 формалізує правила прийняття рішень за результатами контролю з урахуванням ризику виробника та споживача, що дозволяє кількісно оцінювати наслідки помилок контролю [6]. Методологічну основу такого підходу становить концепція невизначеності вимірювань, викладена в керівництві GUM (JCGM 100), яке визначає універсальні принципи оцінювання та інтерпретації невизначеності результатів вимірювань [7].

Хоча гладкі калібри не є вимірювальними засобами у строгому метрологічному розумінні, логіка ризик-орієнтованого підходу може бути застосована і до атрибутивного контролю. У цьому випадку невизначеність пов'язана не з похибкою вимірювання, а з випадковою варіацією розмірів деталей і зміною ефективного розміру калібру внаслідок зношування [8, 9].

Таким чином, аналіз теоретичних і нормативних основ проектування гладких калібрів свідчить про доцільність поєднання класичного нормативного підходу з імовірнісними методами оцінки ризику. Така інтеграція створює передумови для кількісної оцінки надійності геометричного контролю та обґрунтованого управління ресурсом контрольного інструменту в сучасних умовах виробництва.

Алгоритмізований нормативний розрахунок гладких калібрів для контролю отворів

Нормативний розрахунок гладких граничних калібрів є обов'язковим етапом їх проектування і спрямований на забезпечення формальної відповідності параметрів калібрів вимогам системи допусків і посадок та стандартів на контрольний інструмент. Алгоритмізація цього розрахунку дозволяє однозначно визначити послідовність дій, структурувати вхідні та вихідні дані, а також створює передумови для подальшої цифрової реалізації методики [3, 5].

Подальший виклад нормативного розрахунку ґрунтується на положеннях стандартів ДСТУ ISO 286-1:2019, ДСТУ ISO 286-2:2019 та ISO 1938-1:2015, які регламентують параметри контрольованих отворів і гладких калібрів [1–3]. При цьому розглядається контроль отворів як найбільш поширений випадок застосування гладких калібрів у машинобудуванні, що відповідає практиці серійного виробництва.

Для алгоритмізації розрахунку вводиться припущення про коректність вибору поля допуску отвору відповідно до функціонального призначення деталі. Таким чином, параметри поля допуску розглядаються як задані величини, а завдання розрахунку полягає у визначенні параметрів гладких калібрів, які забезпечують контроль цих меж [1, 2].

Вихідною інформацією для нормативного розрахунку є номінальний розмір отвору D та його граничні відхилення ES і EI , які визначаються відповідно до ДСТУ ISO 286-2 залежно від обраного поля допуску та якості точності [2].

Граничні розміри отвору визначаються за класичними співвідношеннями:

$$D_{max} = D + ES, D_{min} = D + EI.$$

Отримані значення D_{max} та D_{min} визначають геометричні межі допустимих розмірів отвору і є базовими величинами для подальшого розрахунку параметрів прохідного та непрохідного калібрів. На цьому етапі розрахунок має детермінований характер і не враховує статистичну варіацію фактичних розмірів деталей у партії [5].

Прохідний калібр призначений для контролю мінімального граничного розміру отвору і реалізує принцип максимальної матеріальності. Відповідно до вимог ISO 1938-1, параметри прохідного калібру визначаються з урахуванням допуску виготовлення та нормативного зношування [3].

Верхня межа розміру прохідного калібру визначається як:

$$D_{PP\ max} = D_{min} + Z + T_{PP}/2,$$

де Z – нормативний значення допустимого зносу прохідного калібру.

Нижня межа розміру прохідного калібру:

$$D_{PP\ min} = D_{PP\ max} - T_{PP},$$

де T_{PP} – допуск на виготовлення прохідного калібру.

Таким чином, нормативний допуск на зношування Z задає допустимий інтервал зміни ефективного розміру прохідного калібру в процесі експлуатації. У межах нормативного підходу цей інтервал розглядається як геометричний запас, що не має прямого кількісного зв'язку з імовірністю помилки контролю [3, 5].

Непрохідний калібр призначений для контролю максимального граничного розміру отвору та не має допуску на зношування. Відповідно до нормативних вимог його граничні розміри визначаються так [3]:

$$D_{HE\ max} = D_{max},$$

$$D_{HE\ min} = D_{HE\ max} - T_{HE},$$

де T_{HE} – допуск виготовлення непрохідного калібру.

Такий підхід забезпечує контроль верхньої межі поля допуску отвору та доповнює контроль, здійснюваний прохідним калібром, відповідно до принципу Тейлора [3, 4].

Для наочного подання послідовності розрахунків і структурування інформації нормативний алгоритм подано у табличній формі (таблиця 1).

Таблиця 1

Табличний алгоритм нормативного розрахунку гладких калібрів для контролю отворів

Крок	Вхідні дані	Зміст операції	Розрахункова залежність	Результат
1	D, ES, EI	Визначення граничних розмірів отвору	$D_{max} = D + ES,$ $D_{min} = D + EI$	D_{max}, D_{min}
2	D_{min}, Z, T_{PP}	Верхня межа ПР-калібру	$D_{PP\ max} = D_{min} + Z + T_{PP}/2$	$D_{PP\ max}$
3	$D_{PP\ max}, T_{PP}$	Нижня межа ПР-калібру	$D_{PP\ min} = D_{PP\ max} - T_{PP}$	$D_{PP\ min}$
4	D_{max}	Верхня межа НЕ-калібру	$D_{HE\ max} = D_{max}$	$D_{HE\ max}$
5	$D_{HE\ max}, T_{HE}$	Нижня межа НЕ-калібру	$D_{HE\ min} = D_{HE\ max} - T_{HE}$	$D_{HE\ min}$
6	Результати кроків 1–5	Контроль узгодженості	Перевірка взаємного положення меж	Узгоджений набір параметрів

Для підвищення відтворюваності розрахунків та усунення неоднозначностей нормативний розрахунок доцільно подати у вигляді формалізованого алгоритму. Алгоритмізація дозволяє чітко визначити послідовність дій, перелік вхідних параметрів і структуру вихідних результатів, що є необхідною умовою для цифрової реалізації методики [5, 9].

У поданому алгоритмі всі розрахункові залежності мають однозначне трактування і можуть бути реалізовані як у ручному режимі, так і в автоматизованих середовищах. При цьому алгоритм не містить емпіричних коефіцієнтів або припущень, що виходять за межі нормативних вимог [3].

Поданий табличний алгоритм забезпечує прозорість і однозначність нормативного розрахунку, а також створює основу для подальшої інтеграції ризик-орієнтованих розрахунків у єдину цифрову модель [5, 9, 11].

Позиціонування методики та порівняльний аналіз нормативного і ризик-орієнтованого підходів

Нормативний підхід до проектування та застосування гладких калібрів сформувався як складова класичної системи забезпечення взаємозамінності та історично орієнтований на масове виробництво з відносно стабільними технологічними процесами. Його ключовою особливістю є детермінований характер розрахунків, за якого параметри калібрів визначаються виключно на основі граничних розмірів контрольованих поверхонь і нормативно встановлених допусків [1–3].

Основною перевагою такого підходу є простота і відтворюваність розрахунків, що дозволяє широко застосовувати гладкі калібри без залучення складного вимірювального обладнання. Разом з тим нормативний підхід не містить інструментів для кількісної оцінки надійності контролю, оскільки не враховує статистичну природу формування фактичних розмірів деталей і змінність параметрів технологічного процесу в часі [5].

Допуск на зношування прохідного калібру, передбачений стандартом ISO 1938-1:2015, розглядається в межах нормативного підходу як фіксований геометричний запас. При цьому відсутній прямий зв'язок між величиною допустимого зношування та імовірністю помилки контролю. У результаті момент бракування калібру визначається формально – за досягненням нормативної межі або на підставі досвіду персоналу, що може призводити як до передчасного вибраковування інструменту, так і до підвищеного ризику пропуску браку [3, 8].

Сучасні тенденції розвитку систем управління якістю та геометричних специфікацій виробів пов'язані з переходом від формального дотримання нормативів до управління ризиками. У межах концепції GPS геометричний контроль розглядається не лише як перевірка відповідності граничним значенням, а як процес прийняття рішень за наявності невизначеності [6].

Стандарт ISO 14253-1:2017 встановлює правила прийняття рішень за результатами контролю з урахуванням ризику виробника та споживача. Хоча зазначений стандарт орієнтований переважно на вимірювальний контроль, його положення мають загальнометодологічний характер і можуть бути адаптовані до атрибутивного контролю, у тому числі з використанням гладких калібрів [6, 7].

Для обґрунтування доцільності застосування ризик-орієнтованої методики виконано порівняльний аналіз її ключових характеристик у зіставленні з класичним нормативним підходом (таблиця 2).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика нормативного та ризик-орієнтованого підходів до проектування і експлуатації гладких калібрів

Критерій порівняння	Нормативний підхід	Ризик-орієнтований підхід
Методологічна основа	Детерміновані геометричні співвідношення	Імовірнісні моделі та правила прийняття рішень
Урахування варіації процесу	Не враховується явно	Враховується через μ , σ та сценарії
Інтерпретація зносу калібру	Формально допустимий до межі Z	Допустимий до досягнення критичного ризику
Оцінка помилки контролю	Відсутня	Кількісна P_{FA} , P_{FR}
Гнучкість щодо умов виробництва	Низька	Висока
Зв'язок з економічними втратами	Опосередкований	Прямий
Основний недолік	Неможливість оцінки надійності	Потреба у статистичних даних

У працях, присвячених статистичному контролю якості, показано, що ігнорування стохастичної природи технологічних процесів може призводити до суттєвих економічних втрат навіть за формальної

відповідності нормативним вимогам [5, 9]. Це створює об'єктивні передумови для інтеграції імовірнісних моделей у традиційні методики проектування та експлуатації контрольного інструменту.

Порівняльний аналіз показує, що ризик-орієнтований підхід не суперечить нормативному, а логічно доповнює його. Нормативний розрахунок формує базову геометричну основу, тоді як ризик-орієнтований аналіз дозволяє кількісно оцінити надійність контролю та обґрунтувати рішення щодо експлуатації калібрів у конкретних виробничих умовах [8, 9, 13].

Ризик-орієнтована імовірнісна модель оцінки помилки контролю

У межах ризик-орієнтованого підходу контроль геометричних параметрів розглядається як процес прийняття рішень за умов невизначеності. Для атрибутивного контролю з використанням гладких калібрів невизначеність зумовлена двома основними чинниками: випадковою варіацією фактичних розмірів деталей у партії та зміною ефективного розміру прохідного калібру внаслідок зношування [5, 8].

На відміну від вимірювального контролю, у якому результат подається у вигляді числового значення, атрибутивний контроль формує бінарне рішення («придатна / непридатна»). Проте навіть у цьому випадку імовірність прийняття помилкового рішення може бути кількісно оцінена шляхом імовірнісного опису розподілу контрольованої величини та граничних умов прийняття рішення [6, 9].

Запропонована модель не замінює нормативний розрахунок, а надбудовується над ним, використовуючи результати нормативного етапу як вихідні параметри. Такий підхід забезпечує збереження повної відповідності вимогам стандартів і водночас дозволяє перейти до кількісної оцінки ризику помилки контролю [3, 8].

Для опису варіації фактичних розмірів отворів у партії приймається припущення про нормальний розподіл:

$$x \sim N(\mu, \sigma), \quad (1)$$

де x – випадкова величина, що описує фактичний розмір отвору; μ – математичне очікування (середній розмір в партії); σ – стандартне відхилення процесу, яке в машинобудуванні, зазвичай пов'язане з точністю параметру.

Застосування нормального розподілу є обґрунтованим для стабільних технологічних процесів механічної обробки та широко використовується в теорії статистичного контролю якості [5, 9]. У разі істотних відхилень від нормальності модель може бути модифікована шляхом внесення змін в залежність, що відображає закон розподілу.

Параметр μ є одним із ключових у моделі ризику, оскільки визначає положення центру розподілу розмірів відносно граничних значень поля допуску. На етапі проектування або підготовки виробництва, коли статистичні дані ще відсутні, значення μ доцільно приймати рівним середині поля допуску:

$$\mu_0 = \frac{D_{min} + D_{max}}{2}. \quad (2)$$

У процесі серійного виробництва значення μ повинно уточнюватися на основі результатів вибірових вимірювань або даних статистичного контролю процесу (SPC), що дозволяє враховувати можливі зсуви центру розподілу в часі [5].

Оскільки положення μ може змінюватися внаслідок дрейфу технологічного процесу, у моделі використовується сценарний підхід. Він передбачає аналіз кількох характерних сценаріїв:

$$\mu = \mu_0, \quad \mu = \mu_0 \pm k\sigma, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт сценарного зсуву. Такий підхід дозволяє оцінити ризик помилки контролю за найгіршого допустимого положення центру розподілу та забезпечити консервативну оцінку надійності контролю [8, 9].

У процесі експлуатації прохідний калібр зазнає зношування, що призводить до зменшення його ефективного розміру. Для кількісного опису цього процесу вводиться параметр зносу w , який визначає зменшення ефективного діаметра калібру відносно початкового значення.

Ефективний розмір прохідного калібру при зносі w визначається як:

$$G(w) = G_0 - w, \quad (4)$$

де G_0 – ефективний розмір нового калібру (математичне очікування), що визначається за результатами нормативного розрахунку.

Такий опис дозволяє безпосередньо пов'язати експлуатаційний стан калібру з умовами прийняття рішення при контролі та є достатньо точним для інженерних оцінок у межах допустимого нормативного зношування [3, 8].

Основним показником ризику для прохідного калібру є ймовірність пропуску браку, тобто ймовірність того, що деталь з розміром, меншим за мінімально допустимий, буде помилково визнана придатною.

Ймовірність пропуску браку $P_{FA}(w)$ (для нормального закону розподілу) визначається як [5]:

$$P_{FA}(w) = \Phi\left(\frac{D_{\min} - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{G(w) - \mu}{\sigma}\right), \quad (5)$$

де Φ – функція стандартного нормального розподілу.

Отримана залежність безпосередньо пов'язує величину зношування прохідного калібру з ймовірністю помилки контролю та дозволяє перейти від формального геометричного критерію до кількісної оцінки надійності контролю [6, 8].

Експлуатаційний граничний знос прохідного калібру Y визначається з умови досягнення заданого допустимого рівня ризику:

$$P_{FA}(Y) = P_{FA}^*, \quad (6)$$

де P_{FA}^* – гранично допустима ймовірність пропуску браку.

На відміну від нормативного підходу, у якому момент бракування калібру визначається досягненням фіксованої геометричної межі Z , у ризик-орієнтованій моделі цей момент визначається функціонально – через допустимий рівень ризику. У разі застосування сценарного аналізу значення Y доцільно визначати за найгіршим сценарієм, що забезпечує додатковий запас надійності контролю [8, 10].

Економічна інтерпретація, практична реалізація та цифрова підтримка методики

У виробничих умовах помилки геометричного контролю мають не лише метрологічні, але й безпосередні економічні наслідки. Пропуск браку призводить до підвищення витрат на доопрацювання, ремонту або гарантійне обслуговування, тоді як хибне бракування придатних деталей зумовлює прямі втрати продукції та зниження ефективності використання ресурсів [5, 8].

З позицій ризик-орієнтованого підходу експлуатацію гладких калібрів доцільно розглядати як задачу оптимізації, у якій необхідно знайти компроміс між витратами на виготовлення і заміну контрольного інструменту та очікуваними втратами, пов'язаними з помилками контролю. Такий підхід узгоджується з принципами ризик-менеджменту, покладеними в основу сучасних систем управління якістю відповідно до вимог ДСТУ ISO 9001:2015 [10, 12].

Очікувані сумарні витрати, пов'язані з експлуатацією прохідного калібру, можуть бути подані у вигляді функції:

$$C(w) = C_{\text{инстр}}(w) + C_{FA} \cdot P_{FA}(w) + C_{FR} \cdot P_{FR}(w), \quad (7)$$

де $C_{\text{инстр}}(w)$ – витрати на виготовлення, калібрування та заміну калібру при зносі w ; C_{FA} – втрати від пропуску браку; C_{FR} – втрати від хибного бракування придатних деталей; $P_{FA}(w)$, $P_{FR}(w)$ – відповідні ймовірності помилок контролю (ймовірність хибного прийняття браку та ймовірність хибного відхилення придатної деталі).

У міру зростання зносу прохідного калібру витрати на інструмент зменшуються (відношення вартості калібру до кількості проконтрольованих деталей), однак ймовірність пропуску браку зростає. Таким чином, функція $C(w)$ має мінімум, який відповідає економічно оптимальному моменту бракування калібру. Отже, вибір допустимого рівня ймовірності помилки контролю P_{FA}^* фактично відображає політику управління ризиками підприємства та може бути адаптований залежно від критичності продукції [8, 10].

Для ілюстрації алгоритму розглянемо розрахунок калібрів для отвору 30H7.

Згідно з ДСТУ ISO 286-2: $D_{\min} = 30,000$ мм; $D_{\max} = 30,021$ мм (допуск IT = 21 мкм).

Відповідно до ISO 1938-1:2015 (Таблиця 2) для даного розміру:

- нормативний запас на зношування: $Z = 3,5$ мкм (0,0035 мм).
- допуск на виготовлення калібру: $T_{\text{ПР}} = 3$ мкм (0,003 мм).

Розрахунок граничних розмірів нового прохідного калібру (ПР):

- верхня межа: $D_{\text{ПР max}} = D_{\min} + Z + T_{\text{ПР}}/2 = 30,000 + 0,0035 + 0,0015 = 30,005$ мм.
- нижня межа: $D_{\text{ПР min}} = D_{\text{ПР max}} - T_{\text{ПР}} = 30,005 - 0,003 = 30,002$ мм.

- ефективний розмір нового калібру: $G_0 = 30,0035$ мм.

Для нового калібру ($w=0$) ризик споживача $P_{FA} \approx 0\%$, проте ризик виробника P_{FR} (помилкове відбраковування придатних деталей) становить 25,7%, оскільки розмір G_0 суттєво зміщений всередину поля допуску деталі. Граничний експлуатаційний знос за критерієм $P_{FA} = 1\%$ становить $Y = 6,5$ мкм.

З метою оцінки універсальності моделі, для різних законів розподілу, проведено порівняльний аналіз ризиків споживача і виробника для різних сценаріїв налаштування процесу та зносу калібру (таблиця 3).

Таблиця 3

Залежність ризиків споживача і виробника від закону розподілу контрольованого параметру, параметрів процесу та стану калібру

Параметри процесу (μ ; σ), мм	Стан калібру (знос w)	P_{FR} (ризик виробника), %	P_{FA} (ризик споживача), %	Метрологічне обґрунтування сценарію
Нормальний закон розподілу				
$\mu = 30,005$; $\sigma = 0,0035$	Новий ($w = 0$)	25,72	~ 0	Налаштування на межу максимуму матеріалу. Високий помилковий брак.
$\mu=30,005$; $\sigma=0,0035$	Граничний ($w = 6,5$ мкм)	0	1,00	Точка Y (допустимий знос) за критерієм ризику 1%.
$\mu=30,0105$; $\sigma=0,0035$	Новий ($w = 0$)	2,15	~ 0	Ідеальне центрування процесу. Мінімальні втрати виробника.
$\mu=30,0105$; $\sigma=0,0070$	Новий ($w = 0$)	7,82	6,68	Незадовільна точність ($C_p < 1$). Калібр не забезпечує надійності.
Рівномірний закон розподілу				
$\mu=30,0105$; $\sigma=0,0060$	Новий ($w = 0$)	16,60	~ 0	Процес із постійним дрейфом (знос інструменту). Ризик розподілений лінійно.
$\mu=30,005$; $\sigma=0,0035$	Граничний ($w = 4,2$ мкм)	0	1,00	Швидке зростання ризику споживача через "важкі хвости" розподілу.
Трикутний закон розподілу				
$\mu=30,005$; $\sigma=0,0035$	Новий ($w = 0$)	12,50	~ 0	Високоточна фінішна обробка. Нижчий ризик P_{FR} порівняно з нормальним законом розподілу.
$\mu=30,005$; $\sigma=0,0035$	Граничний ($w = 8,4$ мкм)	0	1,00	Максимальний ресурс калібру завдяки високій концентрації розмірів у центрі.

Аналіз впливу розміру налаштування (математичного очікування μ) на показники ризику показують, що просте переналаштування верстата на середину допуску при нормальному законі знижує помилковий брак у 12 разів (з 25,7% до 2,15%). Те саме спостерігається і для рівномірного закону розподілу.

З таблиці 3 також випливає, що при одному і тому самому критерії ризику ($P_{FA} = 1\%$), допустимий знос Y змінюється від 4,2 мкм (рівномірний закон) до 8,4 мкм (трикутний). Це доводить, що термін служби калібру залежить від фізики розсіювання розмірів.

Розроблений алгоритм нормативного розрахунку гладких калібрів та ризик-орієнтованої оцінки помилки контролю орієнтований на реалізацію в цифровому середовищі з використанням табличних процесорів типу Microsoft Excel. Такий підхід забезпечує автоматизацію обчислень, прозорість логіки розрахунку та можливість оперативного аналізу впливу вихідних параметрів на характеристики

контрольного інструменту відповідно до вимог системи допусків і посадок ISO та стандарту ISO 1938-1:2015 [1–3].

Цифрова модель побудована за модульним принципом і включає окремі функціональні блоки для введення нормативних параметрів, алгоритмізованого розрахунку граничних розмірів калібрів і оцінки ризику помилки контролю. Вхідними даними є номінальний розмір отвору, поле допуску та квалітет точності, які визначають положення і ширину поля допуску відповідно до ДСТУ ISO 286-1:2019 та ДСТУ ISO 286-2:2019 [1, 2]. Нормативні значення граничних відхилень, допусків на виготовлення та допустимого зношування калібрів визначаються автоматично на основі вбудованої довідкової бази, що виключає суб'єктивний фактор і знижує імовірність помилок при проєктуванні.

Алгоритмізований нормативний розрахунок, реалізований у цифровій формі, забезпечує однозначне визначення граничних розмірів прохідного та непрохідного калібрів відповідно до вимог стандартів [3, 4]. Результати нормативного етапу безпосередньо використовуються як вихідні параметри для ризик-орієнтованої імовірнісної моделі, побудованої з урахуванням статистичної варіації розмірів деталей та зношування контрольного інструменту, що узгоджується з положеннями ISO 14253-1:2017 і концепцією невизначеності вимірювань, викладеною в GUM [6, 7].

Важливою перевагою цифрової реалізації є можливість параметричного та сценарного аналізу. Зміна номінального розміру, квалітету точності або параметрів зносу дозволяє досліджувати вплив цих факторів на граничні розміри калібрів, допустимий експлуатаційний ресурс і рівень ризику помилки контролю, що відповідає сучасним підходам статистичного контролю якості [5, 9, 11].

Отже, цифрова реалізація методики слугує не лише засобом автоматизації нормативних розрахунків, а й інструментом підтримки прийняття інженерних рішень у ризик-орієнтованій системі управління якістю. Вона дозволяє інтегрувати нормативні вимоги, імовірнісну оцінку надійності контролю та економічні аспекти експлуатації калібрів у єдину інженерну модель, що узгоджується з принципами ризик-менеджменту, закладеними в ДСТУ ISO 9001:2015 [10, 12].

Висновки

1. Розроблено алгоритмізований метод розрахунку гладких калібрів, що поєднує нормативні вимоги ISO з імовірнісною оцінкою надійності контролю.

2. Запропоновано модель, що встановлює кількісний зв'язок між зношуванням калібру, параметрами технологічного процесу та ризиком пропуску браку.

3. Доведено, що експлуатаційний ресурс калібру суттєво залежить від фізики розсіювання розмірів: при фіксованому рівні ризику 1% допустимий знос становить від 4,2 мкм (для рівномірного закону) до 8,4 мкм (для трикутного).

4. Показано, що оптимальне центрування процесу ($\mu = \mu_0$) радикально мінімізує втрати виробника від хибного бракування при використанні нових калібрів.

5. Цифрова реалізація методики у середовищі табличних процесорів дозволяє автоматизувати проєктування та створює основу для впровадження «цифрових двійників» контрольного інструментарію.

6. Запропонований підхід забезпечує зниження економічних втрат за рахунок переходу від формальних геометричних меж зносу до функціонального управління ризиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] ДСТУ ISO 286-1:2019. Геометричні специфікації виробів (GPS). Система допусків і посадок ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилень і посадок. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 68 с.

[2] ДСТУ ISO 286-2:2019. Геометричні специфікації виробів (GPS). Система допусків і посадок ISO. Частина 2. Таблиці стандартних допусків і відхилень. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 80 с.

[3] ISO 1938-1:2015. Geometrical product specifications (GPS). Dimensional gauging equipment. Part 1: Plain limit gauges of linear size. – Geneva : ISO, 2015. – 48 p.

[4] Taylor F. W. On the art of cutting metals. – New York : American Society of Mechanical Engineers, 1906. – 279 p.

[5] Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. – 7th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. – 768 p.

[6] ISO 14253-1:2017. Geometrical product specifications (GPS). Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 1: Decision rules for proving conformance or nonconformance with specifications. — Geneva : ISO, 2017. – 38 p.

[7] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). – Sèvres : BIPM, 2008. – 120 p.

[8] Chase K. W., Parkinson A. R. A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies. – Research in Engineering Design. – 1991. – Vol. 3, No. 1. – P. 23–37. – DOI: 10.1007/BF01580066.

[9] Bender A., Braun T. Statistical tolerancing and tolerance analysis in mechanical engineering. – Berlin : Springer, 2006. – 214 p.

[10] ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 32 с.

[11] Savio E., Carmignato S., Leach R. Digital twins in industrial metrology. CIRP Annals. 2020. Vol. 69, Iss. 2. P. 603–626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.002>.

[12] Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT) : ДСТУ ISO 31000:2018. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2018. – 21 с.

[13] Sony M., Antony J., Douglas A. Quality 4.0 and its impact on manufacturing activities: a industrial case study. International Journal of Quality & Reliability Management. 2021. Vol. 38, No. 6. P. 1393–1417.

Савуляк Віктор Валерійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, <https://orcid.org/0009-0009-7178-6243>, e-mail: vvsav81@gmail.com

Семічаснова Наталія Степанівна – старший викладач кафедри технологій та автоматизації машинобудування, <https://orcid.org/0000-0003-1290-5483>, e-mail: semichasnova79@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

V. Savuliak¹
N. Semichasnova¹

Algorithmization of calculation of smooth calibres for control of holes using digital design methods

¹Vinnitsia National Technical University

The article solves the current scientific and applied problem of algorithmization of calculation of smooth limit gauges intended for control of holes in mechanical engineering, using modern digital design methods. It is substantiated that in the conditions of transition to the concept of "Industry 4.0" traditional deterministic methods of calculation of parameters of the control tool need to be supplemented with probabilistic models to ensure the reliability of geometric control.

The authors have developed and formalized a normative algorithm for determining the limit sizes of through and non-through gauges, which is based on the requirements of national and international standards DSTU ISO 286 and ISO 1938-1. The algorithm is presented in a structured tabular form, which allows it to be easily integrated into computer-aided design systems (CAD) and quality management systems based on spreadsheet processors. Particular attention is paid to the unambiguous determination of the limits of manufacturing tolerances and wear of the through gauge as basic parameters for further digital modeling.

The scientific novelty of the work lies in the development of a risk-oriented probabilistic model for estimating errors in attributive control. Unlike the classical approach, where the wear allowance is considered as a fixed geometric margin, the proposed model takes into account the stochastic nature of the technological process (variation of the sizes of parts in the batch) and the random nature of wear of the working surfaces of the gauge. The use of the normal distribution function made it possible to establish a mathematical relationship between the current state of the gauge and the probability of passing a defect (consumer risk).

The author's method for determining the operational limit wear of a through gauge is proposed, which is based on establishing an acceptable risk level P_{FA}^ . This allows us to move from formal removal of the tool from operation to reasonable management of its resource depending on the criticality of the controlled connection and economic factors. An economic interpretation of the results in the context of risk management was performed in accordance with the principles of DSTU ISO 9001:2015, which shows the impact of control errors on the total production costs.*

Practical testing of the method on the example of calculating calibers for controlling the 30H7 hole confirmed that the risk-oriented approach provides higher reliability of control in conditions of drift of technological process parameters. The results of the study can be implemented at machine-building enterprises for digitalization of metrological support and optimization of costs for control tools.

Keywords: smooth limit gauges; hole control; calculation algorithmization; ISO tolerance and fit system; risk-based approach; probability of control error; gauge wear; digital design.

Savuliak Viktor - Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Automation of Mechanical Engineering, , <https://orcid.org/0009-0009-7178-6243>, e-mail: vvsav81@gmail.com

Semichasnova Nataliia – senior lecturer of the Department of Machine-Building Technologies and Automation, <https://orcid.org/0000-0003-1290-5483>, e-mail: semichasnova79@gmail.com