

П.О. Ружин, С.Т. Пацера, В.А. Дербаба, В.І. Корсун

НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

ВПЛИВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ НА ВІДСОТКИ НЕПРАВИЛЬНО ЗАБРАКОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ДВОХФАКТОРНОМУ КОНТРОЛІ

Проблема розрахунку допустимого рівня невизначеності вимірювання при допускному контролі виробів машинобудування залишається актуальною. Поставлена задача вирішується шляхом застосування імітаційно-статистичного моделювання контрольно-вимірювальних процедур. Для цієї мети розроблена алгоритмічна модель. Проведено комп'ютерні експерименти і отримані значення відсотків неправильно забракованих і неправильно прийнятих деталей від рівня невизначеності вимірювань, що оцінюється складовими по типу В. Показано, що при двофакторній контрольно-вимірювальній процедурі вимоги до точності засобів вимірювань в порівнянні з однофакторним варіантом зростають у рази.

Ключові слова: невизначеність вимірювань, допускний контроль, помилки першого та другого роду, зубчасте колесо, моделювання.

Вступ

Постановка проблеми. Проблема забезпечення якості виробництва нерозривно пов'язана з обґрунтуванням допустимого рівня невизначеності вимірювань контрольованих параметрів виробів. Відомо, що похибки вимірювань при допускному контролі нормованих параметрів точності виробів можуть призводити до помилок першого і другого роду. При наявності похибок вимірювання деяка частка виробів може бути помилково зарахована до непридатних, тобто неправильно забракованих (НЗ), а певна доля продукції може бути помилково прийнята у якості придатних, тобто неправильно прийнятих (НП). Тому одна з найважливіших задач проектування контролю – вибір необхідної точності вимірювань, за результатами яких приймаються рішення про придатність або непридатність контрольованих виробів.

Теоретичні аспекти цієї проблеми детально розглянуті науковцями ще в середині ХХ століття. Були одержані результати в загальному вигляді на основі застосування теорії ймовірності та залежностей з кратними інтегралами. Однак спроби конкретизувати відомі теоретичні моделі стосовно до виробів машинобудування складної геометричної форми, включно зубчастих коліс евольвентного профілю, наштовхуються на суттєві методологічні складності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уникнути зазначеної складності можна шляхом розробки алгоритмічної моделі, яка дозволила б розрахувати частки неправильно забракованих і неправильно прийнятих деталей без втрати точності визначення цих показників, а також отримати залежності впливу невизначеності вимірювання на погіршення результатів допускного контролю зубчастих коліс. Для вирішення цього проблемного питання стосовно зубчастих коліс евольвентного профілю в робо-

тах [1–3] з позитивним результатом застосовано методику імітаційно-статистичного моделювання контрольно-вимірювальних процедур.

Імітаційна складова запропонованої методики в цілому відповідає сучасній методології імітаційного моделювання, теоретичні та практичні аспекти якої широко висвітлюються в численних публікаціях науковців з різних галузей знань, наприклад, у роботах [4–14]. Саме імітаційне моделювання є найбільш ефективним методом дослідження систем, а часто і єдиним практично доступним методом отримання інформації про поведінку системи, особливо на етапі її проектування.

Мета статті. Предметом статті є оцінювана за типом В невизначеність вимірювання, як джерело помилок першого і другого роду при допускному контролі в машинобудуванні.

Тема роботи – оцінка впливу невизначеності вимірювань нормованих геометричних параметрів евольвентних зубчастих коліс на частку неправильно забракованих і неправильно прийнятих деталей.

Мета роботи – розробка алгоритмічних моделей для чисельних розрахунків залежностей впливу невизначеності вимірювань, що оцінюється за типом В, на погіршення результатів допускного контролю зубчастих коліс.

Виклад основного матеріалу

Для реалізації запропонованого підходу потрібна розробка алгоритмічних моделей. Методологія проведення досліджень включає імітаційне моделювання виготовлення партії (вибірки) зубчастих коліс із заданими вимогами до точності геометричних параметрів зубчастого вінця відповідно до міжнародних стандартів. При цьому методом статистичного моделювання (Монте Карло) відтворюється масив відхилень від номінального значення геометричного

параметра зубчастого вінця. Прийнято наступні допущення:

– розподіл відхилень геометричного параметра рівномірний, межі інтервалу розсіювання від нижнього до верхнього відхилення вибираються із збільшуваним поправочним коефіцієнтом 1,0027, що відповідає загальноприйнятому в машинобудуванні рівню точності технології;

– базовий масив випадкових відхилень геометричного параметра колеса моделюється в припущенні відсутності похибок вимірювання;

– масив випадкових похибок генерується з рівномірним розподілом, коли межі інтервалу $[a^-; a^+]$ симетричні відносно нуля.

Розроблена алгоритмічна модель чисельних комп'ютерних експериментів передбачає в своєму складі моделюючі блоки вимірювально-контрольних процедур для радіального биття зубчастого вінця і довжини спільної нормалі. Така комбінація геометричних параметрів відображає комплекс для двохфакторного пасивного допускового контролю кінематичної точності зубчастих коліс.

Контрольні процедури моделюються за допомогою логічних формул, при цьому придатним ко-

лесам присвоюється бал придатності «1», а бракованим відповідно «0».

Програмна реалізація алгоритмічної моделі здійснена в програмі Microsoft Excel.

Обсяг вибірки складає 1000 деталей, що досить для прийнятної точності побудови графіків обчислених залежностей.

Моделювання виконано на прикладі конкретного циліндричного прямокутного колеса:

- число зубців $z = 31$;
- дільний діаметр $d = 207,79$ мм;
- ступінь точності 6-С.

Для моделювання було взято граничну інструментальну похибку приладу вимірювання для 10 випадків в діапазоні від 2 до 20 мкм.

В табл. 1 наведено опис структурних блоків алгоритмічної моделі чисельних комп'ютерних експериментів для радіального биття зубчастого вінця. Структурні блоки для імітаційно-статистичного моделювання довжини спільної нормалі аналогічні. Але до них може бути додано блок для моделювання пар охоплених зубців.

Таблиця 1

Структурні блоки при моделюванні радіального биття

Позначення	Назва блоку	Математичні моделі блоків
T1	Моделювання номера зубчастого колеса, i	$i = 1, 2, \dots, n$, де n – ціле число
T2	Статистичне моделювання за умови відсутності похибки вимірювання радіального биття	$F_{r_b} = F_r \cdot x$; де F_{r_b} – радіальне биття при умові відсутності невизначеності вимірювання, мкм; F_r – допуск на радіальне биття, мкм; x – поправочний коефіцієнт до поля розсіювання за нормальної точності 1,0027,
K3	Моделювання контрольної процедури	Логічна функція $\beta_b = 1$, якщо F_{r_b} знаходиться в полі допуску; $\beta_b = 0$, якщо F_{r_b} знаходиться поза полем допуску, де β_b – бал придатності зубця
T4	Статистичне моделювання інструментальної похибки при вимірюванні радіального биття	Δr – гранична похибка вимірювального приладу, мкм
TM5	Підсумовування T2+T4	F_{r_d} – дійсне відхилення радіального биття
K6	Моделювання контрольної процедури	Логічна функція $\beta_d = 1$, якщо F_{r_d} знаходиться в полі допуску; $\beta_d = 0$, якщо F_{r_d} знаходиться поза полем допуску, де β_d – бал придатності колеса за дійсним відхиленням радіального биття
K7	Моделювання контрольної процедури	Логічна функція для визначення правильності бракування зубчастого колеса: ПЗ $i = 1$, якщо $\beta_b = 0$ та $\beta_d = 0$
K8	Моделювання контрольної процедури	Логічна функція для визначення правильності бракування зубчастого колеса: НЗ $i = 1$, якщо $\beta_b = 1$ та $\beta_d = 0$

Позначення	Назва блоку	Математичні моделі блоків
K9	Моделювання контрольної процедури	Логічна функція для визначення правильності бракування зубчастого колеса: $\text{ПП } i = 1$, якщо $\beta_v = 1$ та $\beta_d = 1$
K10	Моделювання контрольної процедури	Логічна функція для визначення правильності бракування зубчастого колеса: $\text{НП } i = 1$, якщо $\beta_v = 0$ та $\beta_d = 1$
K11	Аналіз результатів	Визначення показників дефектності у відсотках від загальної кількості зубчастих коліс, $\text{ПЗ, \%} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{ПЗ}i \right) \cdot 100;$ $\text{НЗ, \%} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{НЗ}i \right) \cdot 100;$ $\text{ПП, \%} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{ПП}i \right) \cdot 100;$ $\text{НП, \%} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{НП}i \right) \cdot 100 .$

Блок-схема алгоритму імітаційно-статистичного моделювання для радіального биття зубчастого вінця показана на рис. 1. Для довжини спільної нормалі блок схема аналогічна. В блок-схемі позначені символами блоки: T_j – технологічні, K_j – контрольні, M_j – метрологічні, TM_j – змішані (підсумовують). Індексом j позначений порядковий номер блоку алгоритму.

Моделювання виконувалося за допомогою вбудованої функції *Генерація випадкових чисел* за рівномірним законом розподілу.

Розраховані за результатами моделювання залежності для радіального биття показано на рис. 2–3. Результати моделювання показані з урахуванням груп деталей: НЗ – неправильно забраковані, ПП – правильно прийняті.

Отримання невизначеності за отриманими вже результатами було розраховано за формулою [15–17]:

$$u_v = a/\alpha$$

де a – границя інтервалу $[a^- ; a^+]$ тобто гранична похибка вимірювального приладу;

$\alpha = \sqrt{3}$ – для рівномірного закону розподілу.

Приклади результатів моделювання для коливання довжини спільної нормалі за групами НЗ, ПП, показано на рис. 4–5.

Загальні результати моделювання за двома параметрами, а саме радіального биття і коливання довжини спільної нормалі за групами НЗ, ПП, НП, показано на рис. 6–8.

Результати досліджень наступні:

Розроблено алгоритмічну модель двохфакторного пасивного допускового контролю зубчастого

вінця евольвентного профілю для випадку контролю на відповідність нормативам кінематичної точності за показниками радіального биття і коливання довжини спільної нормалі.

Проведено комп'ютерні експерименти і отримані залежності відсотків, неправильно забракованих і неправильно прийнятих деталей, від рівня невизначеності вимірювань, що оцінюється складовими по типу В.

В результаті досліджень вперше отримані залежності частки неправильно забракованих і неправильно прийнятих зубчастих коліс від невизначеності вимірювань при двохфакторному контролі.

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновки, що двохфакторний контроль в разі відсутності кореляції масивів випадкових відхилень двох контрольованих параметрів зубчастих коліс істотно збільшує помилки першого і другого роду.

Для суттєвого зниження рівня помилок двохфакторного контролю зубчастих коліс потрібно зменшувати стандартну невизначеність вимірювань, що оцінюється за типом В, до величини, яка не перевищує 1,155 мкм. Цього можна досягти, застосовуючи координатно-вимірювальні машини, які поставляються з відповідним програмним забезпеченням.

Область застосування результатів досліджень – виробництво зубчастих коліс, до яких пред'являються підвищені вимоги до точності (починаючи з 8 ступені точності).

Подальші роботи будуть спрямовані на автоматизацію досліджень.

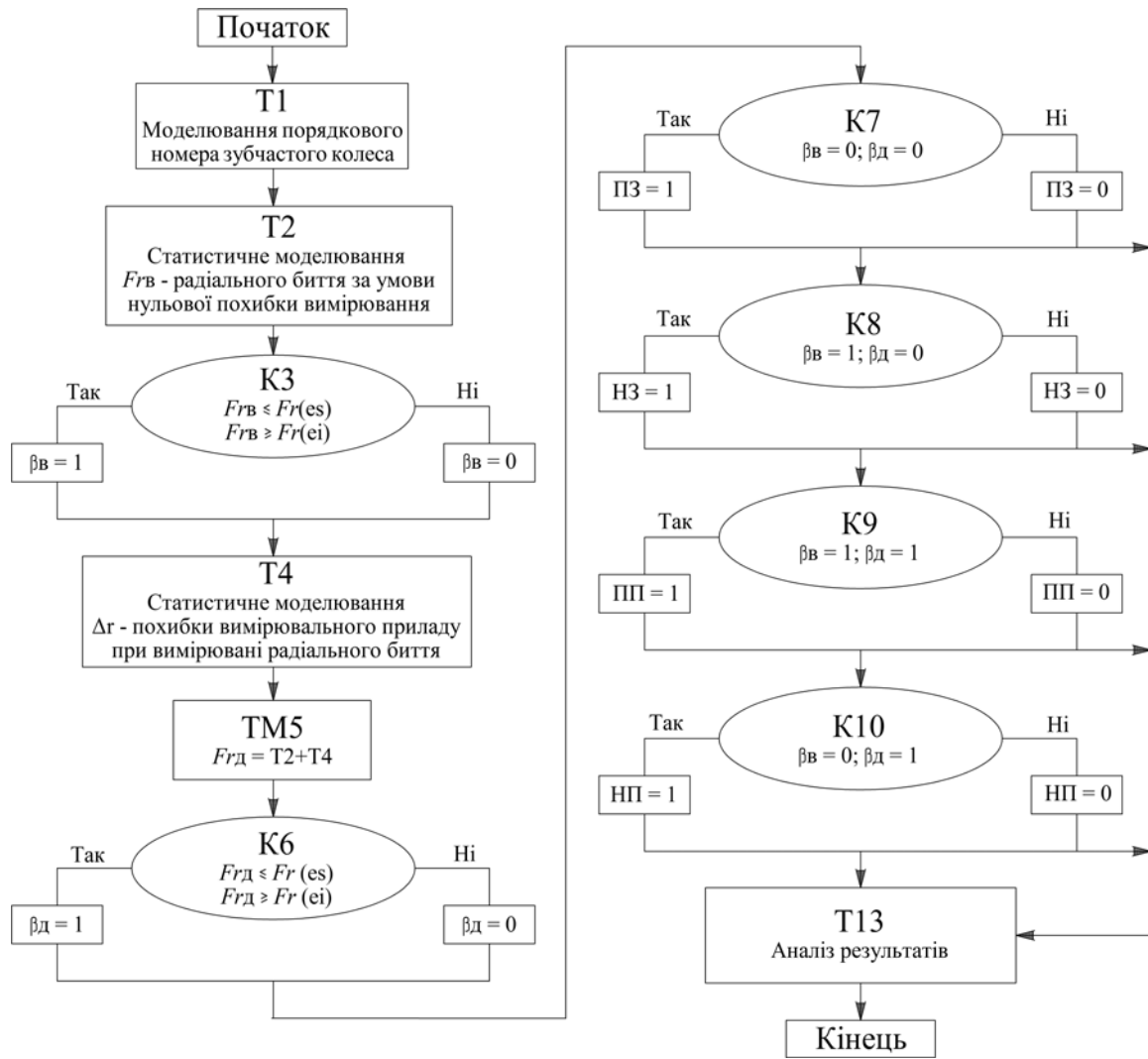


Рис. 1. Блок-схема алгоритму для моделювання радіального биття

Таблиця 2

Фрагмент електронної таблиці імітаційно-статистичного моделювання впливу похибки вимірювання при прийнятному контролі радіального биття зубчастого колеса (для скорочення обсягу таблиці показані не всі рядки)

№ зубчастого колеса	Радіальне биття за умови нульової похибки вимірювання, мкм	Оцінка придатності за умови нульової похибки вимірювання	Випадкові значення інструментальної похибки, мкм	Радіальне биття з урахуванням випадкового значення похибки вимірювання, мкм	Оцінка придатності з урахуванням похибки вимірювання	Оцінка придатності за групами			
						ПЗ	НЗ	ПП	НП
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	39,8	1	8,3	48,1	0	0	1	0	0
2	26,3	1	7,2	33,5	1	0	0	1	0
3	14,2	1	-5,1	9,1	1	0	0	1	0
500	40,5	0	-9,5	31,1	1	0	0	0	1
501	40,9	0	4,3	45,2	0	1	0	0	0
502	5,8	1	0,1	5,9	1	0	0	1	0

№ зубчастого колеса	Радіальне биття за умови нульової похибки вимірювання, мкм	Оцінка придатності за умови нульової похибки вимірювання	Випадкові значення інструментальної похибки, мкм	Радіальне биття з урахуванням випадкового значення похибки вимірювання, мкм	Оцінка придатності з урахуванням похибки вимірювання	Оцінка придатності за групами			
						ПЗ	НЗ	ПП	НП
998	40,8	0	-9,6	31,2	1	0	0	0	1
999	9,3	1	-11,5	-2,2	0	0	1	0	0
1000	2,4	1	11,9	14,3	1	0	0	1	0
Всього деталей за стовпчиком 3, шт.		973		Всього деталей за стовпчиком 6-10, шт.	835	10	155	818	17
Всього деталей за стовпчиком 3, %		97,3		Всього деталей за стовпчиком 6-10, %	83,5	1,0	15,5	81,8	1,7

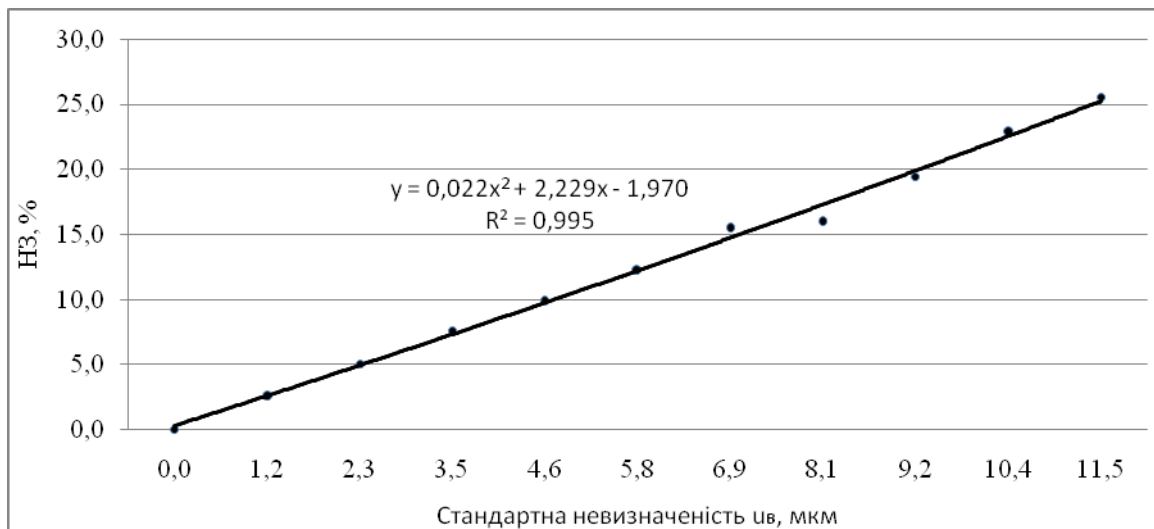


Рис. 2. Залежність відсотка неправильно забракованих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при радіальному битті

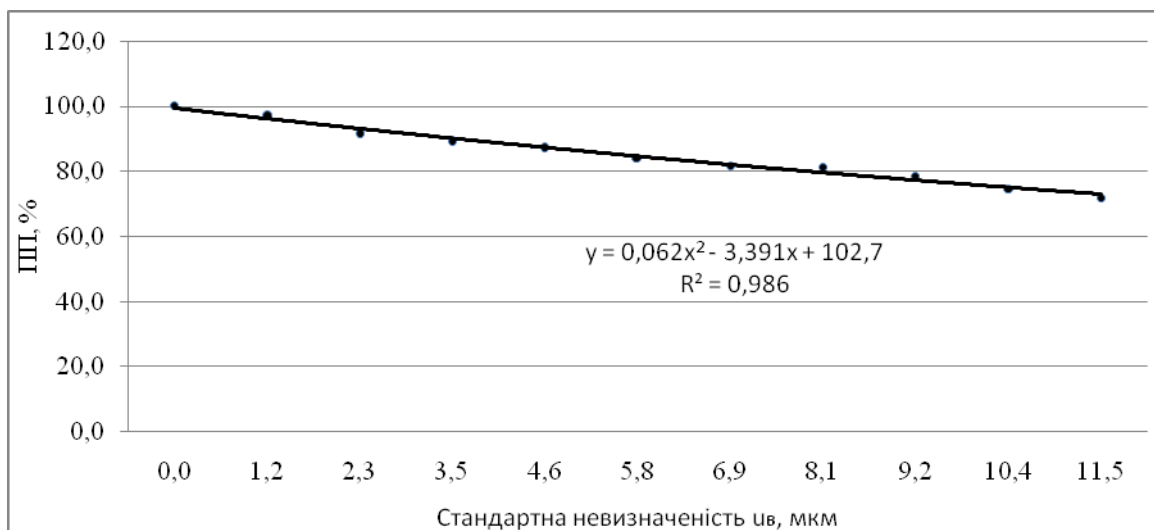


Рис. 3. Залежність відсотка правильно прийнятих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при радіальному битті

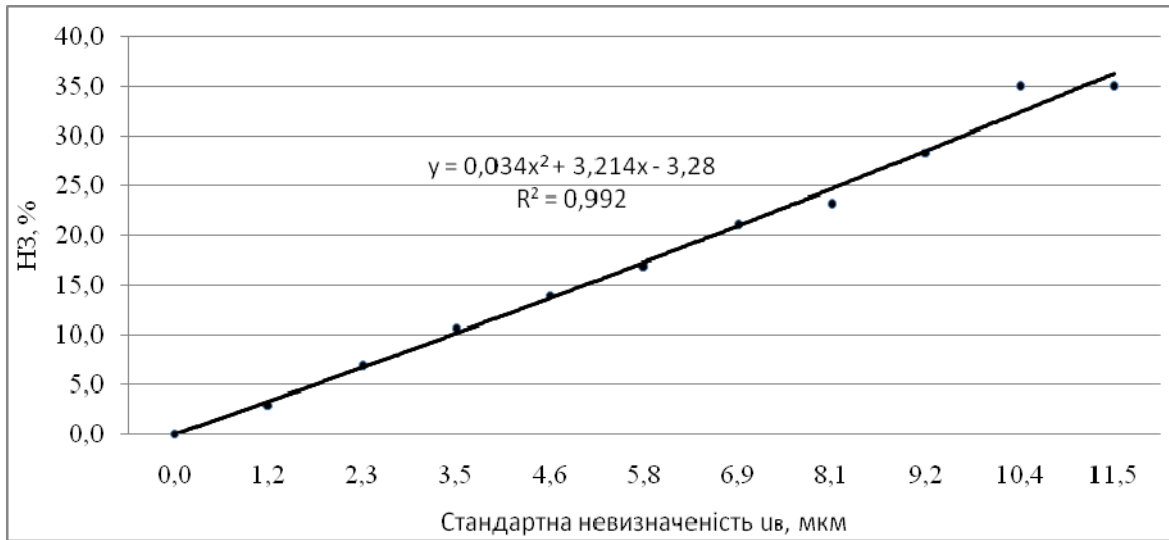


Рис. 4. Залежність відсотка неправильно забракованих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при коливанні довжини спільної нормалі

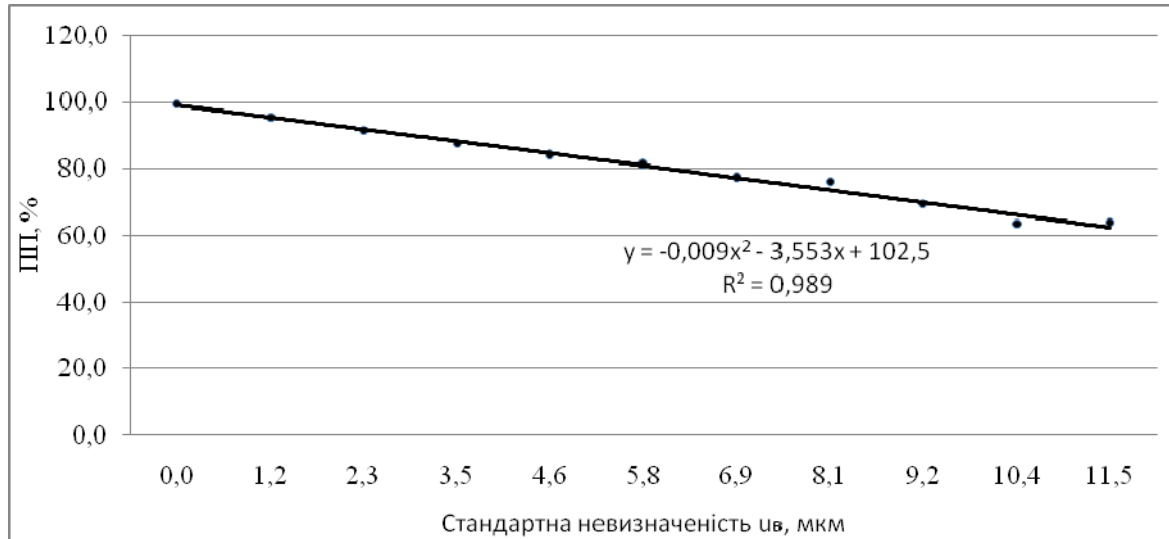


Рис. 5. Залежність відсотка правильно прийнятих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при коливанні довжини спільної нормалі

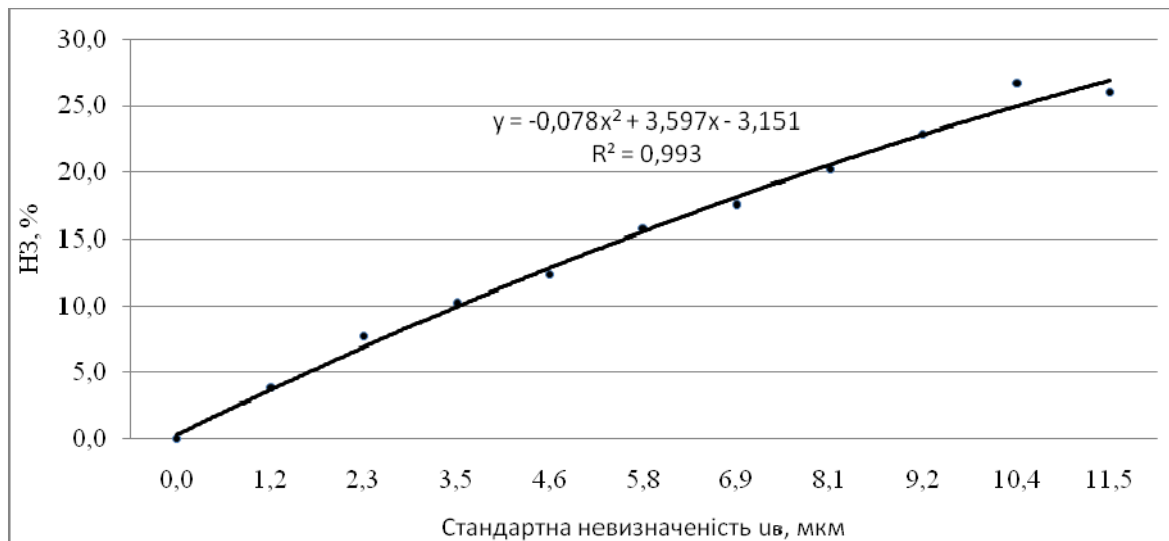


Рис. 6. Залежність відсотка неправильно забракованих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при випадку двохпараметричного контролю

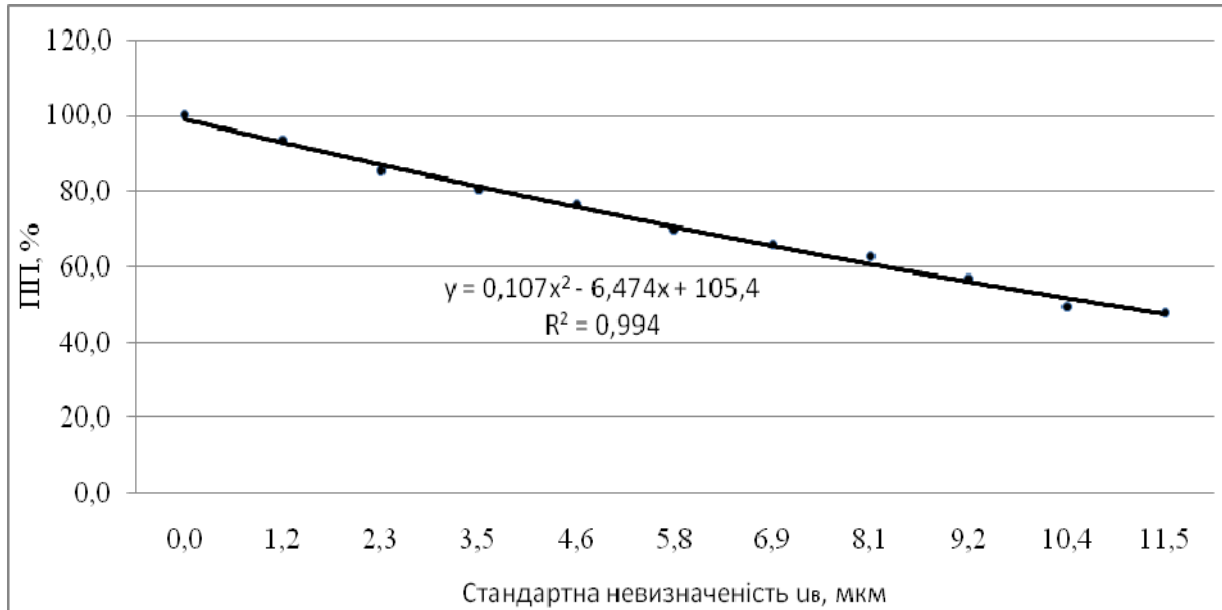


Рис. 7. Залежність відсотка правильно прийнятих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при випадку двохпараметричного контролю

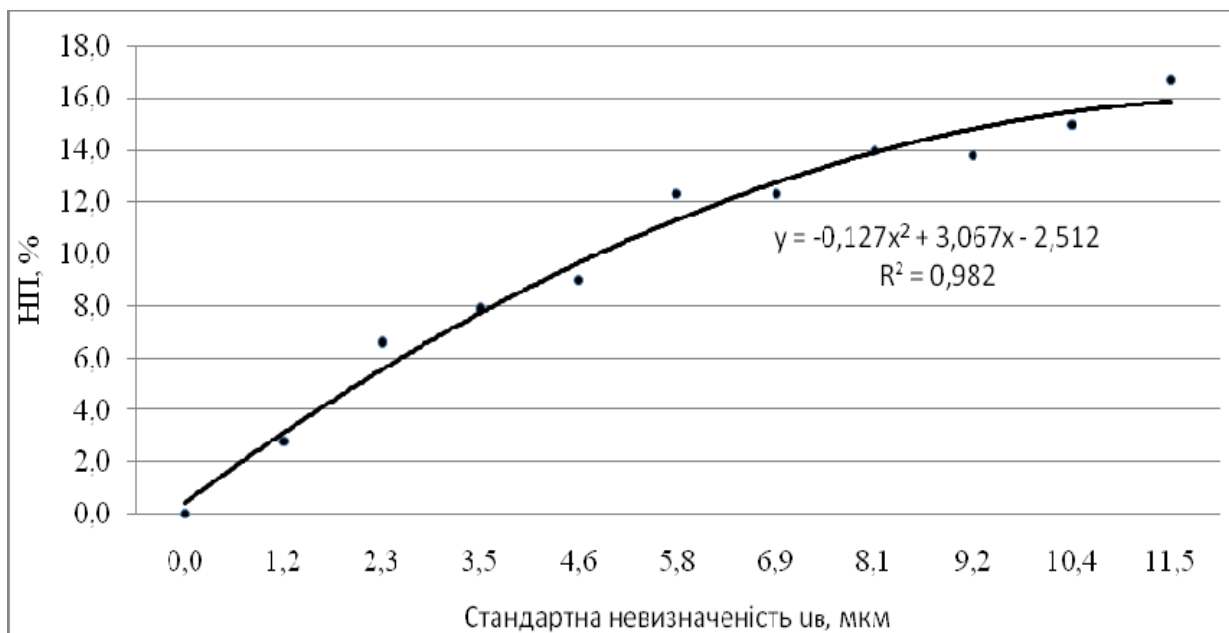


Рис. 8. Залежність відсотка неправильно прийнятих зубчастих коліс від стандартної невизначеності вимірювання при випадку двохпараметричного контролю

Висновки

1) Двохфакторний контроль в разі відсутності кореляції масивів випадкових відхилень двох контрольованих параметрів зубчастих коліс у разі збільшує помилки першого і другого роду.

2) Для істотного зменшення рівня помилок двохфакторного контролю зубчастих коліс слід знизувати невизначеність вимірювань, що оцінюється за

типом В, до величини, яка не перевищує 1,155 мкм. Цього можна досягти, застосовуючи координатно-вимірювальні машини, що поставляються з відповідним програмним забезпеченням.

3) Область застосування результатів досліджень – виробництво зубчастих коліс, до яких пред'являються підвищені вимоги щодо точності (починаючи з 8 ступеня точності).

Список літератури

1. Дербаба В.А. Имитационно-статистическая модель инструментальных погрешностей измерения геометрических параметров зубчатых колёс: дис. канд. техн. наук: 05.11.01 / Дербаба В.А. – Одесса, 2014. – 109 с.
2. Пацера С.Т. Алгоритм імітаційно-статистичного дослідження контрольно-вимірвальної системи та його програмна реалізація у NI Lab VIEW / С.Т. Пацера, В.І. Корсун, В.А. Дербаба, П.О. Ружин // Системи обробки інформації. – 2016. – № 6 (143). – 226 с.
3. Derbaba V.A. Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes [Electronic resource] / V.A. Derbaba, V.V. Zil, S.T. Patsera // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, Dnipro, 2014. – No. 5 (143). – P. 45-50. – Available at: <http://scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84914695179&partnerID=MN8TOARS>.
4. White K.P. The basics of simulation [Electronic resource] / K.P. White, R.G. Ingalls // Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference, 2017. – Available at: <https://www.informs-sim.org/wsc17papers/includes/files/037.pdf>.
5. Nutaro Y. A method for bounding, error in multi-rate and federated simulations [Electronic resource] / Y. Nutaro // Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2016. – Available at: <https://www.informs-sim.org/wsc16papers/087.pdf>.
6. A Methodology for Continuous Quality Assurance of Production Data Manufacturing Applications [Electronic resource] / J. Bokrantz, A. Skoogh, J. Andersson, J. Ruda, D. Lamkull // Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, December 2015. – California, USA. – P. 2088-2099. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc15papers/214.pdf>.
7. Modeling for Everyone: Emphasizing the Role of Modeling in STEM Education [Electronic resource] / P. Fishwick, S. Brailsford, S.Y. Taylor, A. Tolk, A. Uhrmacher // Modeling Methodology, Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 7-10 December 2014. – Georgia, USA. – P. 2786-2796. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/251.pdf>.
8. Panel: The Future of Research in Modeling & Simulation [Electronic resource] / L. Yilmaz, S.Y. Taylor, R. Fujimoto, F. Darema // Modeling Methodology, Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 7-10 December 2014. – Georgia, USA. – P. 2797-2811. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/252.pdf>.
9. A Structured DEVS Model Representation Based on Extended Structured Modeling [Electronic resource] / Y. Hu, J. Xiao, G. Rong, X. Hu // Modeling Methodology, Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 7-10 December 2014. – Georgia, USA. – P. 2817-2823. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/253.pdf>.
10. Epistemology of Modeling and Simulation [Electronic resource] / A. Tolk, B.L. Heath, M. Ihrig, J.J. Padilla, E.H. Page, E.D. Suarez, E.D. Szabo, P. Weirich, L. Yilmaz // Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013. – Washington, USA. – P. 1152-1166. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/101.pdf>.
11. Bécharde V. Simulation of Mixed Discrete and Continuous Systems: An Iron Ore Terminal Example [Electronic resource] / V. Bécharde, N. Côté // Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013. – Washington, USA. – P. 1166-1178. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/102.pdf>.
12. A DSM-based Multi-Paradigm Simulation Modeling Approach for Complex Systems [Electronic resource] / X. Li, Y. Lei, W. Wang, W. Wang, Y. Zhu // Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013. – Washington, USA. – P. 1179-1190. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/103.pdf>.
13. Kim S.H. Using Simulation to Study Statistical Tests for Arrival Process and Service Time Models for Service Systems [Electronic resource] / S.H. Kim, W. Whitt // Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013. – Washington, USA. – P. 1223-1232. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/107.pdf>.
14. Gore R. The Need for Usable Formal Methods in Verification and Validation [Electronic resource] / R. Gore, S. Diallo // Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013. – Washington, USA. – P. 1258-1268. – Available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/110.pdf>.
15. Боцюра О.А. Сравнительный анализ различных способов вычисления коэффициентов охвата при реализации байесовского подхода к оцениванию неопределенности измерений / О.А. Боцюра, И.П. Захаров // Системи обробки інформації. – 2016. – № 6(143). – С. 20-24.
16. Захаров И.П. Применение метода эксцессов для получения достоверной оценки расширенной неопределенности / И.П. Захаров, Е.А. Климова // Системи обробки інформації. – 2014. – № 3(119). – С. 24-28.
17. Захаров И.П. Неопределенность измерений для чайников и начальников. 3-е изд. перераб. и дополн. / И.П. Захаров. – Харьков: 2015. – 52 с.

References

1. Derbaba, V.A. (2014), "Imitacionno - statisticheskaya model instrumentalnykh pogreshnostey izmereniya geometricheskikh parametrov zubchatykh kolos: dissertatsiya" [Simulation-statistical model of instrumental errors in measuring geometrical parameters of gear wheels: dissertation], Odessa, 109 p.
2. Patsera, S.T., Korsun, V.I., Derbaba, V.A. and Ruzhyn, P.O. (2016), "Alhorytm imitatsiyno-statystychnoho doslidzheniya kontrol'no-vymiryval'noyi systemy ta yoho prohramna realizatsiya u NI Lab VIEW" [Algorithm of simulation - statistical

research of control and measuring system and its program realization at NI Lab VIEW], *Information Processing Systems*, No. 6(143), 226 p.

3. Derbaba, V.A., Zil, V.V. and Patsera, S.T. (2014), Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 5 (143), Dnipro, pp. 45-50, available at: <http://scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84914695179&partnerID=MN8TOARS>.

4. White, K.P. and Ingalls, R.G. (2017), The basics of simulation, *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, available at: <https://www.informs-sim.org/wsc17papers/includes/files/037.pdf>.

5. Nutaro, Y. (2016), A method for bounding, error in multi-rate and federated simulations, *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, available at: <https://www.informs-sim.org/wsc16papers/087.pdf>.

6. Bokrantz, J., Skoogh, A., Andersson, J., Ruda, J. and Lamkull, D. (2015), A Methodology for Continuous Quality Assurance of Production Data Manufacturing Applications, *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, 5-9 December 2015, California, USA, pp. 2088-2099, available at: <https://informs-sim.org/wsc15papers/214.pdf>.

7. Fishwick, P., Brailsford, S., Taylor, S.Y., Tolk, A. and Uhrmacher, A. (2014), Modeling for Everyone: Emphasizing the Role of Modeling in STEM Education, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 7-10 December 2014*, Georgia, USA, pp. 2786-2796, available at: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/251.pdf>.

8. Yilmaz, L., Taylor, S.Y., Fujimoto, R. and Darema, F. (2014), Panel: The Future of Research in Modeling & Simulation, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 7-10 December 2014*, Georgia, USA, pp. 2797-2811, available at: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/252.pdf>.

9. Hu, Y., Xiao, J., Rong, G. and Hu, X. (2014), A Structured DEVS Model Representation Based on Extended Structured Modeling, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 7-10 December 2014*, Georgia, USA, pp. 2817-2823, available at: <https://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/253.pdf>.

10. Tolk, A., Heath, B.L., Ihrig, M., Padilla, J.J., Page, E.H., Suarez, E.D., Szabo, E.D., Weirich, P. and Yilmaz, L. (2013), Epistemology of Modeling and Simulation, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013*, Washington, USA, pp. 1152-1166, available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/101.pdf>.

11. Béchard, V. and Cote, N. (2013), Simulation of Mixed Discrete and Continuous Systems: An Iron Ore Terminal Example, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013*, Washington, USA, pp. 1166-1178, available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/102.pdf>.

12. Li, X., Lei, Y., Wang, W., Wang, W. and Zhu, Y. (2013), A DSM-based Multi-Paradigm Simulation Modeling Approach for Complex Systems, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013*, Washington, USA, pp. 1179-1190, available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/103.pdf>.

13. Kim, S.H., and Whitt, W. (2013), Using Simulation to Study Statistical Tests for Arrival Process and Service Time Models for Service Systems, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013*, Washington, USA, pp. 1223-1232, available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/107.pdf>.

14. Gore, R. and Diallo, S. (2013), The Need for Usable Formal Methods in Verification and Validation, *Modeling Methodology, Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 8-11 December 2013*, Washington, USA, pp. 1258-1268, available at: <https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/110.pdf>.

15. Botsyura, O.A. and Zakharov, I.P. (2016), "Sravnitel'nyy analiz razlichnykh sposobov vychisleniya koeffitsiyentov okhvata pri realizatsii bayesovskogo podkhoda k otsenivaniyu neopredelennosti izmereniy" [Comparative analysis of various methods for calculating coverage factors in the implementation of the Bayesian approach to estimating measurement uncertainty], *Information Processing Systems*, No. 6(143), pp. 20-24.

16. Zakharov, I.P. and Klimova, Ye.A. (2014), "Primeneniye metoda ekstsessov dlya polucheniya dostovernoy otsenki rasshirennoy neopredelennosti" [Using the method of excesses to obtain a reliable estimate of the expanded uncertainty], *Information Processing Systems*, No. 3(119), pp. 24-28.

17. Zakharov, I.P. (2015), "Neopredelennost' izmereniy dlya chaynikov i nachal'nikov" [Measurement Uncertainty for Dummies and Chiefs], Kharkiv, 52 p.

Надійшла до редколегії 19.10.2018

Схвалена до друку 11.12.2018

Відомості про авторів:

Ружин Павло Олександрович

аспірант
НТУ Дніпровська політехніка,
Дніпро, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2469-8450>

Пацера Сергій Тихонович

кандидат технічних наук
професор
НТУ Дніпровська політехніка,
Дніпро, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9137-3950>

Information about the authors:

Pavel Ruzhin

Doctoral Student of
National Mining University,
Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2469-8450>

Sergey Patsera

Candidate of Technical Sciences
Professor of
National Mining University,
Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9137-3950>

Дербаба Віталій Анатолійович

кандидат технічних наук
доцент
НТУ Дніпровська політехніка,
Дніпро, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3918-2177>

Vitalii Derbaba

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor of
National Mining University,
Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3918-2177>

Корсун Валерій Іванович

доктор технічних наук
завідувач кафедри
НТУ Дніпровська політехніка,
Дніпро, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8102-4335>

Valery Korsun

Doctor of Technical Sciences
Head of Department of
National Mining University,
Dnipro, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8102-4335>

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРОЦЕНТ НЕПРАВИЛЬНО ЗАБРАКОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ДВУХФАКТОРНОМ КОНТРОЛЕ

П.А. Ружин, С.Т. Пацера, В.А. Дербаба, В.И. Корсун

Проблема расчета допустимого уровня неопределенности измерений при допусковом контроле изделий машиностроения остается актуальной. Поставленная задача решается путем применения имитационно-статистического моделирования контрольно-измерительных процедур. Для этой цели разработана алгоритмическая модель. Проведены компьютерные эксперименты и получены зависимости процентов неправильно забракованных и неправильно принятых деталей от уровня неопределенности измерений, оцениваемого составляющими по типу В. Показано, что при двухфакторной контрольно-измерительной процедуре требования к точности средств измерений по сравнению с однофакторным вариантом возрастают на порядок.

Ключевые слова: неопределенность измерения, допусковый контроль, ошибки первого и второго рода, зубчатое колесо, моделирование.

THE EFFECT OF AN UNCERTAINTY OF MEASUREMENTS ON THE INTEREST OF INCORRECTLY REJECTED ARTICLES UNDER TWO-FACTOR CONTROL

P. Ruzhin, S. Patsera, V. Derbaba, V. Korsun

The subject of work is measurement uncertainty, evaluated by type B, as a source of errors of the first and second kind under the tolerance control in mechanical engineering. The theme of work is the assessment of the influence of the measurement uncertainty of the normalized geometric parameters of the involute gears on the proportion of incorrectly rejected and incorrectly accepted parts. The purpose of the work is to determine the dependence of the influence of measurement uncertainty, as measured by type B, on the distortion of the results of the tolerance testing of gear wheels. The methodology of the research includes simulation modeling of the manufacture of a batch of gears with specified accuracy requirements for the geometric parameters of the gear in accordance with international standards. In this case, the method of statistical modeling (Monte Carlo) reproduces an array of deviations from the nominal value of the geometric parameter of the ring gear. The following assumptions are made: - the distribution of deviations of the geometric parameter is uniform, the limits of the dispersion interval from the lower to the upper deviations are selected with an increasing correction factor of 1.0027, which corresponds to the accepted level of accuracy of technology in engineering; - the first array of random deviations of the wheel parameter is modeled under the assumption that there is no measurement error, and then generated with a uniform distribution of measurement errors in the form of an additional array; while the boundaries of the interval $[a^-; a^+]$ are symmetric relative to zero. The developed algorithmic model of numerical computer experiments includes modeling blocks of measurement and control procedures for the radial runout of the ring gear and the length of the common normal. This combination of geometric parameters reflects a set of parameters when monitoring the kinematic accuracy of gear wheels. The control procedures are modeled using logical formulas, while suitable wheels are given a shelf-life score of "1", and defective – "0". The software implementation of the algorithmic model is implemented in Microsoft Excel. The sample size formed 1000 parts, which is enough for the acceptable accuracy of plotting dependencies. As a result of research, the dependences of the fraction of incorrectly rejected and incorrectly accepted gears on the measurement uncertainty in two-factor control were obtained. The analysis of the obtained dependences leads to the following conclusions: 1) Two-factor control in the absence of a correlation of arrays of random deviations of two controlled parameters of gear wheels significantly increases the errors of the first and second kind. 2) In order to reduce significantly the error of two-factor control of gears, the measurement uncertainty estimated by type B should be reduced to a value not exceeding 1.155 microns. This can be achieved by using the coordinate measuring machines that come with the appropriate software. 3) The application scope of research results is the production of gears, which are subject to increased requirements for accuracy (starting with 8 degrees of accuracy).

Keywords: measurement uncertainty, tolerance control, errors of the first and second kind, gear wheel, modeling.