

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

© V. Derbaba

UNCERTAINTY OF MEASUREMENTS WITH CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS OF GEAR WHEELS

Цель. Разработка методики определения влияния расширенной неопределенности измерительного средства на разбраковку зубчатых колес при контроле длины общей нормали.

Методы исследований базировались на теоретической метрологии при моделировании инструментальных погрешностей средства измерения; теоретических основ технологии приборостроения и машиностроения, при моделировании случайных отклонений геометрических параметров от номинального значения в пределах допусков для эвольвентных зубчатых колес; статистического моделирования (метода Монте-Карло) на основе генерирования случайных чисел при программной реализации математических моделей исследуемого процесса.

Результаты исследований. Разработан метод статистического моделирования, который впервые адаптирован для моделирования случайных инструментальных погрешностей в имитационной модели измерения и контроля геометрических параметров эвольвентных зубчатых колес для оценки ошибки I и II рода, рисков изготовителя и потребителя. Ранее такой подход для эвольвентных зубчатых колес не применялся.

Научная новизна. Впервые предложена структура имитационно-статистической модели измерения и контроля эвольвентных зубчатых колес. Определены зависимости для оценки влияния предельной инструментальной погрешности измерительного прибора на ошибки первого и второго рода, риски изготовителя и потребителя при пассивном приемочном контроле геометрических параметров эвольвентных зубчатых колес различной степени точности и вида сопряжения. Зависимости, описывающие уровень ошибок первого и второго рода при контроле длины общей нормали, приведены впервые.

Практическое значение. Программная реализация разработанной имитационно-статистической модели измерения и контроля геометрических параметров эвольвентных зубьев позволяет обоснованно выбирать средства измерения необходимой точности еще на этапе технологической подготовки производства. Использование в учебном процессе имитационно-статистической модели измерения и контроля геометрических параметров эвольвентных зубьев позволяет улучшить знания и умения, повысить уровень компетенций выпускников высших учебных заведений в области технических измерений и контроля деталей.

Ключевые слова: эвольвентное зубчатое колесо, имитационное моделирование, статистическое моделирование, длина общей нормали, неопределенность, погрешность, отклонение, процент неправильно забракованных изделий, приемный контроль.

Введение. В современном машиностроительном производстве проблема эффективности технологических процессов изготовления зубчатых колес поставлена очень остро в связи с рыночными отношениями и возросшей конкуренцией. Остаются актуальными проблемы технологического обеспечения качества выпускаемой продукции в связи с возможным внедрением на промыш-

ленных предприятиях машиностроения международной системы менеджмента качества [1-2].

Состояние вопроса. Анализ последних достижений и публикаций. Если обоснованию выбора точности средств измерения и контроля гладких сопряжений посвящено достаточное количество работ, например [3-4], то подобным обоснованиям для зубчатых колес уделяется недостаточно внимания. Тем более что стандартами предусматривается весьма обширный перечень контролируемых параметров зубчатых колес. В работах [5-6] предложена методика статистического моделирования, которая предусматривает моделирование с помощью электронных таблиц процесса изготовления, контроля и разбраковки изделий с гладкими поверхностями или резьбой. Проанализированы работы [7-8], где исследование посвящено оценке адекватности метода имитационного статистического моделирования процессов разбраковки деталей при измерении толщины эвольвентного зуба. Работы [9-11] подробно описывают процесс компьютерного имитационного моделирования измерений сложнопрофильных деталей, которые моделируются в САМ-системах и изготавливаются на современных станках с числовым программным управлением.

Цели и задачи проведения исследований. В настоящей статье исследовано влияние расширенной неопределенности измерительных средств на показатели дефектности зубчатых колес, когда критерием качества выбрано отклонение длины общей нормали. Поставленная цель достигается применением имитационного моделирования и компьютерного генерирования случайных погрешностей (фрагмент показан в табл.1). В качестве контролируемого размера выбрана длина общей нормали W , которая является показателем, определяющим гарантируемый боковой зазор, который, в свою очередь, определяет вид сопряжения. Общая нормаль W – расстояние между двумя разноименными боковыми поверхностями зубьев (рис.1).

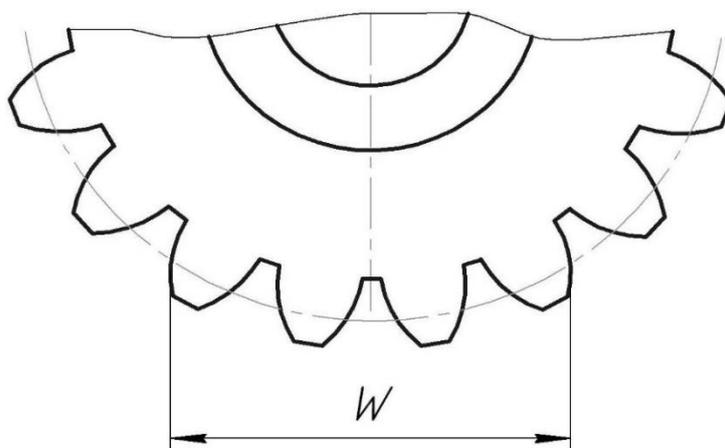


Рис.1. Схема измерения длины общей нормали

Изложение основного материала. Ниже рассмотрена последовательность моделирования на примере конкретного цилиндрического прямоугольного колеса. Колесо имеет следующие конструктивные параметры и допуски:

- модуль $m=3$ мм;
- делительный диаметр $d=150$ мм;
- число зубьев $z=50$;
- число охватываемых зубьев при измерении длины общей нормали $z_n=6$;
- номинальное значение длины общей нормали $W_n=50,892$ мм;
- допуск на длину общей нормали 50 мкм, наименьшее отклонение длины общей нормали - 41 мкм.

Имитационная электронная таблица включает в себя строки (в каждой из них записаны номера зубьев, для которых определяется отклонение общей нормали, результаты их изготовления, измерений и разбраковки) и столбцы, в которые заносятся результаты статистического моделирования.

В первом столбце моделируются порядковые номера зубьев, для которых определяется общая нормаль.

Во втором столбце моделируется истинное отклонение длины общей нормали $E_{W_{и}}$, полученное при принятых параметрах точности технологии.

Компьютерное моделирование позволяет моделировать истинное значение, что в незначительно отклоняется от показателей в работе [12]. Для моделирования истинного отклонения длины общей нормали использован пакет анализа, входящий состав Microsoft Excel, предназначенный для решения сложных статистических и инженерных задач.

В диалоговом окне из пакета «Анализ данных» – «Генерация случайных чисел» заполняем соответствующие поля:

- число переменных –1 (истинное отклонение от номинального значения);
- число случайных чисел –50 (соответствует количеству сочетаний зубьев при измерениях);
- распределение – нормальное (предполагаем, что нет доминирующих факторов, влияющих на отклонение от среднего значения);
- параметры распределения: среднее значение и стандартное отклонение.

Среднее значение отклонения длины общей нормали принято равным координате середины поля допуска:

$$E_{W_{и\text{ ср}}} = -41 + \frac{-41 + (-91)}{2} = -66 \text{ мкм}$$

- параметры распределения: среднее значение и стандартное отклонение.

Среднее значение отклонения длины общей нормали принято равным координате середины поля допуска:

$$E_{W_{и\text{ ср}}} = -41 + \frac{-41 + (-91)}{2} = -66 \text{ мкм}$$

Этим самым предполагается высокий уровень настроенности технологического процесса изготовления (может также моделироваться низкий уровень настроенности).

Стандартное отклонение может быть смоделировано для технологических процессов, отличающихся по уровню точности:

- пониженной точности, при которой отношение величины поля допуска к стандартному отклонению менее 6;
- нормальной точности, при которой отношение величины поля допуска к стандартному отклонению равно 6;
- повышенной точности, при которой отношение величины поля допуска к стандартному отклонению более 6.

В примере, приведенном в табл.1, принят пониженный уровень точности технологии, при котором указанное отношение равно 4 (в учебных целях).

Тогда стандартное отклонение

$$\sigma = \frac{T_W}{4} = \frac{50}{4} = 12,5 \text{ мкм}$$

Таблица

Электронная таблица имитационного статистического моделирования процесса изготовления, контроля и разбраковки зубчатого колеса со следующими параметрами: степень точности 7; вид сопряжения E

(для сокращения объема таблицы показаны не все строки)

Номера охватываемых зубьев при измерении	Истинное отклонение длины общей нормали E_{Wn} , мкм	Балл годности β_n	Погрешность измерения длины общей нормали, мкм	Действительное отклонение длины обшей нормали E_{Wn} , мкм	Балл годности после измерений $\beta_{ид}$	Разбраковка длин общей нормали на			
						правильно принятые	неправильно принятые	правильно забракованные	неправильно забракованные
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-6	-35	0	-24	-59	1	0	1	0	0
2-7	-65	1	12	-53	1	1	0	0	0
3-8	-77	1	32	-45	1	1	0	0	0
6-11	-65	1	-36	-101	0	0	0	0	1
7-12	-63	1	43	-20	0	0	0	0	1
14-19	-38	0	31	-7	0	0	0	1	0
45-100	-67	1	-23	-90	1	1	0	0	0
46-1	-67	1	31	-36	0	0	0	0	1
48-3	-58	1	-8	-66	1	1	0	0	0
49-4	-44	1	21	-23	0	0	0	0	1
50-5	-61	1	-50	-111	0	0	0	0	1
Итого		48			31	30	1	1	18

Выводным интервалом является столбец 2.

В столбце 3 проводится оценка годности длины общей нормали по двухбалльной шкале: годным присваивается балл $\beta_{и}=\langle 1 \rangle$, а бракованным соответственно балл $\beta_{и}=\langle 0 \rangle$. Годными считаем длины общей нормали, у которых истинное значение отклонения от номинального значения $E_{Wи}$ лежит в поле допуска. Тогда для компьютерного

заполнения столбца 3 используется формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(E_{Wи} \geq E_{W\text{min}}; E_{Wи} \leq E_{W\text{s}}); 1; 0), \quad (1)$$

где $E_{Wи}$ – истинное отклонение длины общей нормали, $E_{W\text{min}}$, $E_{W\text{s}}$ – предельные значения отклонений, заданные в стандарте на зубчатые колеса.

Сумма баллов в столбце 3 (48) отображает долю годных комплектов зубьев при выбранной для моделирования точности технологии.

В столбце 4 имитируется (моделируется) действительная погрешность измерения длины общей нормали. Для моделирования используется, как и выше, инструмент анализа EXCEL – «Генерация случайных чисел» в меню «Сервис».

При заполнении соответствующего диалогового окна принимаем:

- число переменных 1;
- число случайных чисел 50;
- распределение равномерное, называемое также прямоугольным (можно также имитировать и другие распределения).

Для осуществления компьютерного моделирования необходимо заполнить поля диалогового окна: «от» и «до». То есть здесь следует ввести значение расширенной неопределенности U типа В [13], как интервальную меру неопределенности, взятую из паспорта измерительного средства. Для получения искомым зависимостей U моделировалась в широком диапазоне: от ± 50 до ± 5 мкм (в табл. 1 показаны результаты только для $U=\pm 50$ мкм).

В столбце 5 отображается суммарный результат изготовления и измерения, т.е. действительное значение длины общей нормали $E_{Wд}$. Для этого проводим построчное суммирование соответствующих ячеек таблицы.

В столбце 6 проводится оценка годности сочетания зубьев после измерения по двухбалльной шкале: годным сочетаниям присваивается балл $\beta_{ид}=\langle 1 \rangle$, а бракованным соответственно балл $\beta_{ид}=\langle 0 \rangle$. Годными являются сочетания зубьев, у которых действительное значение $E_{Wд}$ лежит в поле допуска, балл определяется так же, как и выше по формуле

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(E_{Wд} \geq E_{W\text{min}}; E_{Wд} \leq E_{W\text{s}}); 1; 0) \quad (2)$$

где $E_{Wд}$ – действительное значение длины общей нормали.

Сумма баллов (31) в столбце 6 отображает долю годных сочетаний зубьев при данной точности технологии с учетом влияния расширенной неопределенности измерения. Сопоставление суммы баллов в столбцах 3 и 6 наглядно демонстрирует, что погрешность измерения существенно снизила процент годных сочетаний зубьев (в нашем примере на 34%!).

Далее проводится выявление процента неправильно забракованных или процента неправильно принятых сочетаний зубьев.

Правильно забракованные сочетания должны иметь бал «0» как в столбце 3, так и в столбце 6. Для моделирования применена формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 0; \beta_{\text{ид}} = 0); 1; 0). \quad (3)$$

Неправильно забракованные должны иметь бал «1» в столбце 3, и бал «0» в столбце 6. В этом случае применена формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 1; \beta_{\text{ид}} = 0); 1; 0) \quad (4)$$

Правильно принятые детали должны иметь бал «1» как в столбце 3, так и в столбце 6. Применяется формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 1; \beta_{\text{ид}} = 1); 1; 0). \quad (5)$$

Неправильно принятые детали должны иметь бал «0» в столбце 3, и «1» бал в столбце 6. Для моделирования применена формула

$$\text{ЕСЛИ}(\text{И}(\beta_{\text{и}} = 0; \beta_{\text{ид}} = 1); 1; 0). \quad (6)$$

Сумма баллов (30, 1, 1, 18) в столбцах 7÷10 отображает соответственно долю правильно принятых, неправильно принятых, правильно забракованных, неправильно забракованных сочетаний зубьев.

Графически, полученные результаты будут иметь следующий вид:

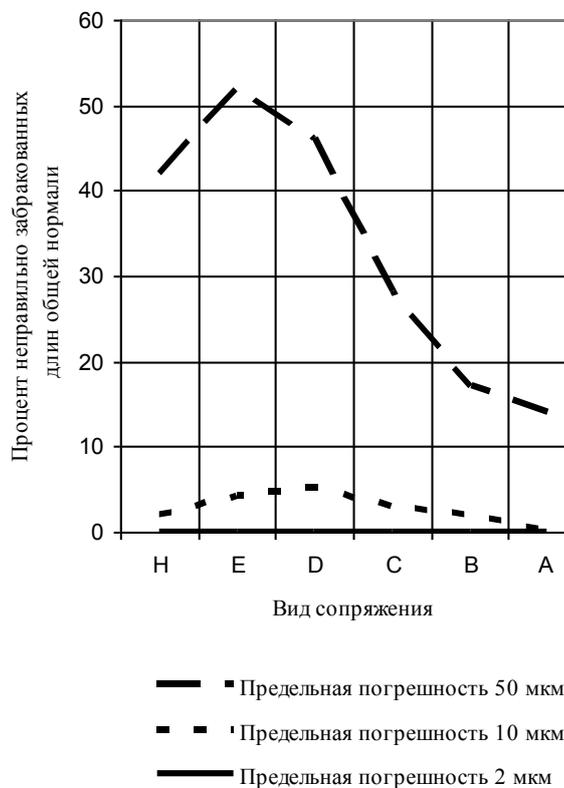


Рис.2. Зависимость процента неправильно забракованных длин общей нормалей от величины расширенной неопределенности для 7 степени точности при различных видах сопряжений

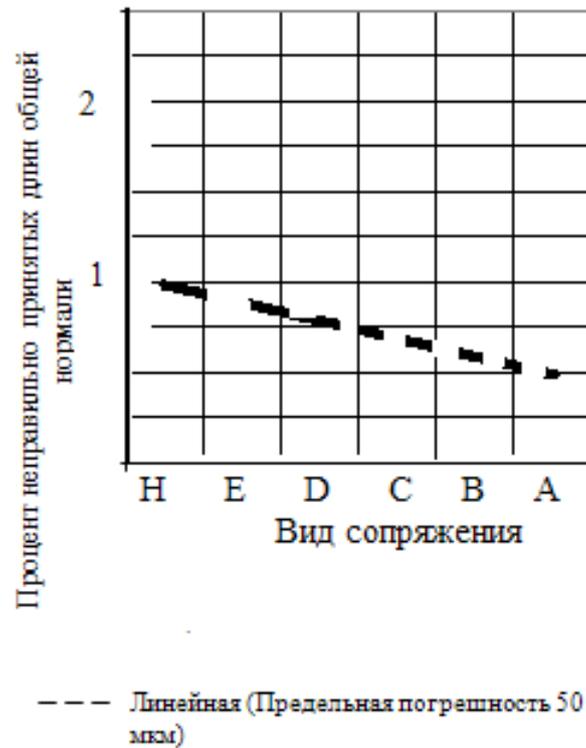


Рис.3. Зависимость процента неправильно принятых длин общей нормали для 7 степени точности при различных видах сопряжений

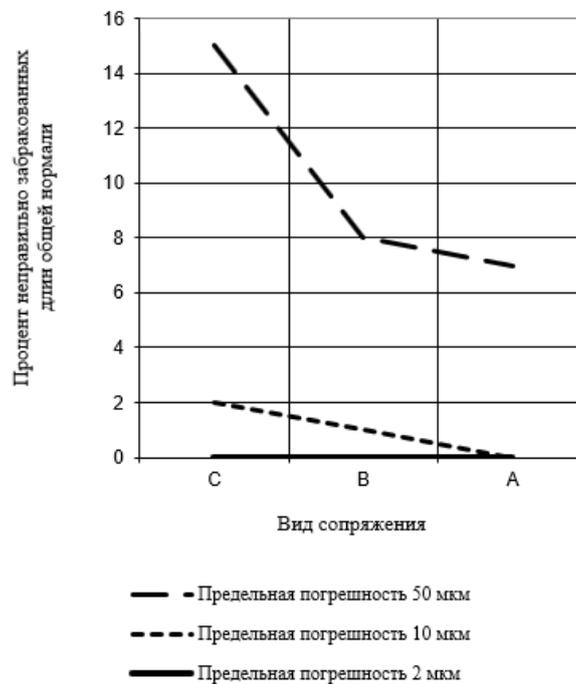


Рис.4. Зависимость процента неправильно забракованных длин общей нормали от величины расширенной неопределенности для 9 степени точности при различных видах сопряжений

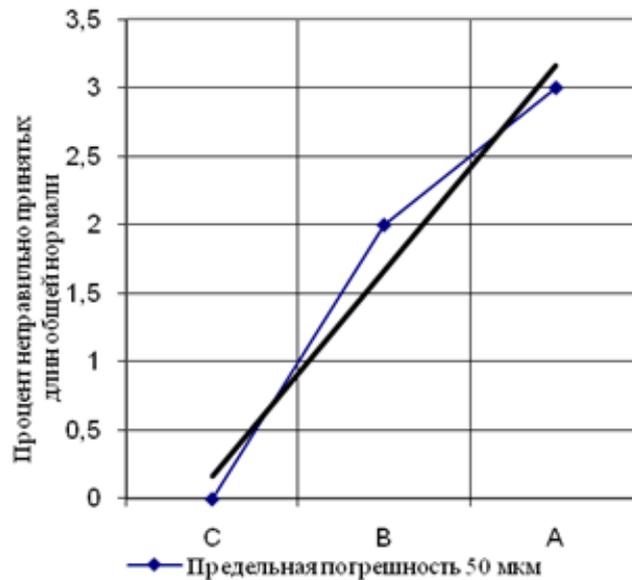


Рис.5. Зависимость процента неправильно принятых длин общей нормали для 9 степени точности при различных видах сопряжений

На рис. 2-5 показаны полученные зависимости влияния расширенной неопределенности на процент неправильно забракованных или неправильно принятых длин общей нормали при использовании соответственно штангенинструментов, микрометрических и индикаторных нормалемеров.

На основе полученных зависимостей предложены практические рекомендации по выбору допускового уровня инструментальных погрешностей при измерении длины общей нормали зубчатых колес и разработана методика [14] имитационного моделирования влияния случайных погрешностей при измерении длины общей нормали зубчатых колес с эвольвентным профилем [15] на количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей колес.

Выводы. Показано, что при заданных начальных условиях для контроля длины общей нормали зубчатого колеса можно рекомендовать измерительные средства, имеющие расширенную неопределенность порядка $U=\pm 2$ мкм.

Метод имитационно-статистического моделирования является эффективным при исследовании влияния погрешностей измерения на ошибки пассивного контроля длины общей нормали зубчатых колес.

Указанные закономерности могут быть использованы в научных исследованиях соответствующих институтов машиностроения, а также в период подготовки производства на предприятиях, при выборе типоразмеров измерительных приборов с приемлемой ценой и необходимым уровнем точности измерений.

Перечень ссылок

1. Кравченко, Ю.Г., Дербаба, В.А., Крюкова, Н.В. (2015). К вопросу эмпирического определения напряжений и коэффициентов трения при стружкообразовании. *Международный научно-технический сборник НТУ «ХПИ»*, (85), 137-148.

2. Дербаба, В.А. (2010). CAD/CAM в аэрокосмическую технологию. *Вестник Днепропетровского университета им. О. Гончара*, (14), 46-54.
3. Дербаба, В.А., Корсун, В.И., Пацера, С.Т. (2011). Влияние расширенной неопределенности на риски изготовителя и заказчика при измерении толщины зуба. *Системы обработки информации*, 1(91), 57-61.
4. Пацера, С.Т., Корсун, В.И., Курдюков, С.С. (2006). Изучение влияния расширенной неопределенности второго рода на риски изготовителя и заказчика методом статистического моделирования. *Системы обработки информации*, 7(56), 62-65.
5. Дербаба, В.А., Корсун, В.И., Пацера, С.Т. (2012). Статистическое моделирование точности зубообработки и измерений толщины зуба с учетом интервальной меры неопределенности измерительного средства. *Системы обработки информации*, 1(99), 65-69.
6. Азаров, А.В., Войчишен, А.Л., Корсун, В.И., Пацера, С.Т. (2009). Метод статистического моделирования при изучении влияния расширенной неопределенности на риски заказчика и изготовителя метрической резьбы. *Системы обработки информации*, 5(79), 78-81.
7. Derbaba, V.A., Zil, V.V., 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*, (5), 45-50.
8. Дербаба, В.А., Корсун, В.И., Пацера, С.Т. (2013). Статистическое моделирование погрешностей измерения толщины эвольвентного зуба и влияния их на показатели дефектности производства. *Научно-виробничий журнал «Метрологія та прилади»*, 2/П/(40), 90-97.
9. Дербаба, В.А. (2013). Моделирование влияния погрешностей измерения общих нормалей зубьев на показатели разбраковки. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 6/4(66), 48-52.
10. Sivun S.O., Zil, V.V., Patsera, S.T. (2014). The CAM-system technological capabilities of the cylindrical worm lathe processing in the CNC lathes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 87-91.
11. Войчишен, А.Л., Дербаба, В.А., Пацера, С.Т. (2014). Возможности имитационного моделирования измерений геометрических параметров фасетных тел в современных САМ-системах. *Научно-виробничий журнал «Метрологія та прилади»*, 1 П (45), 46–48.
12. Дербаба, В.А., Войчишен, А.Л., Корсун, В.И., Пацера, С.Т. (2014). Элементы неопределенности измерений в имитационно-статистической модели измерительно-контрольной системы эвольвентных зубчатых колес. *Системы обработки информации*, 3(119), 134–137.
13. Войчишен, О.Л., Дербаба, В.А., Корсун, В.И., Пацера, С.Т. (2015). Імітаційно-статистична модель інструментальних похибок вимірювання радіального биття зубчастих коліс. *Системи обробки інформації*, 6(131). 29-31.
14. Пацера, С.Т., Ружин, П.О., Дербаба, В.А., Корсун, В.И. (2016). Алгоритм імітаційно-статистичного дослідження контрольно-вимірювальної системи та його програмна реалізація у Ni LabVIEW. *Системи обробки інформації*, 6(143), 116-119.
15. Дербаба, В.А. (2017). Алгоритм імітаційно-статистичного моделювання вимірювально-контрольної системи геометричних параметрів зубчастих коліс. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (50), 179-185.

АНОТОЦІЯ

Мета. Розробка методики визначення впливу розширеної невизначеності вимірювального засобу на розбракування зубчастих коліс при контролі довжини загальної нормалі.

Методи досліджень базувалися на теоретичній метрології при моделюванні інструментальних похибок засобу вимірювання; теоретичних основ технології приладобудування і машинобудування, при моделюванні випадкових відхилень геометричних параметрів від номінального значення в межах допусків для евольвентних зубчастих коліс; статистичного моде-

лювання (методу Монте-Карло) на основі генерування випадкових чисел при програмній реалізації математичних моделей дослідного процесу.

Результати досліджень. Розроблено метод статистичного моделювання, який вперше адаптований для моделювання випадкових інструментальних похибок в імітаційній моделі вимірювання та контролю геометричних параметрів евольвентних зубчастих коліс для оцінки помилки I і II роду, ризиків виробника і споживача. Раніше такий підхід для евольвентних зубчастих коліс не застосовувався.

Наукова новизна. Вперше запропоновано структуру імітаційно-статистичної моделі вимірювання та контролю евольвентних зубчастих коліс. Визначено залежності для оцінки впливу граничної інструментальної похибки вимірювального приладу на похибки першого і другого роду, ризики виробника і споживача при пасивному приймальному контролі геометричних параметрів евольвентних зубчастих коліс різного ступеня точності і виду спряження. Залежності, що описують рівень помилок першого і другого роду при контролі довжини загальної нормалі, наведені вперше.

Практичне значення. Програмна реалізація розробленої імітаційно-статистичної моделі вимірювання та контролю геометричних параметрів евольвентних зубів дозволяє обґрунтовано вибрати засоби вимірювання необхідної точності ще на етапі технологічної підготовки виробництва. Використання в навчальному процесі імітаційно-статистичної моделі вимірювання та контролю геометричних параметрів евольвентних зубів дозволяє поліпшити знання та вміння, підвищити рівень компетенцій випускників вищих навчальних закладів в галузі технічних вимірювань і контролю деталей.

Ключові слова: *Евольвентне зубчасте колесо, імітаційне моделювання, статистичне моделювання, довжина загальної нормалі, невизначеність, похибка, відхилення, відсоток неправильно забракованих виробів, приймальний контроль.*

ABSTRACT

Purpose. Methodology development of determination of impact of the extended uncertainty of the measuring device on the sorting out of the gears with control the length of the total normal.

Methods of the research was based on a theoretical metrology in the modeling of instrumental errors in the measuring instrument; theoretical basis of technology of instrumentation and machinery, in the modeling of a random deviations of geometric parameters from the nominal value within the tolerances for involute gear wheels; statistical modeling (Monte Carlo method) on the basis of generating random numbers in software implementation of mathematical models of the process under study.

Research results. The method of statistical modeling, which was developed, was first adapted to modeling random instrumental errors in the simulation model of measurement and controlling the geometric parameters of the involute gear wheels for estimating the errors of I and II kind, the manufacturer's and consumer's risks. Earlier such an approach for involute gear wheels was not used.

The originality. The structure of the simulation-statistical model of measuring and controlling involute gear wheels was proposed for the first time. Dependencies are determined for estimating the impact of the marginal instrumental error of the measuring device on errors of I and II kind, the manufacturer's and consumer's risks with passive acceptance control of the geometric parameters of the involute gear wheels of various degrees of accuracy and the type of coupling. Dependences de-

scribing the level of errors of I and II kind with controlling the length of the total normal are given for the first time.

Practical significance. The software implementation of the developed simulation-statistical model of measurement and controlling the geometric parameters of the involute teeth makes it possible to reasonably select the measuring devices of the required accuracy at the stage of technological preparation of production. Usage in the educational process simulation-statistical model of measurement and controlling the geometric parameters of the involute teeth makes it possible to improve knowledge and skills, to increase the level of competence of graduates of higher educational institutions in the field of technical measurements and parts control.

Keywords: *involute gear wheel, simulation modeling, statistical modeling, length of the total normal, uncertainty, measurement error, percentage of incorrectly rejected articles, acceptance control.*

УДК 622.831.2:539.422.3

Л.М. Захарова, І.В. Назимко

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПЕРЕХОДУ МАЛОАМПЛІТУДНОГО ПОРУШЕННЯ

L. Zakharova, V. Nazimko

COMPLEX OF APPROACHES PROVIDING TRANSITION OF MICRO-FAULT

Мета. Мета даної статті полягала в розвитку комплексного підходу до вирішення проблеми переходу малоамплітудного порушення вугільного пласта довгим очисним вибієм.

Методологія. Для обґрунтування оптимального рішення проблеми переходу малоамплітудного порушення застосовано методи проектно-орієнтованого управління процесом переходу.

Результати. Не існує надійної окремої технології, яку б можна було застосувати для переходу малоамплітудного порушення вугільного пласта довгим очисним вибієм. Так геофізичні методи розвідки вугленосної товщі не забезпечують гарантії для успішного переходу пошкодженої товщі навколо малоамплітудного порушення. Ми запропонували розглядати процес переходу малоамплітудного порушення як проект і управляти ризиками переходу за допомогою певного набору технологій, які доповнюють одна одну. Найбільш критичними компонентами для рішення проблеми переходу є моніторинг дисипативних структур, оптимальне комбінування технологій дегазації вугільного пласта й оточуючих його пісковиків, а також спеціальний метод контролю швидкості газовиділення зі шпуру для визначення викидонебезпечності вугільного пласта, що відпрацьовується. Перша технологія забезпечує управління моніторингом дисипативних структур, що дозволяє ефективно керувати вказаними дисипативними структурами й запобігти обваленню покрівлі пласта під час переходу порушення. Решта технологій допомагає підтримувати високі темпи посування очисного вибію, що підключає й стимулює довговічність тріщинуватого масиву для підвищення стійкості покрівлі пласта.