УДК 621.83

В.А. Дербаба, В.И. Корсун, д.т.н., С.Т. Пацера, к.т.н.

ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ.

АЛГОРИТМ ІМІТАЦІЙНОГО СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ТОВЩИНИ ЕВОЛЬВЕНТНОГО ЗУБЦЯ ТА ПОХИБКИ ЇЇ ВИМІРЮВАННЯ

Розроблено алгоритм імітаційного стохастичного моделювання технологічної послідовності формоутворення евольвентних зубців. Послідовно виконується імітація: стохастичного процесу формоутворення зубців по товщині і по діаметру вершин зубців, стохастичний процес похибок вимірювання висоти зубця зубоміром. В результаті моделювання визначаються показники дефектності виробництва: відсотки неправильно забракованих та неправильно прийнятих деталей.

Ключові слова: моделювання, вимірювання, зубчасте колесо, похибка, відхилення, дефектність.

В.А. Дербаба, В.И. Корсун, д.т.н., С.Т. Пацера, к.т.н.

АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ТОЛЩИНЫ ЭВОЛЬВЕНТНОГО ЗУБА И ПОГРЕШНОСТИ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Разработан алгоритм по имитационному стохастическому моделированию технологической последовательности формообразования эвольвентных зубьев. Последовательно имитируются: стохастический процесс формообразования зубьев по толщине и по диаметру вершин зубьев, стохастический процесс погрешности измерения высоты зуба зубомером. Как результат моделирования определяются показатели дефектности производства: проценты неправильно забракованных и неправильно принятых деталей.

Ключевые слова: моделирование, измерение, зубчатое колесо, погрешность, отклонение, дефектность.

V. Derbaba, V. Korsun, ScD, S. Patsera PhD

ALGORITHM OF IMITATION STOCHASTIC DESIGN OF EXACTNESS OF THICKNESS OF EVOLVENT TOOTH AND ERROR OF ITS MEASURING

Algorithm of imitation stochastic design of technological sequence of evolvent teeth formation is worked out. The following processes are imitated in consecutive order: stochastic process of teeth formation according to the thickness and the tooth top diameter, stochastic process of error in measuring of the tooth height with the help of a tooth measuring instrument. As a result of design the indexes of imperfectness of production are determined: percentage of erroneously defective and erroneously accepted details.

Keywords: modeling, measurement, gear wheel, deviation, variance, the defective.

Постановка проблеми

Толщина зуба является одним из нормируемых геометрических параметров эвольвентных зубчатых колес [1]. Требования к точности толщины зуба определяются по ГОСТ 1643-81 в зависимости от вида сопряжения, степени точности по нормам плавности, величины делительного диаметра и допуска на радиальное биение [2].

Схема измерения действительной толщины зуба для случая, когда измерительной базой является наружный цилиндр, показана на рис. 1. Из рис. 1 видно, что измерительной базой для определения высоты зуба h_c является номинальный диаметр окружности выступов и,

если диаметр окружности выступов будет отличаться от номинального значения, высота зуба будет определена с погрешностью Δh_c . Это приводит к погрешности измерения толщины зуба ΔS_c .

Технология изготовления эвольвентных зубчатых колес (ЭЗК) характеризуется сложностью технологических методов формообразования боковых поверхностей зубьев, геометрической сложностью режущего инструмента.

Для зубчатых колес характерна взаимозависимость нормируемых показателей точности [3].

Рисунок 1 – Схема измерения толщины зуба:

S_c – толщина зуба, ΔS_c – погрешность толщины зуба,
 h_c – высота зуба, Δh_c – погрешность высоты зуба,
 d – делительный диаметр, d_a – диаметр окружности выступов

По этим причинам разработчики технологических процессов изготовления зубчатых колес испытывают определенные трудности при расчетном (проектном) определении показателей дефектности производства ЭЗК [4].

Анализ последних достижений и публикаций

В работах [5 и 6] для количественной оценки влияния технологических и метрологических факторов на дефектность изделий применен метод имитационного статистического моделирования процессов изготовления и измерения. В этих работах изложены конкретные примеры статистического моделирования, которые основаны на моделировании с помощью электронных таблиц. Однако в указанных работах не формализован алгоритм моделирования.

Формулирование цели

Задача рассмотренного ниже исследования ставится как разработка алгоритма имитационного статистического моделирования для класса задач по определению зависимости уровня дефектности производства от погрешностей применяемых измерительных средств и параметров точности технологии изготовления ЭЗК.

Изложение основного материала

Для решения поставленной задачи применим алгоритмическую имитационную

стохастическую модель технологической системы по изготовлению зубчатых колес, включающей в себя технологические и метрологические элементы. Известно [7 и 8], что имитационные модели воспроизводят поведение изучаемой системы на основе анализа наиболее существенных взаимосвязей входящих в нее параметров.

Прежде всего, при моделировании будем выделять блоки, отражающие отдельно формообразующие процессы (технологические блоки) и блоки измерительные (метрологические). Тогда структуру рассматриваемой технологической системы можно представить, как состоящую из последовательных блоков «черных ящиков».

Рисунок 2 – Структура модели технологической системы с выделением технологических и метрологических элементов. Пунктирными линиями выделены составляющие параметры, исследованные ниже

В соответствии со структурой на рис. 2 технологическая система состоит из технологического T_i и метрологического M_i блоков. Технологический блок отражает в модели технологические составляющие: станок, приспособление, режущий инструмент, заготовку детали. В свою очередь, метрологический блок в модели соответствует измерительному инструменту и методике измерения параметров. Для технологического блока показаны входные параметры, обозначенные X_{ni} , X_{mi} , где индекс n соответствует параметру, влияющему на настроенность технологической системы, а индекс m соответствует параметру, влияющему на точность технологической системы. Выходные параметры технологического блока обозначены как S_{ni} , S_{mi} , индексы которых n и m делят эти параметры на две группы: параметры настроенности и точности технологического блока. Параметры S_{ni} , S_{mi} являются входными параметрами в метрологический блок и отражают свойства изделия. Входными параметрами для метрологического блока

являются также параметры U_{ni} , U_{mi} , индексы которых n и m также делят эти параметры на две группы: параметры метрологической настроенности (соответствует уровню систематической погрешности измерения), и метрологической точности (соответствует уровню случайных погрешностей измерения).

Выходными факторами в предложенной модели технологической системы приняты показатели дефектности – процент деталей [2]:

- Z_{III} – правильно принятых;
- Z_{HII} – неправильно принятых;
- Z_{IIZ} – правильно забракованных;
- Z_{HIZ} – неправильно забракованных.

На рис. 3 показан разработанный алгоритм имитационного стохастического моделирования точности толщины эвольвентного зуба и погрешности ее измерения. Принятые обозначения расшифрованы непосредственно в блоках алгоритма.

Для моделирования использован пакет анализа, входящий состав программы Microsoft Excel, предназначенный для решения сложных статистических и инженерных задач.

Реализация алгоритма выполнена применительно к цилиндрическому прямозубому колесу, которое имеет следующие конструктивные параметры и допуски [1]:

- модуль $m = 3$ мм;
- делительный диаметр $d = 150$ мм;
- число зубьев $z = 50$;
- номинальное значение постоянной хорды $S_c = 4,161$ мм;
- номинальное значение высоты до постоянной хорды $h_c = 2,243$ мм;
- наименьшее отклонение толщины зуба $E_{cs} = 12$ мкм [1];
- допуск на толщину зуба $T_c = 45$ мкм.

В качестве контролируемого параметра S_i выбрано отклонение толщины зуба, наименьшее значение которого – E_{cs} , является показателем, определяющим гарантируемый боковой зазор, который, в свою очередь, определяет вид сопряжения [2]. Наименьшее отклонение толщины зуба E_{cs} является наименьшим предписанным уменьшением постоянной хорды S_c .

В табл. 1 приведен фрагмент имитационной электронной таблицы. Строки таблицы привязаны к номерам зубьев колеса, а столбцы отражают этапы алгоритма моделирования. В примере, приведенном в табл. 1 (столбец 2), принят нормальный уровень точности

технологии, при котором $K = 6$ (отношение величины поля допуска к стандартному отклонению). В столбце 3 проводится оценка годности зубьев по двухбалльной шкале: годным присваивается балл $\beta_i = \langle 1 \rangle$, а бракованным соответственно балл $\beta_i = \langle 0 \rangle$. Годными считаем зубья, у которых истинное значение отклонения толщины зуба находится в поле допуска. Сумма баллов в столбце 3 (50 из 50 зубьев) отображает долю годных зубьев при выбранной для моделирования точности технологии, т.е. 100%. В отличие от работы [6], вслед за статистическим моделированием толщины зуба в столбце 4 выполняется моделирование случайных отклонений диаметра вершин зубьев. При этом возможны различные варианты назначения качества точности. В столбце 5 отображаются результаты моделирования погрешности измерения высоты зуба (влияния интервальной меры неопределенности зубомера). В случае варианта с нулевой предельной погрешностью измерительного прибора оцениваются показатели дефектности зубьев только от величины качества точности окружности выступов.

В столбце 6 оценивается суммарное смещение измерительной базы высоты зуба от отклонения диаметра вершин зубьев и от погрешности прибора.

В столбце 7 вычисляется отклонение толщины зуба от номинального значения, обусловленное суммарным смещением измерительной базы с учетом эвольвентного профиля боковой поверхности зуба. Для этой цели графоаналитическим методом построен профиль боковой поверхности зуба и аппроксимирована величина ΔS отклонения измеренной толщины зуба от номинала ΔS в зависимости от смещения Δh измерительной базы высоты зуба. Для рассматриваемого примера эта зависимость описывается формулой

$$\Delta S_c = 0,7284 \Delta h. \quad (1)$$

В столбце 8 показаны результаты моделирования погрешности измерения толщины зуба (влияния интервальной меры неопределенности зубомера).

Действительное отклонение толщины зуба (столбец 9) определяется суммированием трех составляющих (столбцов 2, 7, 8):

В последней строчке табл. 1 в столбцах 11÷14 отображаются соответствующие показатели дефектности.

Рисунок 3 – Блок схема алгоритма (начало)

Рисунок 3 – Блок схема алгоритма (окончание)

Таблица 1 – Фрагмент электронной таблицы имитационного статистического моделирования процесса изготовления, измерения и разбраковки зубчатого колеса со следующими параметрами: степень точности 6; вид сопряжения H , интервальная мера неопределенности измерительного прибора 50 мкм, коэффициент точности технологии $K = 6$, квалитет диаметра выступов зубьев 6

Номер зуба	Истинное отклонение толщины зуба, обусловленное точностью оборудования и режущего инструмента	Оценка годности зуба по критерию толщины	Отклонение диаметра вершин зубьев от номинального размера, мкм	Погрешность измерения высоты зуба (влияние интервальной меры неопределенности зубомера), мкм	Сумма значения в столбце 5 и половины значения в столбце 4 (т.е. в радиусном выражении)	Отклонение измеряемой толщины зуба от номинала ΔS_c (вызванное эвольвентным профилем зуба), мкм	Погрешность измерения толщины зуба (влияние интервальной меры неопределенности зубомера), мкм	Действительное отклонение толщины зуба (сумма столбцов 2, 7, 8), мкм	Оценка годности зуба по критерию толщины (с учетом влияния изучаемых факторов)	Правильно забракованные зубья	Неправильно забракованные зубья	Правильно принятые зубья	Неправильно принятые зубья
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№3	-43	1	-10	-46	-51	-38	49	-32	1	0	0	1	0
№12	-64	0	-13	40	34	24	-25	-65	0	1	0	0	0
№16	-36	1	-11	-12	-17	-13	-44	-93	0	0	1	0	0
№47	-30	1	-12	-41	-47	-34	25	-40	1	0	0	1	0
Всего, %	100								50	10	40	50	0

Рисунок 4 – Зависимость процента неправильно забракованных деталей от величины предельной погрешности зубомера для степени точности зубьев 6H: 1 – при шестом квалитете диаметра вершин зубьев; 2 – при седьмом квалитете диаметра вершин зубьев

Рисунок 5 – Зависимость процента правильно принятых деталей от величины предельной погрешности зубомера для степени точности зубьев 6H: 1 – при шестом квалитете диаметра вершин зубьев; 2 – при седьмом квалитете диаметра вершин зубьев

Выводы

1. Разработанная имитационная стохастическая модель обеспечивает выполнение проектного анализа влияния точности применяемых средств измерения и случайных отклонений геометрических параметров эвольвентного зуба на показатели разбраковки продукции на следующие группы: правильно принятую, неправильно принятую, правильно забракованную и неправильно забракованную. Тем самым обеспечивается возможность управления структурой проектируемой производственной системы в плане выбора технологических и метрологических элементов и вариантов их сочетания.

2. Практическое опробование предложенной модели позволило сделать вывод, что имеющиеся в технической литературе рекомендации по назначению качества точности диаметра вершин зубьев для случая его использования в качестве метрологической базы нуждаются в коррекции. Так для зубчатых колес 6 и 7 степеней точности можно рекомендовать качества диаметра вершин зубьев соответственно 6 и 7, а не 8, как это указано в технической литературе [1].

3. Проведенные исследования позволили показать, что предельная погрешность зубоизмерительного прибора оказывает на дефектность производства более сильное влияние, чем точность диаметра вершин зубьев, принятого в качестве измерительной базы. Одновременно конкретизированы требования к точности зубоизмерительных приборов при 6, 7 и 8 степенях точности зубчатых колес эвольвентного зацепления. В этом случае можно рекомендовать для контроля толщины зуба зубчатого колеса приборы, имеющие интервальную меру неопределенности не более $U = \pm 2$ мкм.

Список использованных источников

1. Допуски и посадки. Справочник. В 2-х ч. В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. Ч. 2.
2. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. Балакшин Б.С. и др. М., «Машиностроение», – 1972. – 615 с.
3. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. М., «Машиностроение», – 1972 г., – с.368.
4. Балушок К.Б. Обеспечение точности и ускоренной технологической подготовки производства деталей ГТД с зубчатыми венцами на основе компьютерного моделирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Открытое акционерное общество «Мотор Сич», – Запорожье, – 2003
5. Дербаба В.А. Влияние расширенной неопределенности на риски изготовителя и заказчика при измерении длины общей нормали зубчатого колеса / В.А. Дербаба, В.И. Корсун, С.Т. Пацера // – Системи обробки інформації. – Харків. – 2010. – Вип. 4 (85).
6. Дербаба В.А. Влияние расширенной неопределенности на риски изготовителя и заказчика при измерении толщины зуба / В.А. Дербаба, В.И. Корсун, С.Т. Пацера // Системи обробки інформації. – Харків. – 2011. – Вип.1 (91).
7. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. – 1981. – 487 с.
8. Леонов С.Л. Обеспечение геометрических параметров качества деталей на основе прогнозирования законов распределения методами имитационного стохастического моделирования. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. Алтайский ГТУ имени И.И. Ползунова. – Барнаул. – 2009. – С. 471.

Рецензент: д.т.н., проф. Дидык Р.П., государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск