

Съставяне на бюджета на неопределеност при измерване с уред за комплексна двупрофилна проверка на зъбни колела

Младен Петров

Establishment of the budget of uncertainty in measurement with machine complex dual-flank gear test. *The validation process is applied to processes where the outcome can not be controlled or processes whose efficiency and stability of results are specified. The article presents a methodology for validation of the authors developed a comprehensive method for complex dual-flank gear test without using a reference standard sprocket on the device.*

Keywords: - Metrology, gears, complex dual-flank gear test, mathematical modeling.

ВЪВЕДЕНИЕ

Валидирането на процесите е задължително изискване съгласно клауза 7.5.2 от ISO 9001:2000. То се прилага за процеси, при които крайният резултат не може да се контролира или за процеси, чиито ефикасност и стабилност на резултатите са регламентирани. Обхватът и точността на стойностите, които могат да бъдат получени с помощта на валидираните методи (например неопределеността на резултатите, границата на откриваемост, селективността на метода, линейността, граница на повторяемост и възпроизводимост, устойчивостта спрямо външни въздействия или взаимна чувствителност спрямо смущения от матрицата на обекта за изпитване), както са оценени за предвидената употреба, трябва да съответстват на нуждите на клиента.

Предвид изискванията на стандарта ISO 9001:2008 и EN ISO IEC 17025:2005, всички измервателни процедури, цифрови и нецифрови анализи направени при предпроектните проучвания са насочени към целта да се валидира разработеният метод за комплексна двупрофилна проверка без използване на еталонни зъбни колела, наречен „Метод на трите колела“ [1,2,3].

За да бъде постигната тази цел, при оптимални разходи за валидиране, са изпълнени следните задачи:

- Използване на програмни системи разработени от световно признати софтуерни фирми. При разработването на приложния софтуер, върху програмните системи EXCEL и MathCAD са обработване на данните от измерването и последваща статистическа обработка на опитните данни, са използвани стандартизирани алгоритми [4].
- За целите на експеримента е използван действащ серийно произвеждан междуцентромер МЦ400. Проверката е извършена съгласно методиката, указана в ГОСТ 8.490-83 .
- Използваните измервателни преобразуватели, са калибрирани съгласно установените методики (БДС 11316-73).
- В глава 2 е направен математичен модел на грешката на измерване, съгласно утвърдената методика за пресмятане на грешката при косвено измерване.
- Референтните стойности, с които е сравнен предложения метод, са получени при измервания върху серийно произвеждани уреди – междуцентромер МЦ400 [2] и уред за измерване на радиално биене на зъбни колела. При провеждане на измервателните процедури са спазени условията, предвидени в ГОСТ 8.050-73 .

Методиката за валидиране на процеса на измерване по метода на трите колела е разработена на базата на действащите директиви и рекомендации [4]. Понятието “неопределеност” означава несигурност, съмнение в резултата от измерването. Тя е положителен параметър, свързан с резултата от измерване, който характеризира разсейването на стойностите, които могат да бъдат приписани на измерването

величина въз основа на наличната информация. Тази дефиниция поставя ударението върху резултата от измерването и оценената му неопределеност. Източниците на неопределеност са идентифицирани с анализ, чрез причинно-следствена диаграма, а тежестта им на влияние е оценена експертно чрез FMEA анализ. Експертните анализи са направени на базата на анкети и са обработени статистически, за да се докаже на валидността на обобщеното мнение на експертите. Определените на база на QFD метод коефициенти на техническа важност на техническите и метрологичните показатели на изследвания метод на трите колела показват, че „грешката на метода“ е най-важният показател, което доказва целесъобразността на последвалите изследвания.

Обобщена процедура за оценяване и изразяване на неопределеността на измерването

1. Определяне и изразяване на моделната функция на измерване – $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Тази функция описва зависимостта между измерваната величина Y (изходна величина) и входните величини X_i .

2. Определянето на оценките x_i на входните величини X_i може да се базира на статистическите методи или методи, различни от статистическите.

3. Определяне на средноквадратична стандартната неопределеност $u(x_i)$ на всички входни величини - използва се оценяване тип "А".

4. Оценяване на ковариациите $u(x_i, x_k)$ при наличие на корелирани входни величини.

5. Изчисляване на резултата от измерването y въз основа на моделната функция (стъпка 1) и оценките x_i на входните величини X_i .

6. Определяне на комбинираната средноквадратична неопределеност $u_c(y)$.

7. Изчисляване на разширената неопределеност U .

Когато е необходимо да бъде посочена разширената неопределеност, тя се изчислява чрез умножаване на комбинираната средноквадратична неопределеност $u_c(y)$ с фактора на покриване k , чиято стойност се определя в зависимост от приетото ниво на достоверност γ и ефективните степени на свобода V_{eff} .

8. Пълно представяне на резултата от измерването.

При направени пет независими отделни измервания (повторения) на четири групи по четири зъбни колела ($n=5.4.4=80$ измервания) оценената стойност x_i на величината X_i се дава чрез средноаритметичната стойност на отделно измерените стойности X_{ij} ($j = 1 \dots n$) $x_i \Rightarrow \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij}$. Оценката на средноквадратичното

отклонение на разпределението на стойностите X_{ij} се определя по формулата

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2}{n-1}}$$
, а оценката на средноквадратичното отклонение на средноаритметичното – по формулата $S(x_i) = S(\bar{x}_i) = \frac{S(X_i)}{\sqrt{n}}$.

За средноквадратичното отклонение на амплитудата и фазовия ъгъл на първия хармоник, който се явява и основна величина за прилагане на метода, при направени $5.4.4=80$ единични измервания се получава за амплитудата - $\bar{S} = \frac{(S_1+S_2+S_3+S_4)}{4} = \frac{(1+1.7+0.9+0.8)}{4} = 1,1 \mu m$, а за фазовия ъгъл $\bar{\delta} = \frac{(S_1+S_2+S_3+S_4)}{4} = \frac{(4.2+12.4+2.3+5.2)}{4} \approx 6 \text{ deg.}$ Разсейването на данните при получаването на

амплитудата е в границата на грешката на измервателния преобразувател, дадена по паспортни данни. Грешката на получаването на фазовия ъгъл е доста голяма, което се дължи на една неточност при използваната методика на измерването –

визуално (по белег) установяване в ъглово направление на зъбното колело върху измервателния дорник, което при почти нулева хлабина (минимално 4 μm) не е никак лесно.

Методът Монте Карло е използван за изследване, чрез симулационен експеримент, на софтуера за пресмятане на данните, получени от измервателните преобразуватели при прилагане на Метода на трите колела. Обобщените данни, показват недвусмислено, че методът на трите колела е адекватно обезпечен с подходящ математически инструментариум.

Методика за поелементна проверка на уреда за КДП

При провеждане на проверката на междуцентромер МЦ400 са използвани операции и средства за измерване, съгласно ГОСТ 8.490-83 „Приборы для проверки межусевого расстояния. Методы проверки“.

Последователност при извършване на проверка

1. Външен оглед - При него трябва да се установи отсъствие на: побитости, наранявания на работните повърхнини, корозия, липса на дефекти върху детайлите, които влошават експлоатационните качества на уреда.

2. Изпробване - Измерителната и установъчната каретка на уреда, трябва да се преместват по направляващите плавно, без заяждане и явно наличие на хлабини. Закрепването на измервателните преобразуватели трябва да бъде надеждно и да осигурява постоянство на показанията. Дорниците трябва да лягат плътно в центрите, без осезаеми хлабини.

3. Грешката на отчитащите устройства (ИС-10) се проверява съгласно съответната методика (БДС11316-73). При измерване в пет точки, равномерно разпределени в обхвата и при 10 повторения, е получена случайна грешка $\pm 1,5\mu\text{m}$. В случая тя е по-малка, тъй като отклоненията на ИМП не превишават 1 mm, а обхватът на преобразувателя е 10mm.

4. Определяне на отклонението от успоредност и прекосвяване на осите на дорниците, установени на измерителната и установъчната каретка на уреда за КДП. При измерване на зъбни колела с външно цилиндрично зацепване се използват ППКМД установени между цилиндричните дорници.

5. Прекосвяването на осите на дорниците се определя със специално приспособление, което се допира плътно до цилиндричните повърхнини на дорниците установени на каретките. Отчитат се показанията на измервателния преобразувател, който е със стойност на едно деление – 0,001mm.

Отклонението от успоредност на осите не трябва да превишава 0,01mm за уреди с клас на точност АВ и 0,014mm – за клас на точност В на дължина 100mm. В случая, измерените отклонения не превишават указаните в стандарта.

6. Определяне грешката на уреда при измерване на цилиндрични зъбни колела с външно зацепване. Уредите за КДП са 3 типоразмера S_1 , S_2 и S_3 и са с класовете на точност АВ и В. Използваният междуцентромер МЦ400 е типоразмер S_1 , за модули над 1mm и до 8mm, а междуцентровото разстояние е до 320mm.

7. Грешката на уреда при двупрофилна проверка се определя с помощта на два атестирани гладки цилиндрични диска и измервателен преобразувател (ИС-10) закрепен на уреда в работно положение. Една от повърхнините на диска има атестирано биене от 0,120mm, другата повърхнина - 0,254mm, а повърхнината на другия диск не повече от 0,002mm. Повърхнините са измерени с оптичен дължиномер с десеткратно повторение и стойностите са получени с грешка под $\pm 1\mu\text{m}$. Дискът с минималното радиално биене се установява на дорника на измервателната каретка, а другият – на дорника на установъчната каретка. След това дисковете се притискат с измервателно усилие 60-80N, отчетено с динамометър. Стартира се измервателната програма и задвижването на уреда.

Таблица 1

№	Груба оценка	Дет. оценка	Съставляваща на неопределеността	Коментари
1	2	3	4	5
1	U1		Шум	Измерването на шум (електрически и механичен) е рутинна операция при процедурата за калибриране
2	U2		Повторяемост	Измерването на повторяемост се извършва по време на калибриране с еталонните дискове
3	U3		Отскоци от динамични удари	Поради малко измервателно усилие и висока ъглова скорост на въртене, при влизане в зацепване на зъбите се предполага, че се получават микроотскоци, които допълнително увеличават ИМР. Приема се, че при измервателно усилие около 80N и ъглова скорост под 2min^{-1} тия микроотскоци са под 0,001 mm.
4	U4		Хлабина между базовата повърхнина и отвора на водимото ЗК	При допусково поле H7 на отвора на зъбното колело и h4 на базовата повърхнина на дорника, се получава среден ексцентрицитет между осите 0,008 mm, който влияе на изменението на средната стойност на ИМР, но не влияе на изменението на радиалната съставляваща за един оборот. Препоръчва се използването на дорник със сцепен конусна втулка за елиминирание на радиалната хлабина.
5	U5		Хлабина между базовата повърхнина и отвора на водещото ЗК	При допусково поле H7 на отвора на зъбното колело и h4 на базовата повърхнина на дорника, се получава среден ексцентрицитет между осите 0,008 mm, който влияе на изменението на средната стойност на ИМР, но не влияе на изменението на радиалната съставляваща за един оборот.
6	U6		Челно биене на базовата повърхнина (дорника) на водимото ЗК	Челното биене изменя ИМР, като го увеличава със съставляваща, явяваща се съставляваща на амплитудата на втората хармоника и не влияе върху първата хармоника.
7	U7		Челно биене на базовата повърхнина (дорника) на водещото ЗК	Челното биене изменя ИМР, като го увеличава със съставляваща, явяваща се съставляваща на амплитудата на втората хармоника и не влияе върху първата хармоника.
8	U8		Радиално биене на базовата повърхнина (дорника) на водимото ЗК	Радиалното биене изменя ИМР, като го увеличава със съставляваща, явяваща се съставляваща на амплитудата на първата хармоника. Радиалното биене е 0,002mm.
9	U9		Радиално биене на базовата повърхнина (дорника) на водещото ЗК	Радиалното биене изменя ИМР, като го увеличава със съставляваща, явяваща се съставляваща на амплитудата на първата хармоника. Радиалното биене е 0,004mm.
10	U10		Деформации от промяната на измервателното усилие	Промяната на измервателното усилие за един оборот при прието максимално осево преместване на подпружинната каретка 1 mm, е минимално, тъй като пружината е така проектирана, че да има линейна характеристика с малък ъглов коефициент, което не променя деформациите на елементите на уреда за един оборот и не води по промяна на амплитудата на първата хармоника.
11	U11		Промяна на температурата за един цикъл на измерване	Промяната на температурата е 1°K за един час, а едно измерване не превишава 1 минута, така че тази грешка е под 0,0001 mm.
12	U12		Неточно ъглово базиране на водимото и водещото ЗК	Предложеният метод има един съществен източник на неопределеност, идващ от естеството на зъбното зацепване – зъбът на едното ЗК се зацепва в междузъбието на отсрещното ЗК, което води до систематично функционално зависещо от модула и броя зъби, изместване на оценката при пресмятане на векторните функции .

								Таблица 2
Наименование на съставл.	Тип оценка	Тип Разпред.	Брой Изм.	Граници на разсейване а*	Граници на разсейване а (µm)	Коеф. на корелация	Коеф. на разпред.	Съставляваща на неопред.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Шум	A		>10			не		0,05µm
Повторяемост	A	Норм.	50			не		2 µm
Отскоци от динамични удари	B	Норм.	-			не		0,5µm
Хлабина между базовата повърхнина и отвора на водимото ЗК	B	Норм.	-	0-0,016	0-0,010	не		0 µm
Хлабина между базовата повърхнина и отвора на водещото ЗК	B	Норм.	-	0-0,016	0-0,010	не		0 µm
Рад. биене на базовата повърхнина (дорника) на водимото ЗК	B	Релей	-	0-2 µm	0-2 µm	не		2 µm
Рад. биене на базовата повърхнина (дорника) на водещото ЗК	B	Релей	-	0-4 µm	0-4 µm	не		4 µm
Деформации от промяната на измервателното усилие	B	Норм.	-	80±2 N	±1 µm	не		1 µm
Промяна на температурата за един цикъл на измерване	B	Норм.	-	0,5 ⁰ K	±1 µm	не		1 µm
Неточно ъглово базиране на водимото и водещото ЗК	B	Норм.	-	$\pi/(2.z)$	max 3 µm	не		3 µm

Извършват се минимум пет измервания на всяка повърхнина и се определя средната стойност и средно-квадратичното отклонение.

8. Грешката на уреда при измерване колебанията на междусововото разстояние на един зъб се определя с помощта на диск 0,002mm и дорник, имащ по базовата цилиндрична повърхнина падини с позната стойност. Дискът и дорникът се допират и се отъркават.

Разликата между измерените стойности на падините на дорника и радиалното биене на дисковете и атестираните стойности не трябва да превишава указаните. За F''_{ir} – клас на точност AB, делителен диаметър до 50mm – грешката е 5 µm, от 50 до 160mm – грешката на F''_{ir} е 10 µm. При клас на точност B и делителен диаметър до 100mm грешката е 10 µm, от 100 до 200mm – 15 µm, от 200 до 355mm – 20 µm. За f'_{ir} – делителен диаметър до 50mm грешката е 5 µm, от 50 до 120mm – 8 µm. В случая уреда е клас B и грешката на F''_{ir} не трябва да превишава 0,015 mm.

Друго изследване е направено с двете повърхнини на еталонния диск - 0,120mm, и 0,254mm. Направени са по 10 повторения и резултатът показва че стойностите,

получени при измерването на двете повърхнини, са от една съвкупност, т.е. процесът на измерване е равноточен.

Преглед на съставляващите на неопределеността: използват се априорните данни получени чрез експертна оценка след прилагане на FMEA анализ (таблица 1). При анализа на съставляващите на неопределеността се оцени, че не съществува корелация между съставляващите на неопределеността, което дава право тези съставляващи да бъдат сумирани квадратично. Стойностите са дадени в таблица 2.

Комбинирана средноквадратична неопределеност е 5,85 μm , получена след квадратично сумиране на съставляващите на неопределеността. Разширена неопределеност ($k = 2$) – 11,7 μm . Пресмятанията са направени само за определяне на промяната на ИМР с уреди за КДП, които по своята същност са еднокоординатни и за тях важат същите общи характеристики. Ако в схемата на измерване се включи и относителното изместване на средната промяна на ИМР, което изисква предварително настройване с еталон (ППКМД), в неопределеността ще се включат и някои допълнителни съставляващи (еталонната мярка, хлабини в дорниците, деформации ...), някои от които имат определена посока на въздействие.

ИЗВОДИ

1. Направеното проучване на използването на метода за комплексна двупрофилна проверка, показва, методът за КДП без използване на еталонно зъбно колело не е представен в практиката.

2. Симулационният експеримент за изследване на влиянието на математичния алгоритъм върху грешката на измерване доказва, че теоретично методът е работоспособен, а разработеният софтуер не влияе негативно върху грешката на измерване, което е важно условие за валидирането на метода.

3. Разработена е методика за експериментално оценяване на грешката на уреда за КДП чрез отъркаването на два диска с атестирано радиално биене. Проведеният експеримент показва, че този начин на проверка може да се използва при валидиране на хардуера (метрологичното оборудване), върху който се прилага методът на трите колела.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПЕТРОВ Мл. , Бр. СОТИРОВ, Цв. КОРИЙКОВ, Методът за комплексно двупрофилна поверка – състояние и перспективи, International Conferencegeneral Machine Design, October 15-th – 16-th , 2009 , University of Ruse

2. ПЕТРОВ Мл. Т. Станчев , Грешка на оценката на амплитудата и фазовият ъгъл на хармониките при метод за комплексен двупрофилен контрол на зъбни колела без еталонно колело, Научни трудове на РУ - 2011, том50, серия2

3. ПЕТРОВ Мл., Изследване чрез симулационен експеримент на метод за комплексен двупрофилен контрол без еталонно зъбно колело, Научни трудове на РУ - 2011, том50, серия2

4. МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРВАТЕЛНА ТЕХНИКА: книга-справочник в три тома., под общ. ред. на проф. д.т.н. Хр. Радев, София: Софтрейд, 2010. 987 с.,

5. Митков А. Л., Д. П. Минков, Статистически методи за изследване и оптимизиране на селскостопанска техника, I и II част, Земиздат, Сф., 1993.

За контакти:

Младен Илиев Петров, катедра „ТММРМ“ при факултет „Машинотехнологичен“ на Русенски университет „Ангел Кънчев“ e-mail: www.uni.ruse.bg, mpetrov@ru.acad.bg

Докладът е рецензиран