

Изследване чрез симулационен експеримент на метод за комплексен двупрофилен контрол без еталонно зъбно колело

Младен Петров

Research by simulation experiment of methods for complex Double flank Gear Test without reference gear Control of the uncertainty of measurement spacing in dual-flank grip tightly controlled between the reference and gears, is one of the methods used to control the gears. The measurement result includes its own errors in the reference gear, in which precise control of the gears can lead to errors of first and second kind. The elimination of the influence of kinematic error in the reference gear measurement by its exclusion from the scheme of measurement leads not only to increase the accuracy and reliability of the measurement result, but also to reduce the cost of control, especially in the production of small series. The article presents results of simulation experiments by mathematical modeling of change in measuring wheelbase measurement method for complex dual-flank gear test without the use of a standard gear, called the authors' "Method of the three wheels"

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

Въведение

Контролът на колебанието на измервателното междуосово разстояние (a'') е един от най-използваните методи за приемателен контрол на зъбни колела. Той се реализира върху уреди за комплексна двупрофилна проверка (КДП) (междущентромери), при плътно двупрофилно зацепване между контролираното и еталонното зъбни колела. Резултатът от измерването включва и собствените грешки на еталонното зъбно колело, което при контрол на зъбни колела може да доведе до грешки от първи и втори род. Елиминирането на влиянието на кинематичната грешка на еталонното зъбно колело, чрез изключването му от схемата на измерване, води освен до повишаване на точността и достоверността на резултата от измерване и до намаляване себестойността на контрола, особено при серийно производство.

Резултатите от изследването доказват, че е възможно и напълно осъществимо използването на предлагания от авторите метод за КДП без еталонно зъбно колело.

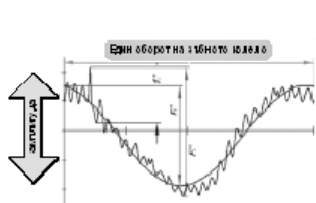
1. Представяне на класическия метод за Контрол на колебанието на ИМР

Контролът на колебанието на измервателното междуосово разстояние (ИМР) a'' е метод за комплексен контрол и е един от най-използваните за контрол на зъбни колела. Той се реализира с помощта на еталонно зъбно колело, но за разлика от еднопрофилната проверка, при този метод ИМР между осите на еталонното и контролираното зъбни колела не е постоянно по време на измерване, а се колебае при плътно двупрофилно (безхлабинно) зацепване (фиг.1). Уредите за КДП са известни отдавна и поради високата им производителност, универсалност и простота на измерване и обслужване са едни от най-разпространените уреди за контрол на цилиндрични зъбни колела с външни и вътрешни зъби, червячни и конусни зъбни колела. Състоят се от базово тяло, върху което са монтирани условно неподвижна каретка, чрез която се настройва необходимото междущентрово разстояние и подвижна каретка (фиг.1). На неподвижната каретка се установява еталонното, а на подвижната – измерваното зъбно колело. Измерването се извършва при непрекъснато въртене на двете зъбни колела, като грешките на измерваното зъбно колело предизвикват колебание на a'' .

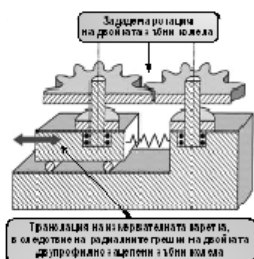
От диаграмата на показанията (фиг.1), получени при измерването, могат да се определят показателите:

- F_{ir} - колебание на ИМР за един оборот на зъбното колело, представляващ комплексен показател за кинематична точност. Определя се като размах на показанията за един оборот на контролираното зъбно колело.

• f''_{ir} - колебание на измервателното междуосово разстояние на един зъб, характеризиращ плавността на работа на зъбното колело



Фиг.1



• Ea''_{sr} и Ea''_{ir} - горно (най-малко) и долно (най-голямо) действително отклонения на измервателното междуосово разстояние, представляващи показатели за странична хлабина в предавката както и самата странична хлабина j_{ng} .

Еталонните зъбни колела се изработват в 3-та, 4-та и 5-та степени на

точност, съответно за 5-6-та, 7-ма и 8-9-та степени на точност по БДС 3296-79.

Предимства на двупрофилния метод са:

- висока производителност и простота на измерване и обслужване;
- универсалност на метода – той е единственият, който дава възможност за измерване на показатели от 4те норми на точност на зъбните колела;
- възможност за измерване на показатели на точност, използвани за производствен контрол, като отклонение на стъпката на зацепване f_{pbr} , отклонение от разположението на еволвентния профил f_{Ha} (респективно f_{ir}), радиално биене на зъбния венец F_{rr} , грешка f_a на профилния ъгъл на зъбонарезния инструмент и грешката F_{ab} на действителната стойност на диаметър на основната окръжност d_b

Класическият метод за КДП притежава следните основни недостатъци:

- при измерване се проявява само радиалната съставляваща на кинематична грешка, докато тангенциалните грешки се проявяват частично;
- резултатът от измерването включва и собствените грешки на еталонното зъбно колело, определени от степента му на точност и износването му;
- влиянието на ъгъла на зацепване α_w върху резултата от измерването на F''_{ir} и f''_{ir} е значително, поради което е необходимо да се използват специално проектирани скъпи еталонни зъбни колела/рейки. В някои случаи стойността на този ъгъл се различава от експлоатационната.

2. Теоретично представяне на метода на трите колела

Предлаганият комплексен метод за двупрофилен контрол се основава на компютризирано класическо двупрофилно измерване, без използване на еталонно зъбно колело, на три произволно взети зъбни колела с еднакъв брой зъби. Трите зъбни колела с условни номера 1, 2 и 3 притежават собствени кинематични грешки F''_{ir} , представляващи сложни периодични функции, които могат да бъдат представени като сума от последователни хармонични колебания от вида:

$$Y_i = A_0 + \sum_{j=1}^k (A_j \cdot \sin(\rho_i \cdot j + \theta_j)) \quad (1)$$

където: A_j - амплитуда на j -тия хармоник на кинематичната грешка на зъбни колела

n – Брой на ъгловите дискретизации,

k – брой на хармониците;

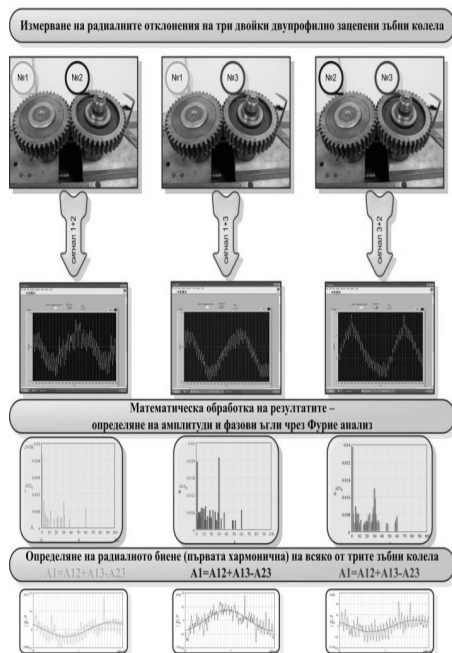
Y_i - текуща стойност на сумарната амплитуда; $\rho_i = \frac{2\pi \cdot i}{n}$ - ъгъл на завъртане

на зъбното колело на който се отчита текущата i -та стойност на амплитудата

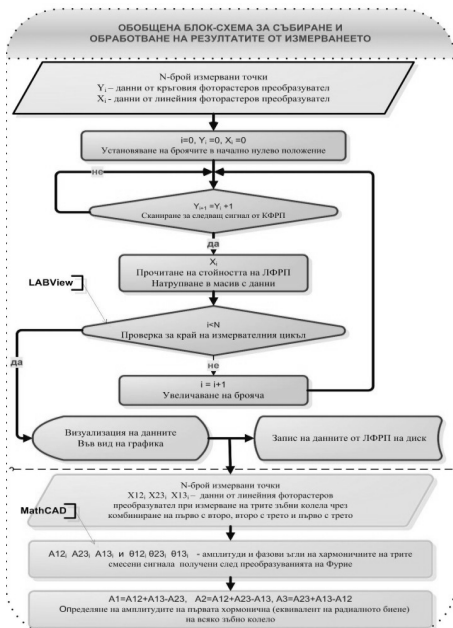
θ_j - фазов ъгъл на j -тия хармоник

Контролираните зъбни колела образуват три измервателни двойки 1-2; 1-3, 2-3. Извършват се три измервания със стандартен междуцентромер при двупрофилно зацепване при едни и същи начални положения и посоки на въртене на всяко зъбно колело, т.е. при фиксирани начални фази на колебанията в следната последователност (фиг.2 и фиг.3)

- I измерване - зацепват се /обхожда се/ зъбно колело 1 със зъбно колело 2;
 II измерване - зацепват се /обхожда се/ зъбно колело 1 със зъбно колело 3;
 III измерване - зацепват се /обхожда се/ зъбно колело 2 със зъбно колело 3;



Фиг.2



Фиг.3

Отчита се промяната на ИМР за един оборот на измерваните зъбни колела. Тъй като те са равен брой зъби, то векторът с измерените стойности A_{12} , A_{13} и A_{23} е получен като сума от действието на вектора на грешките (A_1 , A_2 , A_3) на всяко от зъбните колела, проявяващи се в радиално направление .

Резултатите от измерването се обработват чрез хармоничен (Фурие) анализ, съгласно зависимости (2), даващи възможност за намиране на амплитудите и фазовите ъгли за всяка j -та честота (хармоник), така че полученият вектор от измерването на съвместното действие на радиалните грешки на зацепената двойка зъбни колела да се представи като сбор от елементарни периодични функции.

$$Ax_j = \sum_{i=0}^{n-1} (Y_i \cdot \sin(\frac{2\pi \cdot j}{n} \cdot j)) \quad Ay_j = \sum_{i=0}^{n-1} (Y_i \cdot \cos(\frac{2\pi \cdot j}{n} \cdot j)) \quad A_j = \sqrt{Ax_j^2 + Ay_j^2} \quad \theta_j = \arctg(\frac{Ay_j}{Ax_j}) \quad (2)$$

където: A_j е амплитудата на вектора на j -тия хармоник, Ax_j и Ay_j са съответно реалната и имагинерната стойност на вектора, а θ_j е фазовият ъгъл.

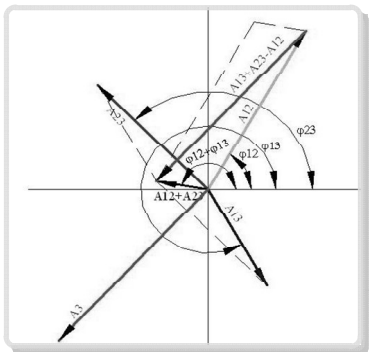
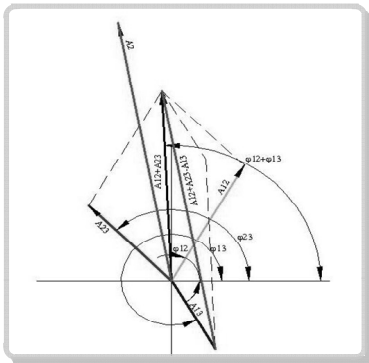
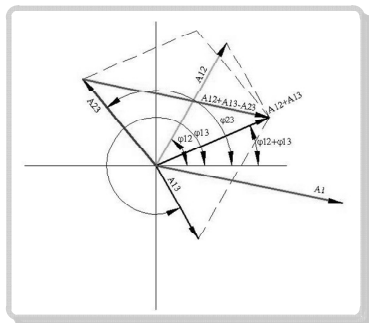
Стойностите на първия хармоник, които е еквивалентен на радиалното биене на зъбното колело - $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$ се получават по векторни уравнения 3 (фиг. 4):

$$\bar{A}_1 = 0,5 \cdot (\bar{A}_{12} + \bar{A}_{13} - \bar{A}_{23}), \quad \bar{A}_2 = 0,5 \cdot (\bar{A}_{12} + \bar{A}_{23} - \bar{A}_{13}), \quad \bar{A}_3 = 0,5 \cdot (\bar{A}_{23} + \bar{A}_{13} - \bar{A}_{12}) \dots \dots \dots (3)$$

където: $\bar{A}_{12}, \bar{A}_{13}, \bar{A}_{23}$ е амплитудата на първия хармоник получен след Фурие анализът на сигнала от измерваните двойки зъбни колела.

3. Разработване на математичен модел на метода на трите колела.

За да бъде апробиран алгоритмът за математично обработване на описания метод, е разработена методика за симулиране на данни от двупрофилно зацепване на трите двойки зъбни колела, включваща (фиг.5):



Диаграми, илюстриращи определянето на векторите на радиалното биене на трите зъбни колела

Фиг.4

1. Симулиране на вектора (масива) със стойностите на радиалните отклонения на зъбното колело за един оборот, в зависимост от различните им геометрични и точностни показатели.

2. Симулиране на грешката на сигнала от измервателния преобразувател, отчитащ радиалното отклонение на измервателната каретка на уреда за КДП при взаимното отъркаване на двойките зъбни колела при двупрофилното им зацепване.

3. Математическо обработване на измерената информация съгласно гореизложената методика (фиг.2,3 и4)..

4. Сравняване на симулираните данни и данните от математичното обработване за да се определи грешката, която се внася от алгоритъма.

За разработване на математичния модел е използвана програмата MathCAD. Тя е една от най-съвременните гъвкави системи за пресмятане на математични алгоритми.

За да бъде адекватен симулационният експеримент, би трябвало генерираният сигнал от алгоритъма представен на фиг.5 максимално да се доближава по големина и форма до сигнала получаван при реално измервани зъбни колела. При анализът на многобройни амплитудно честотни диаграми на сигнали от двупрофилен контрол на реални зъбни колела (7-10та степен по нормите за точност) с еталонно зъбно колело (3та степен), стана ясно, че сигналът, получен от измервателния преобразувател измерващ отклонението на ИМР, се формира от няколко характерни нискочестотни амплитуди и височестотни, кратни на броя зъби z . Това беше потвърдено и от редица литературни източници с автори Тайц, Калашников и Марков [1], [2], [3], [4], [5], [7]. Например, нискочестотните – радиалното биене оказва влияние върху първи хармоник, челното биене – върху втори хармоник, а височестотните, с честота равна на броя зъби и субхармоници кратна на тях, зависят от коефициента на корекция, коефициента на припокриване, грешката на профилния ъгъл,

грешката на основната окръжност, грешката на еволвентния профил [9], [10], [11].

За да се определи степента на влияние на геометричните и точностните показатели на зъбните колела върху големината на нискочестотните и

високочестотните характерни амплитуди, е проектиран и проведен планиран пълен факторен експеримент по метода на Тагучи от типа 2^4 при три повторения с изследване на единични действие на избраните фактори и двойни взаимодействия.

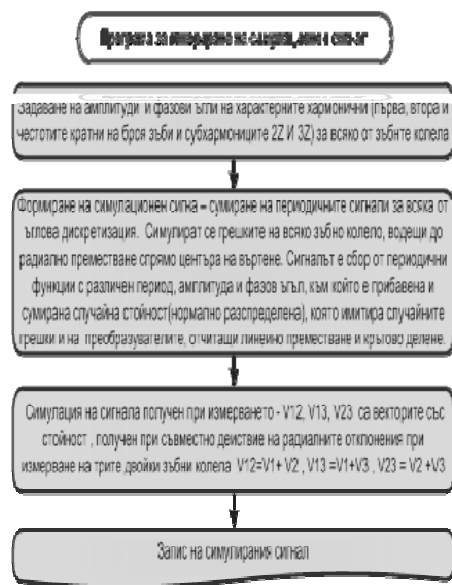


Таблица 1					
Код	Вид	Наименование	Дим.	Ниво на факторите	
				1	-1
A	Упр.	Модул на ЗК	mm	4,5	3
B	Упр.	Коефициент на корекция	mm	1 (1,1)	0
C	Упр.	Грешка на профилен ъгъл (20deg)	min	-30	0
D	Упр.	Радиално биене	-	max	min

Фиг.5

данните от петте повторения на всеки три зъбни колела от един вид, стойностите на характерните амплитуди и фазовите ъгли на всяко едно от трите зъбни колела са въведени в програмата за симулиране на сигнал от двупрофилно зацепване по метода на трите колела (фиг.5). След това, изходният сигнал от тази програма, представляващ преместване от взаимното действие на изменението на ИМР при трите двойни двупрофилно зацепени зъбни колела, е въведен в действителната програма за обработване на данни от измерването по метода на трите колела, илюстрирана на фиг. 2 и 3.

Изводи

1. Резултатите от проведения симулационен експеримент (табл.2) показват, че методът е работоспособен и при различни геометрични и точностни показатели на измерваните зъбни колела.

Избраните фактори и техните нива са дадени в таблица 1. Изследвано е влиянието на избраните фактори върху три нискочестотни амплитуди – първа, втора и трета и три високочестотни – кратни на броя зъби z , $2z$ и $3z$. Направен е и дисперсионен анализ, за да се провери адекватността на получения модел.

Експериментът е проведен върху съществуващ уред за КДП с електромеханично задвижване на еталонното колело, който е модернизирал, чрез вграждане на фоторастеров преобразувател ИС10 5-ти клас с дискретност 0,001 mm и кръгов фоторастеров преобразувател с дискретност 2500 импулса на оборот. За снемане на измервателната информация е използвана програмата LabView.

Последователно, според плана на експеримента, еталонни зъбни колела с $m=3$ ($z=48$) и $m=4,5$ ($z=30$) са отъркавани при пет повторения с по три зъбни колела с различен профилен ъгъл и коефициент на корекция, а големината на радиалното биене е симулирано с ексцентрична втулка вложена в отвора на зъбното колело (табл.1).

На получения сигнал от измерването е направен хармоничен (Фурие) анализ и са намерени определени стойностите на амплитудите и фазовите ъгли на избраните характерни хармоници.

След статистически анализ за наличие на груби грешки при измерването и еднородността на ред от дисперсии на

2. Наличието на разлики при определянето на първи хармоник, еквивалентен на радиалното биене на зъбното колело, от порядъка на микрометри се дължи и на това, че за да се симулира и грешката на измервателните преобразуватели, към генерирания сигнал по характерните амплитуди, се прибавя и шум - случаен сигнал разпределен по нормален закон, с размах $\pm 1\mu\text{m}$ и $\pm 2\pi/2500\text{ rad}$ (една дискрета за линейния и кръговия измервателен преобразувател).

3. Резултатите от проведеният експеримент по метода на Тагучи за определяне на влиянието на избраните фактори върху стойностите на характерните амплитуди показват: голямо радиално биене увеличава амплитудата на първия хармоник;

Таблица 2						
Нива на факторите	Симулирана стойност на амплитудата на първи хармоник (μm)			Стойност на амплитудата на първи харм. след математ. обработка (μm)		
	ЗК1	ЗК2	ЗК3	ЗК1	ЗК2	ЗК3
A(-)B(-)C(-)D(-)	39	36	11	38	36	12
A(+)B(-)C(-)D(-)	30	7	8	30	7	8
A(-)B(+)C(-)D(-)	32	12	22	31	13	22
A(+)B(+)C(-)D(-)	8	4	14	8	4	14
A(-)B(-)C(+)D(-)	34	22	18	33	22	19
A(+)B(-)C(+)D(-)	117	45	13	117	45	13
A(-)B(+)C(+)D(-)	39	36	11	39	36	11
A(+)B(+)C(+)D(-)	19	15	38	19	15	38
A(-)B(-)C(-)D(+)	91	67	87	91	67	87
A(+)B(-)C(-)D(+)	102	100	96	102	99	95
A(-)B(+)C(-)D(+)	87	55	76	87	55	76
A(+)B(+)C(-)D(+)	82	79	89	82	79	89
A(-)B(-)C(+)D(+)	13	12	12	13	12	12
A(+)B(-)C(+)D(+)	22	52	16	22	52	16
A(-)B(+)C(+)D(+)	37	45	24	37	45	24
A(+)B(+)C(+)D(+)	32	24	32	32	24	32

голям коефициент на корекция води до увеличаване на амплитудата на z-товата честота; голям модул, грешка на профилният ъгъл и съвместно влияние на модула и коефициент на корекция води до увеличаване на амплитудата на 2z-товата честота.

4. Генерираните сигнали по амплитуди, фазови ъгли и характерни честоти, с приемлива точност се доближават до реално измерените стойности на сигнала.

5. По получените стойности на високочестотните хармоници и по тяхното взаимно отношение може да се съди и за някои други грешки на зъбното колело (грешка на профилния ъгъл, грешка на еволвентния профил и др.), които досега не са разкривани при използване на класическия метод за КДП. Разбира се това е обект на допълнително теоретично и експериментално изследване.

6. Генерираният симулационен сигнал

може да послужи като еталонен при валидирането на софтуерът за математично обработване на сигнала при прилагане на метода на трите колела.

Литература

[1] Афонский, Б. Д., Исключение погрешности измерительного зубчатого колеса из результата двухпрофильного контроля, Измерительная техника, 1973, №2

[2] Верхотуров, Б. Я., Синтез первообразной функции погрешности непосредственно из результата разностных измерений, Измерительная техника, 1964, №12

[3] Верхотуров, Б. Я., Графо-аналитический и графический метод разработки результатов разностных измерений, Измерительная техника, 1966, №3

[4] Марков, Н. Н., Проявление погрешности основного шага при комплексном контроле цилиндрических зубчатых колес, Стандартизация, 1957, №4

[5] Роотс, Ю. О., Повышение точности комплексной проверки зубчатых колес, Доклады МИИСП, М. том1, вып.5, 1964

[6] Роотс, Ю. О., Исключение погрешности измерительного колеса при комплексной проверке зубчатых колес, Доклады ТСХА, вып.86, 1963

[7] Тайц, Б. А., Точность и контроль зубчатых колес, Москва, Машиностроение, 1972

[8] Hermdn, K. W., W. Wurzner, Periodische Prufing von Lehrzahnroden one Lweiflankenwalzprufgeraten, Feingerratetechnik 29, 3/1980

[9] Корийков, Цв. и др. , Проектиране на измерителни зъбни колела за комплексен двупрофилен контрол, НТК, 1987, Стара Загора

[10] Корийков, Цв. и др. , Подобряване на достоверността на контрола на зъбни колела по метода на двупрофилната проверка, Научна сесия „15 години НЕИМ“, Габрово, 1980

[11] Тошков Т., Проявяване на грешките на основната стъпка при двупрофилен контрол на зъбни колела, Доклад на научна сесия на ВМЕИ Габрово, 1980

[12] Сотиров, Бр., Метрологично осигуряване на средства за измерване на зъбни колела, Автореферат на кандидатска дисертация, Русе, 1990

[13] Kackarq R. N., Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method, J. of Quality Technology v17 Nr=4q 1085

[14] Roy, Ranjit, Aprimer on the Taguchi Method, Van Norsand REINOLD, New Yorkq 1990

Данни за автора: Младен Илиев Петров главен асистент в катедра „ТММРМ“ при факултет „Машино-технологичен“ на Русенски университет „Ангел Кънчев“. www.uni.ruse.bg, mpetrov@ru.acad.bg

Докладът е рецензиран