

Особености на геометричното проектиране на еталонни зъбни колела за комплексен двупрофилен контрол

Бранко Сотиров

Characteristics of geometric design of standard gears for double flank gear test: The complex dual flank test is the most productive and widely used method for control of cylindrical gears. A key element in the measurement scheme of this method is the master gear whose characteristics define the reliability and quality of the measurement result. This paper proposes an algorithm for geometric design of standard gears in order to assure the quality of the dual flank gear test.

Key words: Double Flank Gear Test, Master gears.

ВЪВЕДЕНИЕ

Един от най-използваните, предпочитани и производителни методи за приемателен контрол на зъбни колела е контролът колебанието на измервателното междусово разстояние (ИМП) a'' . Известно е, че този комплексен метод се реализира с помощта на еталонно зъбно колело (ЕЗК), което е неделим, основен и решаващ от метрологична гледна точка елемент на методите и устройствата за измерване при еднопрофилен и двупрофилен контрол. Геометричната точност на ЕЗК (класове на точност А, В и С) е аналогична или много близка до точността на референтните еталонни зъбни колела, използвани при периодични проверки на устройствата за измерване на зъбни колела (УИЗК).

Основните размери и изисквания към еталонните зъбни колела с прави зъби за еднопрофилен и двупрофилен контрол у нас се регламентират от [1], където по разбираеми причини те са наричани измервателни цилиндрични зъбни колела. От метрологична гледна точка използването на тези ЕЗК е свързано с редица недостатъци (а в някои случаи е и некоректно), които могат да бъдат резюмирани така – те не могат да осигурят необходимото качество на измерванията по отношение на: ъгъл на зацепване на реалната измервателна предавка, коефициент на припокриване, измерване по цялата дължина на активния еволвентен участък и поява на интерференция в измервателната предавка.

Неспазването на посочените изисквания на практика означава, че от метрологична гледна точка използването на стандартизирани и/или метрологично и геометрично некоректно проектирани ЕЗК е свързано с редица недостатъци и рискове, влияещи пряко върху осигуряването на единството и точността на измерванията при контрол на цилиндрични зъбни колела.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Базови (входни) параметри при проектиране на ЕЗК обикновено са параметрите на измерваното/работно зъбно колело (ИЗК): брой на зъбите Z_i ; модул m , ъгъл на профила (изходния контур) α , ъгъл на наклона на зъба β по делителния цилиндър, коефициент на радиалната хлабина s^* , коефициент на височината на главата на зъба на ИЗК $h_{ам}^*$, коефициент на височината на зъба, имаща еволвентен профил $h_{и}^*$, коефициент на височинна модификация (фланкиране) на зъба на ИЗК h_g^* , коефициент на дълбочинна модификация на зъба Δ^* , коефициент на корекция на ИЗК по чертеж x_n , минимален (стандартен) допълнителен коефициент на корекция $E_{H\beta}/m$ от сдружаването за осигуряване на странична хлабина в реалната предавка на контролираното зъбно колело, максимален (стандартен) допълнителен коефициент на корекция $(E_{H\beta}+T_H)/m$ за осигуряване на странична хлабина в реалната предавка на контролираното зъбно колело.

Анализът на публикации по темата [2, 6] и натрупания научно-изследователски и в реални производствени условия опит, дават основание да се посочат следните

основни изисквания, които следва да се съблюдават при проектиране на ЕЗК:

А) *Определяне на броя на зъбите Z_e на еталонното зъбно колело.*

Първоначално броят на зъбите на еталонното зъбно колело се приема равен на броя на зъбите на насрещно работещото с измерваното работно колело в реалната предавка. Пресмята се стойността на коефициента на припокриване $\varepsilon_{и}$, който трябва да е равен на коефициента на припокриване на реалната предавка ε_p [6]. При $\varepsilon_{и} \neq \varepsilon_p$ стойността на Z_e се коригира.

В случай, че еталонното колело ще се използва и за технологичен контрол е необходимо броят на зъбите му да се избере от условието $\varepsilon_{и} \geq 1.05$ [6].

Броят на зъбите на еталонното колело не може да бъде по-малък от стойността [3]:

$$z_{\min} = h_l^* \frac{2}{\sin^2 \alpha} \quad (1)$$

Б) *Осигуряване на ъгъл на зацепване на измервателната предавка, равен на профилния ъгъл на зъбонарезния инструмент.*

Ъгълът на зацепване на реалната измервателна предавка, получен в резултат на коригиране на ИЗК се различава от профилния ъгъл на инструмента, с който е нарязано измерваното колело. В резултат на това върху резултатите от измерването се проявява влиянието на грешките на кинематичната верига на зъбообработващата машина, известни още като тангенциална съставляваща на кинематичната грешка. Промяната на ъгъла на зацепване на измервателната предавка влияе пряко и на формирането на коефициента на припокриване на измервателната предавка;

Известно е [6], че в резултат на съвместното влияние на грешките от геометричния $e_r/2$ и кинематичен $e_w/2$ ексцентрицитети, колебанията $\Delta\alpha''$ на ИМП имат синусоидален характер, описван с уравнението:

$$\Delta\alpha'' = \frac{1}{2 \sin \alpha_w} [e_r \cos \varphi (\sin \alpha \cos \Delta\alpha_w - \cos \alpha \sin \Delta\alpha_w) + e_k \cos(\varphi + \psi) \sin \Delta\alpha_w] \quad (2)$$

В случай, че при измерване е изпълнено $\alpha_w = \alpha$, зависимост (2) приема вида:

$$\Delta\alpha'' = 0.5e_r \cos \varphi, \quad (3)$$

т.е. изменението на ИМП се определя само от геометричният ексцентрицитет (радиалните грешки при обработка), докато кинематичния ексцентрицитет (тангенциални грешки при обработка) не се проявяват [6].

В случай, че ъгълът на зацепване α_w при двупрофилна проверка се различава от ъгъла α на изходния контур, то съгласно зав. (3) отклонението на ИМП очевидно ще се влияе и от тангенциалните грешки при обработка.

Строго погледнато, стойността на ъгъла α_w при измерване все пак не остава постоянна, а се изменя по обиколката на зъбния венец по причина на радиалното му биене, грешките на профилите на ИЗК и ЕЗК и реалното колебание на дебелината на зъбите.

Равенството на ъглите α_{tw} и α_t (в челно сечение) се осигурява посредством т. нар. V-0 (фау-нулево) зацепване на измервателната предавка, при което изменението $\Delta\alpha''$ на ИМП се определя единствено от геометричния ексцентрицитет e_r , а влиянието на e_k се елиминира. По този начин се избягва необходимостта от корекции на измерените стойности на показателите F''_{ir} и f''_{ir} с оглед подобряване на достоверността на двупрофилния метод на контрол.

• Реализиране на V-0 зацепване на измервателната предавка

Коефициентът на корекция на ЕЗК x_e се приема равен на взетата с обратен знак сума от зададения коефициент на корекция на ИЗК $x_{и}$ и допълнителния коефициент на корекция в нормално сечение, получен от задължителното най-малко изместване на изходния контур E_{H_s} на контролираното зъбно колело:

$$x_e = -(x_H + \frac{E_{Hs}}{m}) \quad (4)$$

Както е известно, величината E_{Hs}/m винаги е отрицателна за зъбни колела с външни зъби и е положителна за колела с вътрешни зъби.

- Изчислява се сумарния коефициент на корекция x_Σ :

$$x_\Sigma = x_e + x_H - \frac{|E_{Hs}|}{m} \quad (5)$$

- Пресмятат се номиналното измервателното междуосово разстояние a'' и минималното измервателното междуосово разстояние a''_{\min} при двупрофилно зацепване на зъбни колела с прави или наклонение зъби

$$a'' = \frac{(Z_e + Z_u)m}{2 \cos \beta} \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{n\alpha}}, \quad (6)$$

където: α_t и α_{tw} са съответно профилен ъгъл и ъгъл на зацепване в челно сечение,

$$a''_{\min} = \frac{(Z_e + Z_u)m}{2 \cos \beta} \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{n\min}}, \quad (7)$$

- Пресмятат се коефициента на възприеманото изместване y и коефициента на допълнителното изменение на височината на зъба Δy за осигуряване на постоянна радиална хлабина:

$$y = \frac{a''_{\min} - a}{m}, \quad (8)$$

където: a''_{\min} - начално междуосово разстояние на ИМР,

a - делително междуосово разстояние на ИМР.

$$\Delta y = x_\Sigma - y \quad (9)$$

В) *Осигуряване на възможността с ЕЗК да се проверява цялата дължина на работния еволвентен профил на ИЗК. Определяне на характерните точки на еволвентния профил на зъба.*

Размерите на стандартните ЕЗК не могат да осигурят проверка по цялата дължина на работния еволвентен профил на ИЗК. Реално контролираната дължина ще намалява с намаляването на броя на зъбите на контролираното колело и поставя под съмнение достоверността и обективността на резултата от измерването. За да се изпълни това важно изискване е необходимо коефициента на височината на главата на зъба h^*_{ae} на еталонното колело да бъде равен на коефициента h^*_{ai} , т.е.:

$$h^*_{ae} = h^*_{ai} = h_{ai}/m \quad (10)$$

- Височината на зъба h_e на еталонното колело се пресмята по зависимостта:

$$h_e = (2 h^*_{ae} - c^*)m - \Delta y m, \quad (11)$$

където: $h^*_{ie} - h^*_{ae} = 1$

- Пресмятат се диаметрите на еталонното и измерваното зъбни колела:

- диаметри на делителната окръжност (делителни диаметри) d_e и d_{ie} ;
- диаметри на началната окръжност d_{we} и d_{wi} ;
- диаметри на върховата окръжност d_{ae} и d_{ai} ;
- диаметри на впадините на зъбите (петовата окръжност) d_{fe} и d_{fi} ;
- диаметри на основната окръжност d_{be} и d_{bi} .

- Пресмятат се диаметрите на характерни точки на еволвентния профил на еталонното зъбно колело:

- диаметър на окръжността на граничната точка на профила на зъба d_{ie} :

$$d_{ie} = d_{be}/\cos \alpha_{ie} \quad (12)$$

- диаметър на окръжността d_{pe} на началната точка на активния профил на зъба.

• Определят се радиусите на кривина на характерните точки от еволвентния профил на зъба на ЕЗК - граничната точка на еволвентния профил на зъба ρ_{le} и др., както и профилните ъгли за тези точки;

• Изчислява се дължината на активния профил на зъба в ъглови $\Delta V_{раб}$ и линейни единици L_a .

Г) Проверка на качеството на зацелване на измервателната предавка по геометрични параметри.

• Задължително се прави проверка за отсъствие на подрязване в основата на зъба на ЕЗК. Подрязване е невъзможно, ако е изпълнено условието:

$$x_{min} = h_{le}^* - h_{ae}^* - z_e \sin 2\alpha_t / 2 \cos \beta, \text{ и/или } tg \alpha_e \geq 0 \quad (13)$$

• Проверка за заостреност на зъба на еталонното колело по диаметъра на върховата окръжност.

Приема се, че заостреност на зъбите ще отсъства, ако за дебелината на зъба S_{nae} по върховата окръжност е изпълнено условието:

$$S_{nae} \geq 0.3m \quad (S_{nae} \geq 0.4m) \quad (14)$$

$$\text{където: } S_{nae} = d_{ae} \left(\frac{0.5\pi + 2x_e tg \alpha}{z} + inv \alpha_t - inv \alpha_{ae} \right) \cos \beta_{ae}$$

• Проверява се за отсъствие на интерференция на преходната крива при основата на зъба на ЕЗК.

Използването на препоръчаните от БДС 8.875-84 стандартни ЕЗК в отделни случаи може да доведе до появата на интерференция в основата на зъбите на ИЗК или ЕЗК, особено при проверка на зъбни колела с отрицателна корекция

За да се гарантира изпълнение на това важно метрологично условие е необходимо началната точка на еволвентния профил на еталонното колело ρ_{le} да е разположена по-ниско от началната точка на активния профил за най-малкото ИМР a''_{min} , т.е. да е изпълнено неравенството:

$$\rho_{le} \leq \rho_{pe}^{min} \quad (15)$$

където: ρ_{pe}^{min} - радиус на кривина на началната точка от активния еволвентен профил на ЕЗК за a''_{min} .

• Проверява се и за отсъствие на интерференция на преходната крива при основата на зъба на ИЗК.

Тази проверка е аналогична на проверката от подточка Г) и има вида:

$$\rho_{li} \leq \rho_{pi}^{min} \quad (16)$$

където: ρ_{pi}^{min} - радиус на кривина на началната точка от активния еволвентен профил на ИЗК за a''_{min}

• При двупрофилна проверка на зъбни колела с вътрешни зъби се прави проверка и за интерференция на върховете между зъбния венец на ИЗК и еталонното зъбно колело.

Д) Изчисляване на необходимите контролни размери.

Такива са размерите за контрол на контактната линия на зъба на колела с наклонени зъби – ъгъл на наклона на зъба β_b и β_a по основния и върховия диаметри, както и размера на осевата стъпка p_x . Пресмятат се и размерите за контрол на изместването на изходния контур/дебелина на зъба – дължина на общата нормала W и размера по ролки M .

За да е възможно измерването на W е необходимо да са изпълнени условията:

$$\rho_{pe} < \rho_w < \rho_{ae} \quad (17)$$

където: $\rho_w = 0.5W \cos \beta_b$

При условие, че една или повече от проверките на качеството на зацепване на измервателната предавка по геометрични параметри не дадат положителен резултат, се правят необходимите корекции и допълнения.

Възможно е в някои случаи тези корекции да са взаимно изключващи се и да не са в състояние да отговорят едновременно на изискванията, описани в подточки А), Б) и В). Такъв случай може да се окаже изискването за осигуряване на необходимия ъгъл на зацепване α_{tw} и коефициент на припокриване ε_u на измервателната предавка, който се определя по зависимостта [4]:

$$\varepsilon_u = \frac{z_e(\operatorname{tg}\alpha_{ae} - \operatorname{tg}\alpha_w) + z_u(\operatorname{tg}\alpha_{au} - \operatorname{tg}\alpha_w)}{2\pi} \quad (18)$$

където: α_{ae} и α_{au} са профилните ъгли на точките, лежаща на върховете окръжности на еталонното и измерваното колело.

В такива случаи са необходими компромисни решения (например с броя на зъбите) с оглед съвместяване на разнопосочни изисквания, като задължително се осигурява реализирането на V-0 зацепване на измервателната предавка и изпълнението на всички изисквания относно качеството на зацепване на измервателната предавка по геометрични параметри.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Използването на стандартизирани или унифицирани еталонни зъбни колела при двупрофилна проверка е свързано с редица недостатъци и сериозни рискове за точността и достоверността на измерванията;
2. Предложен е алгоритъм и е разработена методика за геометрично проектиране на еталонни зъбни колела в зависимост от спецификата на контролираните зъбни колела и конкретната задача на измерването;
3. Методиката е апробирана успешно в метрологичната практика през годините в рамките на два стопански договора.

БЛАГОДАРНОСТ

Авторът изказва искрената си благодарност и признателност на доц. д-р инж. Цвятко Станев Корийков, с когото заедно създадохме и успешно прилагаме в метрологичната практика методиката за геометрично проектиране на еталонни зъбни колела за комплексен двупрофилен контрол на цилиндрични зъбни колела.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС 8.875-84 Държавна система за осигуряване единство на измерванията. Колела зъбни измерителни. Методи за проверка;
- [2] Корийков, Цв. Ст., Т. Г. Тошков, Б. Д. Сотиров, Проектиране на измервателни зъбни колела за комплексен двупрофилен контрол, Доклад на научно-техническа конференция-МАКК'87, ст. Загора, октомври 1987;
- [3] Охендушко К. Зъбни Колела, том 1, София, Техника, 1974, 566 с.
- [4] Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач, под ред. И.А. Болотовского, М., Машиностроение, 1986, 447 с.
- [6] Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес, М., Машиностроение, 1972, 368 с.

За контакти:

Доц. д-р Бранко Сотиров, Катедра "Технология на машиностроенето и металорежещи машини", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 493, e-mail: bsotirov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.