

Подобряване на трибологичните характеристики на предавки с вътрешно зацепване

Антоанета Добрева

Improving Tribological Characteristics of Gear Trains with Internal Meshing: The paper presents an investigation in the area of gear trains with internal meshing. Methodology for the determination of geometrical boundaries for such gears is systemized and analyzed including new analytical relationships. Optimization of tribological parameters of gear trains with internal meshing based on the criteria contact strength, minimal friction coefficient and maximal efficiency coefficient is implemented. Options for decreasing the energy losses for gear trains with internal meshing are analyzed.

Key words: Tribological Characteristics, Internal Meshing, Decrease of Energy Losses

ВЪВЕДЕНИЕ

При определени конструкции зъбни предавки и трансмисии е възможно реализиране на големи предавателни числа, като отделните степени на предавката са с вътрешно зацепване, а в някои случаи и с малка разлика в броя на зъбите.

Известно е, че научен колектив под ръководството на доц. Емилия Ангелова и проф. Петър Ненов от Русенския университет разработва софтуер за якостно и геометрично пресмятане на зъбни предавки с помощта на геометрични и силови блокиращи контури [1, 2, 3]. За различните видове предавки с вътрешно зацепване съществуват блокиращи контури, представени в [4]. За предавки с големи предавателни числа, като отделните степени на предавката са с вътрешно зацепване, а в някои случаи и с малка разлика в броя на зъбите, тези блокиращи контури не винаги могат да бъдат използвани.

Целите на представеното изследване са: да се систематизира и допълни съществуващата методика за определяне на геометричните граници на предавки с вътрешно зацепване; да се анализират енергийните загуби в предавки с вътрешно зацепване в зависимост от геометрията на зацепване и да се дефинират възможностите за намаляване на загубите на енергия.

СИСТЕМАТИЗИРАНА И РАЗШИРЕНА МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИТЕ ГРАНИЦИ НА ПРЕДАВКИ С ВЪТРЕШНО ЗАЦЕПВАНЕ

Разглежда се систематизирана и допълнена методика за определяне на геометричните граници на предавки с вътрешно зацепване на базата на предишни и настоящи изследвания на автора.

Геометричните граници на вътрешното зацепване следва да изпълняват следните условия: избягване на подрязването; допълнително специфично условие за зацепване; недопускане на интерференция от II род; осигуряване на минимално допустим коефициент на припокриване; осигуряване на достатъчна широчина на междузъбието в петата на зъба на венеца с вътрешни зъби. Допустимите решения се представят по графичен начин чрез блокиращи контури, фиг.1.

Геометричните условия, на които трябва да отговаря предавка с вътрешно зацепване се дефинират по следния начин:

1. Избягване на подрязването, линия 1, фиг.1,

Подрязване съществува тогава, когато броят зъби на малкото зъбно колело е по-малък от граничния брой зъби. За разглеждания вид зъбни предавки важи зависимостта:

$$x_{1\min} = [(\operatorname{inv}\alpha_{w0\min} - \operatorname{inv}\alpha_0) \cdot (z_1 + z_0) / (2 \cdot \operatorname{tg}\alpha_0)] - x_0 \quad (1)$$

В представената зависимост, значението на използваните параметри е:

x_{1min} - минимално допустим коефициент на изместване на изходния контур на малкото зъбно колело;

α_0 - ъгъл на профила на изходния контур;

z_0 - брой зъби на дълбяка;

x_0 - коефициент на изместване на дълбяка;

$$\alpha_{w0min} = \arctg\{z_0/(z_1+z_0) \cdot \text{tg}[\arccos(m \cdot z_0 \cdot \cos\alpha_0 / (m \cdot z_0 + 2h_a^* + 2x_0))]\} \quad (2)$$

2. Допълнително специфично условие за зацепване, линия 2, фиг.1

Това допълнително условие описва граничния случай, когато върховата окръжност на зъбния венец с вътрешни зъби минава през началото на активния участък от линията на зацепване при основната окръжност на малкото зъбно колело.

$$0,5 \cdot d_{a2} = [(0,5d_{b2})^2 + (a \cdot \sin\alpha_{wt})^2]^{0,5} \quad (3)$$

В зависимост (3), значението на използваните параметри е:

d_{a2} - диаметър на върховата окръжност на колелото с вътрешни зъби;

d_{b2} - диаметър на основната окръжност на колелото с вътрешни зъби;

a - междуосово разстояние;

α_{wt} - ъгъл на зацепване

3. Интерференция от II род, извън областта на зацепване, линия 3, фиг.1

При малка разлика в броя на зъбите на зъбното колело z_1 и зъбния венец с вътрешни зъби z_2 , е възможно възникване на интерференция от II род, т.е. удар на главите на зъбите на зъбното колело и венеца извън областта на зацепване.

В този случай е валидна следната зависимост:

$$(\varphi + \nu) / [(z_2/z_1) \cdot (\vartheta - \delta)] = 1, \quad (4)$$

където:

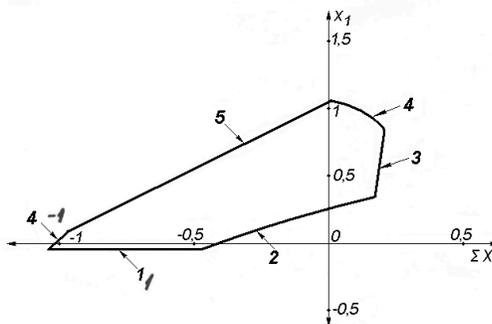
$$\varphi = \arccos[(d_{a2}^2 - 4 \cdot a^2 - d_{a1}^2) / (4 \cdot d_{a1} \cdot a)]$$

$$\vartheta = \arccos[(d_{a2}^2 + 4 \cdot a^2 - d_{a1}^2) / (4 \cdot d_{a2} \cdot a)]$$

$$a = a_0 \cdot \cos\alpha_0 / \cos\alpha_{wt}$$

Значението на останалите параметри от зависимост (4) е описано подробно в [6].

4. Коефициент на припокриване, $\epsilon \geq 1,1$, линия 4, фиг.1



Фиг. 1. Геометрични граници на зъбна предавка с вътрешно зацепване в зависимост от коефициента на изместване на изходния контур на колелото с външни зъби x_1 и от сумарния коефициент на изместване x_{Σ} , [6]

5. Ширина на междузъбието в петата на зъба на венца с вътрешни зъби, линия 5, фиг. 1

$$\begin{aligned}
 l &\geq 0,2.m; \text{ при което} & (5) \\
 l &= [(d_{f2} - \pi)/z_2] \cdot s_f \\
 s_f &= \psi_y \cdot d_{f2} \\
 \psi_y &= \psi - \text{inv}\alpha_0 - \text{inv}\alpha_y \\
 \psi &= s/d_2 \\
 \alpha_y &= \arccos(d_2 \cdot \cos\alpha_0/d_{f2}) \\
 s &= \pi.m/2 - 2(x_2 - x_1).m.\text{tg}\alpha_0
 \end{aligned}$$

Част от геометричните параметри в уравнение (5) са показани на фиг.4. В зависимостите към това уравнение, значението на основните геометрични параметри е следното:

m - модул на зацепването
 d_{f2} - петова окръжност на зъбния венец с вътрешни зъби.

Уравненията, показани графично на фиг.1 представляват блокиращия контур за предавки с вътрешно зацепване. Всяка точка от полето, ограничено от тези линии, представлява решение на поставената задача от геометрична гледна точка.

В процеса на изследване се установи следната тенденция: с нарастване на положителния коефициент на изместване на изходния контур X_1 , загубите на мощност намаляват и коефициентът на полезно действие в зацепването нараства.

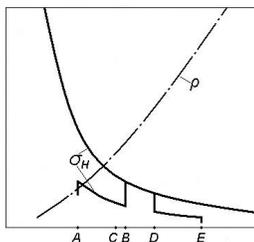
ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТРИБОЛОГИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕДАВКИ С ВЪТРЕШНО ЗАЦЕПВАНЕ ВЪТРЕШНОТО ЗАЦЕПВАНЕ

На основата на блокиращия контур е направена оптимизация по критериите контактна якост, минимален коефициент на триене и максимален коефициент на полезно действие в зацепването.

Изведен е геометричен коефициент h_{va} , който определя загубите на мощност в зацепването и зависи само от геометрията на зъбната двойка, като се прилага допускането, че коефициентът на триене остава постоянен по линията на зацепване.

$$h_{va} = [(1-i)/2i] \cdot \{ [i^2 \cdot (\text{tg}\alpha_{at1} - \text{tg}\alpha_{wt})^2 + (\text{tg}\alpha_{wt} - \text{tg}\alpha_{at2})^2] / [i \cdot \text{tg}\alpha_{at1} - \text{tg}\alpha_{at2} + (1-i) \cdot \text{tg}\alpha_{wt}] \} \quad (6)$$

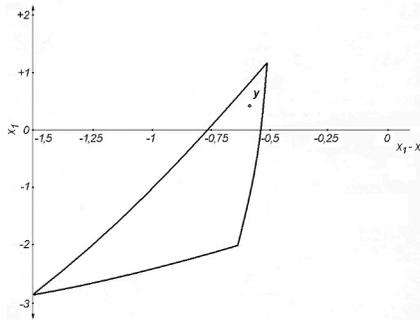
На фиг. 2. са показани зависимостите на приведения радиус на кривината ρ и на контактното напрежение σ_H в зависимост от положението на дадена точка от линията на зацепване, [6].



Фиг. 2. Изменение на приведения радиус на кривина и контактното напрежение по дължина на линията на зацепване

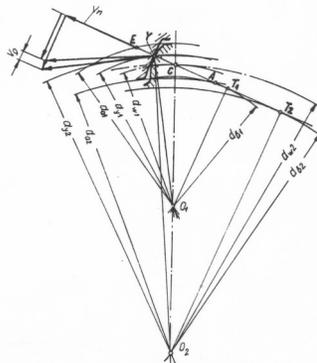
От фиг. 2 става ясно, че контактното напрежение за вътрешно зацепване е толкова по-малко, колкото по-отдалечена спрямо т. А е разглежданата точка от линията на зацепване. Най-голяма стойност контактното напрежение достига в т. В, когато в зацепване се намира една двойка зъби. При изчисляване на предавки с вътрешно зацепване и малка разлика в броя на зъбите, зацепването в повечето случаи е извънполюсно, т.е. т. С лежи извън активния участък АЕ от линията на зацепване. Получените контактни напрежения в полюса не могат да бъдат решаващи при оптимизирането по критерия контактна якост.

В изследването за определящ параметър се използва приведенният радиус на кривината в т.А, фиг.2, където този радиус има най-малка стойност. Резултатите от извършеното оптимизиране за зъбна двойка от колело с външни зъби ($z_1=78$) и зъбен венец с вътрешни зъби ($z_2=80$) с извънполюсно зацепване по критерия контактна якост са следните:



Фиг. 3. Геометрични граници за зъбна предавка с извънполюсно вътрешно зацепване: $z_1=78$ и $z_2=80$

- Най-висока стойност приведенният радиус на кривината в т.А достига при най-висока положителна стойност на коефициента на изместване на изходния контур x_1 и при най-ниска стойност на ъгъла на зацепване α_{wt} в рамките на блокиращия контур, т.е. точка Y, фиг. 3, с координати $x_1 = 0,4$; $x_1 - x_2 = -0,6$ и $\alpha_{wt} = 46^\circ$;

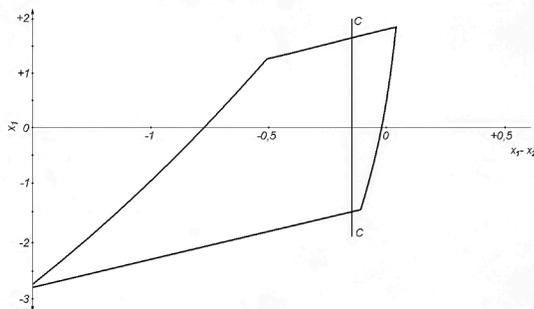


Фиг. 4. Скорост на плъзгане v_g в точка Y от вътрешното зацепване

- Както е известно, отрицателните стойности на плъзгането водят до интензивно образуване на питинг. В случаите, когато зацепването е извънполюсно в рамките на целия блокиращ контур, фиг.3, по страничната повърхност на вътрешните зъби възниква отрицателно плъзгане. Стойностите на плъзгането по абсолютна стойност са толкова по-големи, колкото повече т. С се отдалечава от т. А и от т. Е, фиг.4;

При зъбни двойки с вътрешно зацепване и разлика в броя на зъбите, по-голяма от 4, е възможно да се реализира полюсно зацепване. В рамките на блокиращия контур е ограничено полето с гарантирано полюсно зацепване, фиг.5, вдясно от правата С – С. Правата С – С е графично решение на уравнението:

$$(\operatorname{tg}\alpha_{wt})^2 = (1 / \cos\alpha_{at1})^2 - 1 \quad (7)$$



Фиг. 5. Геометрични граници за зъбна предавка с вътрешно зацепване: $z_1=72$ и $z_2=80$

Изменението на геометрията на зацепване влияе основно на относителното и специфично плъзгане, т.е. директно на коефициента на полезно действие в зацепването. Влиянието на геометрията на зацепване върху коефициента на триене е малко и се изразява главно чрез коефициента на припокриване. По-късият активен участък от линията на зацепване води до намаляване на загубите от триене за една двойка зъби, което отново насочва към избора на т.У от блокиращия контур, фиг.3.

ТРИБОЛОГИЧНИ ОСОБЕНОСТИ НА ТЕЖКОНАТОВАРЕНИ ЗЪБНИ ПРЕДАВКИ С ВЪТРЕШНО ЗАЦЕПВАНЕ

С изключение на полюса на зацепване, зъбните профили, намиращи се в зацепване, се движат относително един спрямо друг по целия активен участък от линията на зацепване. Плъзгането предизвиква загряване в смазочния слой, което се отразява върху височината и здравината му и оказва силно влияние върху големината на силите на триене в зацепването. Високата температура в зацепването зависи значително от коефициента на триене, който е функция на плъзгането.

Освен това, високите повърхностни температури на зъбните колела водят до отслабване на смазочния слой и до ново нарастване на триенето в зацепването. Този процес, основан на взаимната зависимост между триене и температура, води до износване при задиране, счупване на зъб и заклиняване.

При планетни и ексцентрикови предавки, осигуряващи големи предавателни числа, при които плъзгането в зацепването има голяма стойност, якостното изчисление по критериите якост на огъване и контактна якост не е достатъчно за гарантиране на нормална работа на този вид предавки. Необходимо е и топлинно

изчисляване на зацепването, тъй като е възможно при положителни резултати от изчисляването по двата якостни критерии зъбни предавки от този тип с геометрия на зацепването, съобразена със геометрични граници на вътрешното зацепване, да прегреят и да загубят функционалната си годност много по-рано от предварително предвидената според изчисленията трайност. Прецизирана методика за топлинно изчисляване на планетни и ексцентрикови предавки е описана подробно в [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеното изследване на трибологичните характеристики на предавки с вътрешно зацепване дава основание да се направят следните изводи:

1. Изборът на максимален коефициент на изместване на изходния контур на зъбното колело с външни зъби x_1 в рамките на блокиращия контур за зъбни предавки с вътрешно зацепване и малка разлика в броя на зъбите е най-целесъобразен от гледна точка на оптимизирането по критериите максимален коефициент на полезно действие и максимална контактна якост.

2. Изследването на зъбни предавки с вътрешно зацепване и малка разлика в броя на зъбите (от 2 до 8) дава възможност за бързо и точно определяне на оптималните коефициенти на изместване на изходния контур на дадена зъбна двойка по критериите максимален коефициент на полезно действие в зацепването и висока контактна якост. Препоръчва се използването на полюсно зацепване в случаите, когато е възможно неговото реализиране.

3. При планетни и ексцентрикови предавки, осигуряващи големи предавателни числа, е необходимо е да се извърши и топлинно изчисляване на зацепването.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Angelova, E., V. Ronkova, P. Nenov, Increasing Load Capacity of Cylindrical Gear by Optimizing Their Geometric Parameters, „INMATEH – Agricultural Engineering”, may-august, vol 31, №2/2010, National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed to Agriculture and Food Industry-INMA Bucharest, ISSN:2068-2239, ISSN:2068-4215, 40-46.

[2] Angelova, E., P. Nenov, B. Kaloyanov, V. Vyrbanov, Usage of 2D-Models for Optimization of the Gear Ratio of Cylindrical Reducers. Scientific conference ADEMS'09, Technical University Kluzh-Napoka, Rumania, 2009.

[3] Angelova A.E., Ronkova T.V., Tiufektchian M.A, Computer-Aided Design Of Involute Cylindrical Gear Drives For Portable Electric Tools, 2-nd International Scientific and Practical Conference “Technology, Materials, Transport and Logistics: Development Prospects” TMTL'11, 19-23.09.2011, Yalta (Crimea), Ukraine, The Scientific Journal №12(166)2011, ISSN 1998-7927, 14-18.

[4] DIN 3993. Geometrische Auslegung von Zylindrischen Innradpaaren mit Evolventenverzahnung, 1981.

[5] Dobreva, A., V. Dobrev: Improving the Tribological Characteristics of Heavy Loaded Gear Boxes. Proceedings of the First Balkan Conference on Tribology “Balkantrib'93”, Volume 2.3, Sofia, 1993, p. 166-170.

[6] Dobreva, A., V. Dobrev. Power Transmissions – Calculation Methods and Discussion.// Zbornik prednasok - 48 Medzinarodna konferencia katedier casti strojov a mehanizmov 2007, Slovenska technicka univerzita v Bratislaveq Slovakia, 2007, p.45-49.

За контакти:

Доц. д-р инж. Антоанета Иванова Добрева, Катедра „ММЕИГ”, РУ, тел: 00359 887 746 311, Е – mail: adobreva@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.