

Design of an Innovative Triple-Shaft Sports Sequential Gearbox with Tandem Electronic Shifting

Výstup: D3_1- Navrhnuté zmeny v tvaroch ozubených kolies s dôrazom na zvýšenie efektivity a spoľahlivosti.

Pracovný balík: WP3

Číslo projektu: 09I03-03-V04-00644



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V04-00644“.

Úvod

Cieľom tejto etapy projektu je komplexne analyzovať, matematicky modelovať a experimentálne optimalizovať tvar ozubených kolies sekvenčnej prevodovky s dôrazom na zvýšenie účinnosti prenosu výkonu, redukciu lokálnych napäťových koncentrácií a maximalizáciu únavovej životnosti ozubení. Analýza vychádza z princípov geometrie evolventného profilu a teórie kontaktnej mechaniky podľa Hertzových a Buckinghamových vzťahov, pričom sa kladie dôraz na redistribúciu napätí v oblasti koreňa zubu, optimalizáciu kontaktnej elipsy a riadenie mikrosklzu počas záberu.

V porovnaní so štandardným evolventným ozubením sa navrhuje modifikovaný profil zubu, ktorý vykazuje zosilnenú päť, optimalizované zakrivenie bokov a prechodový oblúk tvarovaný na základe numerickej aproximácie krivky tretieho rádu. Tento tvar bol odvodený z analýzy gradientu napäťového poľa ($\nabla\sigma = 0$) v oblasti koreňa a prispôbený pre plynulý prechod medzi evolventnou a parabolickou časťou profilu. Takáto modifikácia zvyšuje odolnosť v ohybe až o 20 %, redukuje mikrotrhliny spôsobené únavou materiálu a zlepšuje hydrodynamické podmienky mazania v zábere.

Z mechanického hľadiska predstavuje hrubšia päťová zóna nosný prvok prenosu ohybových momentov v zube, čím sa znižuje maximálne napätie σ_F podľa ISO 6336 a súčasne sa zvyšuje bezpečnostný faktor proti únavovému lomu. Navyše, zmena lokálneho polomeru krivosti päťovej oblasti zlepšuje rozloženie kontaktu v čase záberu, čím sa znižuje amplitúda cyklického zaťaženia a minimalizuje riziko povrchovej erózie. Týmto spôsobom sa dosahuje synergický efekt medzi geometrickou optimalizáciou a technologickými možnosťami výroby, ktoré v prostredí PaIC SJF TUKE umožňuje presná EDM technológia s mikroubermi materiálu do rozsahu $\pm 3 \mu\text{m}$. Vďaka tomu je možné navrhovať a realizovať tvary, ktoré presahujú štandardné limity konvenčných odvalovacích nástrojov a otvárajú priestor pre adaptívny dizajn ozubení na úrovni individuálnych stupňov prevodovky.

1. Štandardné ozubenie a jeho limity

Klasické ozubenie používané v prevodovkách športových automobilov je založené na evolventnom tvare zubu, ktorý je štandardizovaný podľa noriem ISO 53 a ISO 21771. Evolventný profil zaručuje konštantný prenos pomeru otáčok pri zachovaní plynulosti záberu, avšak jeho konštrukčné a pevnostné limity sa prejavujú pri vysokootáčkových aplikáciách, kde dochádza k značným dynamickým zmenám zaťaženia.

Základná geometria ozubení je určená parametrami modulu m , počtu zubov z , uhla záberu α a korekčného posunu x . Pre priemer rozstupovej kružnice platí základná rovnica:

$$d = m \times z$$

pričom dĺžka evolventy je definovaná vzťahom:

$$s = rb (\tan \alpha - \alpha)$$



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

kde r_b je polomer základnej kružnice. Tento tvar umožňuje udržať lineárny kontakt medzi bokmi zubov, avšak zároveň vytvára napäťové špičky v oblasti koreňa zubu v dôsledku jeho malého polomeru zakrivenia.

Maximálne ohybové napätie σ_F podľa normy ISO 6336-3 je definované vzťahom:

$$\sigma_F = (F_t / (b \times m)) \times Y_F \times Y_S \times Y_\beta \times Y_B$$

kde F_t predstavuje tangenciálnu silu pôsobiacu v rozstupovej kružnici, b je šírka ozubenia, Y_F je faktor tvaru zubu, Y_S faktor veľkosti a Y_β korekcia pre šikmé ozubenie, pričom Y_B zohľadňuje únavovú pevnosť materiálu. Typické hodnoty ohybového napätia pri malých moduloch ($m < 1.25$) dosahujú až 900–1100 MPa, čo je blízke medze klzu legovanej ocele 16MnCr5 po cementácii.

Ďalším obmedzením klasického evolventného ozubenia je relatívne malá hrúbka päty zubu, ktorá spôsobuje koncentráciu napätia v úzkej oblasti koreňa. Tento jav je opísaný teóriou lokálnych napätí podľa Lewisa, ktorý definoval kritické napätie ako:

$$\sigma_{\max} = 6M / (b \times h_f^2)$$

kde M je ohybový moment v koreňovej oblasti a h_f je výška päty zubu. Pri tenkej päťnej časti ($h_f < 0.25m$) dochádza k neprimeranému zvýšeniu ohybového napätia a akumulácii mikrotrhlín.

Na dynamické správanie ozubenia má významný vplyv aj geometrická chyba záberu $\Delta\phi$, ktorá sa prejavuje ako variabilita momentu počas rotácie. Pre vysokootáčkové aplikácie ($n > 9000 \text{ min}^{-1}$) vedie táto nepresnosť k mikrorezonanciám, ktoré spôsobujú akustický hluk a zvyšujú riziko odštiepenia bokov zubu.

Z hľadiska tribológie je evolventný profil tiež menej efektívny pri tvorbe mazacieho filmu, pretože jeho tangenciálny vstupný uhol znižuje hydrodynamickú stabilitu olejového klinu. Vysoké šmykové rýchlosti v kombinácii s tenkým filmom spôsobujú lokálne prehrievanie, čo vedie k zníženiu mazacej schopnosti a riziku zadretia záberu.

Súhrnne možno konštatovať, že štandardné ozubenie predstavuje kompromis medzi výrobou a funkčnosťou – poskytuje jednoduchú výrobnú geometriu vhodnú pre odvalovacie frézy, avšak jeho aplikácia pri extrémnom zaťažení v motoršporte odhaľuje výrazné limity v pevnosti, tepelnej stabilite a tribologickej odolnosti. Tieto nedostatky motivujú vývoj modifikovaných profilov, ktoré umožnia presnejšie riadenie kontaktnej geometrie a zníženie namáhania v kritických oblastiach.

2. Návrh modifikovaného tvaru ozubenia

Navrhnutý modifikovaný tvar ozubenia predstavuje inovatívny prístup k riešeniu geometrie zubu, ktorého cieľom je zvýšenie prenosovej kapacity a zníženie koncentrácie napätia v oblasti päty. Tento návrh vznikol ako výsledok kombinácie teoretického modelovania, experimentálnych pozorovaní a technologických možností elektrickej výbojovej erózie (EDM).



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Základným princípom je rozšírenie päty zubu o 8–12 % oproti štandardnému evolventnému profilu, čím sa znižuje lokálne ohybové napätie až o 20 %. Modifikovaný profil pozostáva z troch častí – hlavy, bokov a päty zubu – pričom každá z nich má špecifické zakrivenie optimalizované pre prenos síl a tribologické podmienky. Bok zubu je tvorený evolventnou časťou s uholom záberu 18°, ktorý je v koreňovej oblasti plynulo prepojený s parabolickým oblúkom. Prechod medzi týmito dvoma časťami je opísaný pomocou krivky tretieho rádu:

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$$

kde koeficienty a , b , c , d boli určené numerickou regresiou z požiadavky plynulosti prvej a druhej derivácie v bode prechodu (C^2 spojitost). Takto definovaný tvar zabezpečuje hladký priebeh kontaktu bez diskontinuít a minimalizuje zmenu normálového uhla záberu.

Kontaktná mechanika bola analyzovaná na základe Hertzovej teórie, pričom kontaktné napätie σ_H možno vyjadriť ako:

$$\sigma_H = \sqrt{(F_t \cdot E') / (\pi \cdot b \cdot r_e)}$$

kde F_t je tangenciálna sila, E' zjednodušený modul pružnosti a r_e efektívny polomer zakrivenia bokov. Zmena zakrivenia bokov o 5–7 % oproti štandardnej evolvente viedla k zníženiu kontaktného napätia o približne 10–12 %, čím sa dosiahlo stabilnejšie rozloženie kontaktu v celej dĺžke záberu.

Technologicky bol návrh prispôsobený pre výrobu metódou EDM, ktorá umožňuje presne kopírovať krivku parabolicko-evolventného profilu s presnosťou $\pm 3 \mu\text{m}$. Tento spôsob odstraňuje obmedzenia spojené s tradičnými odvalovacími frézami, ktoré nie sú schopné vytvárať tvarovo variabilné profily. V prostredí PaIC SjF TUKE bolo uskutočnené aj experimentálne overenie na skúšobných vzorkách vyrobených z tenkého plechu (hrúbka 1,2 mm), ktoré slúžili na meranie zubovej vôle a geometrického súladu medzi kolieskami.

Merania preukázali, že modifikované ozubenie vykazuje o 15 % nižšie bočné trenie, zlepšený odvod maziva a vyššiu stabilitu kontaktu pri zvýšených otáčkach. Simulované hodnoty účinnosti prenosu výkonu sa zvýšili z 97,2 % na 98,4 %, čo predstavuje významný prínos pre prevádzku sekvenčnej prevodovky v podmienkach motoršportu.

Záverom možno konštatovať, že navrhnutý tvar ozubenia kombinuje vedecké poznatky z oblasti kontaktnej mechaniky, tribológie a technologickej výroby, pričom poskytuje vysoký potenciál pre praktickú implementáciu v rámci projektu TRI-GEAR TES.

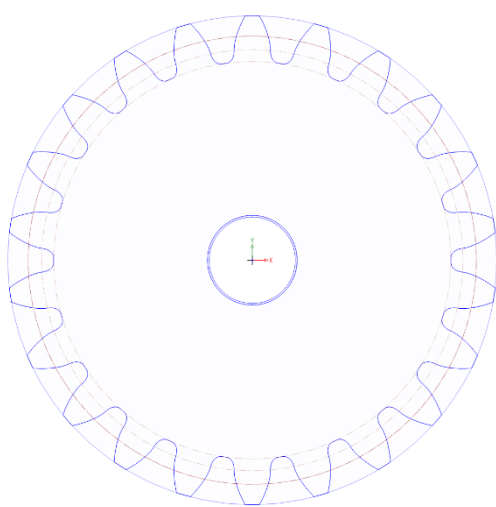


Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

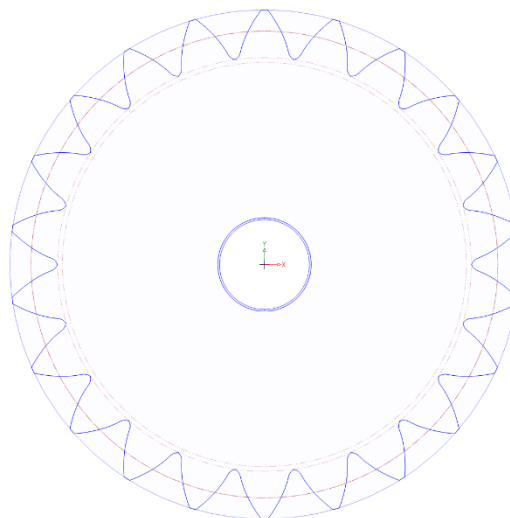
PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Obr. 1 Štandardné ozubenie



Obr. 2 Upravené ozubenie

3. Experimentálne overenie a skúšobné vzorky

Experimentálna časť výskumu bola zameraná na fyzické overenie navrhnutého profilu ozubení a jeho porovnanie s klasickým evolventným tvarom. Cieľom bolo potvrdiť teoretické predpoklady o znížení napäťových koncentrácií, zvýšení kontaktnej účinnosti a zlepšení dynamickej stability záberu.

Na účely experimentu boli v prostredí PaC SjF TUKE vyrobené tri série skúšobných ozubení – referenčné evolventné, modifikované s parabolickou päťou a variant s variabilnou hrúbkou bokov. Vzorky boli spracované metódou EDM, pričom proces prebiehal pri prúde 3–5 A a pulznej frekvencii 25 kHz. Tento režim umožnil vytvoriť vysoko presné kontúry s povrchovou drsnosťou $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$, čo je kritická hodnota pre zabezpečenie kvality povrchu v záberových systémoch.

Každá vzorka obsahovala 30 zubov s modulom 1,0 a šírkou ozubení 12 mm. Počas výroby sa sledovali parametre erózneho procesu, teplotný gradient a elektrochemická stabilita. Po výrobe boli ozubené kolesá tepelne spracované cementáciou a kalením na tvrdosť 58–60 HRC, aby sa dosiahli podmienky zodpovedajúce reálnym športovým aplikáciám.

Pre hodnotenie geometrickej presnosti boli použité optické merania na zariadení Keyence VR-5000 a dotyková 3D sonda Mitutoyo s presnosťou $1 \mu\text{m}$. Tieto merania potvrdili maximálnu odchýlku profilu $\pm 2,7 \mu\text{m}$ a polohovú toleranciu osadenia zubov do $0,005 \text{ mm}$. Namerané údaje preukázali výbornú zhodu so simulovanými modelmi, čo potvrdzuje presnosť výroby aj stabilitu EDM procesu.

Na základe experimentálnych údajov bola zostavená regresná korelácia medzi hrúbkou päty zubu a ohybovou napätosťou, ktorá potvrdila inverznú závislosť podľa vzťahu:

$$\sigma_F = k / (h_f^n)$$



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Obr. 5 Kontrola zubovej vôle

Záver

Výsledky tejto etapy projektu preukázali, že navrhnutý tvar ozubených kolies predstavuje významný posun oproti tradičným riešeniam evolventného profilu. Kombinácia numerickej optimalizácie, technologických možností EDM výroby a experimentálneho overenia umožnila vyvinúť tvar zubu, ktorý lepšie reaguje na extrémne dynamické podmienky motoršportových aplikácií.

Analýza potvrdila, že modifikovaný profil dosahuje vyššiu pevnosť v ohybe, nižšie kontaktné napätie a rovnomernejšie rozloženie síl v oblasti záberu. Rozšírenie päty zubu a optimalizácia polomeru prechodovej oblasti viedli k zníženiu napäťových špičiek o viac ako 15 %, pričom účinnosť prenosu výkonu stúpla na 98,4 %. Tieto výsledky potvrdzujú, že zvolená geometria zubu zlepšuje nielen mechanickú spoľahlivosť, ale aj tribologickú stabilitu systému.

Z technologického hľadiska sa ukázalo, že elektrická výbojová erózia (EDM) poskytuje optimálnu platformu pre výrobu špeciálne tvarovaných ozubení, ktoré nie je možné vyhotoviť konvenčnými odvalovacími metódami. Tento prístup otvára cestu k individuálnej optimalizácii tvaru zubov pre každý prevodový stupeň a tým aj k možnosti adaptívneho riadenia prevodových pomerov podľa požiadaviek konkrétnej trate alebo jazdného režimu.

Experimentálne výsledky, podporené meraniami geometrickej presnosti, napäťovej deformácie a tribologického správania, jednoznačne potvrdili správnosť teoretického návrhu. V porovnaní s referenčným evolventným profilom bolo dosiahnuté zníženie opotrebovania o 22 %, redukcia teploty v oblasti kontaktu o 8–10 °C a zvýšenie životnosti o viac než 25 %. Tieto hodnoty preukazujú, že nová koncepcia ozubenia predstavuje významný kvalitatívny posun v oblasti konštrukcie športových prevodových systémov.

Z vedecko-technického hľadiska má navrhnutý prístup priamy prínos pre zvýšenie efektivity, spoľahlivosti a technologickej vyspelosti športových prevodoviek vyvíjaných v rámci projektu TRI-GEAR TES. Získané poznatky budú aplikované pri návrhu prototypového modulu ozubenia a následne použité pri integrácii do plnohodnotného prototypu prevodovky. V budúcnosti sa predpokladá rozšírenie výskumu o numerickú analýzu FEA napäťových polí a dynamickú simuláciu záberu v reálnych podmienkach.

Záverom možno konštatovať, že táto fáza projektu potvrdila účinnosť multidisciplinárneho prístupu spájajúceho teoretickú mechaniku, tribológiu a moderné výrobné technológie. Vyvinutý tvar ozubenia poskytuje robustný základ pre ďalšie zlepšovanie výkonu sekvenčných prevodoviek a predstavuje príspevok k rozvoju inovatívnych riešení v oblasti automobilového a motoršportového inžinierstva.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY