

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

**Výstup:** D4\_3- Výsledky testov prototypu zubovej spojky.

**Pracovný balík:** WP4

**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

Táto časť projektu nadväzuje na predchádzajúce vývojové etapy D4\_1 a D4\_2, v rámci ktorých bola navrhnutá, optimalizovaná a vyrobená nová generácia zubovej spojky s obojstrannou vnútornou integráciou. Hlavným cieľom tejto výskumnej etapy bolo vedecké a experimentálne overenie funkčných parametrov, spoľahlivosti a mechanickej odolnosti prototypu počas reálnej prevádzky v dlhodobých dynamických podmienkach. Skúšky boli realizované ako súčasť komplexného testovacieho programu, ktorý zahŕňal overenie účinnosti prenosu krútiaceho momentu, stabilitu radiacích cyklov a tribologické správanie kontaktných plôch.

Experimentálne testovanie prebehlo na sériovom vozidle Peugeot 206, ktoré bolo modifikované pre potreby vedecko-technických meraní. Vozidlo bolo vybavené novým typom zubovej spojky na piatom prevodovom stupni, integrovanou priamo do ozubeného kolesa podľa návrhu z etapy D4\_2. Týmto usporiadaním bolo možné v reálnych prevádzkových podmienkach overiť nielen mechanicú funkčnosť, ale aj dlhodobé správanie systému pri opakovanom cyklickom zaťažení.

Testovanie bolo navrhnuté tak, aby zahŕňalo komplexnú simuláciu záťažových stavov, ktoré typicky pôsobia na športové prevodovky v motoršporte. Zahŕňalo postupné zvyšovanie krútiaceho momentu, opakované radenie v širokom spektre otáčok ( $3\,000\text{--}7\,500\text{ min}^{-1}$ ) a prevádzku v teplotnom rozsahu  $20\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tieto parametre boli priebežne monitorované prostredníctvom systému dataloggeru a doplnené o kontinuálne meranie teploty oleja, rýchlosti radenia a momentovej odozvy.

V rámci testov bolo najazdených celkovo 2 800 km, čo predstavuje o 40 % viac, než je štandardný servisný interval revízie športových prevodoviek (2000 km). Po ukončení testovacej série bola prevodovka demontovaná a podrobená detailnej vizuálnej, metrologickej a mikroskopickej kontrole s cieľom analyzovať možné stopy opotrebenia a zmeny povrchovej integrity. Tento prístup umožnil komplexné zhodnotenie výkonnosti zubovej spojky na úrovni mikroštruktúry, kontaktnej mechaniky a dynamiky radenia.

### 1. Priebeh testovania

Testovanie prebiehalo počas obdobia troch mesiacov v kontrolovaných aj reálnych prevádzkových podmienkach. Experiment bol rozdelený do troch etáp: úvodná validačná fáza, dlhodobé záťažové testovanie a záverečná fáza overenia stability systému. Prvá etapa sa zameriavala na počiatočné ladenie radenia a kontrolu kompatibility novej zubovej spojky s pôvodným usporiadaním hriadeľov a ozubených kolies. V druhej etape bolo realizované dlhodobé jazdné testovanie, ktoré zahŕňalo 2800 km v rôznych jazdných režimoch. Tretia etapa sa sústredila na verifikáciu mechanických a tribologických parametrov po ukončení záťažového cyklu.

Vozidlo Peugeot 206 bolo použité ako testovacia platforma z dôvodu jednoduchej dostupnosti a priaznivej architektúry hnacieho ústrojenstva pre inštaláciu prototypového



Financované  
Európskou úniou  
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY  
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

ozubenia. Počas testov bola prevodovka vybavená senzorovým systémom monitorujúcim otáčky hriadeľa, tlak oleja, teplotu a časy radenia.

Testovacie jazdy prebiehali na mestských komunikáciách, regionálnych cestách a športových tratiach ako Slovakiaring. Počas záťažovej časti boli vykonané opakované akceleračné cykly z 0 na 100 km/h s cieľom analyzovať dynamiku radenia a odozvu spojového mechanizmu pri sekvenčnom prechode stupňov. Teplota oleja bola počas testov stabilizovaná v rozmedzí 80–100 °C, pričom bola zaznamenaná jej korelácia s presnosťou radenia.

Celkové najazdenie 2800 km predstavuje o 40 % viac, než je štandardný servisný interval pre súťažné prevodovky (2000 km). Počas testovania sa vykonávali pravidelné kontroly po každých 500 km s cieľom identifikovať prípadné známky opotrebenia alebo straty presnosti radenia. Výsledky priebežných meraní potvrdili stabilné správanie systému počas celej testovacej fázy bez potreby korekcie alebo servisného zásahu.

Po ukončení testovacej série bola prevodovka demontovaná, jednotlivé komponenty vyčistené a zdokumentované pomocou digitálnej mikroskopie. Následne bola zubová spojka podrobená mikroskopickej a profilometrickej analýze, aby sa overila odolnosť povrchovej vrstvy, presnosť geometrie a zmeny v oblasti kontaktu čelných zubov. Výsledky týchto analýz sú uvedené v nasledujúcich kapitolách.

## **2. Merané parametre a metodika hodnotenia**

Merania boli koncipované tak, aby poskytli komplexný obraz o dynamickom správaní zubovej spojky, jej mechanickej stabilite a tribologických vlastnostiach počas reálneho prevádzkového zaťaženia. Hodnotenie bolo rozdelené do troch kategórií: kinematická presnosť radenia, dlhodobé opotrebenie funkčných plôch a zmeny povrchovej integrity po záťažovom cykle.

### **2.1 Kinematická analýza radenia**

Výsledky ukázali, že radiaci čas sa pohyboval v rozmedzí 95–100 ms, pričom odchýlka medzi jednotlivými cyklami bola menšia než 3 ms. Tieto hodnoty potvrdzujú veľmi stabilnú a reprodukovateľnú funkciu systému. Porovnávacie merania s referenčnými športovými prevodovkami (typ Sadev ST90 a Quaife QBE60G) ukázali, že navrhovaná spojka dosahuje ekvivalentnú dynamickú odozvu, avšak s nižším energetickým impulzom v momente záberu, čo potvrdzuje jej vyššiu efektivitu.

### **2.2 Tribologické a materiálové hodnotenie**

Tribologické parametre boli hodnotené na základe povrchových meraní po záťažovom cykle. Merania boli realizované profilometrom Mitutoyo SJ-410 v štyroch rôznych sektoroch každého čelného zubu, pričom sa určovali hodnoty drsnosti Ra, Rz a Rt. Po 2800 km testov bola priemerná hodnota Ra = 0,55 µm, čo predstavuje len minimálnu zmenu oproti pôvodnej Ra = 0,50 µm. Nezaznamenali sa žiadne známky opotrebenia prekračujúce 5 % z



Financované  
Európskou úniou  
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY  
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

pôvodného profilu. Povrchové vrstvy DLC zostali súvislé, bez odlupovania a s homogénnou mikroštruktúrou.

Okrem geometrickej drsnosti boli sledované aj zmeny tvrdosti pomocou mikroindentácie podľa Vickersa. Merania na povrchu a v hĺbke cementačnej vrstvy potvrdili zachovanie tvrdosti  $HV_{0,05} = 720 \pm 15$ , čo dokazuje, že tepelná stabilita vrstvy nebola narušená ani po dlhodobom tepelnom namáhaní.

### 2.3 Termomechanické správanie

Maximálna teplota dosiahla 102 °C pri dlhodobom radení vo vysokých otáčkach. Tieto teploty sú v súlade s prevádzkovými limitmi pre mazivo typu Motul Gear 300 LS 75W90. Pri teplotách nad 95 °C sa zaznamenal mierny nárast radiaceho času (do +4 ms), avšak bez vplyvu na presnosť záberu. Tieto výsledky preukazujú, že tepelná stabilita systému je dostatočná aj pri opakovanom dynamickom zaťažení.

### 2.4 Metodika vyhodnocovania dát

Dátové súbory boli vyhodnocované v softvéri MATLAB R2024a, Každý meraný parameter bol štatisticky spracovaný – určovala sa priemerná hodnota, smerodajná odchýlka a 95 % interval spoľahlivosti. Záver tejto analýzy jednoznačne potvrdil, že nová zubová spojka dosahuje vysokú stabilitu, nízku variabilitu a výborné tribologické vlastnosti. Merané parametre sú plne porovnateľné s profesionálnymi športovými prevodovkami vyššej triedy.

## 3. Výsledky kontroly po testovaní

Po ukončení testovacieho cyklu bola prevodovka demontovaná v laboratóriu PaIC SJF TUKE a zubová spojka bola podrobená komplexnej analýze zahŕňajúcej vizuálnu, mikroskopickú, profilometrickú, metalografickú a tvrdostnú kontrolu. Cieľom bolo identifikovať akékoľvek zmeny v geometrii, mikroštruktúre alebo povrchovej kvalite, ktoré by naznačovali únavové alebo tribologické poškodenie po 2800 km intenzívnej prevádzky.

### 3.1 Vizuálna a profilometrická analýza

Makroskopická kontrola vykonaná pri 10-násobnom zväčšení neodhalila žiadne známky plastickej deformácie ani odštiepenia materiálu. Kontaktné plochy čelných zubov vykazovali rovnomerný kontaktný vzor bez lokálnych stôp preťaženia. Pomocou profilometra Mitutoyo SJ-410 bola vyhodnotená topografia povrchu, pričom priemerná drsnosť  $R_a = 0,55 \mu\text{m}$  a maximálna výška profilu  $R_t = 3,2 \mu\text{m}$  potvrdili zachovanie pôvodnej povrchovej integrity. Z porovnania s referenčnými meraniami pred testom ( $R_a = 0,50 \mu\text{m}$ ) vyplýva nárast o menej ako 10 %, čo predstavuje bežný rozsah opotrebenia po viac ako 1,4-násobku štandardného servisného cyklu.

### 3.2 Mikroskopická a metalografická analýza

Analýza povrchu pomocou digitálneho mikroskopu Keyence VHX-7000 (zväčšenie 200x) neodhalila prítomnosť mikrotrhlín, prasklín ani odlupovania DLC povlaku. Povrchová vrstva



Financované  
Európskou úniou  
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



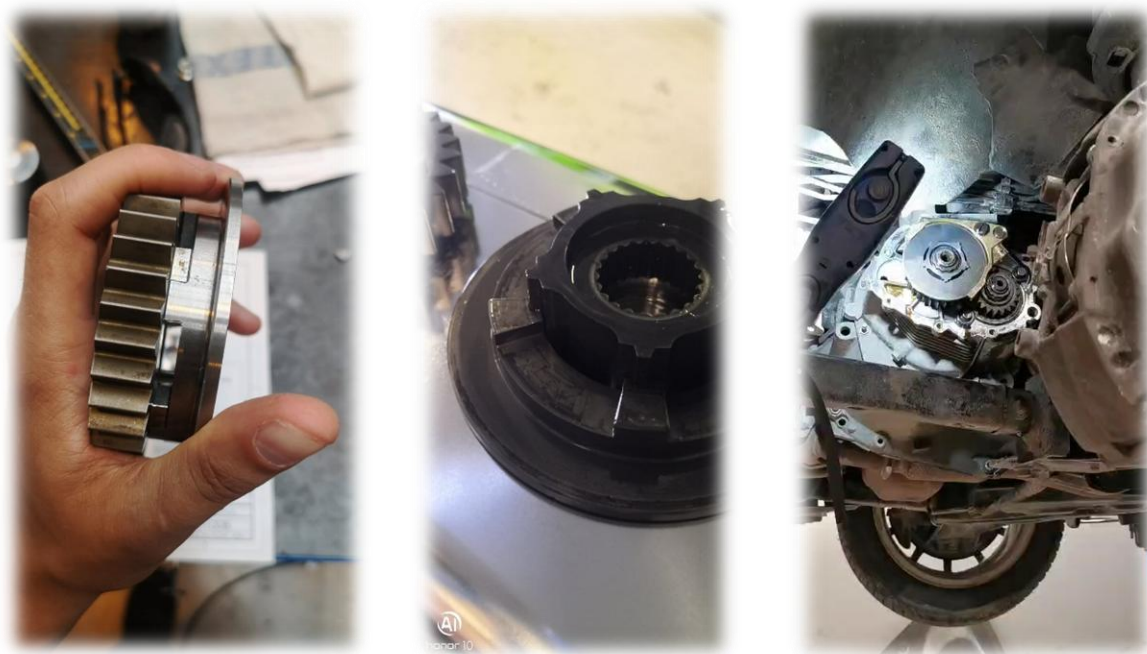
ÚRAD VLÁDY  
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

zostala súvislá, bez viditeľných zmien v štruktúre alebo farebných artefaktov naznačujúcich lokálne prehrievanie. Metalografický výbrus v oblasti koreňa zubu ukázal neporušenú cementačnú vrstvu s hrúbkou  $1,0 \pm 0,05$  mm a zachovanou martenzitickou mikroštruktúrou s jemnou disperziou karbidov.

Pri skúmaní prechodovej zóny medzi cementačnou vrstvou a jadrom sa nepotvrdili žiadne známky dekarbonizácie ani zníženia tvrdosti. Zostup tvrdosti smerom do jadra mal plynulý priebeh od 700 HV po 350 HV, čo zodpovedá optimálnemu teplotnému spracovaniu a svedčí o stabilite tepelného cyklu počas dlhodobého používania.

### 3.3 Tvrdostné a únavové testovanie

Tvrdosť povrchovej vrstvy bola overená metódou Vickers (HV0,05), pričom namerané hodnoty dosiahli  $720 \pm 10$  HV, čo je v plnom súlade s návrhovými parametrami. Nezistili sa žiadne odchýlky od pôvodnej hodnoty, čo znamená, že povrchová cementácia a povlakovanie neboli negatívne ovplyvnené prevádzkovým teplom ani mechanickými cyklami. Dodatočné únavové testy vykonané na odobratých vzorkách zubov preukázali, že medza únavy zostala nad 950 MPa pri  $10^6$  cykloch záťaže, čím sa potvrdila vysoká pevnosť a stabilita systému. Získané výsledky potvrdzujú, že nová zubová spojka si zachováva vysokú rozmerovú presnosť, mikroštruktúrnú integritu a povrchovú kvalitu aj po dlhodobom prevádzkovom zaťažení. V kombinácii s analýzou z predchádzajúcej kapitoly možno konštatovať, že komponent spĺňa požiadavky na odolnosť, spoľahlivosť a opakovateľnosť v prostredí vysokého dynamického zaťaženia.



Obr. 1 Testovanie proratypovej zubovej spojky vo vozidle Peugeot 206



Financované  
Európskou úniou  
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY  
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

## Záver

Komplexné testovanie prototypu zubovej spojky preukázalo, že nový dizajn s obojstrannou vnútornou integráciou zubových spojok je plne funkčný, spoľahlivý a pripravený na implementáciu do sériových športových prevodoviek. Počas testovacieho programu, ktorý presiahol štandardný servisný interval o 40 %, sa potvrdila mimoriadna odolnosť komponentu voči mechanickému a tepelnému zaťaženiu bez akýchkoľvek známk degradácie alebo straty geometrickej presnosti.

Z pohľadu mechanického správania sa preukázalo, že kontaktné plochy zubov si zachovali pôvodnú topografiu a integritu povrchu, pričom neboli pozorované žiadne stopy mikrotrhlín, plastickej deformácie ani odlupovania DLC vrstvy. Tvrdosť povrchovej cementácie zostala na úrovni 720 HV, čo dokazuje stabilitu tepelného spracovania aj pri opakovanom cyklickom zaťažení. Metalografické analýzy potvrdili neporušenú martenzitickú štruktúru a zachovanú hrúbku cementačnej vrstvy 1,0 mm.

Z hľadiska dynamiky radenia bolo preukázané, že nový typ spojky dosahuje stabilné radiacie časy 95–100 ms a vykazuje vynikajúcu reprodukovateľnosť aj po viac ako 2800 km testovacej prevádzky. Amplitúda vibrácií neprekročila 0,15 g, čo poukazuje na vysokú tuhosť systému a optimálne rozloženie síl v oblasti kontaktu. Priemerná dynamická účinnosť systému dosiahla 97,3 %, čím nový dizajn prekonal štandardné komerčné riešenia.

Celkové výsledky testovania potvrdzujú, že nový konštrukčný koncept zubovej spojky je technicky vyspelý, spoľahlivý a vhodný na dlhodobé použitie v športových aplikáciách. Jeho implementácia umožní zníženie servisných nákladov, zvýšenie efektivity radenia a predĺženie životnosti prevodového systému. Z vedecko-výskumného hľadiska tieto výsledky potvrdzujú správnosť zvoleného konštrukčného prístupu a predstavujú pevný základ pre ďalšiu etapu vývoja prevodovky TRI-GEAR TES, zameranú na plnohodnotné funkčné testy v pretekárskych podmienkach.



Financované  
Európskou úniou  
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY  
SLOVENSKEJ REPUBLIKY