

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

Výstup: D2_3- Zhodnotenie a odporúčania na základe konceptuálneho návrhu.

Pracovný balík: WP2

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 etapa projektu predstavuje syntetickú analýzu výsledkov koncepčného návrhu trojhriadeľovej sekvenčnej prevodovky s tandemovým radením, ktorá bola rozpracovaná v rámci výstupu D2_2. Dokument predstavuje komplexné technické zhodnotenie a tvorí kľúčový medzičlánok medzi fázou koncepčného návrhu a nadväzujúcimi detailnými fázami vývoja. Hlavným cieľom je nielen zhodnotenie dosiahnutých výsledkov, ale aj podrobné vyhodnotenie ich dopadu na ďalší výskum, optimalizáciu a aplikáciu v motoršporte.

Analýza zahŕňa hodnotenie technickej, funkčnej a výrobnéj uskutočniteľnosti navrhovaných riešení, pričom sa osobitná pozornosť venuje mechanickým vlastnostiam, dynamike radenia, tuhosti systému, mazaniu a tepelnej stabilite. Okrem čisto technických parametrov sa dokument zaoberá aj aspektmi praktickej implementácie, servisovateľnosti a dlhodobej prevádzkovej spoľahlivosti. V tejto fáze sa preto kladie dôraz na identifikáciu kľúčových predností a potenciálnych obmedzení navrhovaného riešenia, pričom cieľom je definovať jasné odporúčania pre jeho budúci vývoj a aplikáciu.

Základným východiskom hodnotenia je porovnanie dosiahnutých výsledkov konceptu s pôvodne stanovenými cieľmi projektu TRI-GEAR TES, ktoré boli definované ako kvantifikovateľné ukazovatele výkonnosti. Tie zahŕňajú skrátenie dĺžky prevodovky o minimálne 20 %, zvýšenie tuhosti o 10 % a zníženie hmotnosti o 8–12 % bez zníženia prenosovej kapacity, ako aj zlepšenie dynamiky radenia o minimálne 25 %. Súčasťou hodnotenia je aj posúdenie možnosti technologickej výroby a ekonomickej realizovateľnosti prototypu, zohľadňujúcej súčasné výrobné kapacity partnerských pracovísk. Zároveň sa analyzuje implementačný potenciál konceptu v reálnych motoršportových podmienkach, s prihliadnutím na náročnosť údržby, dostupnosť komponentov a dlhodobú prevádzkovú spoľahlivosť systému.

1. Technické zhodnotenie konceptu

Koncepčný návrh preukázal vysoký potenciál z hľadiska mechanickej stability, prenosovej účinnosti a technologickej realizovateľnosti. Trojhriadeľová architektúra s tandemovým radením vytvára rovnováhu medzi kompaktnosťou a výkonnosťou, pričom sa výrazne znižujú torzné deformácie a priehyby hriadeľov. Mechanická štruktúra prevodovky bola analyzovaná z hľadiska rozloženia napätí, tuhosti a hmotnostnej rovnováhy, čo umožnilo potvrdiť, že navrhnutá geometria prináša približne 30 % zlepšenie v pomere tuhosti ku hmotnosti.

Z hľadiska štrukturálnej tuhosti bolo potvrdené, že skrinka prevodovky s vystuženým rebrovaním a integrovanými nosnými prvkami poskytuje podstatne vyššiu odolnosť voči torznému a ohybovému namáhaniu. V porovnaní s pôvodným referenčným modelom sa znížili lokálne deformácie v oblasti uloženia ložísk o 14 % a zároveň sa dosiahla vyššia presnosť záberu ozubenia. Tuhosť medzi osami hriadeľov sa zvýšila o približne 12 %, čo prispieva k stabilnejšiemu chodu pri vysokých otáčkach. Tieto výsledky potvrdzujú, že



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

konštrukcia dokáže prenášať výkon až do 320 Nm bez prejavov deformácie, ktoré by ovplyvňovali presnosť radenia.

Kompaktné usporiadanie hriadeľov v preložených rovinách umožňuje nielen skrátenie celkovej dĺžky prevodovky o približne 28 %, ale aj zlepšenie dynamickej rovnováhy systému. Menšia vzdialenosť medzi jednotlivými hriadeľmi prináša nižšiu zotrvačnosť pohybujúcich sa častí, čo má pozitívny dopad na rýchlosť reakcie prevodovky pri radení. Takto navrhnutá štruktúra zároveň znižuje zaťaženie ložísk a zvyšuje životnosť ozubených kolies o približne 10–15 %.

Významným prínosom nového konceptu je aj vyššia účinnosť mazania a tepelného manažmentu. Spoločný olejový okruh zabezpečuje rovnomerné rozdelenie maziva medzi všetky ložiskové a záberové miesta, čím sa znižuje riziko lokálneho prehrievania. Vďaka optimalizovanému tvaru vnútorných kanálov dochádza k lepšiemu prúdeniu oleja a k účinnejšiemu odvodu tepla, čo je rozhodujúce pri prevádzke v prostredí s vysokou záťažou, typickom pre motoršport.

Z konštrukčného hľadiska sa potvrdilo, že modulárna architektúra s dvojdielnym telesom umožňuje jednoduchú montáž, servis a výmenu jednotlivých komponentov. Systém prírubového spojenia oboch častí prevodovky poskytuje opakovateľnú presnosť montáže a umožňuje rýchle zásahy pri údržbe. V prípade potreby výmeny ozubených kolies, ložísk či tesnení nie je nutné rozoberať celé teleso – prístup k jednotlivým komponentom je riešený segmentovo. Tento prístup prináša úsporu servisného času až o 35 % v porovnaní s tradičnými koncepciami.

Technické hodnotenie tak potvrdzuje, že trojhriadeľová prevodovka s tandemovým radením predstavuje robustný, technologicky realizovateľný a výkonnostne vyvážený systém. Jej konštrukčné riešenie vytvára optimálny základ pre ďalšie detailné vývojové práce zamerané na ozubenie, zubové spojky a radiace mechanizmy.

2. Funkčné zhodnotenie a dynamické správanie

Z funkčného hľadiska preukázala trojhriadeľová koncepcia s tandemovým radením výrazné zlepšenie v oblasti plynulosti, presnosti a rýchlosti radenia, ako aj celkovej dynamickej odozvy systému. Tandemové radenie umožňuje zaradenie nasledujúceho prevodového stupňa počas prenosu výkonu, čím sa eliminuje tradičné časové oneskorenie medzi prerušeniami krútiaceho momentu. Tento princíp, ktorý je v motoršporte využívaný iba pri vysoko výkonných systémoch, umožňuje redukciu času preradenia až o 30–35 % v porovnaní s konvenčnými sekvenčnými prevodovkami.

Dynamické správanie systému bolo hodnotené z pohľadu vyváženosti otáčok hriadeľov, zotrvačností jednotlivých komponentov a reakčného času radiaceho mechanizmu. Optimalizácia rozloženia hmotnosti ozubených kolies a hriadeľov prispela k výraznému zníženiu torzných vibrácií, ktoré boli v predchádzajúcich modeloch zdrojom opotrebovania zubových spojok. Vyváženejšie rozloženie zotrvačných síl znižuje dynamické špičky v



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

prenose výkonu, čím sa predlžuje životnosť spojky a znižujú riziká mikropoškodení povrchov zubov.

Kľúčovou prednosťou je tiež stabilita radenia pri vysokých otáčkach. Vďaka optimalizovanému usporiadaniu hriadeľov a zníženiu priehybov sa zlepšila presnosť zaradenia stupňov aj pri rýchlostiach nad 9000 rpm. Radiace valce, navrhnuté v tandeme, zaručujú okamžitú reakciu bez potreby návratu do neutrálnej polohy. Takéto riešenie znižuje nielen časy radenia, ale aj energetické straty a opotrebovanie zubových spojok.

Dôležitou súčasťou hodnotenia bola aj analýza kompatibility systému s budúcou integráciou elektronickej radiacej jednotky (GCU). Geometria radiacích valcov a ich lineárna konfigurácia vytvárajú vhodné podmienky pre priamu integráciu elektronických aktuátorov bez zásadných zásahov do mechanickej konštrukcie. Tento prístup otvára cestu k plne automatizovanému radeniu a znižuje potrebu vodičského zásahu pri prechode stupňov, čím sa zlepšuje konzistentnosť výkonu vozidla.

Funkčné testy prototypovej simulácie radenia v mechanickej zostave potvrdili hladký prechod medzi jednotlivými stupňami bez trhnutí či oneskorení. Prenos krútiaceho momentu je plynulý a stabilný, pričom tandemový mechanizmus umožňuje predprípravu nasledujúceho stupňa ešte pred dokončením predchádzajúceho radenia. Tento princíp eliminuje „mŕtve zóny“ v prenose výkonu, čo vedie k lepšiemu zrýchleniu a zníženiu časových strát v pretekárskych podmienkach.

Z hľadiska celkového dynamického správania možno konštatovať, že nový koncept dosahuje výrazne vyššiu úroveň plynulosti a presnosti. Zlepšenie riadenia radenia o približne 30 % a zníženie vibrácií o 15–20 % oproti referenčnej koncepcii sú kľúčovými ukazovateľmi, ktoré potvrdzujú správnosť zvoleného prístupu. Okrem toho tandemové radenie umožňuje aj potenciálnu adaptáciu pre viacstupňové elektronicky riadené systémy, čo rozširuje možnosti aplikácie tejto technológie v rôznych segmentoch motoršportu.

3. Výrobno-technologická uskutočniteľnosť

Z pohľadu výroby a technologického spracovania bol navrhnutý koncept vyhodnotený ako plne realizovateľný s využitím moderných obrábacích a montážnych procesov. Navrhovaná prevodovka je konštrukčne prispôsobená pre CNC výrobu komponentov s vysokou presnosťou a zároveň umožňuje flexibilitu pri výbere dodávateľských reťazcov. Všetky hlavné komponenty – hriadele, ozubená, puzdrá, ložiskové sedlá a teleso prevodovky – je možné vyrobiť štandardnými metódami čelného a viacosového obrábania s následným tepelným spracovaním a brúsením funkčných plôch.

Hriadele z legovanej ocele 42CrMo4+QT poskytujú optimálny pomer medzi pevnosťou a húževnatosťou, pričom umožňujú precízne opracovanie drážkových spojov. Ozubené kolesá vyrobené z cementačnej ocele 16MnCr5 sú vhodné pre procesy karbonitridácie a kalenia, ktoré zvyšujú ich povrchovú tvrdosť a odolnosť proti únave materiálu. V rámci technologického hodnotenia bolo potvrdené, že všetky výrobné procesy sú dostupné v



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

rámci priemyselného partnera a nevyžadujú špeciálne zariadenia nad rámec bežnej strojárkej praxe.

Teleso prevodovky, navrhnuté z hliníkovej zliatiny EN AW-7075, predstavuje kompromis medzi nízkou hmotnosťou a vysokou pevnosťou. Táto zliatina je vhodná na eloxovanie a poskytuje veľmi dobrú obrobitelnosť, čím je možné dosiahnuť tolerancie do $\pm 0,01$ mm. Okrem tradičného frézovania sa odporúča využitie 5-osových obrábacích centier, ktoré umožňujú vytvárať komplexné geometrie rebrovania, mazacích kanálov a montážnych otvorov v jednom výrobnom cykle. Pre povrchovú ochranu ocelových častí sa odporúča fosfátovanie, zatiaľ čo hliníkové časti môžu byť povrchovo upravené tvrdým eloxom pre zvýšenie odolnosti voči opotrebovaniu a korózii.

Významnou výhodou je modularita návrhu. Prevodovka pozostáva z dvoch hlavných sekcií – primárnej a sekundárnej – ktoré sú spojené prírubovým spojom so zosilnenou tesniacou plochou. Tento prístup zjednodušuje výrobu, zlepšuje kontrolu kvality a umožňuje paralelné spracovanie komponentov vo viacerých výrobných linkách. Modularita zvyšuje aj servisovateľnosť, pretože jednotlivé časti môžu byť samostatne demontované a repasované bez zásahu do celej zostavy. Takýto prístup významne skracuje montážny čas a znižuje pravdepodobnosť chýb počas kompletizácie.

V rámci hodnotenia technologickej uskutočniteľnosti bola venovaná pozornosť aj ekonomickému aspektu. Náklady na výrobu navrhutej prevodovky sú približne o 12–15 % vyššie ako pri konvenčnej dvojhriadeľovej koncepcii, avšak tieto náklady sú kompenzované výrazne vyššou životnosťou, spoľahlivosťou a znížením potreby údržby. V prípade sériovej produkcie je možné očakávať postupné znižovanie jednotkových nákladov o 8–10 % v dôsledku optimalizácie výrobného procesu a zdieľania nástrojov medzi viacerými projektmi.

Z technologického hľadiska sa odporúča pripraviť návrh aj pre budúce využitie aditívnych technológií, najmä pre vytváranie odľahčených segmentov telesa, kanálov pre vnútorné mazanie a montážnych držiakov. Kombinácia aditívnej a subtraktívnej výroby poskytne priestor pre ďalšiu redukciu hmotnosti a umožní experimentálne testovanie špeciálnych tvarov rebrovania a vetrania. Takéto prístupy majú potenciál priniesť úsporu hmotnosti 5–7 % bez kompromisov v pevnosti a tuhosti systému.

Výrobno-technologické zhodnotenie teda potvrdzuje, že navrhnutý koncept je nielen uskutočniteľný, ale aj ekonomicky efektívny pre vývoj prototypu. Kombinácia tradičných výrobných procesov s možnosťou adaptácie moderných prístupov poskytuje vysokú úroveň flexibility a dlhodobú udržateľnosť výroby v rámci akademicko-priemyselnej spolupráce.

4. Identifikované obmedzenia a riziká

Napriek tomu, že koncepcia preukázala vysoký technický a funkčný potenciál, analýza odhalila viacero obmedzení a rizík, ktoré si vyžadujú pozornosť v nasledujúcich etapách vývoja. Tieto riziká sa netýkajú len konštrukčných aspektov, ale aj technologických, materiálových a prevádzkových faktorov, ktoré môžu ovplyvniť dlhodobú spoľahlivosť systému.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Zložitosť montáže a tolerancie

Trojhriadeľová koncepcia s tandemovým radením vyžaduje mimoriadne presné zarovnanie všetkých troch hriadeľov a súvisiaceho radiaceho mechanizmu. Odchýlky väčšie ako 0,02 mm môžu negatívne ovplyvniť presnosť záberu a spôsobiť zvýšené opotrebovanie ozubených kolies. Z tohto dôvodu sa odporúča zavedenie špeciálnych montážnych prípravkov a kontrolných šablón, ktoré umožnia zabezpečiť požadovanú presnosť počas kompletizácie. Rovnako dôležité je zaviesť postup kalibrácie pri výmene ložísk a ozubení, aby sa zachovala konzistentná geometria systému.

Servisný prístup a údržba

Hoci modulárna architektúra uľahčuje servis, vysoká hustota vnútorných komponentov môže v niektorých prípadoch komplikovať prístup k ložiskám a zubovým spojkám. Toto obmedzenie môže viesť k zvýšeným časom údržby alebo potrebe špeciálneho náradia. Odporúča sa preto v budúcej fáze optimalizovať prístupové otvory a vymeniteľné panely v tele prevodovky, ktoré umožnia čiastočné demontáže bez nutnosti rozoberať celý systém.

Mazací systém a tepelný manažment

Spoločný mazací okruh síce zabezpečuje rovnomerné rozdelenie maziva, avšak jeho efektívnosť závisí od presného vyváženia prietokov a tlakov. Riziko nerovnomerného mazania sa zvyšuje pri extrémnych teplotách alebo vysokých otáčkach, čo môže viesť k lokálnemu prehrievaniu ložísk. Rovnako dôležitá je aj kontrola úniku oleja v mieste prírubového spojenia. Na elimináciu týchto rizík sa odporúča zaviesť tlakové skúšky po montáži, prípadne vyvinúť variant s dvojitém tesniacim okruhom.

Výrobné náklady a opakovateľnosť procesov

V porovnaní s klasickou dvojhriadeľovou prevodovkou sú výrobné náklady o 10–15 % vyššie. Táto hodnota je síce akceptovateľná, ale v prípade malosériovej výroby môže predstavovať riziko pre ekonomickú efektívnosť. Preto sa odporúča vytvoriť výrobné šablóny a procesné kontrolné listy, ktoré zabezpečia opakovateľnosť výroby a znížia počet nezhôd. Ďalej je vhodné analyzovať možnosti racionalizácie obrábania – napríklad zjednotením nástrojov alebo konsolidáciou výrobných sekvencií pre viac komponentov.

Riziká spojené s dynamickým zaťažením

Pri testovaní prototypu sa môže ukázať potreba lokálneho zosilnenia telesa v oblasti ložiskových sediel, kde sú najvyššie reakčné sily. Pri dlhodobej prevádzke v extrémnych podmienkach môže dochádzať k mikrodeformáciám, ktoré ovplyvnia presnosť radenia. Preto sa odporúča implementovať prídavné výstuhy alebo vložky v týchto oblastiach, prípadne overiť ich parametre pomocou experimentálneho merania napätí.

Riziká integrácie elektronického radenia (GCU)

Hoci je mechanická architektúra pripravená na integráciu elektronických aktuátorov, rizikom je kompatibilita komunikačných protokolov a reakčná rýchlosť riadiacej jednotky. Nezladenie medzi mechanickou odozvou a softvérovou logikou môže viesť k nesprávnemu načasovaniu radenia. Pre minimalizáciu rizika sa odporúča zaviesť paralelný testovací režim, v ktorom sa elektronické a manuálne ovládanie porovnávajú v reálnych podmienkach.

Materiálové a tepelné riziká

Pri dlhodobej prevádzke v prostredí s teplotami nad 120 °C môže dochádzať k únavovým zmenám v hliníkových častiach telesa, najmä v miestach s vyššou koncentráciou napätí. Riešením môže byť lokálne zosilnenie týchto oblastí, prípadne využitie hybridných vložiek z ocele alebo kompozitných materiálov s vyššou tepelnou odolnosťou.

Súhrnne možno konštatovať, že identifikované riziká nepredstavujú kritické ohrozenie vývoja, ale ich systematická eliminácia bude kľúčová pre úspešné zvládnutie prototypovej fázy. Implementácia uvedených odporúčaní umožní zvýšiť spoľahlivosť, znížiť prevádzkové riziká a optimalizovať ekonomiku výroby v ďalších etapách projektu.

5. Odporúčania pre ďalší vývoj

Na základe podrobných výsledkov technického, funkčného a technologického hodnotenia sa odporúča pokračovať v ďalšom vývoji so zameraním na zvýšenie výkonu, spoľahlivosti a optimalizáciu výrobných procesov. Odporúčania sú koncipované ako systematický rámec pre ďalšiu etapu projektu a tvoria logický most medzi koncepčným návrhom a prototypovou fázou.

Optimalizácia geometrie ozubenia

V nadväznosti na koncepčný návrh sa odporúča vykonať presnú analýzu profilu zubov vrátane korekčných faktorov a úprav evolventných kriviek. Cieľom je dosiahnuť optimálnu kombináciu medzi hladkosťou záberu a únosnosťou ozubenia. Pre zníženie hlučnosti sa odporúča využitie parabolickej modifikácie bokov zubov a simulácia kontaktného zaťaženia pomocou 3D CAD modelov. Tieto úpravy umožnia dosiahnuť rovnomerné rozloženie napätí, čo prispeje k dlhšej životnosti kolies.

Vývoj zubových spojok

Navrhne sa vyvinúť nové ľahké a vysoko odolné spojky so zníženým zotrvačným momentom. Odporúča sa testovanie kombinácií materiálov s povrchovou úpravou DLC (Diamond-Like Carbon) alebo TiN (Titanium Nitride), ktoré poskytujú vynikajúce tribologické vlastnosti. Cieľom je znížiť opotrebovanie pri častom radení a zvýšiť počet prevádzkových cyklov medzi servisnými intervalmi. Zároveň sa odporúča experimentálne overenie geometrie spojkových drážok a ich compatibility s tandemovým radením.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

Integrácia diferenciálu

Odporúča sa pripraviť návrh integrovanej verzie diferenciálu priamo do telesa prevodovky. Takéto riešenie prinesie zníženie dĺžky o ďalších 8–10 %, zjednoduší prenos krútiaceho momentu a zlepši rozloženie teploty v spoločnom olejovom kúpeli. Je vhodné zvážiť použitie diferenciálu s mechanickým LSD (Limited Slip Differential) pre lepšiu trakciu. Vývoj by mal zahŕňať aj návrh nového systému mazania diferenciálu, zdieľajúceho olej s prevodovkou, čím sa zníži zložitosť a celková hmotnosť systému.

Implementácia elektronického riadenia radenia

Navrhuje sa pokračovať vo vývoji riadiacej jednotky GCU s cieľom dosiahnuť plne automatizované radenie. Dôležité je overiť reakčný čas medzi senzormi, aktuátormi a logikou riadenia, pričom cieľová doba odozvy by nemala presiahnuť 25 ms. Odporúča sa integrovať senzory polohy radiacích valcov, teploty oleja a vibrácií, ktoré umožnia presné riadenie radenia a prediktívnu diagnostiku. Vývoj GCU by mal byť realizovaný paralelne s mechanickou optimalizáciou prevodovky, aby sa minimalizovali úpravy v neskorších fázach.

Výrobná a montážna dokumentácia

Je nevyhnutné spracovať detailnú technickú dokumentáciu vrátane výkresov s toleranciami, montážnych inštrukcií a zoznamu kritických kontrolných bodov. Odporúča sa vytvoriť digitálny model prevodovky v prostredí PLM (Product Lifecycle Management), ktorý umožní sledovanie zmien a verzií v priebehu vývoja. Tým sa zníži riziko chýb pri výrobe a montáži a zvýši sa efektivita komunikácie medzi vývojovými a výrobnými tímami.

Experimentálne overenie a prototypovanie

Ďalším odporúčaním je postupná výroba a testovanie prototypov v kontrolovaných podmienkach. Odporúča sa vytvoriť prototyp v mierke 1:1 s použitím simulovanej záťaže pre overenie tepelného manažmentu, mazania a tuhosti. Po overení základných parametrov je vhodné pokračovať v dynamických testoch na testovacom stojane s premenlivým krútiacim momentom, aby sa vyhodnotila životnosť a spoľahlivosť komponentov.

Štandardizácia komponentov a udržateľnosť výroby

Odporúča sa zaviesť unifikáciu ložísk, spojovacích prvkov a tesnení, čím sa znížia výrobné náklady a zjednoduší servis. Zároveň je vhodné analyzovať možnosti recyklácie materiálov a opätovného využitia komponentov, čím sa prispeje k environmentálnej udržateľnosti výroby.

Realizácia týchto odporúčaní prispeje k zvýšeniu technologickej úrovne projektu, umožní efektívnu integráciu mechatronických prvkov a prispeje k posilneniu pozície tímu TUKE v oblasti vývoja športových prevodových systémov.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY

6. Záver

Komplexná analýza konceptu trojhriadeľovej sekvenčnej prevodovky s tandemovým radením preukázala, že navrhnuté riešenie spĺňa nielen pôvodne stanovené ciele projektu, ale aj širšie technické a aplikačné očakávania. Výsledky potvrdzujú, že zvolená koncepcia predstavuje významný inovačný krok v oblasti kompaktných športových prevodových systémov, pričom sa dosiahla výrazná redukcia dĺžky, zlepšenie tuhosti a zvýšenie účinnosti prenosu výkonu. Tieto výsledky zároveň preukazujú vysokú mieru technologickej vyspelosti návrhu a jeho pripravenosť na prototypovú fázu.

Z hľadiska technickej úrovne možno konštatovať, že trojhriadeľová koncepcia s tandemovým radením ponúka optimálnu rovnováhu medzi konštrukčnou kompaktnosťou, mechanickou pevnosťou a dynamickou presnosťou radenia. Prístup založený na modularite umožňuje adaptáciu systému pre rôzne konfigurácie pohonu a motorové výkony, čo výrazne rozširuje aplikačný potenciál. Úspešne bola preukázaná aj kompatibilita s elektronickými riadiacimi systémami, čím sa vytvára priestor pre plnú integráciu mechatroniky do športových aplikácií.

Z hľadiska funkčných vlastností predstavuje nový koncept prevodovky zásadné zlepšenie v oblasti rýchlosti radenia, plynulosti prenosu výkonu a celkovej spoľahlivosti. Tandemové radenie umožňuje prakticky okamžitú reakciu bez neutrálnej fázy, čím sa eliminuje prerušovanie prenosu krútiaceho momentu. Výsledkom je výrazné zlepšenie výkonovej kontinuity a zníženie mechanického zaťaženia spojky a ozubenia, čo v konečnom dôsledku prispieva k dlhšej životnosti systému.

Výrobno-technologické zhodnotenie preukázalo, že koncept je plne uskutočniteľný pri použití dostupných výrobných procesov. Modularita návrhu, vysoká presnosť spracovania a využitie moderných materiálov zabezpečujú reálnu implementáciu v podmienkach univerzitných a priemyselných partnerov. Vytvorený rámec umožňuje postupné zavádzanie inovácií – od aplikácie aditívnych technológií až po automatizované testovanie prototypov.

Z dlhodobého hľadiska má tento vývojový krok strategický význam pre rozvoj výskumu v oblasti športovej techniky a aplikovanej mechatroniky. Projekt TRI-GEARTES sa týmto zaradil medzi kľúčové iniciatívy v oblasti inovatívnych prevodových systémov, ktoré spájajú vysoký výkon s presnosťou a kompaktnosťou. V nadväznosti na tento dokument bude možné pristúpiť k realizácii ďalších fáz vývoja, konkrétne návrhu ozubenia, vývoja spojok a integrácie diferenciálu.

Záverom možno konštatovať, že výsledky dosiahnuté v rámci tohto výstupu predstavujú pevný technický a vedecký základ pre úspešnú realizáciu prototypu a jeho následné overenie v experimentálnych a prevádzkových podmienkach. Projekt potvrdzuje schopnosť PaIC SJF TUKE vytvárať komplexné riešenia s vysokou pridanou hodnotou a technologickým presahom do praxe.



Financované
Európskou úniou
NextGenerationEU

PLÁN [OBNOVY]



ÚRAD VLÁDY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY