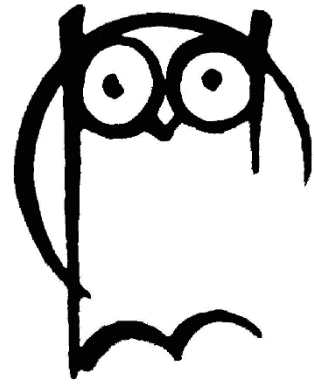


Debreceni Egyetem

Műszaki Kar

Légi-és Közúti Járművek Tanszék



A ZF6HP26 sebességváltó áttételének meghatározása

Szerző: Zsila Klaudia Fanni BSc hallgató

Témavezető: Dr. Tiba Zsolt

Tanszékvezető: Dr. Tiba Zsolt

Debrecen

2022.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. ZF6HP26 sebességváltó bemutatása.....	4
2. Irodalomkutatás.....	9
3. Egyszerű bolygóművek egyenletei	9
3.1 Bolygóművek felépítése	9
3.2 Fordulatszámegyenletek	10
4. Ravigneaux összetett bolygóművek.....	12
4.1 Ravigneaux-egység felépítése	12
4.2 Ravigneaux-összetett bolygómű fordulatszámegyenletek.....	12
5. Ravigneaux 3D-modellezés	17
6. Ravigneaux-bolygómű fordulatszámainak meghatározása méréssel.....	19
6.1 A mérés menete	20
7. Fordulatszámegyenlet helyességének ellenőrzése számítással	22
8. Fogaskerekek egymáshoz viszonyított elfordulása.....	24
9. ZF6HP26 sebességváltó áttételének meghatározása.....	27
9.1 Első fokozatban az áttétel meghatározása	27
9.2 Második fokozat áttétel meghatározása.....	29
9.3 Harmadik fokozat áttétel meghatározása.....	31
9.4 Negyedik fokozat áttétel meghatározása	34
9.5 Ötödik fokozat áttétel meghatározása.....	36
9.6 Hatodik fokozat áttétel meghatározása.....	37
9.7 Hátrameneti fokozat áttétel meghatározása	38
Összefoglalás.....	39
Felhasznált irodalmak	40

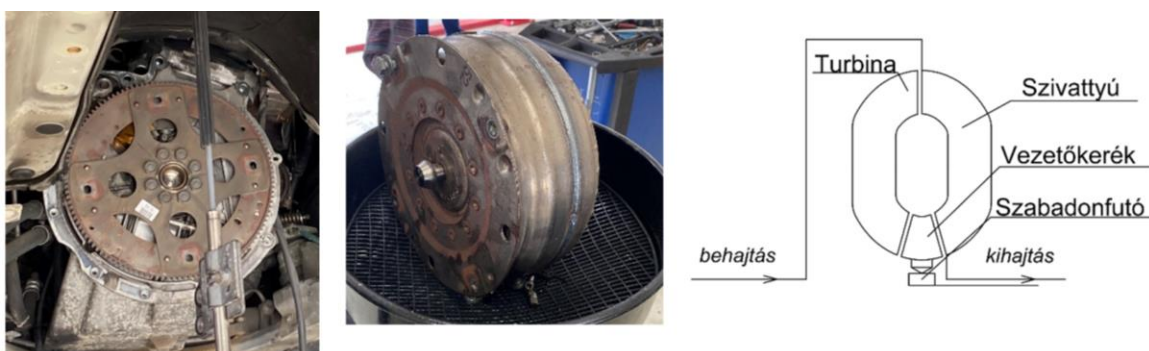
Bevezetés

Az automatizálás egyre nagyobb mértékű elterjedésének köszönhetően az automata szerkezetek használatának igénye folyamatosan nő. A vezetés megkönnyítése érdekében egyre gyakrabban alkalmazzák az automata sebességváltókat. Az automata sebességváltók gyors fejlődéséhez az alacsonyabb gyártási költségek is hozzájárultak, mely lehetővé tette a szériagyártást, így a legtöbb autógyártó vállalat elkezdte használni saját gépkocsijukban, többek között a BMW is. A dolgozat középpontjában egy BMW automata sebességváltó szerepel, melynek az áttételét szeretnénk meghatározni. Az automata sebességváltók áttétel módosítása a sorba kapcsolt bolygóművek megfelelő elemeinek fékezéséből, illetve összekapcsolásából adódik. A bolygóműves egység konstrukció szerint két csoportba sorolható attól függően, hogy csak sorba kapcsolt elemi bolygóműveket, vagy összetett bolygómű egységeket is tartalmaz. Bármely automata sebességváltó szétszedése után látható, hogy az adott gyártó mely konstrukciót alkalmazta.

A látókörünkbe került egy bolygóműves automata váltót tartalmazó BMW sebességváltó, ami a ZF által fejlesztett ZF6HP26 sebességváltó, mely elsőként alkalmazta a Pierre Lepelletier által szabadalmaztatott rendszert [2]. A koncepció egy hagyományos egyszerű KB-típusú előtét bolygómű és vele sorba kapcsolt összetett Ravigneaux-egységből épül fel. Ezzel a konstrukcióval a sebességváltó tömege az elődjeihez képest jelentősen csökkent, de már 6 áttétel arány megvalósítását biztosítva. A ZF6HP26 sebességváltó elsőként a BMW 7-es szériába került beszerelésre [3]. Érdeklődésünkben állt a sebességváltó áttételének meghatározása. Melynek a legegyszerűbb módja az [1] alapján levezetett fordulatszámegyenletek alkalmazása, melyhez a szétszedett BMW sebességváltó fogaskerekeinek a fogszámaikat megszámoztuk. Az egyenleteket a behajtó és a kihajtó tengely fordulatszám hányadosára rendezve közvetlen kiszámítható az áttétel. De az [1] forrásban szereplő fordulatszámegyenletek az egyszerű bolygóművekre levezetett egyenletek, melyek nem feltétlen alkalmazhatók a ZF6HP26 sebességváltóban szereplő összetett Ravigneaux-egységre. A Ravigneaux-bolygómű áttételének meghatározásával számos tanulmány, cikk foglalkozik. Egy számítási módot ismertet a [4] tanulmány is, amely nem tartalmazza a bolygómű egység összes lehetséges kapcsolási módjában az áttétel meghatározását. Ennek megfelelően nem alkalmas a ZF6HP26 típusú sebességváltó áttételszámítására. Így elsőnek az összetett bolygóműre használható egyenleteket kell meghatározni majd a kapott egyenletek a gyártó által publikált fogaskerekek fordulatszámainak a behelyettesítésével és egy Ravigneaux-modellen végzett méréssel is ellenőrizve vannak a dolgozatban. A fordulatszám egyenletek levezetése előtt ismerkedjünk meg a ZF6HP26 sebességváltóval.

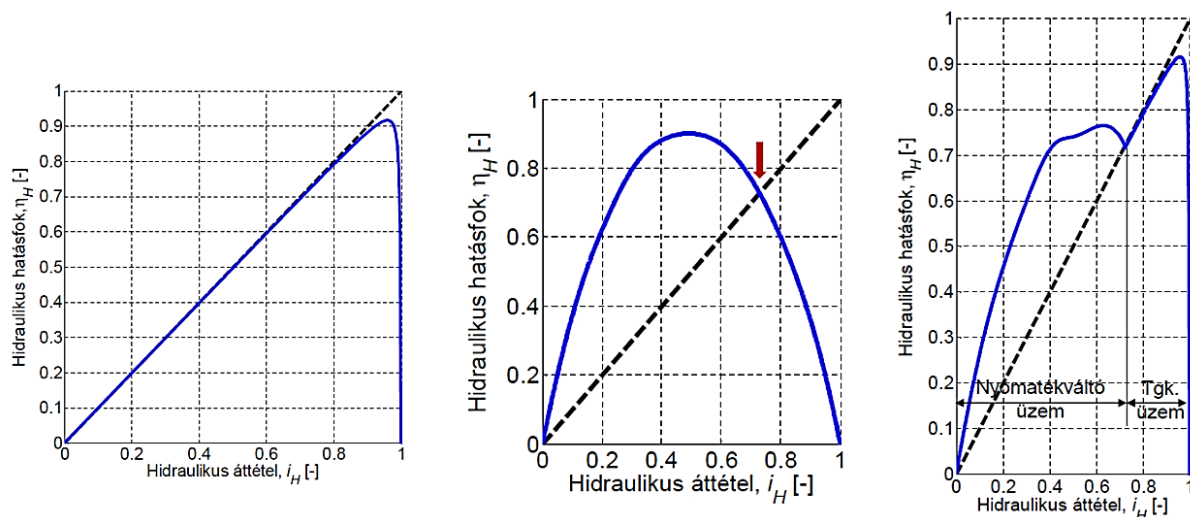
1. ZF6HP26 sebességváltó bemutatása

A ZF6HP26 sebességváltó felépítésének bemutatásához a Debreceni SZC Brassai Sámuel Műszaki Technikumban szerelői oktatási célra szétszedett BMW sebességváltójáról készült videók, illetve a Protruck KFT járult hozzá. A Protruck KFT ZF Service Partner cég Magyarországon az egyedüli ZF márkaszervíz. A szervízben egy BMW e39-es ZF6HP automata sebességváltó szétszerelésére került sor. Mivel a harmadik és a negyedik fokozatban nagyobb gázadásnál vészüzembe kapcsol. Ebben az állapotban az autó sebessége az első fokozatban a maximális sebességre korlátozódik. A hibakód olvasó alapján a B és a C lamelláknál csúszás lépett fel, mely általában a lamellák kopásából származik. A sebességváltó lehúzását követően látható volt, hogy a motor és a váltó között nem található lendkerék (1.1. ábra), mint manuális váltóknál. Mivel a sebességváltóban a hidraulika végzi a motor által keltett rezgések és lengések csillapítását, így egy vékony lemeztárcsa váltotta fel a lendkereket.



1.1. ábra: Lemeztárcsa (bal oldal) és a hidrodinamikus nyomatékváltó

A hidrodinamikus nyomatékváltó egy szivattyúkerékből, mely a motor főtengelyéhez kapcsolódik és a vele szemben elhelyezett, hajtott turbina kerékből épül fel. A kerek ferde és enyhén ívelt lapátosításúak, ez a kialakítás teszi lehetővé az olaj átáramlását az egyik kerékből a másikba. Ahhoz, hogy ne csak hidrodinamikus tengelykapcsoló funkciót lásson el, egy vezetőkereket építettek be a szivattyú és a turbina közé, így lehetővé válik a nyomatékmódosítás. A vezetőkerék beépítését követően a nyomatékmódosítás hidraulikus hatásfokának értéke 1 alatt is lehet, lásd 1.2. ábra. Ennek a kiküszöbölésére a vezetőkereket egy szabadonfutóval látják el.



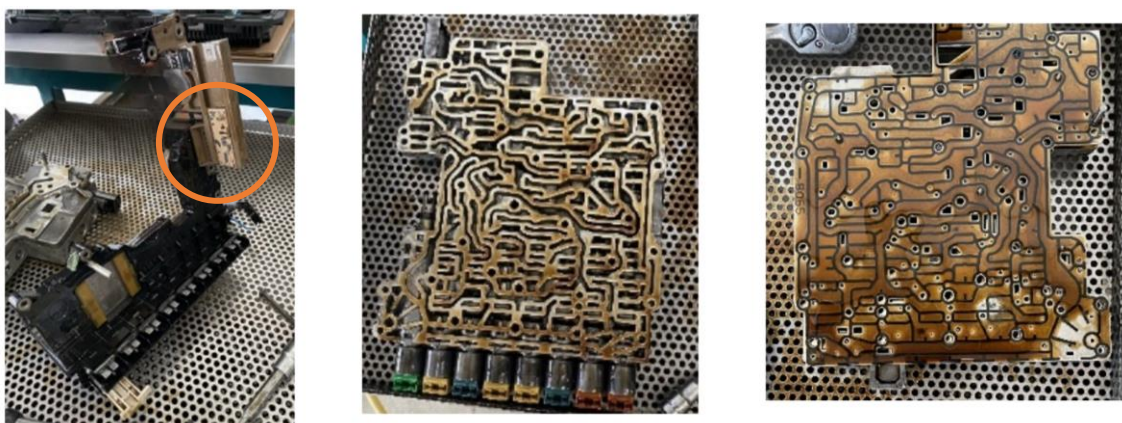
1.2. ábra: Hidraulikus hatásfok az áttétel függvényében [7]

A hidrodinamikus nyomatékvtó szivattyúkerekere alakzáró hajtáson keresztül hajtja meg a belső fogaskerékes olajszivattyút. Az automata sebességváltóban az olajszivattyú feladata a vezérléshez szükséges megfelelő mennyiségű olaj juttatása a dugattyúkhöz. A szétszerelés első lépése az olaj kiöntése, majd a szűrő eltávolítása. Minden ZF automata váltó szétszerelését követően a szűrőt teljesen kell cserélni. Ha valamely alkatrész törött, apró kis fémdarabkák láthatók a szűrőn, de ez ennél a váltónál nem volt tapasztalható. A szűrő levételét követően látható, a váltóban található mechatronikai egység, azaz a vezérlés.



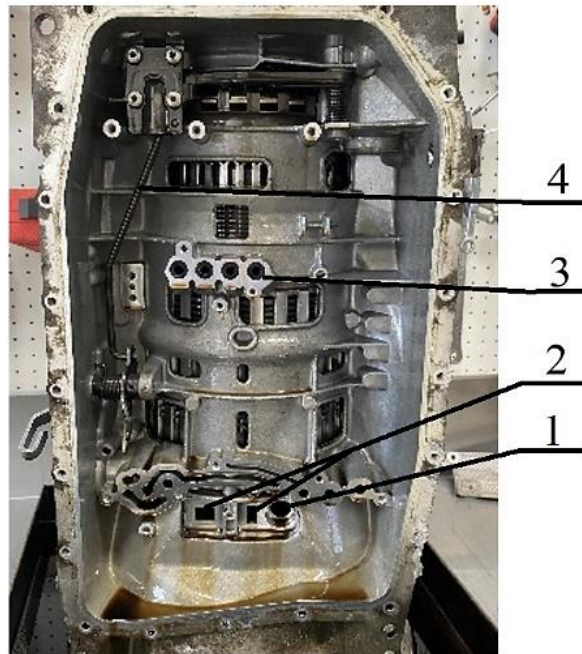
1.3. ábra: Olajszűrő (bal oldal) a teljes ZF6HP sebességváltó(középen) és a mechatronika egység (jobb oldal)

A sebességváltó vezérlése elektrohidraulikus. Az elektronikus egység műanyag borítású, amíg a hidraulikát a fém rész foglalja magában. Az elektronika működteti a mágnesszelepek vezérlését, melyeknek különböző állásai vannak. Abban az esetben, ha egy szelep meghibásodik, egyszerre szükséges az összes szelep cseréje, mivel fizikailag nem lehetséges egy szelep cseréje. Itt található a bemenő és a kimenő fordulatszámérzékelők, melyek különbségét tárolja be a hibakód olvasó. Ha 150 1/perc értéknél lényegesen nagyobb, abban az esetben vészüzembe áll a sebességváltó és kiírja a szerviz felkeresésének szükségességét. A mechatronika szétszedését követően a tömítések kerültek kicserélésre és a használt olaj kiöntése után a fém részek áttörését követően össze is szerelhető. A 4. ábrán látható a leszedett mechatronika. Az első ábra az elektronikus rész. A bekarikázott barna műanyag rész egy kis dugattyú helye, amely a mágnesszelepekhez jutott olajért felelős. Középső képen láthatók a színes mágnesszelepek és az olajjáratok. Melyekre illeszkedik a jobb oldalon látott egyedi számmal ellátott lap, ami szintén ki lett cserélve a gyártói utasítást követően.



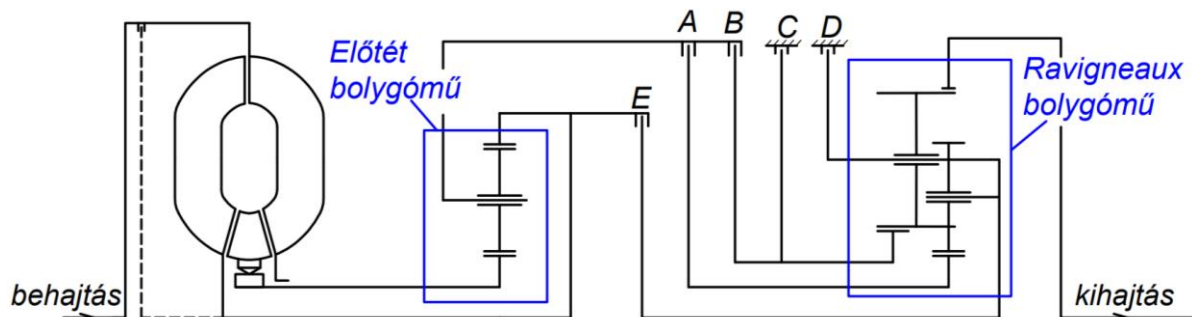
1.4. ábra: Vezérlőegység

A mechatronikai egység leszerelését követően az 1.5. ábrán látható a sebességváltó. Az 1-es jelű fészekbe csatlakozik az olajsűrítő szivornya csöve, ezen keresztül szívja fel a szivattyú az olajat. A 2 számmal jelölt furatokon keresztül nyomja vissza az olajat a vezérlőegységbe. A 3 szám a 4 darab tömített csövek a mechatronikából a sebességváltó mechanika felé menő olajnyomások átvezető csövei, melyek tömítését szintén ki kell cserélni, az új tömítéseknek körülbelül 1mm szélességben kell túlnyúlni a furatok peremein. Ezeken a furatokon keresztül a tengelykapcsolók és fékek működtetése sűrített levegővel leellenőrizhető. A 4-es szám mutatja a parkoláért felelős mechanizmust.



1.5. ábra: A vezérlőegység leszerelése után a sebességváltó

A váltó típusok konstrukciójának megfelelően a további felépítésben kisebb mértékben eltérnek egymástól, esetleg több alkatrészt tartalmaznak. A ZF6HP és az azt követő szám, ami lehet 19, 26, 28, 32, melyekből a nyomatékra lehet következtetni. Minél nagyobb a HP utáni szám, annál nagyobb nyomatékot bír el a sebességváltó. A ZF6HP26 sebességváltó első szerkezeti eleme az előtét bolygómű, mely egy már említett egyszerű KB- típusú bolygómű. A bolygómű napkereke a szivattyúház egy tengelyével bordáskötéssel rögzül. Ezt követi az E-tengelykapcsoló, mely az előtét bolygómű gyűrűkerekéről továbbítja a hajtást. A tengelykapcsolók és a fékek helyét az 1.6. ábra mutatja, ahol az A, B és az E tengelykapcsolókat, a C és a D betűk fékeket jelentenek.



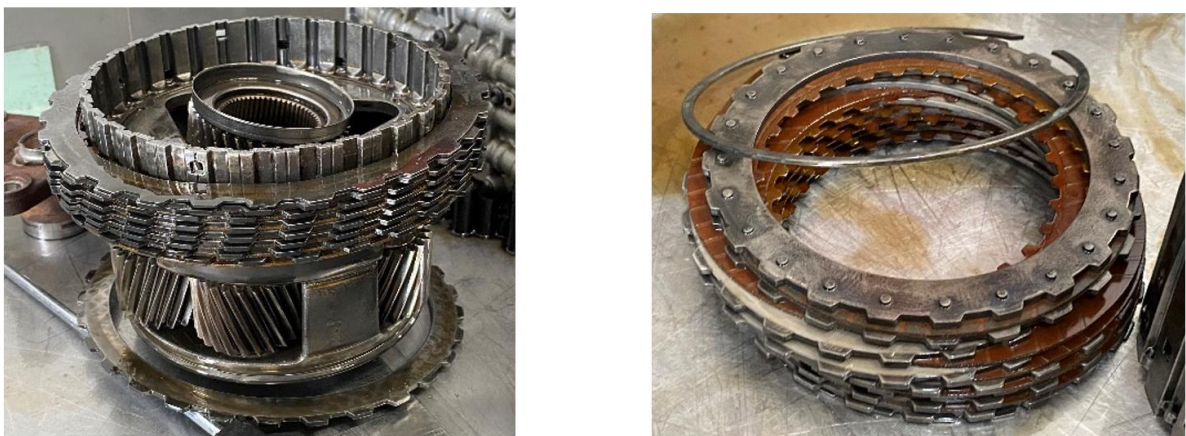
1.6. ábra: ZF6HP26 kinematikai vázlat

Az E-tengelykapcsoló kivétele után láthatók a C-D jelzésű fékek, melyek egy lamella tartóban helyezkednek el és ez rögzítve van a házhoz. Ezek a fékek biztosítják az összetett bolygómű adott fokozatban a megfelelő elemének a fékezését.



1.7. ábra: E-tengelykapcsoló (bal, középső) és a C-D lamellaház (jobb)

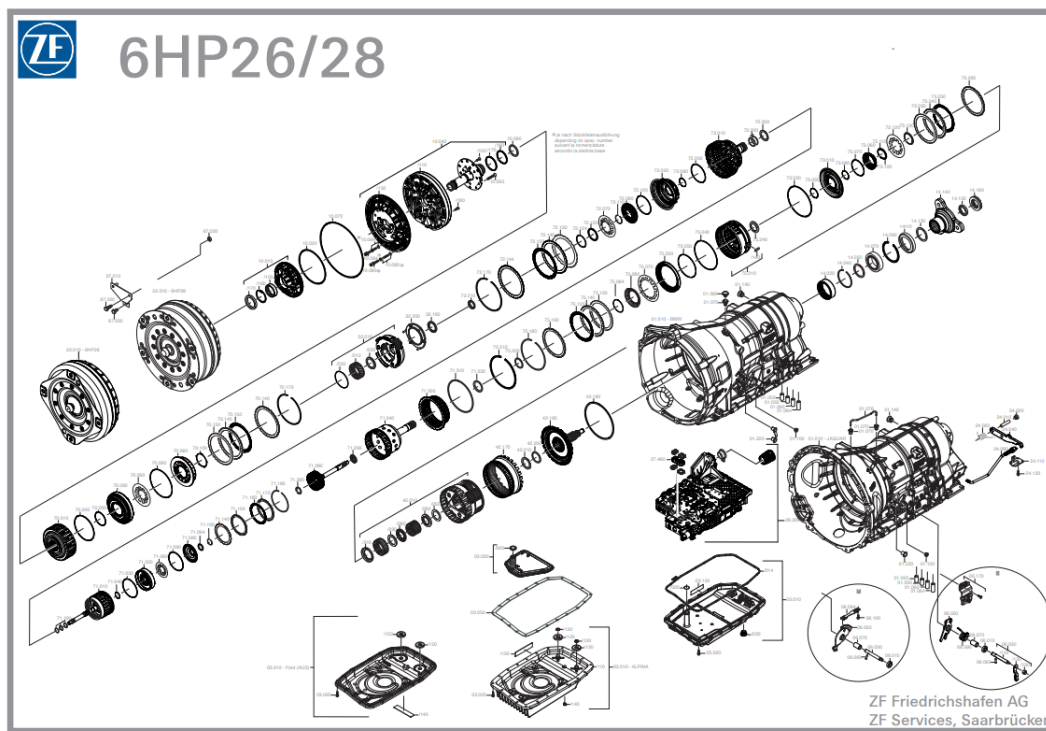
A C-D lamellaházzal egyben a Ravigneaux- bolygómű is kiszedhető a sebességváltóházból. A kiemelés követően megnézhető a C és D fékek lamelláinak kopásának mértéke. Minél több a lamella száma, annál nagyobb nyomatékot képes átvinni. A szétszedett C fék lamelláinak száma 14 és még a nyitó, illetve záró lamella. A kopó tárcsák száma 7, ahogy a fém tárcsáké is szintén 7 db, melyek felváltva helyezkednek el. A kopás mértékének megállapítása szemrevételezéssel történik, mert csúszások esetén a kopó lamella megég, így megfeketedik, az acél lamella a kopás mértékének megfelelően kékülhet is. A haszonjárművek automata sebességváltó lamellái között gyakori a két oldalú lamella, azaz egyik oldala a betétezett a másik oldala a fém rész. A külső fogazású acél lamellák a váltóműházhoz, a belső fogazású kopó lamellák a hajtott egységhez kapcsolódnak, majd megfelelő olajnyomás hatására összenyomódnak és ezzel biztosítva a hajtott egység fékezését.



1.8. ábra: Ravigneaux-bolygómű (bal) és a lamellák (jobb)

Az összetett bolygómű kiemelésével a sebességváltóházból az összes szerkezeti elemet kiszedtük. Az Ravigneaux- bolygómű gyűrűkereke a sebességváltó kihajtása, melyhez kapcsolódik a kimenő tengely. A bolygómű egység csapágyazása egysorú mélyhornyú golyóscsapággal és tűgörgős csapággal valósul meg. A tűgörgős csapágys belső gyűrűje

egybe van építve a C-D házzal, ennél a sebességváltónál nagy volt a belső gyűrűk kopásának mértéke, ezért a teljes lamellaházat ki kellett cserélni. A tömítések, belső gyűrűk a C-D ház, olajsűrű és a kopott tárcsák cseréjét követően a ZF6HP automata sebességváltó az alábbi ábrán látható szerelési útmutató alapján került összeszerelésre.



1.9. ábra: A sebességváltó összeszerelési útmutató

A tűgörgős csapágyak belső gyűrűinek kopása mellett a hidraulika olajra is oda kell figyelni, melyet körülbelül 80000 kilométernél érdemes cserélni. Az olajsűrű leszerelését követően az olajcserét végző gépet rácsatlakoztatják a hűtőrendszerre, és az olaj leengedését, illetve a felöntését maga a gép végzi. Járó motor mellett amennyi használt olajat kinyom a gép, annyi friss olaj kerül vissza a váltóba, ez 10-11 liter.

A belső gyűrűk kopása mellett a ZF6HP típusú automata sebességváltók gyakoribb hibájának az elektronika, vagyis a vezérlőegység meghibásodása, illetve az üzem alatt megtett sok kilométerhez kötődően bekövetkező alkatrész kopások tekinthetők. Ezzel a ZF szériával lényegesen kevesebben fordulnak szervízhez, mint egy ZF8HP sebességváltóval.

A sebességváltó bemutatását követően térjünk rá a nyomatékmódosítást végrehajtó elem, azaz a bolygómű tárgyalására. Mivel a nyomatékmódosítás a bolygóműben történik, így a sebességváltó áttételének a meghatározásakor a bolygómű behajtása és a kihajtása között kell kapcsolatot teremteni. Ez a bolygóművek fordulatszám egyenleteivel tehető meg.

2. Irodalomkutatás

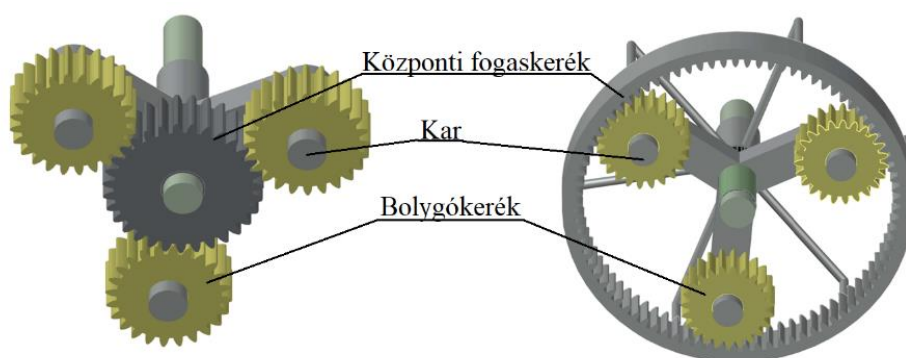
A dolgozat a bolygóművek fordulatszámegyenletein alapszik, ezért tanulmányoztunk ehhez kapcsolódóan különböző publikációkat. Az egyszerű bolygóművekre vonatkozó Tochtermann - Bodensein: Gépelemek I. és II. könyve alapján levezetett egyenleteket vettük alapul. Mely a fordulatszámok közötti kapcsolatot sebességre segítségével írja fel.

A ZF6HP26 sebességváltó az egyszerű bolygómű mellett összetett bolygómű egységet is tartalmaz. Így az összetett bolygóműre alkalmazható egyenleteket is fel kell írni az áttételek számításánál. Egy számítási módot ismertet a [4] tanulmány is, mely nem tartalmazza a bolygómű egység összes lehetséges kapcsolási módjában az áttétel meghatározását. Ennek megfelelően nem alkalmas a ZF6HP26 típusú sebességváltó áttételszámítására. A [16] publikáció egyes kapcsolásokban veszi alapul a bolygómű elemeinek szögsebességét, melyből fogsám arányokkal az összetett bolygómű egység lehetséges áttételeit vezeti le. Tehát ez a tanulmány sem tért ki az összetett bolygómű fordulatszámegyenleteire. Elsőként az egyszerű és az összetett bolygómű közötti kapcsolatot vizsgáltuk. Mely alapján az egyszerű bolygóművekre vonatkozó egyenletekből az összetett egységekre is felírhatók a fordulatszámegyenletek.

3. Egyszerű bolygóművek egyenletei

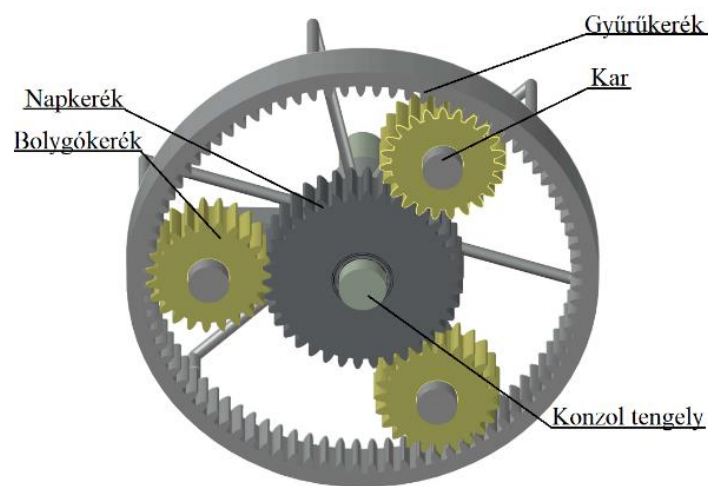
3.1 Bolygóművek felépítése

Az [1] alapján levezetett fordulatszámegyenletek vizsgálata előtt érdemes először a bolygóművek felépítését bemutatni. Bolygóműveknek nevezzük, azokat a fogaskerékpárokat, melyeknek vannak egyszerre forgó és bolygó mozgást is végző fogaskerekei. A bolygómozgást végző fogaskerek a bolygókerek, melyek a bolygókeréktartókar segítségével egy központi kerék körül végeznek ciklois mozgást. Ez a két fogaskerből, illetve a karból felépülő szerkezet egy elemi bolygóművet határoz meg, lásd 3.1. ábra. Viszont önmagában az elemi bolygómű használata a gyakorlatban nem terjedt el, mivel a bolygókerék tengelye nem esik egybe a központi kerék és a kar forgástengelyével így a forgás kivezetését nem lehet megoldani [7].



3.1. ábra: Egy K-elemi bolygómű(bal) és egy B- elemi bolygómű(jobb) modell

A bolygókerék forgásának a levétele egy újabb központi kerék alkalmazásával kivitelezhető, ilyenkor már egyszerű bolygóművekről beszélünk. Az egyszerű bolygómű szerkezeti felépítése alapján megkülönböztetünk normál és kettős bolygókerékes bolygóműveket, melyeknek a fordulatszámegyenleteit az [1] adja meg. A ZF6HP26 sebességváltó nem tartalmaz kettős bolygókerékes bolygóművet, így a dolgozat azok fordulatszámegyenleteire nem tér ki. Felépítés alapján minden egyes bolygómű típus valamely részben különbözik egymástól, akár külső vagy belső fogazatú, akár az egyes szerkezeti elemekben. Tekintettel egy egyszerű normál bolygóműre (KB-típus) két központi kerékből épül fel, melyek közül külső fogazású a napkerék, belső fogazású fogaskerék a gyűrűkerék. A két központi kerékhez kapcsolódnak a bolygókerékek, melyek a bolygókeréktartó csapon vannak csapágyazva (3.2. ábra). Ez alapján négy elemcsoport forgásával kell számolni, a két központi kerék, a bolygókerékek és a kar.



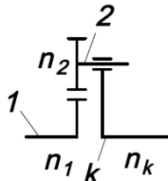
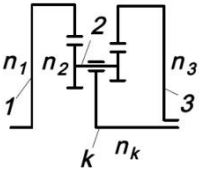
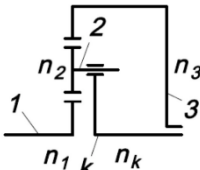
3.2. ábra: Egy K-bolygómű(bal) és egy KB-bolygómű(jobb) modell

A fenti ábrán látható, hogy a fogaskerekek párhuzamos forgástengelyűek, melyek az álló konzol tengelyen vannak ágyazva. Amennyiben ehhez a konzolhoz vannak viszonyítva a fogaskerekek fordulatszámai, azok abszolút fordulatszámoknak tekinthetők. Az [1] alapján az egyszerű bolygóművekre levezetett egyenletekben szereplő fordulatszámok abszolút fordulatszámok. Mivel egyszerű bolygóművek és nincsenek másik bolygóművel összekötve, ez alapján elegendő egy nyugvó vonatkoztatási ponthoz viszonyítani az összes fordulatszámot. Az egyes szerkezeti elemek fordulatszámai a levezetett fordulatszámegyenletekben és a teljes dolgozatban alsó indexel vannak megkülönböztetve. Ez alapján 1: napkereket, 2: bolygókereket, 3: gyűrűkereket és „k”: bolygókeréktartókart jelenti.

3.2 Fordulatszámegyenletek

Néhány típusú bolygómű alap fordulatszámegyenleteit az 3.1. táblázat tartalmazza, ahol az „n” a fordulatszámot és „r” a fogaskerekek sugarát jelenti. A külső fogazású központi kereket „K” a belső fogazású központi kereket „B” jelöli, mellyel a bolygóműtípusok egyszerűen felírhatók.

3.1. táblázat

Típus	Áttétel $n_k = 0$ esetén	Fordulatszámegyenletek
K 	$i_{12} = -\frac{r_2}{r_1}$	$n_1 + \frac{r_2}{r_1} n_2 = \left(1 + \frac{r_2}{r_1}\right) n_k$
B+B 	$i_{12} = \frac{r_2}{r_1}$ $i_{23} = \frac{r_3}{r_2}$ $i_{13} = \frac{r_2 r_3}{r_1 r_2'}$	$n_1 - \frac{r_2 r_3}{r_1 r_2'} n_3 = \left(1 - \frac{r_2 r_3}{r_1 r_2'}\right) n_k$ $n_1 - \frac{r_2}{r_1} n_2 = \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right) n_k$ $n_2 - \frac{r_3}{r_2'} n_3 = \left(1 - \frac{r_3}{r_2'}\right) n_k$
KB 	$i_{12} = -\frac{r_2}{r_1}$ $i_{23} = \frac{r_3}{r_2'}$ $i_{13} = -\frac{r_3}{r_1}$	$n_1 + \frac{r_3}{r_1} n_3 = \left(1 + \frac{r_3}{r_1}\right) n_k$ $n_1 + \frac{r_2}{r_1} n_2 = \left(1 + \frac{r_2}{r_1}\right) n_k$ $n_2 - \frac{r_3}{r_2'} n_3 = \left(1 - \frac{r_3}{r_2'}\right) n_k$

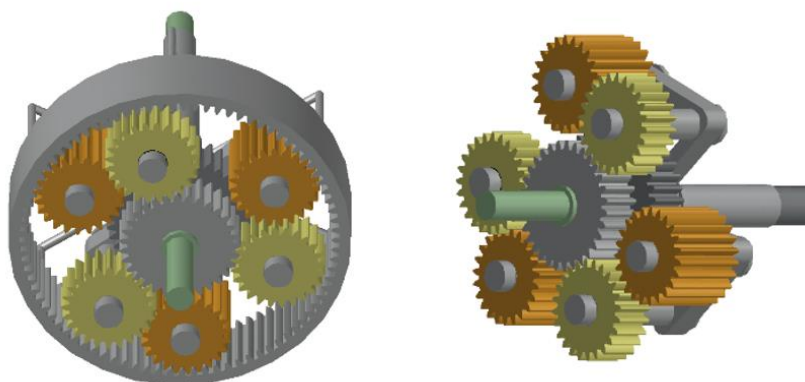
Az 3.1. táblázat a fordulatszámegyenletek mellett tartalmazza még, álló kar esetén az áttételt és az adott típusú bolygómű kinematikai vázlatát. A két központi keréssel rendelkező bolygóművek kinematikai vázlatából leolvasható, hogy a kihajtó és a behajtó tengelyek száma összesen három, kivéve azoknak a bolygóműveknek, melyek csak egy központi keréssel rendelkeznek, így a tengelyek száma eggyel kevesebb lesz. Mivel a bolygókerek csapágyazva vannak a karon ezért azok tengelyei egy forgástengellyé redukálhatók, a másik két tengely a napkerékhez és a gyűrűkerékhez kapcsolódik. Az egyszerű bolygómű két- vagy több szabadságfokú egység. Két szabadságfokú bolygómű egy behajtó és két kihajtó elemből vagy két behajtó és egy kihajtó elemből épül fel. Ha mindkét behajtó tengely hajtott teljesítményösszegző hajtás. Amennyiben a behajtó tengelyek fordulatszámát egymáshoz viszonyítva szabályozzuk ECVT, fokozatmentes hajtásról beszélhetünk. Ha az egy tengelyt hajtjuk a másik kettő kihajtó teljesítményelágazásos hajtás [10].

A kezdetleges bolygóműves sebességváltókban egy-egy fokozathoz egy sorba kapcsolt bolygómű tartozott, mellyel belátható, hogy a fokozatok növelésével a helyszükséglet is növekszik. Így az egyszerű bolygóművek egybeépítésével különböző összetett bolygómű konstrukciók jöttek létre.

4. Ravigneaux összetett bolygóművek

4.1 Ravigneaux-egység felépítése

A helyszükséglet csökkentése érdekében az egyszerű bolygóművek közös elemmel történő összekapcsolásával már összetett bolygóművekről beszélhetünk. Az elsőként megjelent összetett bolygómű a Simpons- egység volt, ami két egyszerű KB-típusú bolygóműből épül fel, melyek napkerekei közösek. Ez a koncepció három előremeneti és egy hátrameneti fokozatot tesz lehetővé [5]. 1949-ben Pol Ravigneaux az összetett bolygómű szabadalma felváltotta a Simpons-egység sebességváltókban való használatát, mivel kisebb és könnyebb, a gyártása is olcsóbbnak bizonyult. Mivel a Ravigneaux-bolygóműben csak egy gyűrűkerék található a gyártása is olcsóbbnak bizonyult. A Ravigneaux összetett bolygómű egy K típusú és egy KB-típusú egyszerű bolygóműre bontható szét. A Ravigneaux-egység felépítését tekintve a két egyszerű bolygómű napkerekei egymással koncentrikusak és a bolygókerekek egy közös karral rendelkeznek. A bolygókerekek részben egymással, részben a saját napkerejükkel kapcsolódnak, lásd 4.1. ábra.



4.1. ábra: Ravigneaux-egység gyűrűkerékkel(bal) és gyűrűkerék nélkül(jobb)

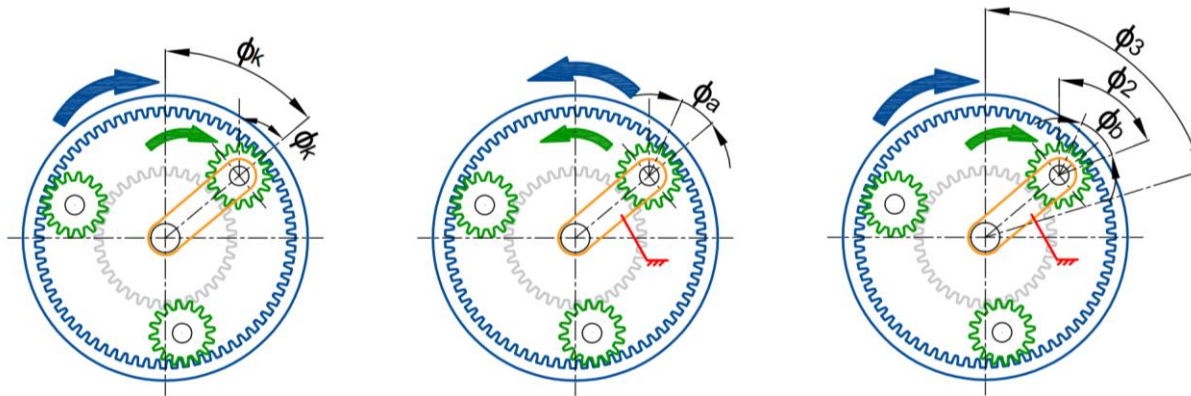
A KB-típusú bolygóműhöz tartozik a nagyobb napkerék, mely előtt a K-típusú bolygómű napkereke helyezkedik el. A fenti ábrán látható, hogy csak a bolygókereknek van egymással közös elemük. Mivel a bolygókerekek egy közös karral rendelkeznek és egymással is kapcsolódnak, így az [1] által levezetett fordulatszámegyenletek nem alkalmazhatóak. A bolygókereknek a fordulatszáma már nem a nyugvó konzol tengelyhez viszonyítottan értelmezhető, hanem a karhoz viszonyítottan. Ez alapján a bolygókerekek fordulatszámait a karhoz viszonyítottan kell felírni a fordulatszámegyenletekben.

4.2 Ravigneaux-összetett bolygómű fordulatszámegyenletek

A fordulatszámegyenletek több módon is levezethetők, mint például a Kutzbach-féle és a Swamp-féle módszerrel. A Kutzbach-féle szerkesztési eljárás, mellyel a bolygókerék sebessége meghatározható. A bolygókerék két kapcsolódó pontjának berajzoljuk az ismert kerületi sebességeit és a sebességvektorok végpontjait összekötve metszik ki a bolygókerék

sebességét. Ezt a sebességábrát felrajzolva a sebességek között geometriailag összefüggések vezethetők le. A Swamp-féle módszer az elemek mozgásoknak a részleteit összegzi. Az összefüggések két mozgás szuperpozíciójából levezethetők. Az összes forgó tag a kar szögsebességével forog, majd a kar fékezésével létrejövő mozgásokból [15]. A dolgozatban a bolygómu kinematikai viszonyaiból kerülnek meghatározásra az egyenletek. Elsőként a Willis-egyenlet felírása szükséges, mivel ez az egyenlet teremt kapcsolatot a napkerék és a gyűrűkerék fordulatszáma között [7] [8]. Ebből levezethetők a bolygókerék fordulatszámát is tartalmazó, a bolygókeréktartó karhoz viszonyított fordulatszáme egyenletek. A levezetés a bolygókerék és gyűrűkerék, illetve a bolygókerék és napkerék egymáshoz viszonyított mozgását veszi alapul. Kiindulva a fogaskerekek szögelfordulásából levezethetők a fordulatszáme egyenletek.

A bolygókerék és a gyűrűkerék egymáshoz viszonyított mozgásának vizsgálatánál a napkerék elfordulása egy kiadódó mozgás. A 4.2. ábrán az óramutató járásával megegyező irány pozitív, amíg az azzal ellentétes negatív értékként van értelmezve.



4.2. ábra: Bolygókerék-Gyűrűkerék mozgás vizsgálata

A 4.2/1 ábrán egymáshoz van rögzítve a bolygókerék és a kar, így azt elfordítva az óramutató járásával megegyező irányba „ ϕ_k ” elfordulással, vele együtt a gyűrűkerék is azonos szögben fordul el [1]. Továbbiakban a bolygókeréktartó kart rögzítjük, így a bolygókerék csak a saját tengelye körül tud elfordulni. Ha ebből a helyzetből a gyűrűkereket visszaforgatjuk „ ϕ_k ” szöggel alaphelyzetbe, a bolygókerék is negatív irányba fordul el „ ϕ_a ” szöggel, lásd 4.2/2 ábra. Ezáltal a bolygókerék eredő szögelfordulása „ $\phi_k - \phi_a$ ”. A gyűrűkereket „ ϕ_3 ” szöggel elfordítva, amennyiben a forgásirány pozitív, a bolygókerék is el fog fordulni szintén pozitív irányba „ ϕ_b ” szöggel. A három előjeles összege a bolygókerék eredő elfordulását adja meg.

$$\Phi_2 = \Phi_k - \Phi_a + \Phi_b \quad (4.1)$$

Mivel a fogaskerék-hajtások alakzáró hajtások, így a kapcsolódó fogaskerekek gördülőíveik megegyeznek.

$$\Phi_a r_2 = \Phi_k r_3 \quad (4.2)$$

$$\Phi_b r_2 = \Phi_3 r_3 \quad (4.3)$$

A bolygókerék szögelfordulásait behelyettesítve az (4.1) egyenletbe

$$\Phi_2 = \Phi_k - \Phi_k \frac{r_3}{r_2} + \Phi_3 \frac{r_3}{r_2} \quad (4.4)$$

Az elforduláshoz tartozó „t” idővel osztva a (4.4) egyenletet, szögsebességeket kapunk

$$\omega_2 = \omega_k - \omega_k \frac{r_3}{r_2} + \omega_3 \frac{r_3}{r_2} \quad (4.5)$$

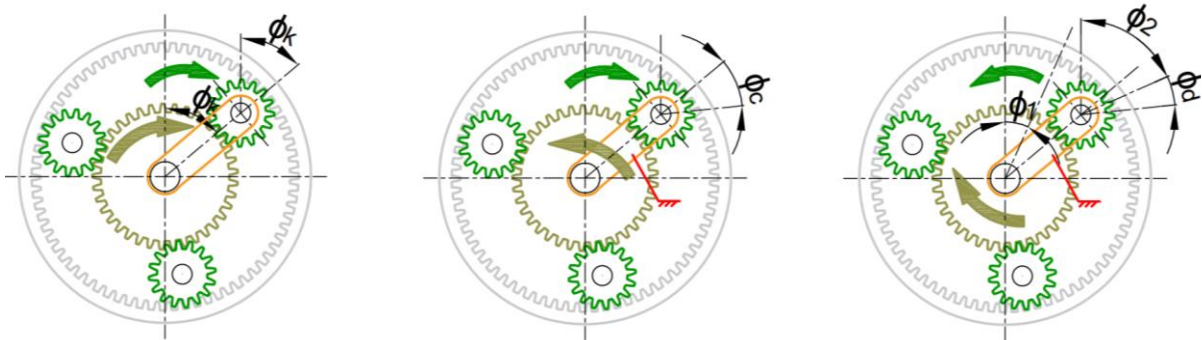
Az (4.5) egyenletet elosztva 2π -vel, felírhatók a fordulatszámok

$$n_2 = n_k - n_k \frac{r_3}{r_2} + n_3 \frac{r_3}{r_2} \quad (4.6)$$

A fenti egyenletet rendezve a gyűrűkerék fordulatszámára

$$n_3 r_3 = n_k r_3 - n_k r_2 + n_2 r_2 \quad (4.7)$$

A gyűrűkerék-bolygókerék egymáshoz viszonyított mozgását követően térjünk át a másik egyenlet levezetésére.



4.3. ábra: Bolygókerék-Napkerék mozgás vizsgálata

A 4.3/1 ábrán szintén egymáshoz van rögzítve a bolygókerék a karral és azt elfordítva az óramutató járásával megegyező irányba „ Φ_k ” elfordulással, ekkor a napkerék fog elfordulni vele azonos szögben. Ebben a levezetésben is a bolygókeréktartó kart rögzítjük. Ezt követően ha a napkereket visszaforgatjuk „ Φ_k ” szöggel alaphelyzetbe, a bolygókerék a napkeréken legördülve pozitív irányban „ Φ_c ” szöggel fordul el, ezt a 4.3/2 ábra mutatja. Így a bolygókerék eredő szögelfordulása „ $\Phi_k + \Phi_c$ ”. A napkerék alaphelyzetből a fordulatszámával arányos „ Φ_1 ” szöggel fordul el, amennyiben a forgásirány pozitív a bolygókerék az óramutató járásával ellentétes irányban „ Φ_d ” szöggel fordul el. A három előjeles összege a bolygókerék eredő elfordulását adja meg.

$$\Phi_2 = \Phi_k + \Phi_c - \Phi_d \quad (4.8)$$

Az alakzáróhajtás miatt

$$\Phi_c r_2 = \Phi_k r_1 \quad (4.9)$$

$$\Phi_d r_2 = \Phi_1 r_1 \quad (4.10)$$

A szögelfordulásokat kifejezve és behelyettesítve a (4.8) egyenletbe

$$\Phi_2 = \Phi_k + \Phi_k \frac{r_1}{r_2} - \Phi_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (4.11)$$

Az elforduláshoz tartozó „t” idővel osztva a (4.11) egyenletet, szögsebességeket kapunk

$$\omega_2 = \omega_k + \omega_k \frac{r_1}{r_2} - \omega_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (4.12)$$

Az (4.12) egyenletet elosztva 2π -vel, felírhatók a fordulatszámok

$$n_2 = n_k + n_k \frac{r_1}{r_2} - n_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (4.13)$$

A fenti egyenletet rendezve a napkerék fordulatszámára

$$n_1 r_1 = n_k r_1 + n_k r_2 - n_2 r_2 \quad (4.14)$$

Az két kinematikai levezetés során kapott egyenleteket, azaz a (4.7) és a (4.14) összeadva

$$n_1 r_1 + n_3 r_3 = n_k r_1 + n_k r_3 \quad (4.15)$$

A (4.15) egyenletet elosztva a napkerék sugarával

$$\frac{r_3}{r_1} n_3 + n_1 = n_k \left(\frac{r_1 + r_3}{r_1} \right) \quad (4.16)$$

A (4.16) egyenletet rendezve

$$\frac{r_3}{r_1} n_3 + n_1 = n_k \left(1 + \frac{r_3}{r_1} \right) \quad (4.17)$$

Mivel a Ravigneaux összetett bolygómű két egysége között a bolygókerek kapcsolódnak egymáshoz, ezért az a fordulatszámegyenlet, mely csak a napkerék és a gyűrűkerék fordulatszámát tartalmazza, meg fog egyezni az egyszerű bolygómű egyenletével. Ez a feltevés a (4.17) egyenlettel be is látható. Az egyszerű bolygóművek esetében a többi egyenlet felírásához elegendő a (4.7) és a (4.14) egyenletekből kifejezni a kar fordulatszámát. A fordulatszámok az 3.2. ábrán látható álló konzolhoz vannak viszonyítva. A levezetésekben a karral együtt a bolygókereket is elforgattuk „ ϕ_k ” szöggel,

ezért a gyűrűkereket illetve a napkereket vissza kellett forgatni alaphelyzetbe, ami a konzolhoz viszonyítva (3.2. ábra) nulla fokos szöghelyzet. A Ravigneaux- bolygómű bolygókerékei közös karral rendelkeznek és egymással is kapcsolódnak, így a többi egyenlet felírásánál a fordulatszámokat nem az állványhoz, hanem a karhoz viszonyítva értelmezhetők.

E szerint a (4.1) egyenlet a következőképpen módosul:

$$\Phi_2 = \Phi_k + \Phi_b \quad (4.18)$$

A bolygókerék szögelfordulását (4.2) behelyettesítve az (4.18) egyenletbe

$$\Phi_2 = \Phi_k + \Phi_3 \frac{r_3}{r_2} \quad (4.19)$$

Az elforduláshoz tartozó „t” idővel osztva a (4.19) egyenletet, szögsebességeket kapunk

$$\omega_2 = \omega_k + \omega_3 \frac{r_3}{r_2} \quad (4.20)$$

Az (4.20) egyenletet elosztva 2π -vel, felírhatók a karhoz viszonyított fordulatszámok

$$n_2 = n_k + n_3 \frac{r_3}{r_2} \quad (4.21)$$

A fenti egyenletet rendezve a kar fordulatszámára

$$n_3 - n_2 \frac{r_2}{r_3} = n_k \quad (4.22)$$

Napkerék-bolygókerék mozgásának vizsgálatkor hasonlóan alakulnak az egyenletek, de nem a (4.1) hanem a (4.8) módosul.

$$\Phi_2 = \Phi_k - \Phi_d \quad (4.23)$$

A bolygókerék szögelfordulását (4.9) behelyettesítve az (4.23) egyenletbe

$$\Phi_2 = \Phi_k - \Phi_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (4.24)$$

Az elforduláshoz tartozó „t” idővel osztva a (4.24) egyenletet, szögsebességeket kapunk

$$\omega_2 = \omega_k - \omega_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (4.25)$$

Az (4.25) egyenletet elosztva 2π -vel, felírhatók a karhoz viszonyított fordulatszámok

$$n_2 = n_k - n_1 \frac{r_1}{r_2} \quad (4.26)$$

A fenti egyenletet rendezve a kar fordulatszámára

$$n_2 \frac{r_2}{r_1} + n_1 = n_k \quad (4.27)$$

A (4.22) és a (4.27) fordulatszámegyenletek már különböznek az egyszerű bolygóművek [1] fordulatszámegyenleteitől, mivel a bolygókerek fordulatát nem az konzolhoz (3.2. ábra), hanem a bolygókeréktartó karhoz a viszonyítjuk. Ezek a levezetett egyenletek helyességét mérésrel és számítással is ellenőriztük. A méréshez első lépésben a Ravigneaux 3D modellt készítettük el.

5. Ravigneaux 3D-modellezés

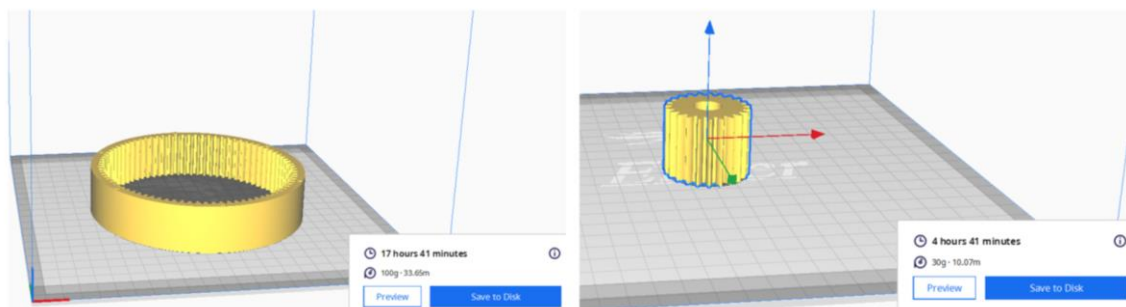
A modellezés során a Ravigneaux bolygómű fogaskerekei az Autocad 3D basic-ben kerültek modellezésre. A rajzok alapját a megfelelő méretek képzik. A bevezetésben említett szétszedett BMW sebességváltó fogaskerekeinek a fogszáma ismert, mivel a kinematikai viszonyokat a fogaskerek modulja nem befolyásolja, a méretekből adódóan célszerűen $m=3$. Melyet szorozva a fogszámmal meghatározható a fogaskerék osztókör átmérője. A modul és a fogszám ismerete alapján meghatározhatók a lábkör- és fejkörátmérő, lábhézag, fejmagasság és a lábmagasság is, melyek alapján az egyes fogaskerek megrajzolhatóak. Mivel a modell kapcsolódó fogaskerekeket tartalmaz, melyek működésének egyik feltétele a megfelelő foghézag, ezért elsőnek a napkerek helyét kell rögzíteni. Melyekhez egy minimális hézaggal a hozzájuk és ez egymáshoz kapcsolódó bolygókerekeket rögzítettük, majd ezt követi a bolygókeréktartó kar, ami egyben a napkerekhez képest rögzíti a bolygókerek helyét.

A fogaskerek fogszámait KB típus $r_{II_1} = 38$, $r_{II_2} = 23$, $r_{II_3} = 85$. Elemi fogaskerékpároknál a napkerék sugara és a bolygókerék átmérő összege a gyűrűkerék sugarával egyenlő. A megszámlolt fogszámokat összeadva kisebb értéket kapunk, mint a gyűrűkerék sugara, tehát a kapcsolódó fogaskerek profileltolások fogaskerékpárok. Ahhoz, hogy a Ravigneaux-modell működőképes legyen egy minimális foghézaggal modelleztünk. Az Autocad-ben 1:2 méretarányban megrajzolt modell az 5.1. ábrán látható.



5.1. ábra: Ravigneaux-bolygómű Autocad 3D basic modell

A modellezést követően a nyomtatás következett. A nyomtatását a Légi- és Közúti Járművek Tanszék biztosította. Maga nyomtatás elvégzése Vértessy Bálint, járműmérnök hallgatótársamnak köszönhető. Első lépésben a megfelelő filamentet választottuk ki majd az Autocad-ben mentett „.dxf” formátumú fájlokat konvertáltuk. Mivel ezt a formátumot a nyomtatóval kompatibilis szoftver nem képes feldolgozni. A konvertálás Fusion 360 program segítségével valósult meg „.3mf” típusú fájlokba. A konvertálás után az Ultimaker Cura programmal nyomtatható ki a modell, ami egy becsült nyomtatási időt és felhasználásra kerülő anyagtömeget is ad. Ezáltal kalkulálható volt az elkészítési idő és a szükséges filament.



5.2. ábra: Ultimaker Cura szoftver

A modell nyomtatása nem összeszerelt állapotban valósult meg, így az elemek egyesével történő kinyomtatása után az összetett bolygóművet össze kellett szerelni. A tengelyek csőtengely kialakításúak, melyek egymásba csúszthatók, ezzel is biztosítva az egyszerű szerelhetőséget. Az egyes elemek egymáshoz képesti rögzítését, a tengelyek hornyaiba illeszkedő kisebb nyomtatott rögzítőgyűrűk biztosítják. A Ravigneaux-egység körülbelül 40 óra és 250-300 gramm PLA fehér műanyag felhasználásával lett kinyomtatva. A kinyomtatott modell a 5.3. ábrán látható.



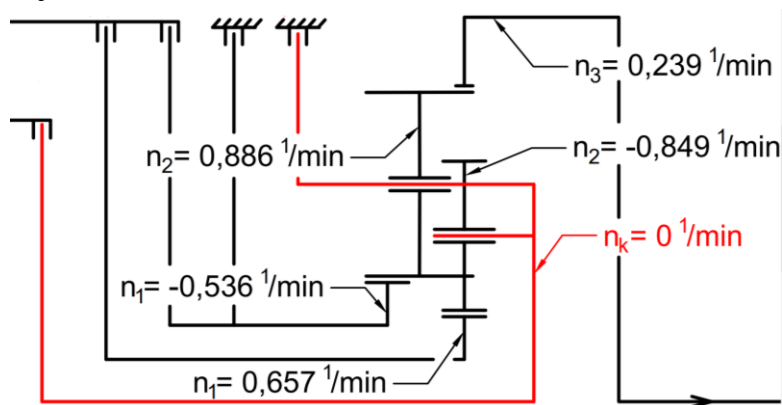
5.3. ábra: Ravigneaux-bolygómű 3D-modell

A modell célja, hogy mérés során a Ravigneaux-bolygóműre levezetett fordulatszámegyenletekben szereplő fordulatszámárányok meghatározásra kerüljenek. Ha a ZF

gyár által publikált összetett bolygómű fordulatszám arányaival megegyezik, akkor ezzel bizonyítottuk a levezetett egyenletek helyességét.

6. Ravigneaux-bolygómű fordulatszámainak meghatározása méréssel

Méréssel a Ravigneaux- bolygómű 3D modell fogaskerekeinek a fordulatszámát szükséges meghatározni, melyből az egymáshoz viszonyított arányuk kiszámítható. Mivel a fordulatszámok és a fordulatok számának aránya megegyezik, így elegendő a fordulatok számát megszámlálni. A Ravigneaux- bolygómű fordulatok számainak aránya a gyár által publikált fordulatszámok arányaival összehasonlítva, levonható a következtetés a 4. fejezetben levezetett egyenletek helyességével kapcsolatban. A gyár által publikált adatok, egyben referencia értéként is értelmezhetők. A mérés a szétszedett ZF6HP26 sebességváltó fokozatai közül az első sebességfokozatban lett konstruálva. Ebben a fokozatban a Ravigneaux- egység közös karja rögzítve van, ezért csak a bolygókerék saját tengelyük körüli forgását kell vizsgálni. A KB napkerék és a K bolygókerék fordulata az óramutató járásával ellentétes irányú, ez az arányok számításánál elhanyagolható, mivel az arányok előjele között lesz különbség, az értékük között nem. Az alábbi ábra a ZF6HP26 sebességváltó első fokozatában az összetett bolygómű elvi vázlatát mutatja, feltüntetve a publikált fordulatszámokkal. A piros szín a nulla fordulatszámú kart jelöli.



6.1. ábra: Ravigneaux-bolygómű elvi vázlata első fokozatban a gyár által publikált fordulatszámokkal

Elsőként a 6.1. ábrán lévő fordulatszámok között egy arányt írunk fel. Ezt követően a méréssel kapott fordulatok száma között ugyanazt az arányt meghatározzuk, mint a publikált fordulatszámokkal és a két értéket párhuzamban vonjuk. Az egymáshoz viszonyított fordulatszám arányokat a 6.1. táblázat adja meg.

6.1. táblázat

KB-típusú bolygómű fogaskerekeinek fordulatszámaránya	
Napkerék-bolygókerék:	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{0,536}{0,886} = 0,605$

Napkerék-gyűrűkerék:	$\frac{n_1}{n_3} = \frac{0,536}{0,239} = 2,243$
Bolygókerék-gyűrűkerék:	$\frac{n_2}{n_3} = \frac{0,886}{0,239} = 3,707$
K-típusú bolygómű fogaskerekeinek fordulatszámaránya	
Napkerék-bolygókerék:	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{0,849}{0,657} = 1,292$

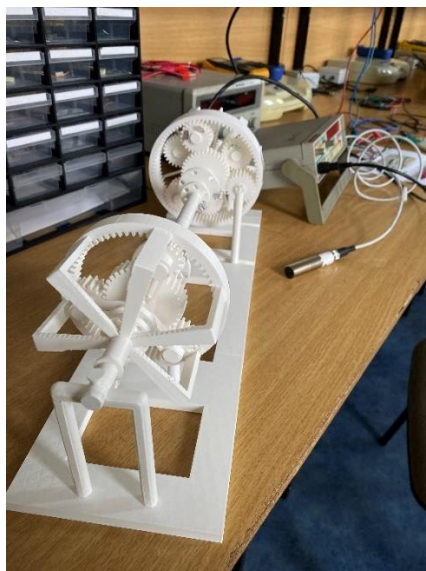
Közelítő értékek meghatározása céljából a Ravigneaux- bolygómű egység forgásáról készült egy videó. Melyben megszámlálható, hogy ha a gyűrűkerék fordulatanak száma 2, mennyiszer fordul körbe a többi elem. Az így kapott számokkal és az arányok felírásával közel a gyár által publikált arányokat kaptuk.

A pontos arány felírásához a mérés szükséges. Mely a Mechatronikai Tanszéken valósult meg Darai Gyula tanár úr segítségével. Mivel a mérés nem közvetlen a modellezés után valósult meg és felvetődött a sebességváltó modellezése, így a mérés már az előtét bolygóművet is tartalmazó modellen lett elvégezve.

6.1 A mérés menete

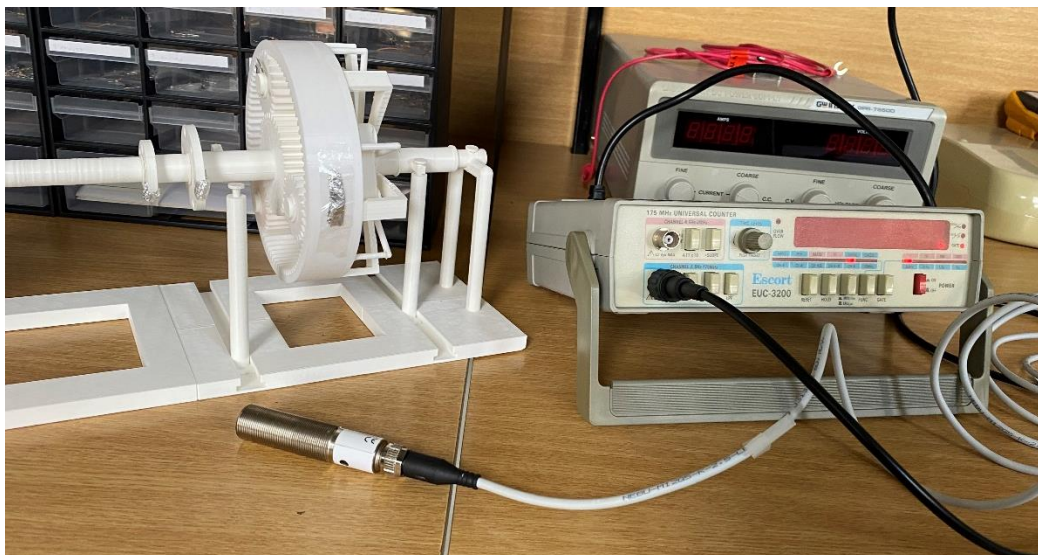
A mérést egy induktív érzékelővel valósítottuk meg. Az induktív érzékelő fém tárgyak érintés nélküli érzékelésére lett kifejlesztve, mivel ez a szenzor az általa létrehozott mágneses tér elhangolását érzékeli. A közelébe kerülő fém tárgy módosítja az erővonalak hosszát, azaz elhangolja a belső frekvenciát [17]. Ezen tulajdonságnak köszönhetően a modell forgó részeinek a mozgása vizsgálható.

Elsőként a mérendő elemekre alumínium darabokat ragasztottunk, amiket a szenzor érzékel 5mm-es távolságból érzékel. Az induktív érzékelő típusa, amivel a mérést végeztük Balluff BES 516-326-s4-c.



6.2. ábra: Ravigneaux-bolygómű fordulatok számának mérése I.

Ahogy az érzékelő előtt elhaladt az alumínium darab a számláló mindig eggyel több érték megjelent. A mérés során használt számláló Escort EUC 3200 volt.



6.3. ábra: Ravigneaux-bolygómű fordulatok számának mérése II.

A mérések során kapott fordulatokokszámát az alábbi táblázatok foglalja magába. Mivel a számláló egész számarányokat mutat, így a mérés során készült képekből és fogasszámokat visszaszámoltunk, hogy a teljes kör után még mennyit fordult a fogaskerék. A 6.2. táblázat a gyűrűkerék 2 darab fordulatához tartozó fordulatszámokat tartalmazza.

6.2. táblázat

KB-típusú bolygómű	K-típusú bolygómű
Napkerék: 3,8	Napkerék: 7,5
Bolygókerék: 6,2	Bolygókerék: 6
Gyűrűkerék: 2	

A 6.3. táblázat azokat a fordulat darabszámokat tartalmazza, melyek a KB napkerék 4 darab fordulatához tartoznak.

6.3. táblázat

KB-típusú bolygómű	K-típusú bolygómű
Napkerék: 4	Napkerék: 5,5
Bolygókerék: 6,8	Bolygókerék: 4
Gyűrűkerék: 2,1	

A mért fordulatok száma között, mint a publikált fordulatszámokkal az arányok felírhatóak, mivel két mérést végeztünk a kapott arányokat átlagoljuk, melyet a 6.4. táblázat mutat.

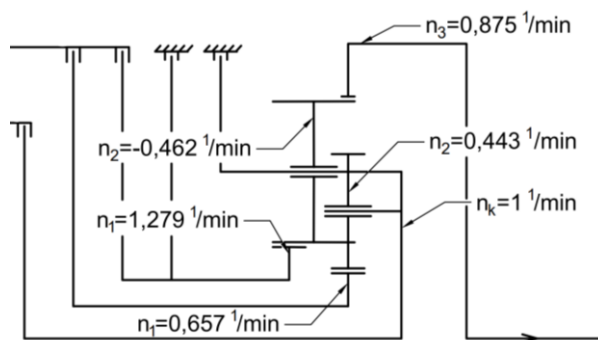
6.4. táblázat

KB-típusú bolygómű fogaskerekeinek fordulatszámaránya			Átlagok
Napkerék-bolygókerék:	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{3,8}{6,2} = 0,613$	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{4}{6,8} = 0,588$	0,601
Napkerék-gyűrűkerék:	$\frac{n_1}{n_3} = \frac{3,8}{2} = 1,9$	$\frac{n_1}{n_3} = \frac{4}{2,1} = 1,91$	1,9
Bolygókerék-gyűrűkerék:	$\frac{n_2}{n_3} = \frac{6,2}{2} = 3,1$	$\frac{n_2}{n_3} = \frac{6,8}{2,1} = 3,238$	3,17
K-típusú bolygómű fogaskerekeinek fordulatszámaránya			Átlagok
Napkerék-bolygókerék:	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{7,5}{6} = 1,25$	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{5,5}{4} = 1,375$	1,31

A mért és a számolt arányok közel azonosnak tekinthetők. Ezzel mérésel bizonyítottuk a fordulatszám egyenletek helyességét.

7. Fordulatszámegyenlet helyességének ellenőrzése számítással

A mérésel megállapított fordulatszám arányok megegyeznek a számított arányokkal, melyből megállapítható, hogy az összetett bolygóműre levezetett fordulatszámegyenletek alkalmazhatók a ZF6HP26 sebességváltó áttételének meghatározásához. De a mérésel csak egy konkrét arány lett bizonyítva, viszont az egyenletek helyességét számítással lehet igazolni, mellyel nemcsak az arányok, hanem a teljes egyenlőség ellenőrizhető. Elsőnek egy sebességfokozat választása szükséges, amelyben az összetett bolygóműre levezetett egyenletek vizsgálhatók. A mérés elvégzése a sebességváltó első fokozatában történt, viszont ebben a sebességfokozatban a bolygókeréktartókar rögzítve van, így biztos, hogy a fordulatszámegyenletek jobb oldala is nulla, ezért ebben a fokozatban nem célszerű számítással igazolni az egyenleteket. Érdemesebb egy olyan kinematikai viszonyt vizsgálni, melyben egyik szerkezeti elem sincs lefékezve. Így a negyedik fokozatban ellenőrizzük a (4.15), (4.18) és a (4.21) fordulatszámegyenletek. A ZF gyár ebben sebességfokozatban is publikálta a fordulatszámokat, melyeket a 7.2. ábra mutat a Ravigneaux- összetett bolygómű kinematikai vázlatán.



7.2. ábra: Ravigneaux-bolygómű elvi vázlata első fokozatban a gyár által publikált fordulatszámokkal

Az ellenőrzés során a fordulatszámegyenletekbe a fenti fordulatszámokat és a sugarakat behelyettesítve az egyenletek ellenőrizhetők. Mivel a kapcsolódó fogaskerekek moduljai azonosak, így az „ $r=mz$ ” összefüggés alapján a sugarak aránya megegyezik a fogsók arányával, ezért az egyenletekben a sugarak helyett a fogsók is írhatók.

A szétszedett BMW sebességváltó fogaskerekeinek a fogsókait megszámláltuk, melyek az egyenletekbe beírhatók.

Ravigneaux- összetett bolygómu egység adatai:

KB típusú bolygómu: $r_{II_1} = 38$, $r_{II_2} = 23$, $r_{II_3} = 85$

K típusú bolygómu: $r_{III_1} = 31$, $r_{III_2} = 24$

A megkülönböztetés miatt a KB bolygómu adatait alsó „II” a K bolygómu adatait pedig „III” index jelöli.

Az adatok ismeretében a fordulatszámegyenletekbe behelyettesíthetők. Elsőnek a KB típusú bolygómu adatai lesznek vizsgálva. A (4.17) egyenlet megegyezik az egyszerű bolygómuvekre felírható fordulatszámegyenlettel, mivel nem szerepel benne a bolygókerék adatai, így az az egyenlőség biztos teljesül. A (4.17) fordulatszámegyenletbe való behelyettesítése:

$$1,279 + \frac{85}{38} 0,875 = \left(1 + \frac{85}{38}\right) \quad (7.1)$$

$$3,236 = 3,236 \quad (7.2)$$

A (4.22) egyenlet a bolygókerék és a gyűrűkerék közötti kapcsolatot adja meg. A 7.2. ábra szemlélteti, hogy a bolygókerék fordulata az óra járásával ellentétes, ezért a fordulatszámának az előjele mínusz, melyet az egyenletbe való beírásnál is figyelembe kell venni. A (4.22) fordulatszámegyenletbe való behelyettesítés:

$$0,875 - \frac{23}{85} (-0,462) = 1 \quad (7.3)$$

$$1 = 1 \quad (7.4)$$

A (4.27) fordulatszámegyenlet a bolygókerék és a napkerék közötti kapcsolatot írja, melybe az ismert adatok behelyettesíthetők:

$$1,279 + \frac{23}{38} (-0,462) = 1 \quad (7.5)$$

$$1 = 1 \quad (7.6)$$

Ezt követően a K típusú bolygómű adatait is behelyettesítve a (4.27) fordulatszámegyenletbe:

$$0,657 + \frac{24}{31}0,443 = 1 \quad (7.7)$$

$$1 = 1 \quad (7.8)$$

Az összetett bolygóműre levezett fordulatszámegyenletekbe behelyettesítve az egyenlőségek teljesülnek, ezzel is igazolva a levezetett fordulatszám egyenletek helyességét. A két ellenőrzési mód után a ZF6HP26 sebességváltó áttétele meghatározható a levezetett egyenletek használatával. Az áttételek meghatározása előtt vizsgáljuk meg a bolygóművek forgásirányait.

8. Fogaskerek egyarához viszonyított elfordulása

A fogaskerek forgásának irányát az egyes sebességfokozatokban célszerű egy táblázatba összefoglalni. Az 8.1. táblázatban a zöld színű nyíl az óramutató járásával megegyező forgást, a kék színű nyíl az azzal ellentétes irányú forgást szemlélteti. A piros színű nyíl annak a szerkezeti elemnek a forgásirányát adja meg, melynek van le nem kötött szabadságfoka, így rendelkezik egy adott fordulatszámmal, de a későbbiekben ez az áttétel számításban nem vesz részt. Az összes fokozatban az előtét KB típusú bolygómű napkerekére fékezve van, így a fordulatszáma nulla és a gyűrűkerek, a bolygókerek, illetve a kar az óramutató járásával megegyező irányban forog. A Ravigneaux- összetett bolygómű fogaskerekének forgása viszont az összes fokozatban más és más, mivel az áttétel módosításban játszik szerepet.

Az első sebességfokozatban a bolygókeréktartókar a fékezett elem. Ebben a fokozatban a bolygókerek csak a saját tengelyük körül forognak, bolygómozgást nem végeznek a saját napkerekük körül.

A második sebességfokozatnál a KB-típusú napkerék fordulatszáma nulla, melyről csúszásmentesen gördül le a saját bolygókerek.

A harmadik sebességfokozatban a forgásviszonyok megértéséhez egy kisebb levezetés szükséges. A KB és K típusú bolygóműre felírva külön-külön 4. fejezetben meghatározott (4.27) fordulatszámegyenletet, mivel a kar közös, így a két egyenlet egyenlő lesz.

$$n_{KB_1} + \frac{r_{KB_2}}{r_{KB_1}} n_{KB_2} = n_{K_1} + \frac{r_{K_2}}{r_{K_1}} n_{K_2} \quad (8.1)$$

A két napkerék fordulatszáma ebben a fokozatban megegyezik, egyszerűsíthető az egyenlet

$$\frac{r_{KB_2}}{r_{KB_1}} n_{KB_2} = \frac{r_{K_2}}{r_{K_1}} n_{K_2} \quad (8.2)$$

A forgásviszonyokból adódó bolygókerék közötti peremfeltétel felírása

$$n_{KB_2} = -\frac{r_{K_2}}{r_{KB_2}} n_{K_2} \quad (8.3)$$

A (8.3) egyenletet behelyettesítve a (8.2) egyenletbe

$$-\frac{r_{K_2}}{r_{KB_2}} n_{K_2} = \frac{r_{K_2}}{r_{K_1}} n_{K_2} \quad (8.4)$$

A (8.4) egyenlet rendezve és kiemelve a K bolygókerék fordulatszámát

$$n_{K_2} \left(\frac{r_{K_2}}{r_{K_1}} + \frac{r_{K_2}}{r_{KB_2}} \right) = 0 \quad (8.5)$$

A (8.6) egyenlőség akkor teljesül, ha:

$$\left(\frac{r_{K_2}}{r_{K_1}} + \frac{r_{K_2}}{r_{KB_2}} \right) = 0 \quad \text{vagy} \quad n_{K_2} = 0 \quad (8.7)$$

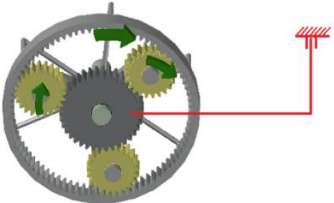
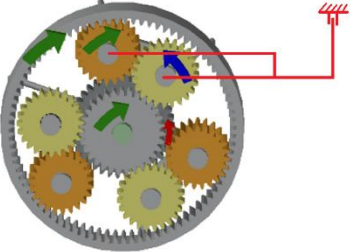
Mivel a fogaskerek sugara nem lehetnek negatív számok és zérusok sem, így a K típusú bolygókerék fordulatszáma lesz egyenlő nullával. A (8.3) egyenlet alapján, ha a K típusú bolygókerék fordulatszáma nulla, abban az esetben a KB típusú bolygókerék fordulatszáma is nulla lesz. Belátható, hogy ebben a sebességfokozatban egyik elem sincs fékezve, de mégis a bolygókerék karhoz viszonyított fordulatszáma nulla. Ez a rövidre zárt sebességfokozat, összefoglalva az a fokozat, melyben a két napkerék és a közös kar fordulatszáma megegyezik, így a fenti levezetés alapján áttételmódosítás nem történik.

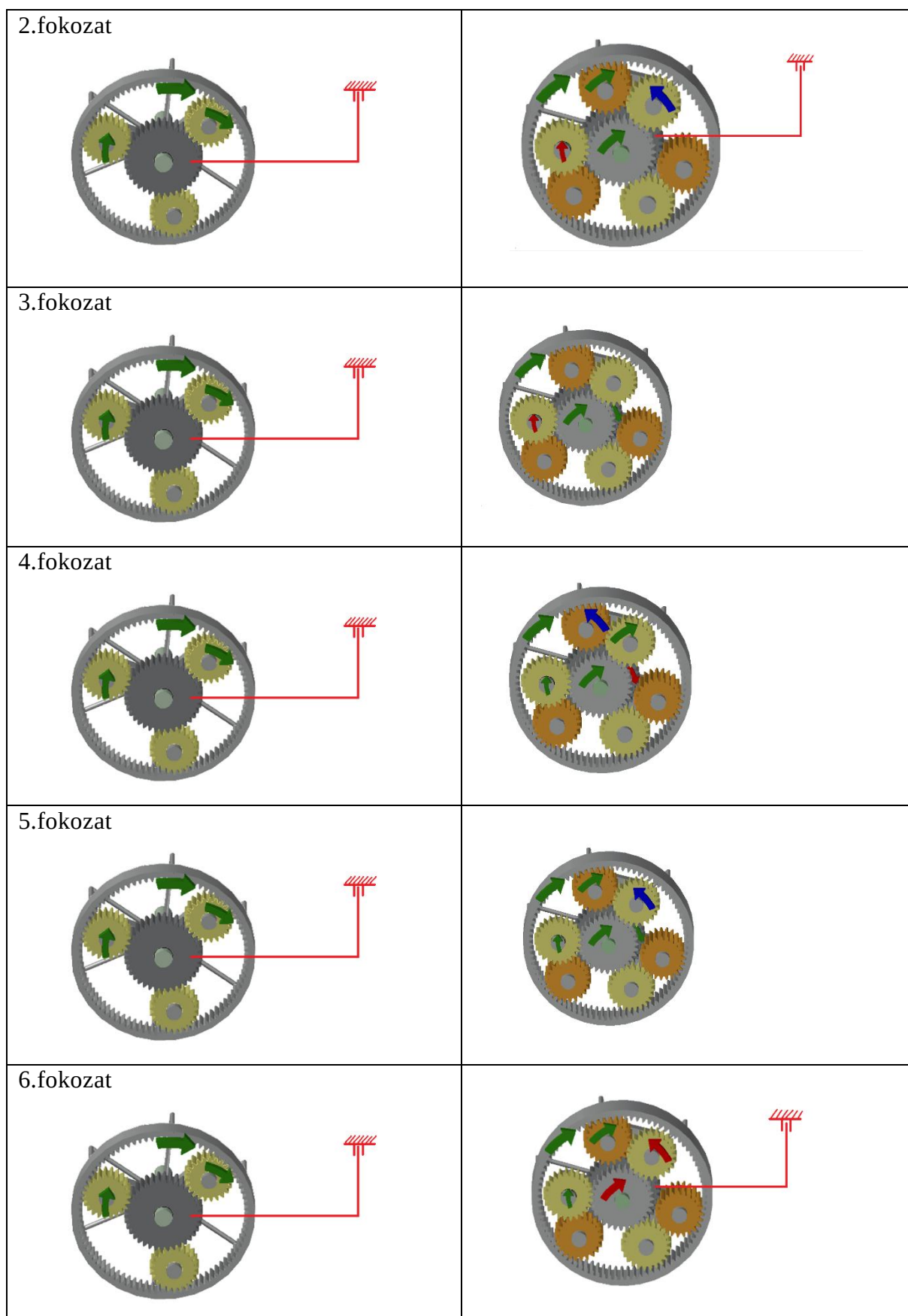
A negyedik és az ötödik sebességfokozatokban nincs fékezett rész. A negyedikben a KB napkerék rendelkezik még szabad szabadságfokkal, az ötödik sebességfokozatban a K bolygómű napkereke és a bolygókeréke.

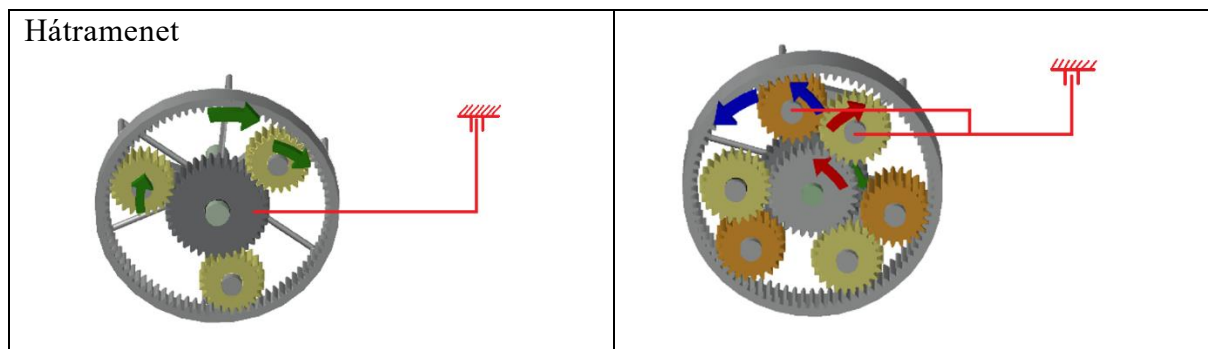
A hatodik sebességfokozatban a KB napkerék fordulatszáma nulla. A le nem kötött szabadságfokú elem a K napkerék és a hozzátartozó bolygókerék.

A hátrameneti sebességfokozat párhuzamba vonható az első sebességfokozattal azzal a különbséggel, hogy az összes fogaskerék forgásiránya ellentétes az első fokozatban levő forgásirányokkal. Vagyis a rögzített elem a közös kar. A le nem kötött szabadságfokkal rendelkező elemek a KB bolygókerék.

8.1. táblázat

Előtét bolygómű	Ravigneuax bolygómű
1.fokozat 	



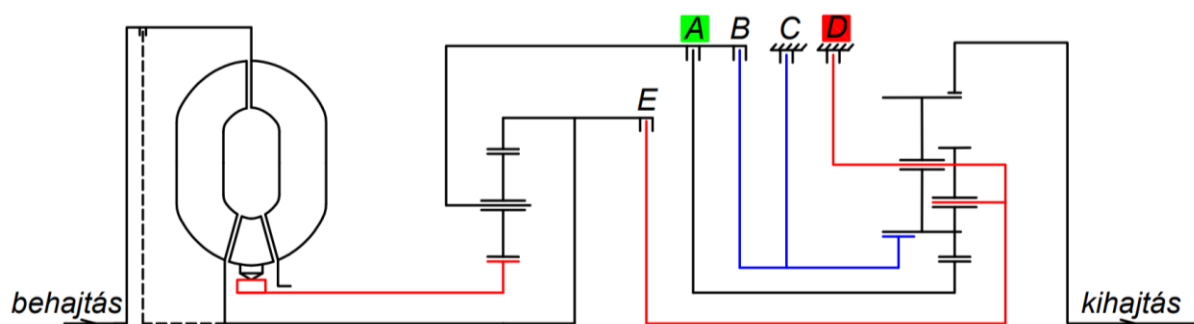


A fenti táblázatban szemléltetett forgásviszonyok a kinyomtatott Ravigneaux- 3D modellen is megfigyelhetők és értelmezhetők. A fogaskerek fordulatainak egymáshoz viszonyítása után áttérhetünk az egyes fokozatokban az áttételek számítására.

9. ZF6HP26 sebességváltó áttételének meghatározása

Az áttételek meghatározásánál kinematikai ábrák mutatják az összekapcsolt, vagy fékezett részeket. A fékezett elemeket piros szín jelöli, a zöld szín pedig a működő tengelykapcsolókat. A kék szín azokat a szerkezeti egységeket szemlélteti, melyeknek van le nem kötött szabadságfoka, így a fordulatszámuk adott, de az áttétel számításban nem játszanak szerepet. Az A, B és az E tengelykapcsolókat, a C és a D betűk fékeket jelentenek.

9.1 Első fokozatban az áttétel meghatározása



9.1. ábra: Első fokozat

Előtét KB- típusú bolygómu fordulatszám egyenletének felírása

$$n_{I_1} + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}} n_{I_3} = \left(1 + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}}\right) n_{I_k} \quad (9.1)$$

A peremfeltétel: $n_{I_1} = 0$, $n_{I_3} = n_m$ behelyettesítése a (9.1) egyenletbe

$$n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.2)$$

A (9.2) egyenlet adja meg az előtét bolygómű áttételét paraméteresen, ahol a kar fordulatszáma a kihajtás, a motor fordulatszáma a behajtás.

Ravigneaux-bolygómű fordulatszám egyenleteinek felírása

K-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{III_1} + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_k \quad (9.3)$$

A peremfeltétel: $n_{III_1} = n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m$, $n_k = 0$ behelyettesítése a (9.3) egyenletbe

$$n_{III_2} = -\frac{r_{III_1}}{r_{III_2}} \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.4)$$

A forgásviszonyokból adódó bolygókerék közötti peremfeltétel felírása

$$n_{III_2} = -\frac{r_{II_2}}{r_{III_2}} n_{II_2} \quad (9.5)$$

A (9.5) egyenlet behelyettesítése a (9.4) egyenletbe

$$n_{II_2} = \frac{r_{III_1}}{r_{II_2}} \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.6)$$

A (9.6) egyenletben szereplő fordulatszámok a motor és a KB-típusú bolygókerék fordulatszáma. Továbbiakban a bolygókerék és a kimenő, vagyis a gyűrűkerék fordulatszáma között kell kapcsolatot létrehozni.

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_3} - \frac{r_{II_2}}{r_{II_3}} n_{II_2} = n_k \quad (9.7)$$

A peremfeltétel: $n_{II_3} = n_{ki}$, $n_k = 0$ behelyettesítése a (9.7) egyenletbe és rendezve

$$n_{ki} - \frac{r_{II_2}}{r_{II_3}} n_{II_2} = 0 \quad (9.8)$$

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_2}} n_{ki} = n_{II_2} \quad (9.9)$$

A (9.6) és a (9.9) egyenleteket egyenlővé téve

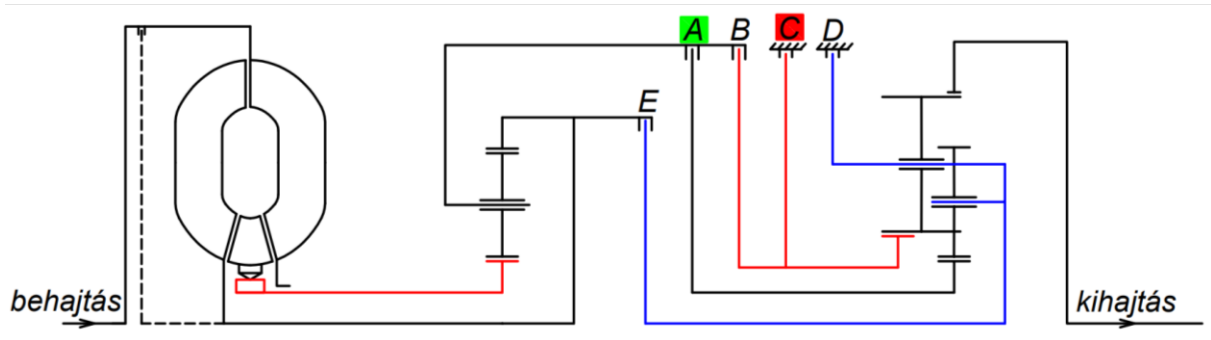
$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_2}} n_{ki} = \frac{r_{III_1}}{r_{II_2}} \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.10)$$

A (9.10) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{II_3}(r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{III_1} r_{I_3}} \quad (9.11)$$

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{II_3}(r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{III_1} r_{I_3}} = \frac{85 \cdot 108}{31 \cdot 71} = 4,171 \quad (9.12)$$

9.2 Második fokozat áttétel meghatározása



9.2. ábra: Második fokozat

Előtét KB- típusú bolygómű fordulatszám egyenletének felírása

$$n_{I_1} + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}} n_{I_3} = \left(1 + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}}\right) n_{I_k} \quad (9.13)$$

A peremfeltétel: $n_{I_1} = 0$, $n_{I_3} = n_m$ behelyettesítése a (9.13) egyenletbe

$$n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.14)$$

A (9.14) egyenlet adja meg az előtét bolygómű áttételét paraméteresen, ahol a kar fordulatszáma a kihajtás, a motor fordulatszáma a behajtás.

Ravigneaux-bolygómű fordulatszám egyenleteinek felírása

K-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{III_1} + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_k \quad (9.15)$$

A peremfeltétel: $n_{III_1} = n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m$ behelyettesítése a (9.15) egyenletbe és rendezve

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_k \quad (9.16)$$

$$n_{III_2} = \frac{r_{III_1}}{r_{III_2}} n_k - \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{III_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.17)$$

A forgásviszonyokból adódó bolygókerek közötti peremfeltétel felírása

$$n_{III_2} = -\frac{r_{II_2}}{r_{III_2}} n_{II_2} \quad (9.18)$$

A (9.18) egyenlet behelyettesítése a (9.17) egyenletbe

$$n_{II_2} = -\frac{r_{III_1}}{r_{II_2}} n_k + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.19)$$

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{II_3} = \left(1 + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}}\right) n_k \quad (9.20)$$

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} = n_k \quad (9.21)$$

A peremfeltétel: $n_{II_1} = 0$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.20) egyenletbe

$$n_k = \frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} \quad (9.22)$$

A peremfeltétel: $n_{II_1} = 0$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.21) egyenletbe

$$n_{II_2} = \frac{r_{II_1}}{r_{II_2}} \frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} \quad (9.23)$$

A (9.19) és az (9.16) egyenleteket egyenlővé téve

$$\frac{r_{II_1} r_{II_3}}{r_{II_2}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = -\frac{r_{III_1}}{r_{II_2}} n_k + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.24)$$

Az (9.22) egyenlet behelyettesítése az (9.24) egyenletbe

$$\frac{r_{II_1} r_{II_3}}{r_{II_2}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = -\frac{r_{III_1} r_{II_3}}{r_{II_2}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.25)$$

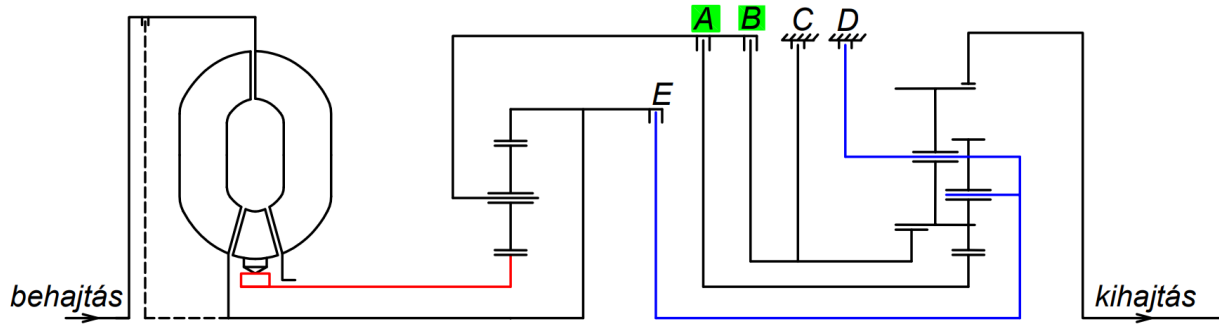
Az (9.25) egyenletben a kihajtás fordulatszámát egyoldalra rendezve

$$\frac{r_{II_3}(r_{II_1} + r_{III_1})}{r_{II_2}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.26)$$

Az (9.26) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{II_3}(r_{II_1} + r_{III_1})(r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{III_1} r_{I_3}(r_{II_1} + r_{II_3})} = \frac{85 \cdot 69 \cdot 108}{31 \cdot 71 \cdot 123} = \mathbf{2,340} \quad (9.27)$$

9.3 Harmadik fokozat áttétel meghatározása



9.3. ábra: Harmadik fokozat

Előtét KB- típusú bolygómu fordulatszám egyenletének felírása

$$n_{I_1} + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}} n_{I_3} = \left(1 + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}}\right) n_{I_k} \quad (9.28)$$

A peremfeltétel: $n_{I_1} = 0$, $n_{I_3} = n_m$ behelyettesítése a (9.28) egyenletbe

$$n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.29)$$

Az (9.29) egyenlet adja meg az előtét bolygómu áttételét paraméteresen, ahol a kar fordulatszáma a kihajtás, a motor fordulatszáma a behajtás.

Ravigneaux-bolygómu fordulatszám egyenleteinek felírása

K-típusú bolygómu 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{III_1} + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_k \quad (9.30)$$

A peremfeltétel: $n_{III_1} = n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m$ behelyettesítése az (9.30) egyenletbe

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_k \quad (9.31)$$

Az (9.31) egyenletből a további levezetés miatt célszerű kifejezni a bolygókerék fordulatszámát

$$n_{III_2} = \frac{r_{III_1}}{r_{III_2}} n_k - \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{III_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.32)$$

A forgásviszonyokból adódó bolygókerek közötti peremfeltétel felírása

$$n_{III_2} = -\frac{r_{II_2}}{r_{III_2}} n_{II_2} \quad (9.33)$$

A (9.33) egyenlet behelyettesítése a (9.32) egyenletbe

$$n_{II_2} = -\frac{r_{III_1}}{r_{II_2}} n_k + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_2} (r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.34)$$

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{II_3} = \left(1 + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}}\right) n_k \quad (9.35)$$

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} = n_k \quad (9.36)$$

A peremfeltétel: $n_{II_1} = n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.35) egyenletbe

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} = \frac{r_{II_1} + r_{II_3}}{r_{II_1}} n_k \quad (9.37)$$

A (9.37) egyenletből kifejezve a kar fordulatszámát

$$n_k = \frac{r_{II_1} r_{I_3}}{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} \quad (9.38)$$

A peremfeltétel: $n_{II_1} = n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.38) egyenletbe

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} = n_k \quad (9.39)$$

A (9.38) és a (9.39) egyenletek egyenlők

$$\frac{r_{II_1} r_{I_3}}{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} \quad (9.40)$$

A fenti egyenletben a motorfordulatszám együtthatóit összevonva

$$\frac{r_{II_1} r_{I_3} - r_{I_3} (r_{II_1} + r_{II_3})}{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} = \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} \quad (9.41)$$

A (9.34) egyenlet behelyettesítése a (9.41) egyenletbe

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} - \frac{r_{I_3} r_{II_3}}{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m = \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} \left(-\frac{r_{III_1}}{r_{II_2}} n_k + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \right) \quad (9.42)$$

A (9.42) egyenlet jobb oldalán zárójelfelbontás

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} - \frac{r_{I_3} r_{II_3}}{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m = -\frac{r_{III_1}}{r_{II_1}} n_k + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.43)$$

A (9.43) egyenletben a motor fordulatszámát egyoldalra rendezve

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} + \frac{r_{III_1}}{r_{II_1}} n_k = \frac{r_{I_3}(r_{III_1}(r_{II_1} + r_{II_3}) + r_{II_1} r_{II_3})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.44)$$

A (9.44) egyenletbe behelyettesítve a (9.38) egyenletet és egyszerűbb alakra rendezve

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} n_{ki} + \frac{r_{III_1} r_{I_3}}{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m + \frac{r_{III_1} r_{II_3}}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = \frac{r_{I_3}(r_{III_1} r_{II_1} + r_{III_1} r_{II_3} + r_{II_1} r_{II_3})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.45)$$

$$\frac{r_{II_3}(r_{III_1} + r_{II_1})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = \frac{r_{I_3}(r_{III_1} r_{II_1} + r_{III_1} r_{II_3} + r_{II_1} r_{II_3}) - r_{II_1} r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.46)$$

$$\frac{r_{II_3}(r_{III_1} + r_{II_1})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = \frac{r_{I_3} r_{III_1} r_{II_1} + r_{I_3} r_{III_1} r_{II_3} + r_{I_3} r_{II_1} r_{II_3} - r_{II_1} r_{III_1} r_{I_3}}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.47)$$

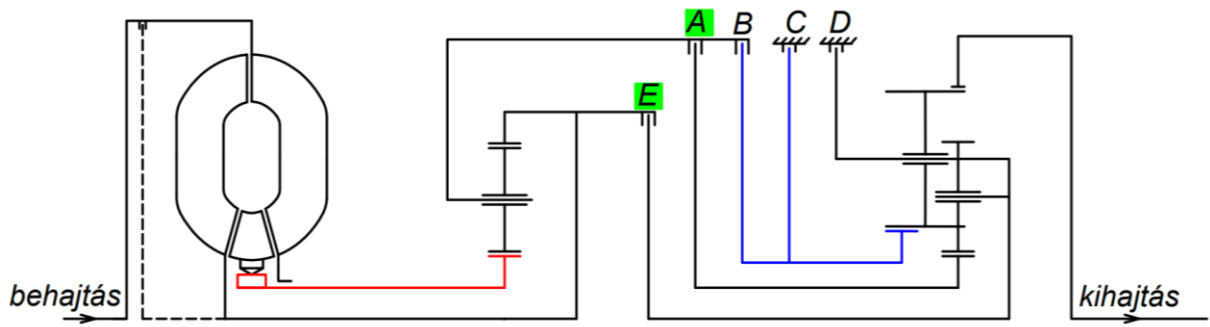
$$\frac{r_{II_3}(r_{III_1} + r_{II_1})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = \frac{r_{I_3} r_{III_1} r_{II_3} + r_{I_3} r_{II_1} r_{II_3}}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.48)$$

$$\frac{r_{II_3}(r_{III_1} + r_{II_1})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})} n_{ki} = \frac{r_{I_3} r_{II_3}(r_{III_1} + r_{II_1})}{r_{II_1}(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.49)$$

A (9.49) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{I_1} + r_{I_3}}{r_{I_3}} = \frac{108}{71} = \mathbf{1,521} \quad (9.50)$$

9.4 Negyedik fokozat áttétel meghatározása



9.4. ábra: Negyedik fokozat

Előtét KB- típusú bolygómű fordulatszám egyenletének felírása

$$n_{I_1} + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}} n_{I_3} = \left(1 + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}}\right) n_{I_k} \quad (9.51)$$

A peremfeltétel: $n_{I_1} = 0$, $n_{I_3} = n_m$ behelyettesítése a (9.51) egyenletbe

$$n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.52)$$

A (9.52) egyenlet adja meg az előtét bolygómű áttételét paraméteresen, ahol a kar fordulatszáma a kihajtás, a motor fordulatszáma a behajtás.

Ravigneaux-bolygómű fordulatszám egyenleteinek felírása

K-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{III_1} + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_k \quad (9.53)$$

A peremfeltétel: $n_{III_1} = n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m$, $n_k = n_m$ behelyettesítése a (9.53) egyenletbe

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{III_2}}{r_{III_1}} n_{III_2} = n_m \quad (9.54)$$

A (9.54) egyenletből kifejezve a bolygókerék fordulatszámát

$$n_{III_2} = \frac{r_{I_1} r_{III_1}}{r_{III_2} (r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.55)$$

A forgásviszonyokból adódó bolygókerék közötti peremfeltétel felírása

$$n_{III_2} = -\frac{r_{II_2}}{r_{III_2}} n_{II_2} \quad (9.56)$$

A (9.56) egyenlet behelyettesítése a (9.55) egyenletbe

$$n_{II_2} = -\frac{r_{I_1} r_{III_1}}{r_{II_2}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.57)$$

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{II_3} = \left(1 + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}}\right) n_k \quad (9.58)$$

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} = n_k \quad (9.59)$$

A peremfeltétel: $n_k = n_m$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.58) egyenletbe

$$n_{II_1} = \frac{r_{II_1} + r_{II_3}}{r_{II_1}} n_m - \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} \quad (9.60)$$

A peremfeltétel: $n_k = n_m$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.59) egyenletbe

$$n_{II_1} = n_m - \frac{r_{II_2}}{r_{II_1}} n_{II_2} \quad (9.61)$$

A (9.57) egyenlet behelyettesítése a (9.61) egyenletbe

$$n_{II_1} = \frac{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3}) + r_{III_1} r_{I_1}}{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.62)$$

A (9.62) és a (9.60) egyenlet egyenlő

$$\frac{r_{II_1} + r_{II_3}}{r_{II_1}} n_m - \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} = \frac{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3}) + r_{III_1} r_{I_1}}{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.63)$$

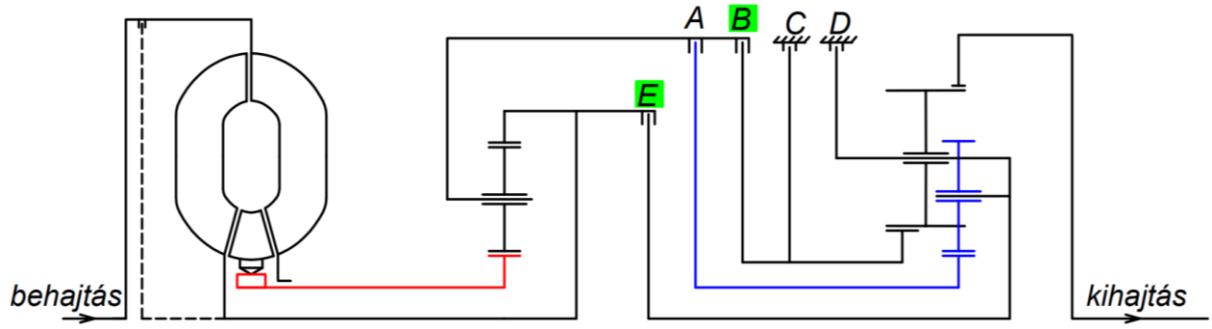
A motor fordulatszám együtthatóit összevonva a (9.63) egyenletben

$$\frac{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3}) - r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3}) - r_{III_1} r_{I_1}}{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m = \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} \quad (9.64)$$

A (9.64) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{II_3}(r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{II_3}(r_{I_1} + r_{I_3}) - r_{III_1} r_{I_1}} = \frac{85 \cdot 108}{108 \cdot 85 - 31 \cdot 37} = \mathbf{1,143} \quad (9.65)$$

9.5 Ötödik fokozat áttétel meghatározása



27. ábra: Ötödik fokozat

Előtét KB- típusú bolygómu fordulatszám egyenletének felírása

$$n_{I_1} + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}} n_{I_3} = \left(1 + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}}\right) n_{I_k} \quad (9.66)$$

A peremfeltétel: $n_{I_1} = 0$, $n_{I_3} = n_m$ behelyettesítése a (9.66) egyenletbe

$$n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.67)$$

A (9.67) egyenlet adja meg az előtét bolygómu áttételét paraméteresen, ahol a kar fordulatszáma a kihajtás, a motor fordulatszáma a behajtás.

Ravigneaux-bolygómu fordulatszám egyenleteinek felírása

KB-típusú bolygómu 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{II_3} = \left(1 + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}}\right) n_k \quad (9.68)$$

A peremfeltétel: $n_k = n_m$, $n_{II_1} = n_{Ik}$, $n_{II_3} = n_{ki}$ behelyettesítése a (9.68) egyenletbe

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} = \frac{r_{II_1} + r_{II_3}}{r_{II_1}} n_m \quad (9.69)$$

A (9.69) egyenlet azonos fordulatszámait egyoldalra rendezve, majd egyszerűsítve

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} = \frac{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3}) - r_{II_1} r_{I_3}}{r_{II_1}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.70)$$

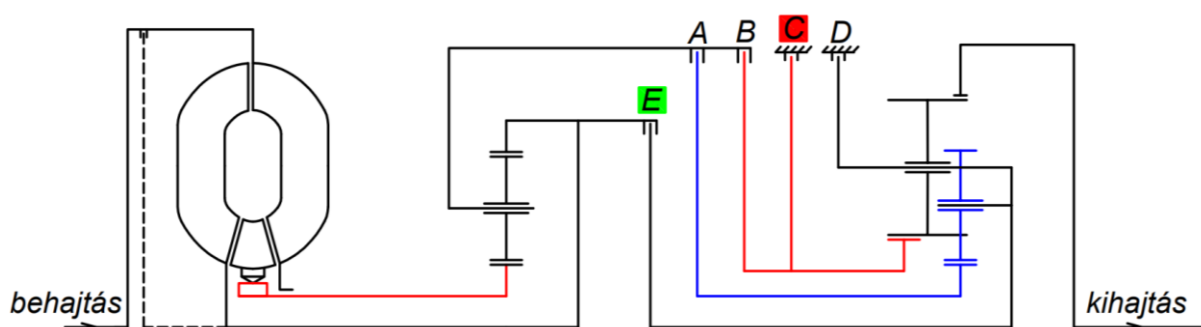
$$n_{ki} = \frac{(r_{II_1} + r_{II_3})(r_{I_1} + r_{I_3}) - r_{II_1} r_{I_3}}{r_{II_3}(r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.71)$$

$$n_{ki} = \frac{r_{II_1} r_{I_1} + r_{II_3} (r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{II_3} (r_{I_1} + r_{I_3})} n_m \quad (9.72)$$

A (9.72) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{II_3} (r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{II_1} r_{I_1} + r_{II_3} (r_{I_1} + r_{I_3})} = \frac{85 \cdot 108}{38 \cdot 37 + 85 \cdot 108} = \mathbf{0,867} \quad (9.73)$$

9.6 Hatodik fokozat áttétel meghatározása



9.6. ábra: Hatodik fokozat

Ravigneaux-bolygómű fordulatszám egyenleteinek felírása

KB-típusú bolygómű 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{II_3} = \left(1 + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}}\right) n_k \quad (9.74)$$

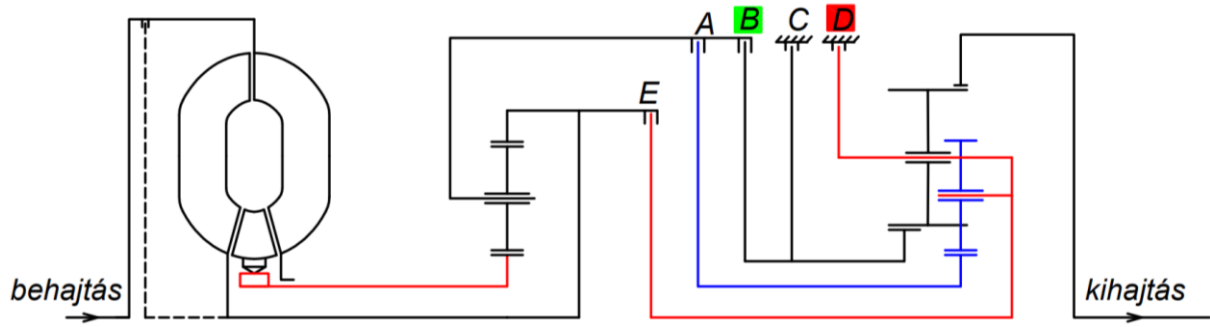
A peremfeltétel: $n_{II_1} = 0$, $n_{II_3} = n_{ki}$, $n_k = n_m$ behelyettesítése a (9.74) egyenletbe

$$\frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} = \frac{r_{II_1} + r_{II_3}}{r_{II_1}} n_m \quad (9.75)$$

A (9.75) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = \frac{r_{II_3}}{r_{II_1} + r_{II_3}} = \frac{85}{123} = \mathbf{0,691} \quad (9.76)$$

9.7 Hátrameneti fokozat áttétel meghatározása



9.7. ábra: Hátrameneti fokozat

Előtét KB- típusú bolygómu fordulatszám egyenletének felírása

$$n_{I_1} + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}} n_{I_3} = \left(1 + \frac{r_{I_3}}{r_{I_1}}\right) n_{I_k} \quad (9.77)$$

A peremfeltétel: $n_{I_1} = 0$, $n_{I_3} = n_m$ behelyettesítése a (9.77) egyenletbe

$$n_{I_k} = \frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m \quad (9.78)$$

A (9.78) egyenlet adja meg az előtét bolygómu áttételét paraméteresen, ahol a kar fordulatszáma a kihajtás, a motor fordulatszáma a behajtás.

Ravigneaux-bolygómu fordulatszám egyenleteinek felírása

KB-típusú bolygómu 4.2 fejezetben meghatározott egyenlete:

$$n_{II_1} + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{II_3} = \left(1 + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}}\right) n_k \quad (9.79)$$

A peremfeltétel: $n_k = 0$, $n_{II_3} = n_{ki}$, $n_{II_1} = n_{I_k}$ behelyettesítése a (9.79) egyenletbe és rendezve

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m + \frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} = 0 \quad (9.80)$$

$$\frac{r_{I_3}}{r_{I_1} + r_{I_3}} n_m = -\frac{r_{II_3}}{r_{II_1}} n_{ki} \quad (9.81)$$

A (9.81) egyenletből a motor és a kihajtás fordulatszámának hányadosával meghatározható az áttétel

$$i = \frac{n_m}{n_{ki}} = -\frac{r_{II_3}(r_{I_1} + r_{I_3})}{r_{II_1} r_{I_3}} = -\frac{85 \cdot 108}{38 \cdot 71} = -3,403 \quad (9.82)$$

Összefoglalás

A dolgozat célja a ZF6HP26 automata sebességváltó áttételének a meghatározása. A konstrukció egy Ravigneaux- összetett bolygóműegységet is tartalmaz, melyre nem feltétlen alkalmazhatók az egyszerű bolygóművekre levezetett fordulatszámegyenletek. Számos tanulmány, cikk foglalkozik a Ravigneaux- bolygómű áttételével, egyenleteivel, szabadtest ábra készítésével, viszont a fordulatszámegyenletek felírására nem térnek ki. Így az áttétel meghatározása előtt az összetett bolygóműre vezettük le a fordulatszámegyenleteket. Az egyenletek a bolygómű kinematikai viszonyainak felírásával kerültek meghatározásra. A levezetett egyenletek helyességét méréssel és számítással is igazoltuk. Mérés és számolás során a publikált fordulatszámértékeket és áttételeket referencia értékeknek vettük. A méréshez a fogszámok ismeretében egy 3D nyomtatott Ravigneaux- modellt készítettünk. A BMW által publikált fordulatszámok és a mérés során kapott fordulatok száma közelítőleg azonosak, ezzel igazoltuk a publikált fordulatszámértékeket. A levezetett egyenletek alkalmazásával a ZF által publikált áttételeket is meghatároztuk. Ezért a dolgozatban a Ravigneaux- bolygóműre levezetett fordulatszámegyenletek segítenek más típusú sebességváltó áttételének a meghatározásában, mely ilyen összetett bolygómű egységet tartalmaz. Emellett oktatási célra használható a méréshez tervezett és nyomtatott modell. A modellt az előtét bolygóművel kiegészítettük, így demonstrálható a ZF6HP26 automata sebességváltó egyes fokozatokban való működése.

Az áttételek természetesen többféle módszerrel is meghatározhatók, de ennél a számítási eljárással levezettük azokat az összefüggéseket, melyek alapját adják más nem publikált áttételek meghatározásának.

Felhasznált irodalmak

- [1] Tochtermann - Bodensein: Gépelemek I. és II. Műszaki Könyvkiadó 1986
- [2] Heribert Scherer and Ulrich Franzmann: 50 Years of ZF Automatic Transmissions 2015
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/ZF_6HP_transmission
- [4] Milan Novaković, Blaža Stojanović, Miloš Milisavljević, Slavica Miladinović - The Kinematic Analysis of Ravigneaux Planetary Gear Set. Technical Diagnostic. 2016. 15(1), pp. 7-12.
- [5] <https://ateupwithmotor.com/terms-technology-definitions/simpson-gearset/>
- [6] <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/fundamental-equation-of-planetary-gears-willis-equation/>
- [7] Dr. Lévai Zoltán: Gépjárművek Szerkezetana
- [8] <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/willis-equation-for-planetary-gears/>
- [9] Farkas Zsolt József: Teljesítmény elágazásos fokozatmentes hajtóművek analízise és szimulációja, doktori témában végzett munka dokumentációja 2013
- [10] Dr. Tiba Zsolt, Dr. Simonyi Sándor: Gépjárművek konvencionális hajtásláncának teljesítmény és erőátviteli rendszerei
- [11] Mátyás Tamás Donát: Háromlépcsős kb típusú fogaskerék-bolygóhajtómű tervezése, Szakdolgozat Miskolci Egyetem, 2015/2016
- [12] Protruck KFT ZF Service Partner, Rendek Bence
- [13] Debreceni SZC Brassai Sámuel Műszaki Technikum videók
- [14] Németh Gábor: Fogaskerék-hajtásról röviden II. FMK. BSc. hallgatói részére (tananyag kiegészítő segédlet)
- [15] Dr. Terplán Zénó: A legegyszerűbb epiciklikus hajtóművek analitikai vizsgálatának különböző módszerei
- [16] Essam L. Esmail Professor, Tamather N. Ali Lecturer, Hamed A. Hussen, Anahed H. Juber - Kinematic analysis of automatic transmissions with planetary gear trains. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. 9 (11) pp. 2213-2225.
- [17] <https://ihome-hu.techexpertolux.com/elektrosnabzhenie/princip-raboty-i-podklyuchenie-induktivnyx-datchikov>