

Villamos meghajtású kishaszon jármű hajtásláncának optimalizálása a hatótáv növelésének érdekében

Lőrincz Illés- Polák József *

* Széchenyi István Egyetem,
H9026 Győr, Egyetem tér 1. (Tel.: +36 30 391-53-01, e-mail: sauter@sze.hu)

Abstract: A tanulmány a Széchenyi István Egyetemen folyó dízel/villamos hibrid kisteherautó hajtáslánc fejlesztésénél alkalmazott optimalizációs elveket foglalja össze. A közúti járművek villamos hajtása sokféle villamos motorral és hajtóműrendszerrel oldható meg. Ezek átfogó elemzésére már több kutatás és elemzés sort kerített, amelyek alapján egy kiinduló hajtásrendszert választottunk, mely kettő állandó mágneses három fázisú aszinkronmotor és egy kapcsolódó, folytonosan konstans áttételű hajtómű hajtásrendszere.

1. BEVEZETÉS

A Széchenyi István Egyetem Közúti és Vasúti Járművek Tanszékén egy Ford Tranzit dízelmotorral hajtott kisteherautót alakítottunk dízel/villamos hajtású hibrid kisteherautóvá úgy, hogy a jármű gyári dízel első kerék hajtását meghagytuk, és a hátsókerekek hajtását kettő állandó mágneses 30 kW teljesítményű villamos motorral oldottuk meg. A hátsókerekek hajtása a gyári merev hátsóhíd alkalmazásával történt, melyben benne található a konstans áttételű hajtómű (differenciálmű). A villamos hajtás fejlesztésénél fontos szempont a villamosmotor és a hajtómű tömeg és hatásfok optimalizációja. Az optimalizáció segítségével növelhető hibrid kisteherautó hatótávolsága, és/vagy a szállítható árú tömegének a nagysága. Az optimalizáció segítséget nyújt a különböző konstrukciók matematikai, és energetikai összehasonlítására, melyek eredményét a műszaki megvalósíthatóság a költségek és a menetdinamikai jellemzők figyelembevételével tudjuk értékelni, és a megfelelő konstrukciót kiválasztani.

2. JÁRMŰHAJTÁS DINAMIKAI VIZSGÁLATA BELSŐÉGÉSŰ- ÉS VILLAMOSMOTORRAL HAJTOTT JÁRMŰVEK ESETÉN

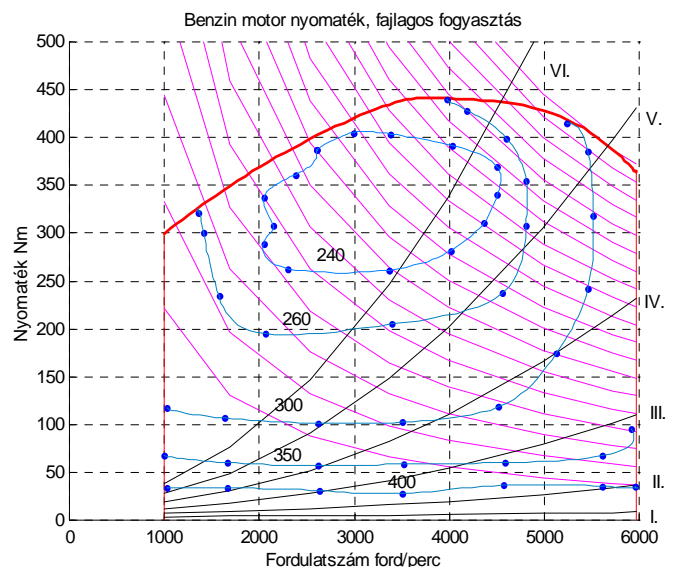
A belsőégésű motor és a jármű együttes üzeme grafikusán leírható (1. ábra) egy nyomaték fordulatszám jelleggörbében, melyben a fordulatszám függvényében feltüntetjük a motor főtelegen értelmezett nyomaték jelleggörbéjét, az állandó teljesítmény vonalait, a jármű egyes fokozataiban lévő ellenállásait és a motor fajlagos fogyasztását a különböző fordulatszám-nyomaték viszonyai mellett.

Az emelkedési és gördülési ellenállás nyomatéka a motor főtelegen a következő összefüggéssel írható le.

$$M_{\psi} = \psi * G * R_g * i_{hm} / \eta_{hm}$$

A légellenállás nyomatéka a motor főtelegen ellenállásként vizsgálva a következő összefüggés alapján számolható.

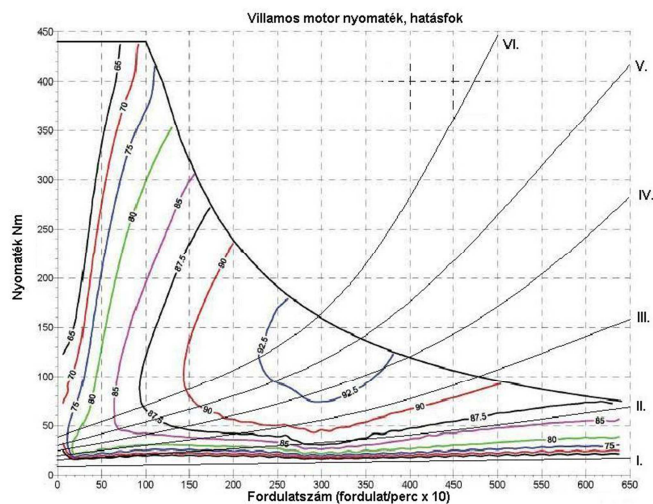
$$M_l = 2 * \rho_l * R_g * A * c_v * \pi^2 * i_{hm}^3 / \eta_{hm}$$



1. ábra A belsőégésű motor és a jármű együttes üzeme

A villamos motor és a jármű együttes üzeme a fenti eljárásához hasonlóan grafikusán leírható

(2. ábra). A villamos motorral kialakított hajtás diagramjában a fajlagos fogyasztás helyét a villamos motor hatásfoka látható.



2.ábra A villamos motor és a jármű együttes üzeme

3. JÁRMŰHAJTÁSRA ALKALMAZHATÓ VILLAMOS MOTOROK

Minden elektromos jármű szíve a villanymotor. Sokféle méretben, formában, típusban léteznek, és a leghatékonyabb mechanikai berendezések közé tartoznak. A belső égésű motorokkal ellentétben a villanymotorok nulla szennyezőanyag kibocsájtással rendelkeznek. Technikailag

három mozgó alkatrész van egy villanymotorban, és élettartamuk részben ennek köszönhetően hosszabb a belső égésű motorokénál. A következőkben felsorolásra kerülnek a járműhajtásra alkalmas villamos motorok:

- Külső gerjesztésű motor (tekerccsel vagy állandó mágnessel),
- Váltakozó áramú villamos motorok,
 - Reluktancia motor (Switched Reluctance Motor, SRM),
 - MCDC- motorok,
 - Háromfázisú ECDC (Electronic Commutation Direct Current) motor,
 - Ötfázisú ECDC-motor,
 - BLDC- motor,

A különböző típusú villamos motorok a fontosabb paramétereik alapján csoportosíthatók, melyet a következő táblázat tartalmaz.

A jelenlegi korszerű járműhajtások a 3 fázisú állandó mágneses szinkron motorokat alkalmazzák és vizsgálatainkban szinte kizárólag ezzel a motor típusal foglalkozunk. Környezetünkben ilyen típusú motorok kutatás fejlesztése folyik, melynek eredményeként várható a gyártási lehetőségek beindítása.

	BDC	BLDC/ PMS	AC	Állandó gerjesztésű	Külsőgerjesztésű	Reluktancia	Keresztmezős
Teljesítmény	magas	kicsi	közepes	magas	jó	jó	magas
Tömeg	nehéz	könnyű	könnyű	könnyű	közepes	közepes	közepes
Helyigény	nagy	kicsi	közepes	kicsi	közepes	közepes	nagy
Fordulatszám	alacsony	magas	magas	közepes	közepes	magas	alacsony
Motor ára	közepes	drága	olcsó	nagyon drága	közepes	olcsó	nagyon drága

4. JÁRMŰHAJTÁSRA ALKALMAZHATÓ HAJTÓMŰ TÍPUSOK

A villamos motor által hajtott járműveknél a következő hajtóműtípusok alkalmazhatók:

Állandó áttételű hajtóművek:

1. lánchajtás,
2. bordásszíj hajtás,
3. fogaskerék hajtás,
4. ékszíjhajtás,

Változtatható áttételű hajtóművek:

1. homlokkerekes váltómű,

2. variomatik hajtómű,
3. bolygóműves hajtómű

A hajtóművek hatásfoktartománya terheléstől és típustól függően 20- 95 % között változik.

A hajtóművek vizsgálatakor, kiválasztásakor két csoportra bonthatók a hajtóművek, az állandó áttételű és a változtatható áttételű hajtóművek. A hajtómű kiválasztásánál két paramétert veszünk figyelembe, a hajtómű tömegét és hatásfokát. E két paraméter mellett kiemelt szerepet játszik a hajtómű összetettsége, mely meghatározza a hajtómű kapcsolhatóságát és a kapcsoláshoz szükséges berendezések tömeg és energia szükségletét.

A kereskedelmi forgalomban kapható villamos hajtású járműveket vizsgálva megállapítható, hogy a fentiekben felsorolt hajtómű típusok közül három típus terjedt el:

lánchajtás: többnyire kétkerekű villamos járművekben,

bordásszíf hajtás: kétkerekű és kisebb négykerekű villamos járművekben,

bolygóműves hajtómű: közepes és nagyobb négykerekű villamos járművekben,

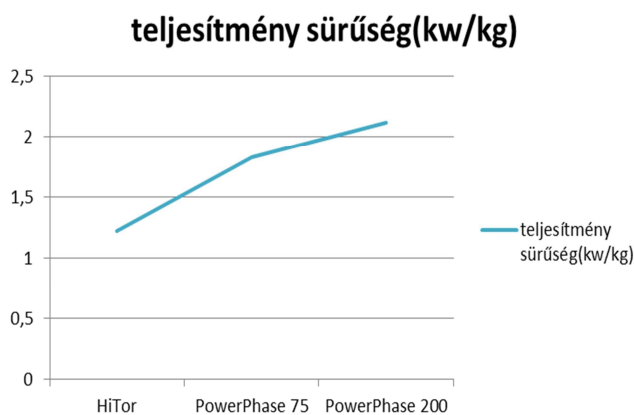
A lánc és bordásszíf hajtások nagy előnye a kis súly, egyszerű szerkezeti kivitel, gyors és könnyű szerelhetőség, ezzel szemben az állandó áttétel miatt a villamos motor optimális működési paraméterei nehezen biztosíthatók a különböző igénybevételek esetén.

A bolygóművek alkalmazásának előnye a fokozat módosítás lehetősége, mely lehetővé teszi villamos motor jó hatásfokú működését különböző üzemi feltételek között, viszont a kapcsoló mechanizmussal együtt nagyobb bonyolultságú és tömegű hajtómű egységet képez.

5. A HAJTÁS TÖMEG ÉS HATÁSFOK OPTIMALIZÁCIÓJA

MOTOR:

A villamos motorok tömeg teljesítmény arányát vizsgálva megállapítható hogy a teljesítmény növekedéséhez viszonyítva a tömegnövekedés kisebb mértékű (3. ábra).



3.ábra A tömeg és a hatásfok arányának változása a villamos motoroknál

A hajtás tömeg optimalizációjának vizsgálatokor felvehetünk a rendszer vizsgálata szempontjából függő és független változókat.

Független változó: motor fordulatszám (n), motor átmérője (\hat{O}), motor tömege (m_m), motor hatásfoka (η_m) hajtómű áttétel (z_h), hajtómű típusa, hajtómű tömege (m_h), hajtómű hatásfoka (η_{hm}).

Függő változó lesz a hajtáslánc tömege (m_{hl}) és hatásfoka (η_{hl}).

A hajtáslánc tömege függ a hajtómű és a motor tömegétől:

$$f m_{hl} = (m_m, m_h)$$

A hajtáslánc hatásfoka függ a hajtómű és a motor hatásfokától:

$$f \eta_{hl} = (\eta_m, \eta_{hm})$$

6. A HAJTÁSLÁNC TÖMEG OPTIMALIZÁCIÓJA

A PMS motorok tömeg csökkentése a motor különböző jellemző részein végezhető el, úgy mint:

- réz (tekercs) tömegcsökkentés ($m_{réz}$),
- lágyvas forgórész tömegcsökkentés (m_{lgyvas}),
- mágnes tömegcsökkentés (m_{magnes}).

A motorban lévő egyéb alkatrészek (első-, hátsó pajzs, tengely, csapágy, stb.) tömege ($m_{áll}$) adott teljesítmény viszonyok mellett állandónak vehető. A motor tömege ezekből a komponensekből áll össze, így a motor tömege.

$$m_{PMS} = m_{réz} + m_{magnes} + m_{áll}$$

Ezen részek tömegeinek, arányának változtatása hatással van a PMS motorok karakterisztikájára, működési jellemzőire és hatásfokára.

Hajtómű alkalmazása esetén a motor tömege mellett a rendszerben megjelenik a hajtómű tömege.

$$m_{hl} = m_{PMS} + m_h$$

A motor átmérőjének növelésével növelhető a motor által létrehozható nyomaték, viszont ez által növekszik a motor tehetetlenségi nyomatéka és ez által csökken a motor munkapontra történő gyorsulása. A nyomaték arányos a gyorsulás dn/dt értékével.

$$M = \Theta * 2\pi * \frac{dn}{dt} \Rightarrow \frac{dn}{dt} = \frac{M}{2\pi * \Theta}$$

A forgórész tehetetlenségi nyomatékának vizsgálatokor megállapított, hogy a tehetetlenségi nyomaték négyzetesen arányos a tömeg forgástengelyétől mért távolságától.

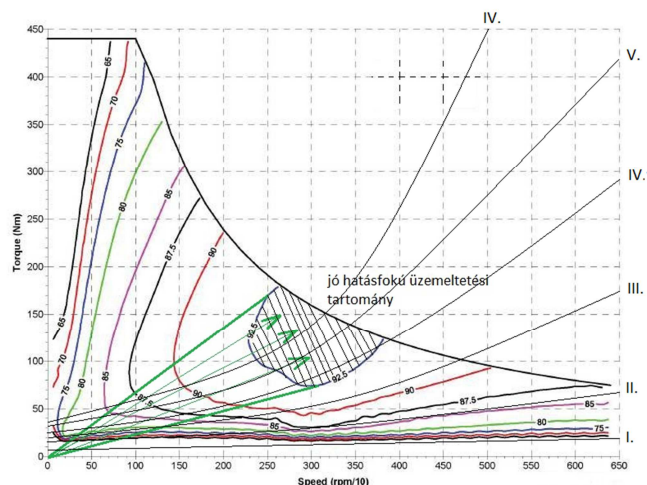
$$\Theta = m * r^2$$

Agy motorok alkalmazása esetén a motor és a kerék együttes tehetetlenségi nyomatékát kell vizsgálni, míg hajtómű beépítése esetén a plusz forgótömegek kerülnek a rendszerbe, melyek tehetetlenségi nyomatékai összeadódnak.

$$\Theta = \sum_{i=1}^N m_i * r_i^2$$

Ezért a átmérő növelésével csökkenthető a motor hossza, és kialakíthatók olyan motorok amelyek a növekvő nyomaték és

a csökkenő fordulatszám (max. 200...1200 min/fordulat) megfelelő optimalizációjával a hajtóművek alkalmazása elhagyható. A hajtómű elhagyása agymotorok alkalmazása esetén lehetséges, melyek közvetlenül a jármű kerekét hajtják. Ebben az esetben a hajtáslánc hatásfokát és működési jellemzőit a motor jellemzői határozzák meg. A tranziens jelenségek vizsgálatakor jól látható, hogy a különböző üzemállapotokhoz különböző hatásfokú értékek tartoznak. Az instacioner állapotok esetén a motor rosszabb hatásfokkal működik (65%...92,5%) mint az optimalizált stacioner tartományban (90% felett) (3.ábra), épp ezért az üzemeltetés közben arra kell törekedni, hogy a motor minél gyorsabban elhagyja kedvezőtlen üzemi tartományt.



3.ábra A villamosmotor működése szempontjából kedvező tartomány

Az átmérő csökkentésével csökken a motor által létrehozott forgatónyomaték nagysága, viszont növelhető a motor fordulatszáma (max 4000...7500 min/fordulat). Ilyen fordulatszám viszonyok mellett viszont megfelelő áttételű hajtómű alkalmazása szükséges.

7. HAJTÁSLÁNC HATÁSFOK OPTIMALIZÁCIÓJA

A hajtáslánc hatásfoka függ a hajtómű és a motor hatásfokától:

$$\eta_{hl} = f(\eta_m, \eta_{hm})$$

A hajtás lánc hatásfoka kerékagy motor alkalmazása esetén:

$$\eta_{hl} = \eta_m$$

Hajtómű alkalmazása esetén a motor hatásfoka mellett a figyelembe kell venni a hajtómű hatásfokát:

$$\eta_{hl} = \eta_{hl} * \eta_{hl}$$

A hajtóművek és a motorok vizsgálatát elvégezve látható, hogy a megfelelő hajtásrendszer kialakítás összetett matematikai elemzést igényel. A megfelelő összefüggések felállítását követően az adott rendszereket próbapadon összeállítva tesztelhetők, és a kapott eredmények összevethetők a matematikai összefüggések által kapott eredményekkel.

A hajtóművek hatásfok értékei szakirodalom által meghatározottak, de ezek általános helyzetekre vonatkoznak, és többnyire egy konstans értéként adják meg.

HAJTÓMŰ:

A hajtómű veszteségforrásai:

A veszteségforrások szétbonthatók terhelésre és fordulatszámra érzékeny, és érzéketlen veszteségekre.

Fordulatszámra érzékeny veszteségek:

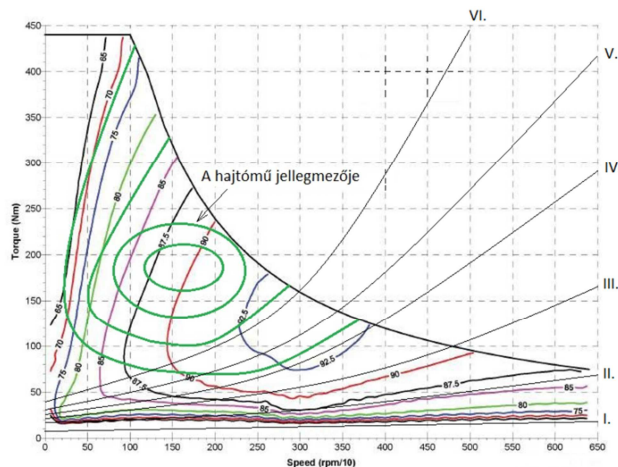
- fogsúrlódás veszteségei, $P_{fv} = (n)$
- a hajtóműben lévő alkatrészek tehetetlensége $P_t = (n)$
- csapágy súrlódás veszteségei, $P_{cs} = (n)$
- tömítések súrlódási veszteségei, $P_{ts} = (n)$
- kenőanyag keverés veszteségei, $P_{kv} = (n)$

Terhelés érzékeny veszteségek:

- alkatrészek rugalmas deformációja, $P_{rd} = (M)$

A változtatható áttételű hajtóművek esetén a hajtómű összhatófoka különböző áttétel esetén különböző értéket ad. Ezek a hatásfok értékek a terhelés és a fordulatszám függvényében nagy szórást mutatnak.

Ezen tényezők figyelembe vételével látható, hogy egy hajtáslánc elemzése esetén a rész egységek és a teljes hajtáslánc hatásfoka nem kezelhető egy konstans értéként. Éppen ezért a hajtóművek esetén is érdemes működési jellegzőket meghatározni, melyek segítségével meghatározható a hajtómű különböző üzemállapothoz tartozó hatásfok értéke. A hajtómű és a villamosmotor jellegzőjét és jármű menetdinamikai jellemzőit (4.ábra) ismerve már meghatározható a hajtáslánc nyomaték fordulatszám jellegzője, mely segítségével a hajtáslánc optimalizálható.



4.ábra A hajtómű a villamosmotor és a jármű együttes jellegzője

Jelen esetben a pontos hajtómű kiválasztás próbapadi teszteléseket követően határozható meg a megfelelő pontossággal.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok célja mindig, egy adott paraméter rendszerű (tömeg, sebesség, alkalmazási terület, stb.) járműhöz a legjobb hatásfokkal, és tömeggel rendelkező hajtás, hajtáslánc fejlesztése, kialakítása. Általánosságban nem meghatározható egy minden jármű típusra optimálisan alkalmazható hajtáslánc összeállítás, hanem mindig a jármű bemenő paramétereit vizsgálva, elemezve határozható meg, hogy melyik hajtáslánc a megfelelő.

A hajtásláncok vizsgálatára matematikai összefüggések írhatók fel, melyek a rendszerben megjelenő független, és függő változok rendszerében lévő összefüggések leírásával vezetnek el az optimális hajtáslánc kiválasztásához. A matematikai modellfelállítást követően a rendelkezésre álló matematikai szoftverek segítségével elemezni lehet a hajtásláncokat. A matematikai paraméterek vizsgálata után kapott eredmények segítségével kiválasztható és megalkotható a megfelelő hajtáslánc. A matematikai modell eredményei alapján megalkotott hajtás rendszer próbapadon tesztelhető. A teszt eredmények összevethetők az elvi modell által meghatározott eredményekkel, és ez által vizsgálható és elemezhető az optimalizációs folyamat.

FÜGGELÉK

M_{ψ}	- az emelkedési és gördülési ellenállás nyomatéka a motor főtengegyén,
M_l	- a légellenállás nyomatéka a motor főtengegyén,
ψ	- gördülősúrlódási tényező,
G	- a jármű súlyereje,
R_g	- gördülési sugár,
i_{hm}	- a hajtómű összes áttétele,

η_{hm}	- hajtómű hatásfoka,
ρ_l	- levegő sűrűsége,
A	- a jármű haladási felülete,
c_v	- légellenállási tényező
Θ	- tehetetlenségi nyomaték
n	- motor fordulatszáma
m	- tömeg
r	- a forgástengelytől mért távolság
m_{hl}	- hajtáslánc tömege
η_{hl}	- hajtáslánc hatásfoka
\emptyset	- motor átmérője
m_m	- motor tömege
Z_h	- hajtómű áttétel,
m_h	- hajtómű tömege
$m_{réz}$	- réz (tekercs) tömeg
$m_{l\acute{a}gyvas}$	- lágyvas forgórész tömeg
$m_{m\acute{a}gnes}$	- mágnes tömeg
$m_{\acute{a}ll}$	- motor alkatrész tömegek
η_m	- motor hatásfoka
η_{hm}	- hajtómű hatásfoka
P_{fv}	- fogsúrlódás veszteségei
P_t	- alkatrészek tehetetlensége
P_{cs}	- csapágy súrlódás veszteségei
P_{ts}	- tömítések súrlódási veszteségei
P_{kv}	- kenőanyag keverés veszteségei
P_{rd}	- alkatrészek rugalmas deformációja

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] L. GUZZELLA, A. SCIARRETTA: Vehicle Propulsion Systems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2005), pp 13-20, 68-75 ISBN 978-3-540-25195-8
- [2] MEHRDAD EHSANI, YIMIN GAO, ALI EMADI: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, USA, CRC Press, (2010), pp 19-53, 105-122 ISBN 978-1-4200-5398-2