

## Hajtómű részterhelésének veszteségvizsgálata és annak jelentősége

Polák József\*, Vida Bálint\*\*

egyetemi tanársegéd\*- BSc hallgató\*\*

Széchenyi István Egyetem

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

A cikk különböző villamos járművek hajtásláncának fejlesztésénél felmerülő tervezési változatok kiválasztására szolgáló mérési és optimalizálási eljárás kezdeti lépéseit mutatja be. Elkészült egy kísérleti hajtómű, melyen kifutási és terhelési mérések segítségével meghatározható az egyes áttételek hatásfok mezeje. Ennek segítségével energetikailag kedvezőbb hajtómű illeszthető egy villamos jármű hajtásláncába.

### 1. BEVEZETÉS

A győri Széchenyi István Egyetemen több éve folyik különböző teljesítmény szintű villamos járművek fejlesztése. A fejlesztések több irányban folynak a járműhajtó PMS motortól kezdve a járműkommunikációs rendszeren keresztül a karosszériáig. Napjainkban a villamos járművek egyik kulcs problémája a villamos energiatárolás és ebből adódóan a rövid hatótávolság, mely szükségessé teszi a villamos járművek energetikai szintű vizsgálatát és elemzését. Az energetikai vizsgálat egyik fontos eleme a jármű hajtáslánca, mely magába foglalja a járművet hajtó PMS motort, és a legtöbb esetben a hozzá tartozó hajtóművet. Egy adott jármű esetén a hajtómű szükségességének illetve áttételének a megállapítása egy összetett elemzés eredményeként határozható meg. A hajtómű igénye esetén megoldandó problémát jelent a megfelelő hajtómű konstrukció tervezése, kiválasztása. A tervezés nehézségét az okozza, hogy a hajtóművek hatásfokát a teljes működési tartományban konstans értéként kezelik általában, miközben ezek a különböző működési tartományokban jelentős eltérést mutatnak. Ezért szükség van a hajtóművek elemzésére, mely segítségével a meghatározott veszteségek pontosabban megmutatják az adott hajtómű hatásfok értékeit a teljes működési tartományban. Az elemző vizsgálatok segítségével az adott hajtásláncban lévő villamos motor és hajtómű energetikai szempontból optimálisan egymáshoz illeszthetővé válik.

#### 1.1 A hajtóművek veszteség forrásai

A hajtóművekben a következő veszteségforrások értelmezhetők, melyek a terheléstől vagy a fordulatszámától, vagy esetleg mindkettőtől függenek:

- fogsúrlódás veszteségei, Pfv
- csapágsúrlódás veszteségei, Pcs
- tömítések súrlódási veszteségei, Pts

- kenőanyag keverés veszteségei, Pkv
- légkeverési veszteségek, Plv
- alkatrészek rugalmatlan deformációja, Prd

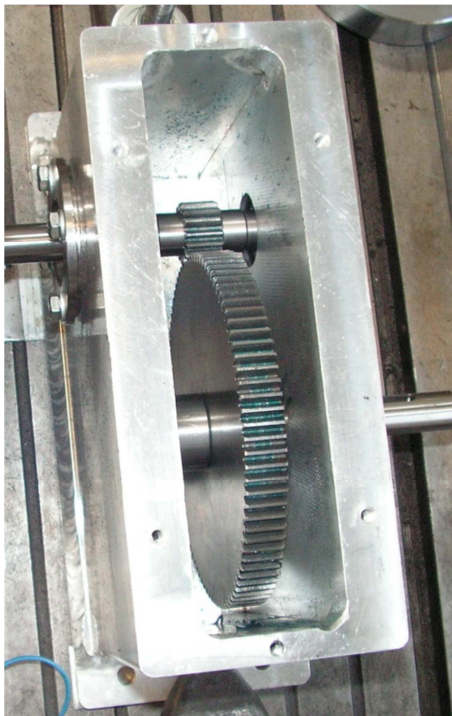
A fent felsorolt veszteségek a teljes működési tartományban a fordulatszám és a terhelés függvényében különböző értékeket vesznek fel. Ennek következtében a hajtómű hatásfoka a teljes működési tartományban az eddig számításba vett konstans értékekhez képest jelentős eltérést mutat. Ahhoz, hogy a hajtómű a jármű hajtásláncába energetikailag optimálisan illeszthető legyen, hasonlóképpen, mint a hajtómotorok esetében, meg kell határozni egy működési jellegmezőt a terhelő nyomaték-fordulatszám függvényében. Ennek segítségével a jármű energia igénye a különböző üzemi viszonyok között pontosabban meghatározható.

#### 1.2 A kísérleti hajtómű fontosabb paraméterei

Az előző fejezetben felvázolt problémák pontos megismerése és vizsgálata szükségessé teszi egy kísérleti hajtómű tervezését és legyártását. A hajtómű pontos vizsgálatára egy mérési eljárást lehet felépíteni, mely segítségével lépésről lépésre tárhatók fel a hajtómű veszteség forrásai, és azok üzemi körülményektől való függősége. A hajtómű tervezésénél a következő paraméterek lettek figyelembe véve:

- a hajtómű terhelési viszonyai ( $P_{max}$ ,  $M_{max}$ ,  $n_{max}$ )
- a hajtómű áttételének változtatási lehetősége szereléssel könnyen és gyorsan megoldható legyen,
- labor körülmények közötti pontos és jó tesztelhetőség,
- a rendelkezésre álló mérő és teszt eszközökkel elvégezhető legyen a mérés,
- a hajtómű kivitelezési költségének minimalizálása,
- mérési eljárás költségének a minimalizálása,

A felsorolt paraméterekből adódóan egy elemi fogazatú homlokfogaskerék hajtómű (1. kép A kísérleti hajtómű 1:6 áttétellel összeszerelve.) lett megtervezve, kivitelezve, melyben három különböző áttétel valósítható meg szereléssel (1:2; 1:3,2; 1:6). Az áttétel változtatása mellett lehetőség van arra, hogy különböző anyagú fogaskereket készítve vizsgálni lehessen a fogaskerek anyagi választásának hatását a hajtómű összhatásfokára a teljes működési tartományban. A hajtómű működési paraméterei ( $P_{\max}=500\text{W}$ ,  $M_{\max}=20\text{Nm}$ ,  $n_{\max}=1500\text{ 1/min}$ ) kis teljesítményű járművek működési viszonyaira lettek meghatározva.



1. kép A kísérleti hajtómű 1:6 áttétellel összeszerelve.

## 2. A HAJTÓMŰVÖN VÉGZENDŐ VESZTESÉG FELTÁRÓ MÉRÉSEK

Az 1.1-es fejezetben felsorolt veszteségek jellemzően soha nem magukban lépnek fel a hajtómű működése közben, hanem mindig valamilyen arányban, együttesen jelennek meg. Ezért nehezen határozhatók meg olyan eljárások, melyek egy adott típusú veszteség hatását elkülönítetten határozzák meg. Ennek ellenére végezhetők olyan mérések, melyek segítségével jól közelíthetők egy-egy konkrét veszteség hatásai.

A kísérleti hajtómű esetén kidolgozásra került egy mérési eljárás, mely segítségével több lépcsőben feltárhatók a hajtómű veszteségforrásainak hatásai.

### 2.1 A hajtómű kifutásos mérési eljárásának kidolgozása

A tervezett vizsgálatok a hajtóművekben előforduló, sokszor nagyon kismértékű, nehezen elkülöníthető veszteségek feltárására irányulnak. A tervezett mérések során ismert tehetetlenségű forgó tömeget felgyorsítás után magára hagyunk és mérjük a lelassulás időfüggvényét. Az eljárással viszonylag pontosan egyszerű eszközökkel meghatározhatók az ismert tehetettség energiái.

Mérjük a magára hagyástól a megállásig eltelt időt, és felvesszük a tömeg ( $n = n(t)$ ) függvényét, így meghatározható a rendszer lassulása, amelyből számítható a veszteség energia ( $E_{vi}$ ), az átlagos veszteség nyomaték ( $M(t)$ ), pillanatnyi teljesítmény ( $P_i$ ), a pillanatnyi nyomaték ( $M_i$ ).

$$E_{vi} = E_{kezdeti} - E_i = \frac{1}{2} \sum J_k * \omega_{kezdeti}^2 - \frac{1}{2} \sum J_k * \omega_i^2$$

$$P_i = M_i * \omega_i$$

$$M_i = \frac{1}{2} \sum J_k * \varepsilon_i$$

- $J_k$ : a hajtóműben forgó tömegek tehetetlensége,  
 $E_{kezdeti}$ : a mérés kezdetekor a hajtóműben lévő mozgási energia,  
 $\omega_{kezdeti}$ : a mérés kezdetekor a vizsgált tengely szögsebessége,  
 $\varepsilon_i$ : az  $i$ . mérés pillanatnyi szöglassulás értéke,

A számított szöglassulás arányos a hajtómű belső veszteségeivel és ez által reprezentálja a hajtómű hatásfokfüggvényét, segítségével felvehető a hajtómű veszteség nyomaték ( $M(t)$ ) függvénye.

$$M(t) = J * \varepsilon(t)$$

A mérés lépései:

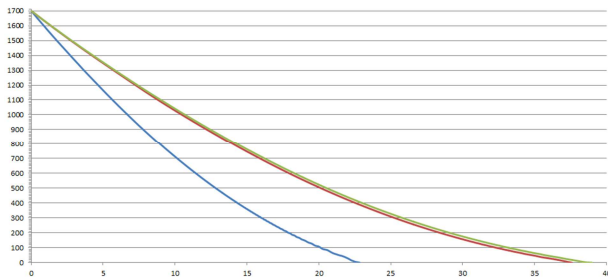
1. A behajtó tengely beszerelése és önálló mérése egy adott tehetetlenségi nyomatékú tárcsával,
2. második nagyobb tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsa felszerelése a behajtó tengelyre és mérése,
3. egy harmadik még nagyobb tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsa felszerelése a behajtó tengelyre és mérése.

A mérések elvégzéséhez három különböző tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsa készült. A tárcsák jellemző mérete:

- 1. tárcsa:  $m_1=1006\text{g}$ ,  $J=0,003053\text{kgm}^2$ ,
- 2. tárcsa:  $m_2=1976\text{g}$ ,  $J=0,003052\text{kgm}^2$ ,
- 3. tárcsa:  $m_3=1976\text{g}$ ,  $J=0,003052\text{kgm}^2$ .

Melyek segítségével elvégezhetők a kifutási vizsgálatok (1. ábra A behajtó tengely kifutási ábrái

három különböző tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsával történő vizsgálat esetén.)



1. ábra A behajtó tengely kifutási ábrái három különböző tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsával történő vizsgálat esetén.

Az adott mérések segítségével meghatározható a vizsgált hajtómű behajtó tengelyének csapágy vesztesége. Természetesen a tengely és az adott tárcsák légkavarási veszteségei nagyon kicsi értékűek, ezért elhanyagoljuk.

4. Tömítőgyűrű beszerelése és a behajtó tengely mérése egy adott tehetetlenségi nyomatékú tárcsával,
5. második nagyobb tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsa felszerelése a behajtó tengelyre és mérése,
6. Harmadik még nagyobb tömegű, de azonos tehetetlenségi nyomatékú tárcsa felszerelése a behajtó tengelyre és mérése.

Ezekkel a mérésekkel meghatározható a csapágy és a tömítőgyűrű együttes vesztesége, mivel az előző mérésekkel meghatároztuk a csapágyazás veszteségeit ezért a kettő különbözetéből megállapítható a tömítés által okozott veszteségek értéke.

7. A fogaskerék (mind három áttételhez tartozó fogaskerékekkel külön) felszerelése a behajtó tengelyre, és a behajtó tengely mérése.

Ezzel a méréssel meghatározható a csapágy a tömítőgyűrű és a fogaskerék légkavarási veszteségének az összege, de mivel az előző mérésekben meghatároztuk a csapágy veszteségeket és a tömítési veszteségeket, és ezek kivonhatók a mérés eredményéből, így meghatározható az adott fogaskerék légkavarási vesztesége.

## 2.2 A hajtómű paraméter vektorának meghatározása

A mérési adatok ismerete mellett meghatározásra kerülnek az egyes áttételek pontos jellemzésére meghatározott paraméter vektorok. A vektorokban található adatok pl. az adott áttétel összes tehetetlenségi nyomatéka ( $\Sigma J$ ), áttétele ( $i$ ), fogaskerék modul ( $m$ ), kenőanyag jellemzői ( $K_m$ ), fogaskerék anyagának sűrűdési jellemző ( $\mu$ ):

$$P_{V_1} [\Sigma J_1; i_1; m_1; K_{m_1}; \mu_1]$$

$$P_{V_2} [\Sigma J_2; i_2; m_1; K_{m_1}; \mu_1]$$

$$P_{V_3} [\Sigma J_3; i_3; m_1; K_{m_1}; \mu_1]$$

$P_{V_1}$ : az első áttétel paraméter vektora,

$P_{V_2}$ : a második áttétel paraméter vektora,

$P_{V_3}$ : a harmadik áttétel paraméter vektora,

A paraméter vektorok és a hajtóművekhez tartozó mérési eredmények pontos ismeretével meghatározható az egyes hajtóművekre (áttételekre) jellemző hatásfok mező.

## 2.4 A Célfüggvények meghatározása

A hajtáslánc optimalizálása szempontjából fontos a célfüggvények meghatározása. A hajtáslánc vizsgálatánál alapvetően két célfüggvény állítható fel:

- tömeg függvény ( $f(m_{hl})$ ),
- hatásfok függvény ( $f(\eta_{hl})$ ).

Jellemzően megállapítható, hogy a tömeg függvény minimalizálására kell törekedni:

$f(m_{hl})$  minimuma az optimális.

A hajtáslánc tömege függ a hajtómű és a motor tömegétől:

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

$m_m$ : PMS motor tömege,

$m_h$ : hajtómű tömege.

A hatásfok függvény maximalizálására kell törekedni:

$f(\eta_{hl})$  maximum az optimális

A hajtáslánc hatásfoka függ a hajtómű és a motor hatásfokától:

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

$\eta_m$ : PMS motor hatásfoka,

$\eta_{hm}$ : hajtómű hatásfoka.

A mérések tovább folytatásával, a paraméter vektorok meghatározásával és a célfüggvények meghatározásával létrehozható a hajtómű energetikai modellje, mely segítségével a PMS motor és a hajtómű optimálisan illeszthetővé válik.

## 2.5 A hajtómű mérése a teljes terhelési tartományban

A veszteségméréseket követően a hajtóművet összeszerelve a behajtó tengely meghajtható egy szabályozható fordulatszámú villamos motorral, míg a kihajtótengelyen egy

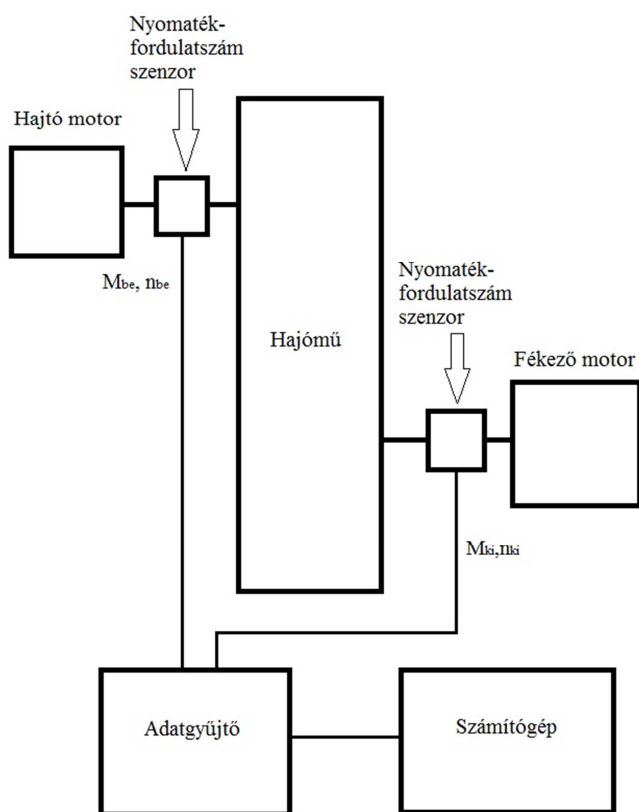
## ÖSSZEFOGLALÁS

villamos generátorral, vagy egy szabályozható elektromechanikus fékkel fékezhető (2. ábra A hajtómű mérésének elvi összeállítása). A beállított terhelések közben mérhető a behajtó tengely fordulatszáma és nyomatéka ( $n_{be}$ ,  $M_{be}$ ), és mérhető a kihajtó tengely fordulatszáma és nyomatéka ( $n_{ki}$ ,  $M_{ki}$ ). A fordulatszámokból meghatározhatók a hozzá tartozó szögsebességek ( $\omega_{be}$ ,  $\omega_{ki}$ )

Ezen adatok segítségével meghatározható a hajtómű bemenő teljesítménye ( $P_{be}$ ), és a kimenő teljesítménye ( $P_{ki}$ ).

Az összetartozó teljesítmény értékek segítségével, pedig meghatározhatók az adott munkapontokhoz tartozó hatásfok értékek.

$$\eta_{(n,M)} = \frac{P_{ki(n,M)}}{P_{be(n,M)}}$$



2. ábra A hajtómű mérésének elvi összeállítása

A cikkben bemutatott mérések elvégzésével, a megfelelő paramétervektorok és célfüggvények meghatározásával feltárható egy konkrét hajtómű hatásfok mezeje a teljes működési tartományban, mely segítségével elkészíthetővé válik egy optimalizálási algoritmus, mely segítségével a hajtómű hajtásláncba illesztése energetikailag kedvezőbb eredményekkel végezhető el. Ez által a villamos járművek hatótávolsága növelhető.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] L. GUZZELLA, A. SCIARRETTA: Vehicle Propulsion Systems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005, ISBN 978-3-540-25195-8
- [2] EHRDAD EHSANI, YIMIN GAO, ALI EMADI: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, USA, CRC Press, 2010 ISBN 978-1-4200-5398-2
- [3] Dr. Hans G.Steger, Johan Sieghart, Erhard Glauning, Műszaki mechanika 2.,B+V Lap- és Könyvkiadó Kft., Műszaki könyvkiadó Kft., Budapest 1994
- [4] Dr. Hans G.Steger, Johan Sieghart, Erhard Glauning, Műszaki mechanika 3.,B+V Lap- és Könyvkiadó Kft., Műszaki könyvkiadó Kft., Budapest 1995, ISBN 963 16 0597 3
- [5] Dr. Szabó András, Hajtástechnika, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar Vasúti Járművek Tanszék, Budapest, 2005

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0012: Hibrid és elektromos járművek fejlesztését megalapozó kutatások - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”  
 „TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012: "Smarter Transport" - Kooperatív közlekedési rendszerek infokommunikációs támogatása - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”