



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Villamos Energetika Tanszék

Stock András

# **ELEKTROMOS AUTÓK HAJTÁSLÁNC KOCEPCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA, TERVEZÉSE**

KONZULENS

Vörös Gábor

BUDAPEST, 2021

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Kiválasztott jármű .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Vontatási követelmények .....</b>	<b>6</b>
3.1 A járművek mozgását befolyásoló erők.....	6
3.1.1 Elméleti összefoglaló .....	6
3.1.2 Számítások .....	7
3.2 Járművek vonóerő méretezése .....	10
<b>4. Motorillesztés .....</b>	<b>12</b>
4.1 Elméleti összefoglaló .....	12
4.2 Motor választása .....	14
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>19</b>

# Összefoglaló

A félév során megvizsgáltam az elektromos autók és villamos hajtásláncuk alapvető tulajdonságait, illetve a velük szemben támasztott követelményeket. Ennek keretében választottam a Mercedes 300 SL típusú autót, aminek meghatároztam a menettulajdonságait, és specifikáltam a hajtáslánc főbb elemeit: a motort, az invertert és az áttételt. A félév folyamán felépítettem egy egyszerű hajtáslánc modellt, majd meghatároztam a főbb komponensek alapvető paramétereit, és a jármű menettulajdonságai által támasztott követelményekhez, teljesítmény, nyomaték, fordulatszám tartomány, illesztettem.

Ezt követően az általam előírt feltételeknek leginkább megfelelő motort kellett illeszteni a hajtáslánchoz. Ennek keretében meg kellett választani az áttételt. A motor feszültségét és áramát figyelembe véve a munkapontban, választottam invertert, amely teljesíteni tudja a motor feszültségigényét delta és csillagkapcsolásban is.

# 1. Bevezetés

Elektromos hajtásrendszer esetén sincs másképp, mint bármilyen szolgáltatás, vagy termék bevezetése előtt. Minden tervezési folyamat egy igényfelméréssel kezdődik, azaz a gyártónak/szolgáltatónak a – Mire van szüksége a végfelhasználónak? – kérdésre kell megtalálni a válaszokat.

Egy elektromos autó esetében a vevők akkor lesznek elégedettek, hogyha az autó jó vezetési élménnyel rendelkezik, a jármű élettartama megfelelő hosszúságú, és hatékonyan üzemeltethető. Ezeknek a követelményeknek a nem teljesülését a teljesítményromlás, tönkremenetel, illetve a rövid hatótáv jellemzik. Továbbá fontos szempont, hogy az autóval ki lehessen állni egy mélygarázsba is, amik általában 25 % emelkedővel rendelkeznek.

A feladatom során ezeknek az igényeknek a figyelembevételével történő elektromos hajtáslánc tervezést hajtottam végre.

## 2. Kiválasztott jármű

A feladatomhoz a Mercedes 300 SL típusú autót választottam, amelyet sokan csak sirályszárnyas Mercedesként ismernek. A formája, menetteljesítménye alapján az ötvenes évekbeli autóépítés csúcsát jelentette ez a versenyautóból átalakított személygépjármű. Egyedi megjelenése és ritkasága miatt, a tehetős gyűjtők egyik kedvenc típusa.

A jármű paramaméterei a következők [1]:

- saját tömeg: 1295 kg
- maximális tömeg: 1515 kg
- szélesség: 1790 mm
- magasság: 1300 mm
- légellenállási tényező: 0.38
- gyorsulás (0-100 km/h): 10 s
- végsebesség: 220 km/h
- teljesítmény: 215 Le (160 kW)
- nyomaték: 275 Nm
- kerék sugara: 0.3375 m

Mivel az autó még ma is megfelelő tulajdonságokkal rendelkezik, hogy a forgalommal lépést tartson, ezért csupán az élmény javításáért más követelményeket fogalmaztam meg néhány területen:

- gyorsulás (0-100 km/h): 6s
- végsebesség: 250 km/h
- teljesítmény: 250 Le (186 kW)
- nyomaték: 300 Nm

A feladatot továbbiakban az általam választott értékekkel végeztem, valamint a maximális tömeget vettem figyelembe, ahol a számítások megkövetelték.

## 3. Vontatási követelmények

### 3.1 A járművek mozgását befolyásoló erők

#### 3.1.1 Elméleti összefoglaló

A járműre ható erők határozzák meg, hogy mekkora teljesítménnyel kell rendelkeznie a jármű motorjának, annak érdekében, hogy képes legyen az autót a teljes sebességtartományon mozgatni, valamint a maximális sebesség kivételével, egy esetleges előzés miatt, mindig rendelkezzen gyorsítási tartalékkal, hogy az előzés biztonságosan kivitelezhető legyen.

Rendeltetésszerű használat esetén a személygépkocsikra két erő hat: az  $F_v$  vonóerő és az  $F_{ve}$  vontatási ellenállás. Newton II. törvényét alkalmazva:

$$F_v - F_{ve} = m * a$$

$F_v$  – vonóerő, a jármű által kifejtett erő, sebesség irányába mutat [N]

$F_{ve}$  – vontatási ellenállás, a jármű mozgását akadályozó erők összege, sebességgel ellentétes irányú [N]

$$F_{ve} = F_{lég} + F_{görd} + F_{em}$$

$F_{lég}$  – légellenállás [N]

$F_{görd}$  – gördülési ellenállás [N]

$F_{em}$  – emelkedési ellenállás [N]

A légellenállás és a gördülési ellenállás összegeként a menetellenállás értékét kapjuk meg:

$$F_m = F_{lég} + F_{görd}$$

A légellenállás a következőképpen számítható:

$$F_{lég} = \frac{1}{2} * \rho_l * A * c_d * v^2$$

$A$  – homlokfelület nagysága [m<sup>2</sup>]

$c_d$  – légellenállási együttható

$\rho_l$  – légsűrűség [kg/m<sup>3</sup>]

A gördülési ellenállás számítása:

$$F_{görd} = \mu_g * m * g$$

Ahol a gördülési súrlódási tényező,  $\mu_g = 0.007$  közelítő értékű gumiabroncs és aszfalt esetén.

Az emelkedési ellenállás a következő képlettel számítható:

$$F_{em} = m * g * \sin \alpha$$

Az  $\alpha$  –t, az emelkedési szöget az emelkedő százalékos értékéből lehet kiszámítani:

$$i = 100 * \tan \alpha$$

### 3.1.2 Számítások

A feladatom első részében a fentebb részletezett erőket számoltam ki a választott járműre, a teljes sebességtartományon, illetve a 0 – 25% emelkedőkre.

Az általam előírt 6s alatti 0 – 100km/h –ra történő gyorsulásból kiszámítható a gyorsulás kezdeti, lineáris szakasza:

$$a = \frac{dv}{dt} = 4.63 \frac{m}{s^2}$$

A homlokfelület a magasság és szélesség szorzatából számolható:

$$A = \text{magasság} * \text{szélesség} = 2.327 m^2$$

Ezt követően kiszámoltam a 0, 5, 10, 25% – os emelkedők szögét radiánban:

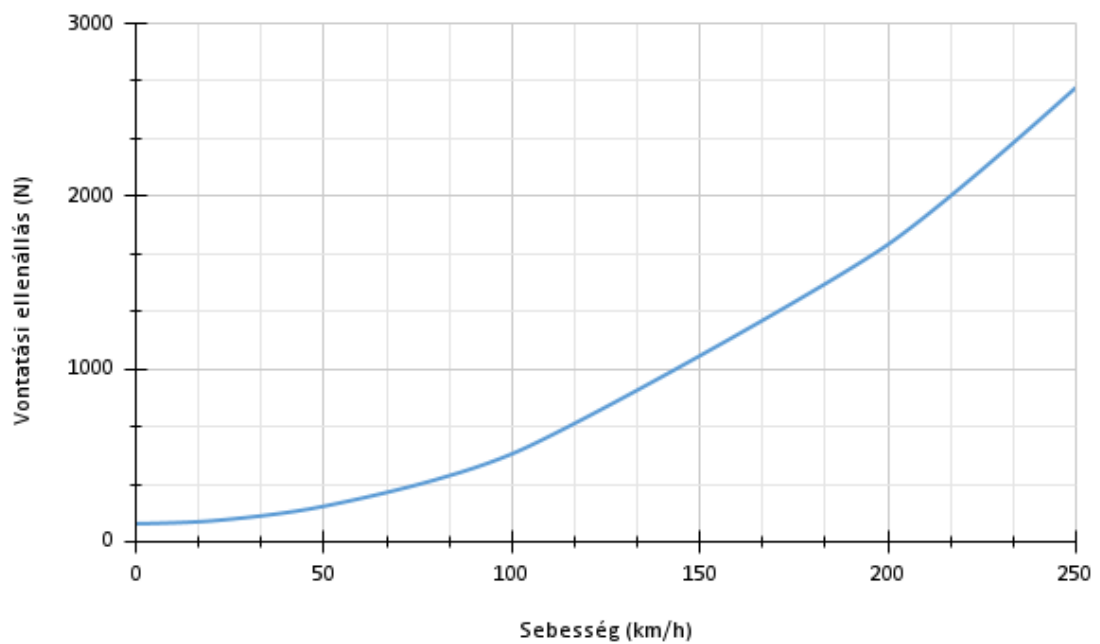
$i_0 =$	0 %		$\alpha_0 =$	0
$i_5 =$	5 %		$\alpha_5 =$	0,049958
$i_{10} =$	10 %		$\alpha_{10} =$	0,099669
$i_{25} =$	25 %		$\alpha_{25} =$	0,244979

3.1. táblázat Különböző emelkedőkhöz tartozó szögek

Ezután elvégeztem a vontatási ellenállását számítását 0% – os emelkedőre (ebben az esetben ez megegyezik a menetellenállással), majd ábrázoltam a sebesség függvényében.

Sebesség [km/h]	Menetellenállás [N]
0	104.0351
20	120.196
50	205.0409
100	508.0586
200	1720.129
250	2629.182

**3.2. táblázat Menetellenállás – sebesség adatok**



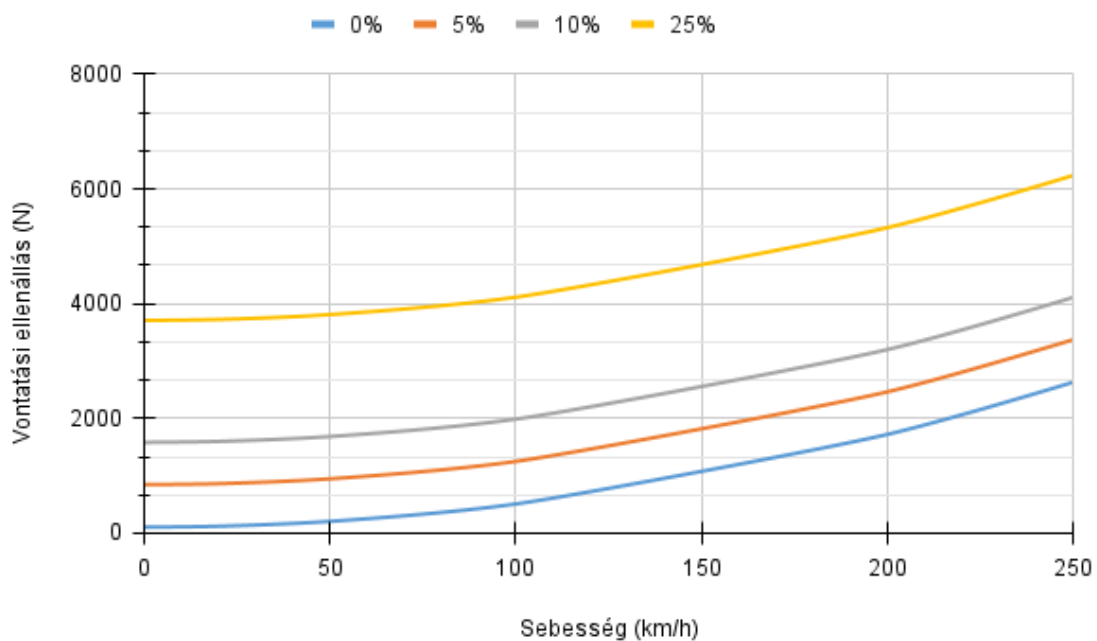
**3.1. ábra Vontatási ellenállás – sebesség diagram**

A számításokat elvégeztem az összes emelkedőre, majd egy közös diagramban ábrázoltam.



	0%	5%	10%	25%
0 km/h	104.0351 N	846.1104 N	1582.979 N	3708.575 N
20 km/h	120.196 N	862.2714 N	1599.14 N	3724.736 N
50 km/h	205.0409 N	947.1163 N	1683.985 N	3809.581 N
100 km/h	508.0586 N	1250.134 N	1987.003 N	4112.598 N
200 km/h	1720.129 N	2462.205 N	3199.074 N	5324.669 N
250 km/h	2629.182 N	3371.258 N	4108.127 N	6233.722 N

**3.3. táblázat Vontatási ellenállások**



**3.2. ábra Vontatási ellenállás – sebesség diagram**

A menetellenállás a vontatási görbék közül a 0% – os görbéhez tartozó jelleggörbéről olvasható le.

### 3.2 Járművek vonóerő méretezése

A járművek hajtását a maximális vontatási teljesítményre és az indítási gyorsítási igényére tervezik. A vonóerő szempontjából a jármű hajtását úgy kell méretezni, hogy a rendelkezésre álló vonóerő nagyobb legyen, mint a tervezés alapjául szolgáló vontatási ellenállás jelleggörbe. A jármű gyorsítási tartaléka a vonóerő és a vontatási ellenállás különbsége:

$$F_v - F_{ve}$$

A gyorsítási tartalék induláskor a legnagyobb, és vízszintes terepen (0% – os emelkedő) és maximális sebességnél zérusra csökken. Ebben a munkapontban a vonóerő már nem nagyobb, mint a jármű pillanatnyi vontatási ellenállása, azaz nincsen gyorsítási tartalék, a jármű nem tud tovább gyorsítani.

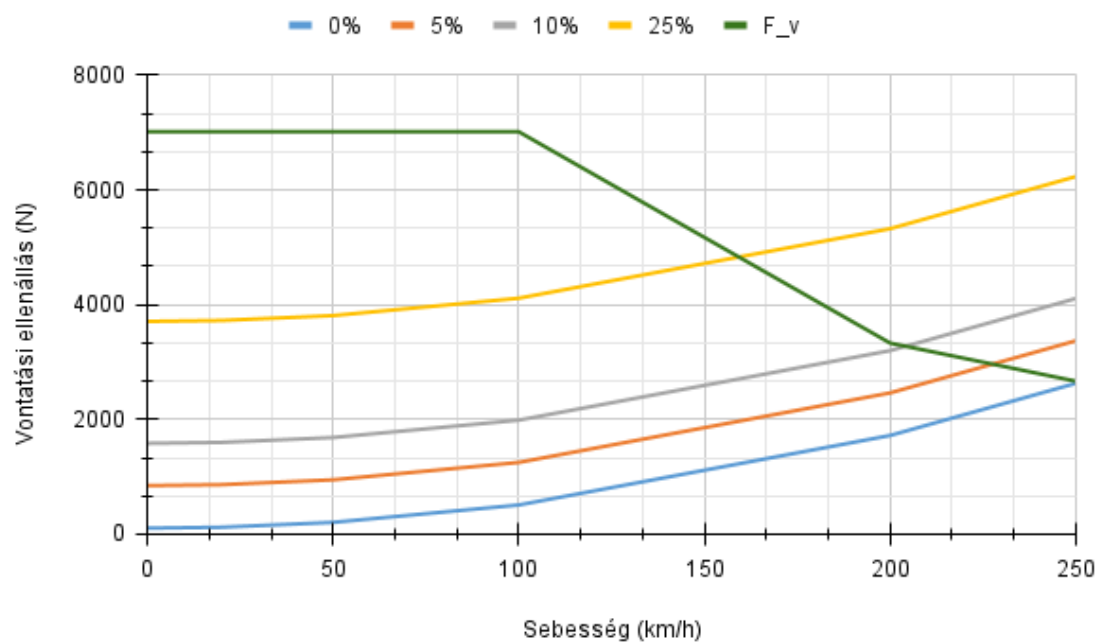
A sebesség tartásához szükséges vontatási teljesítmény a következő képlettel számolható:

$$P = F_{ve} * v$$

Az indítási gyorsítási igényre való méretezéskor Newton II. törvényét felhasználva történik a méretezés. A megfelelő számításokat elvégezve, az így kapott vonóerő görbét illesztettem a vontatási ellenállás görbékhez.

Sebesség [km/h]	Vonóerő [N]
0	7015
20	7015
50	7015
100	7015
200	3330
250	2665.7

3.4. táblázat Vonóerő adatok



3.3. ábra Illesztett vonóerő diagram

## 4. Motorillesztés

A hajtáslánc tervezés következő lépése az előző fejezetben kiszámolt paraméterek és elvárt vonóerő alapján egy állandómágneses szinkron motor illesztése. A feladat során előre megkapott motorspecifikációk közül kellett kiválasztani a számomra legmegfelelőbbet.

### 4.1 Elméleti összefoglaló

A motor  $\omega_v$  és a kerek  $\omega_k$  szögsebessége közötti arányt az áttétel adja meg:

$$á = \frac{\omega_v}{\omega_k} = \frac{P}{\frac{100km/h}{r} * M}$$

$r$  – kerék sugara [m]

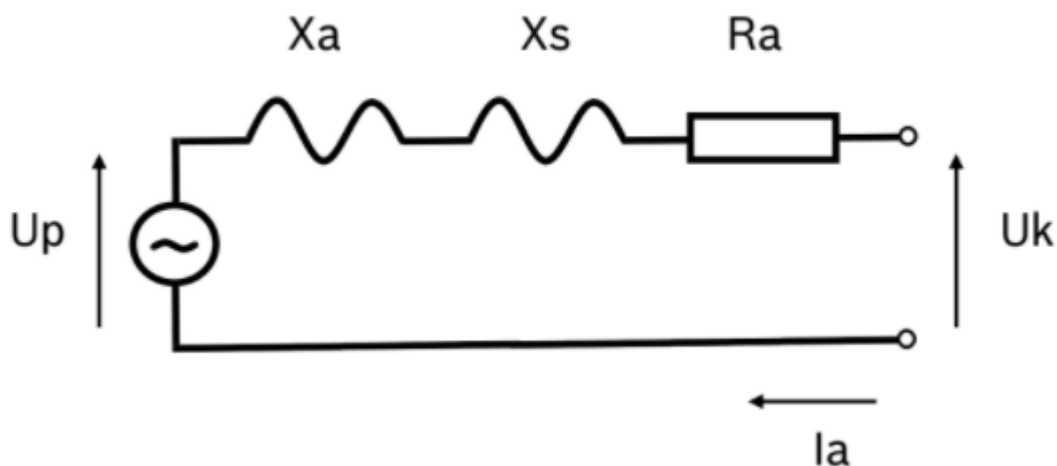
$P$  – motor teljesítménye [W]

$M$  – motor nyomatéka [Nm]

A jármű sebessége és a motor szögsebessége közötti átszámítás idealizált esetben (feltételezzük, hogy nincsen megcsúszás, kipörgés) a következő módon történik:

$$v = r * \omega_k$$

A feladat során használt állandómágneses szinkrongépek helyettesítőkapcsolása a következő:



4.1. ábra Szinkrongépek helyettesítőkapcsolása [2]

$U_p$  – pólusfeszültség [V]

$X_a$  – armatúra reaktancia [ $\Omega$ ]

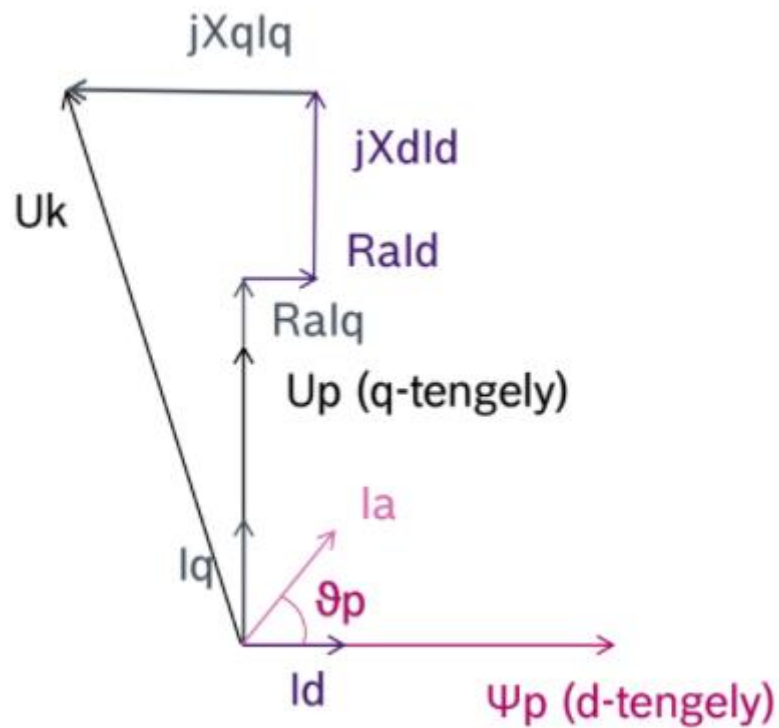
$X_s$  – szórási reaktancia [ $\Omega$ ]

$R_a$  – armatúra ellenállás [ $\Omega$ ]

$U_k$  – kapocsfeszültség [V]

$I_a$  – armatúraáram [A]

$X_d$  –szinkron raktancia  $X_d = X_a + X_s$  [ $\Omega$ ]



4.2. ábra Kiálló pólusú gép vektorábrája [2]

Az  $I_a$  armatúraáram felbontható  $I_d$  és  $I_q$  áramokra:

$$I_d = I_a * \cos\vartheta_p$$

$$I_q = I_a * \sin\vartheta_p$$

A feszültségegyenletek:

$$U_d = R_a * I_d - X_q * I_q$$

$$U_q = U_p + R_a * I_q + X_d * I_d$$

A nyomatékegyenlet:

$$M = \frac{3}{2} * p [\Psi_p * I_q + (L_d - L_q) * I_d * I_q]$$

p – póluspárok száma

Elméleti nyomatéksúcsok:

$$\xi_{mr} = \frac{\Psi_p}{(L_d - L_q) * I_a}$$

$$\vartheta_p = \arccos \left( \frac{-\xi_{mr} \pm \sqrt{\xi_{mr}^2 + 8}}{4} \right)$$

## 4.2 Motor választása

D_out (mm)	li (mm)	PSZI_p (Wb)	Ra (Ohm)	Ld (H)	Lq (H)	p	Ia_max (A)	M (Nm)
140	100	0,064464	1,71E-05	0,000259	0,000378	4	108	42
140	100	0,096697	3,85E-05	0,000582	0,000851	4	72	42
140	100	0,128929	6,84E-05	0,001035	0,001512	4	54	42
160	100	0,07536	1,3E-05	0,000262	0,000389	4	142	64
160	100	0,11304	2,93E-05	0,000589	0,000875	4	94	64
160	100	0,15072	5,21E-05	0,001047	0,001555	4	71	64
180	100	0,086226	1,03E-05	0,000262	0,000398	4	180	93
180	100	0,12934	2,31E-05	0,000589	0,000896	4	120	93
180	100	0,172453	4,1E-05	0,001047	0,001592	4	90	93
200	100	0,097087	8,28E-06	0,000254	0,000406	4	223	130
200	100	0,14563	1,86E-05	0,000572	0,000913	4	149	130
200	100	0,194173	3,31E-05	0,001016	0,001622	4	111	130
220	100	0,107921	6,83E-06	0,000247	0,000412	4	270	175
220	100	0,161882	1,54E-05	0,000555	0,000927	4	180	175
220	100	0,215842	2,73E-05	0,000987	0,001648	4	135	175
240	100	0,118714	5,73E-06	0,000236	0,000417	4	323	230
240	100	0,178071	1,29E-05	0,000532	0,000939	4	215	230
240	100	0,237428	2,29E-05	0,000946	0,001669	4	161	230

4.1. táblázat A rendelkezésre álló motorok és paramétereik

Annak érdekében, hogy az illesztett motor elérje az előírt 300 Nm-es nyomatékot, értelemszerűen két 130 Nm-es motor aktív hosszát kellett megnövelni. Két motor alkalmazásakor az armatúra áram és a pólusok számán kívül minden másik paramétert a kétszeresére kell növelni. Az aktív hossz növelésével arányosan nő a motor többi paraméterének az értéke ( $D_{out}$ ,  $\Psi_p$ ,  $R_a$ ,  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $M$ ), a kívánt nyomaték elérése érdekében 1.15 –szeresére növeltem az aktív hosszt. A továbbiakban így ezekkel az értékekkel számoltam.

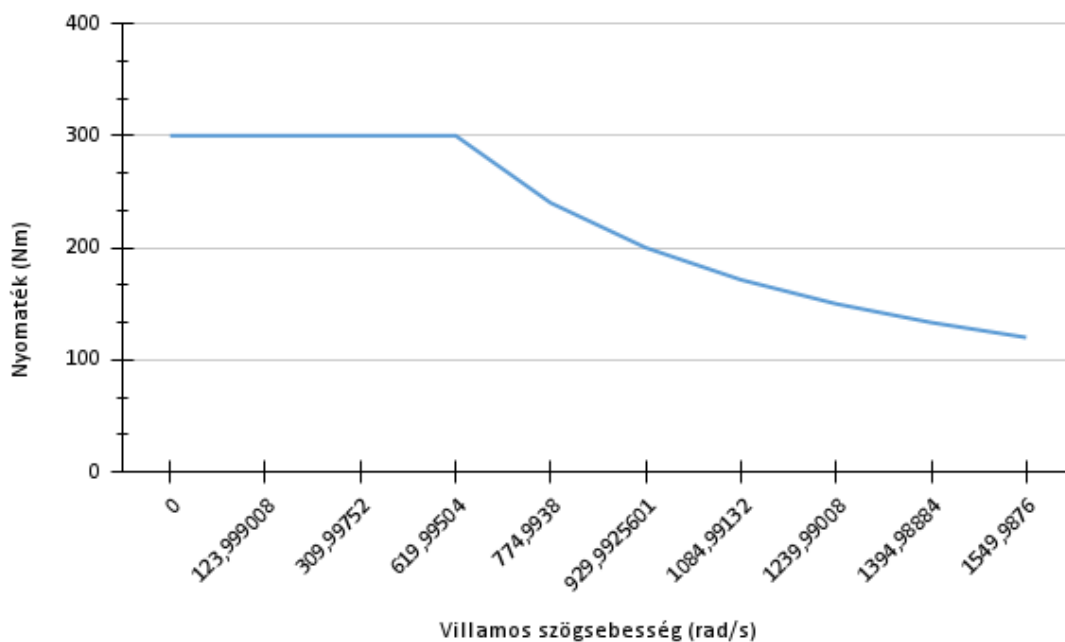
	$D_{out}$ (mm)	$l_i$ (mm)	$\Psi_{p\_p}$ (Wb)	$R_a$ (Ohm)	$L_d$ (H)	$L_q$ (H)	$p$	$I_{a\_max}$ (A)	$M$ (Nm)
<b>Motor 1</b>	460	230	0,2232990259	1,90E-05	0,0005842	0,0009338	4	223	299
<b>Motor 2</b>	460	230	0,3349485377	4,28E-05	0,0013156	0,0020999	4	149	299
<b>Motor 3</b>	460	230	0,4465980518	7,61E-05	0,0023368	0,0037306	4	111	299

4.2. táblázat A kiválasztott motorok módosított paraméterekkel

A fentebb részletezett adatokat eziután mindegyik motorra kiszámoltam a munkapontban (100km/h), hogy a különbségeket látva az igényeknek leginkább megfelelőt lehessen választani.

$v$ [km/h]	0	20	50	100	125	150	175	200	225	250
$v$ [m/s]	0	5,55	13,88	27,77	34,72	41,66	48,61	55,55	62,5	69,44
$\omega_k$ [rad/s]	0	16,46	41,15	82,3	102,88	123,46	144,03	164,61	185,19	205,76
$\omega_v$ [rad/s]	0	123,99	309,99	619,99	774,99	929,99	1084,99	1239,99	1394,99	1549,99
$M$ [Nm]	300	300	300	300	240	200	171,43	150	133,33	120

4.3. táblázat A kiszámolt nyomaték



4.3. ábra Nyomaték – villamos szögsebesség diagram

$U_p$ [V]	138,4442885
$\xi_{mr}$	-2,864247492
$\vartheta_p$ [°]	106,875334
$I_d$ [A]	-64,73472691
$I_q$ [A]	213,3973175
$U_d$ [V]	-1,24E+02
$U_q$ [V]	1,15E+02
$U_{kdelta}$ [V]	<b>168,7880254</b>
$U_{kstar}$ [V]	<b>292,3494358</b>
$M$ [Nm]	314,8851805

4.4. táblázat Az 1. motorhoz tartozó kiszámolt értékek



$U_p$ [V]	207,666432
$\xi_{mr}$	-2,866220532
$\vartheta_p$ [°]	106,8668186
$I_d$ [A]	-43,23205649
$I_q$ [A]	142,5902847
$U_d$ [V]	-1,86E+02
$U_q$ [V]	1,72E+02
$U_{kdelta}$ [V]	<b>253,3550967</b>
$U_{kstar}$ [V]	<b>438,8238998</b>
$M$ [Nm]	315,5712129

4.5. táblázat A 2. motorhoz tartozó kiszámolt értékek

$U_p$ [V]	276,888577
$\xi_{mr}$	-2,886645051
$\vartheta_p$ [°]	106,7791093
$I_d$ [A]	-32,04378273
$I_q$ [A]	106,2741548
$U_d$ [V]	-2,46E+02
$U_q$ [V]	2,30E+02
$U_{kdelta}$ [V]	<b>336,9561954</b>
$U_{kstar}$ [V]	<b>583,6252503</b>
$M$ [Nm]	313,3939216

4.6. táblázat A 3. motorhoz kiszámolt értékek

A választásnál figyelembe kell venni, hogy a nagyobb feszültségeken üzemelő motoron kisebb veszteségek keletkeznek, azonban az alacsonyabb feszültségű rendszerek

szigetelését egyszerűbb megvalósítani, valamint a 400 V –os rendszerek sokkal elterjedtebbek a piacon, mint a 800 V –os rendszerek. Ezek miatt a választásom az első motorra és egy 400 V –os inverterre esett.

## Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.auto-data.net/en/mercedes-benz-sl-coupe-w198-300-sl-215hp-41187>  
2021. szeptember
- [2] Állandómágneses szinkrongépek alapjai prezentáció, Robert Bosch Kft. 2021.  
október
- [3] Vincze Gyuláné, Balázs Gergely György – Villamos járművek 2012. 4-8 oldal,  
14-15 oldal
- [4] E-mobilitás prezentáció, Robert Bosch Kft. 2021. szeptember
- [5] A villamos hajtásláncról rendszerszinten prezentáció, Robert Bosch Kft. 2021.  
október
- [6] Nagy Zsolt – Villamos autók hajtásának vizsgálata szakdolgozat, 2017. 29-32  
oldal