

**Budapesti Műszaki
és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépjárművek tanszék**



Hibrid hajtás Soros hibrid hajtáslánc modellezése

TDK szakdolgozat

Kovácsik Ákos

SDNM0C

**Konzulens: Áfra Miklós (Trigon Electronica Kft.)
Dr. Emőd István (BME GJT)**

2013.10.30.



TARTALOMJEGYZÉK

1. Előszó.....	3
2. Bevezetés.....	4
2.1. A jelen kínálta lehetőségek.....	4
3. Hajtáslánc követelményei.....	6
4. Irodalomkutatás.....	12
4.1. Elektromos forgógépek.....	12
4.2. Permanens mágnes gépek.....	13
4.3. Axiális fluxusú gépek.....	13
4.3.1. Hatásfok, veszteségek.....	14
4.3.2. Egyszerűsített matematikai leírás.....	15
5. Konstruktív kialakítás.....	17
5.1. Új európai menetciklus.....	20
5.2. Modellezés Matlab környezetben.....	22
6. Összegzés.....	29
Irodalomjegyzék.....	30
Mellékletek listája.....	31

1. Előszó

Jelen dokumentum célja, hogy betekintést engedjen egy folyamatos fejlesztés alatt álló projektbe, mely célul tűzte ki magának, hogy szimulációs környezetben létrehozzon egy soros hibrid hajtásláncot. A rendszer külső, befoglaló paramétereit a mai modern járművek -- azon belül is az Európában legnépszerűbb személygépjármű kategóriába, C kategóriába tartozóak -- átlaga szolgáltatja. Ezután megállapítjuk az ideális dinamikai jellemzőket, melyet a hajtásláncnak a lehető legjobban meg kell közelítenie. Az adott komponensek -- szerkezetének, kivitelének, fajtájának -- kiválasztását irodalomkutatás előzi meg, hogy jelen applikáció követelményeit minél jobban kielégítsék. Ezt követően Matlab környezetben készített modellbe kerülnek integrálásra a kereskedelmi forgalomban kapható --a szükséges technikai jellemzőket adatlapjukon szerepeltető -- gépelemek. A modellezett rendszer összehasonlítási alapot nyújt a kategória társak hatásági méréseken -- különböző menetciklusok a fogyasztás, illetve a károsanyag-kibocsájtás mérésére -- elért eredményeivel. Ezek alapján pedig lehetőséget nyújt optimalizációra, illetve mérlegelhetővé teszi az adott rendszer megépítésének érdekességét.

2. Bevezetés

A XIX. század első felében az elektromos forgógépek elterjedése az ipar villamosításával kezdődött, innentől számítva az egyéni hajtások sokkal kedvezőbb konstrukciókat kínáltak, mint az azt megelőző központi erőgépes rendszerek, mind összhatásfok, mind termelékenység szempontjából.

Már ekkor is próbálták gépjárművekben kihasználni az elektromos forgógépek előnyeit, de a legkiepzettebbé a XIX. század végére XX. század elejére vált a belsőégésű motor, a gőzgép és az elektromos motor küzdelme. Nem csoda hát, hogy az első "full hibrid" is 1916-ra elkészült.^[15] A Woods Motor Vehicle Company *Dual Power Model 44 Coupe* modelljét egy elektromos motor hajtotta, melyet akkumulátor látott el energiával, amit a hálózatról lehetett tölteni -- nem a ma megszokott konnektoros-hibrid módjára, hiszen akkor még nem volt ilyen mértékben kiépített elektromos hálózat --, és ez a rendszer önállóan mozgatta a járművet $24 \frac{km}{h}$ -ig, ahonnan már a négyhengeres belsőégésű motor vált egyedüli hajtóelemmé. Nem lett üzleti siker, hiszen majd 3-szor annyiba került, mint a konkurensek, csak belsőégésű motorral szerelt modelljei, és hibrid volta miatt elvesztette az elektromos autók legfőbb előnyét is -- ma alacsony NVH, Noise Vibration and Harsness mutatóval jellemeznénk az akkori mezőnyben --, valamint komplexitása, szerelhetősége is magasabb fokú, bonyolultabb lett.

A XX. század közepére teljesen domináns lett a belsőégésű motor, a nagy hatótávolsága, relatív olcsósága és sikeres piaci modellje miatt. Infrastruktúrája teljesen kiépült -- üzemanyagtöltő állomások, szervizek, stb. --, ezért egyre inkább azzal foglalkoztak, hogy miként lehet jobbá, hatásosabbá, erősebbé tenni. Ezzel a döntéssel hosszú időre meghatározták a járművek struktúráját, hiszen a hagyományos belsőégésű motor rengeteg gépelemet igényel a hajtáslánccban, mely helyigényéhez képest szűknek mondható karosszériában, járműtestben csak gondos átforgatással helyezhető el. Gondoljunk csak bele, hisz van maga a motor, annak segédberendezései, a motorhoz valamilyen közvetítő tengellyel vagy közvetlenül kapcsolódó váltómű, hajtómű, stb.

Ma azonban az energia árak, a károsanyag-kibocsátás, és nem utolsósorban az elektrotechnika fejlesztései újra versenyhelyzetbe hozták az elektromos hajtást, ami teljesen új helyzetet eredményezhet, hiszen megnyitja a strukturális szabadságot a konstruktőrök előtt. Egy akkumulátor tetszőleges formájú, alakú lehet, sőt akár több részre is szedhető, melyeket a kocsi testben bárhol el lehet helyezni. Magát a hajtást akár agymotorokkal is kivitelezhetjük váltómű, hajtómű, közvetítő tengelyek nélkül. A segédberendezések is bárhol elhelyezhetővé válnak, hisz ha elektromos működtetésűek, csak tápkábel szükséges hozzájuk.

Jelen vizsgálatunkban csak a hajtáslánccal foglalkozunk, annak a jármű felépítésére való hatásával, illetve annak kihasználásával nem -- nagy jelentősége ellenére --.

2.1. A jelen kínálja lehetőségek^[3]

Jelenleg 3 fő irány van járművek hajtására:

Hagyományos, belsőégésű motorral szerelt hajtáslánc, ahol minden nagyobb fűtőértékű -- legalább 30 kJ/kg folyékony vagy gáz halmazállapotú -- keverék kémiai tárolt energiáját használjuk fel, hogy abból először hőenergiát, majd mechanikai energiát állítsunk elő, amit már közvetlenül hajtásra tudunk fordítani. Ennél a rendszerrel nagyon kedvező az tüzelőanyag -- az előbb említett keverék -- előállítás

hatásfoka -- 80-90% --, jól tárolható, kis térfogatú, nagy energiasűrűségű -- 35-60 MJ/kg -- a végtermék. Az előbb leírt kettős konverzió, amit a belsőégésű motorok végeznek viszont már igen alacsony -- 15-20% -- hatásfokkal megy végbe, de a csúcshatásfok sem nagyobb 40-45%-nál.

Elektromos hajtásrendszert sokféleképpen létre lehet hozni, ami viszont lényegi változás ezek közt, hogy mi az energiahordozó. Az akkumulátoros járművek -- BEV, Battery Electric Vehicle -- energiasűrűség szempontjából jelentősen elmaradnak a fent említett keverékekhez képest -- 0,5-1 MJ/kg -- ezért a jármű tömegére és/vagy hatótávolságára negatív hatással vannak, mindamelllett, hogy az "utántöltés" is sokkal hosszabb időt vesz igénybe, ellenben lokálisan null-emisszióssá válhat a jármű. A meghajtó elektromos motornak kiváló a hatásfoka -- 90% --, amit az akkumulátor és az áramátalakító -- 80% -- sem csorbít túlságosan. Sajnos az elektromos áram előállítása még nagy erőművekben is csak közepes hatásfokkal valósulhat meg --maximum 55%-- és erre még rájönnek a szállítási veszteségek is.

És végül vannak a tüzelőanyag-cellás járművek. Ezek az elektromos áramot helyben állítják elő, üzemanyaguk a H_2 ami mint köztudott, rettentő nehezen tárolható és magas fokú reakcióképessége miatt veszélyes is. A hidrogén előállítása közepes hatásfokkal valósítható meg -- 40-60% -- és magában az tüzelőanyag-cellában lejátszódó folyamatok is csak közepes hatásfokot -- 40% -- érnek el.

Jól látható, hogy a végső, "well-to-miles" azaz az energiaforrástól a megtett útig számított hatásfok nagyjából azonos mindhárom iránynál. Ezért van nagy törekvés ezen rendszerek olyan szintű kombinálására, melyben minden komponens a saját legnagyobb hatásfokán üzemelhet, így próbálván növelni az összh hatásfokot. Ezeket nevezzük hibrid rendszereknek.

	Belsőégésű motorral szerelt jármű	Elektromos jármű BEV	Tüzelőanyag-cellás jármű
well-to-tank primer energia hordozó előállításának hatásfoka	90%	max 55% --Kombi erőmű--	max 60%
tank-to-vehicle fedélzeti energia-átalakítás hatásfoka	15-20%	80%	40%
vehicle-to-miles előállított energia felhasználásának hatásfoka	90%	90%	90%
well-to-miles összh hatásfok	15-17%	16-19%	17-21%

táblázat 1: A 3 fő irányzat összefoglaló táblázata^[3]

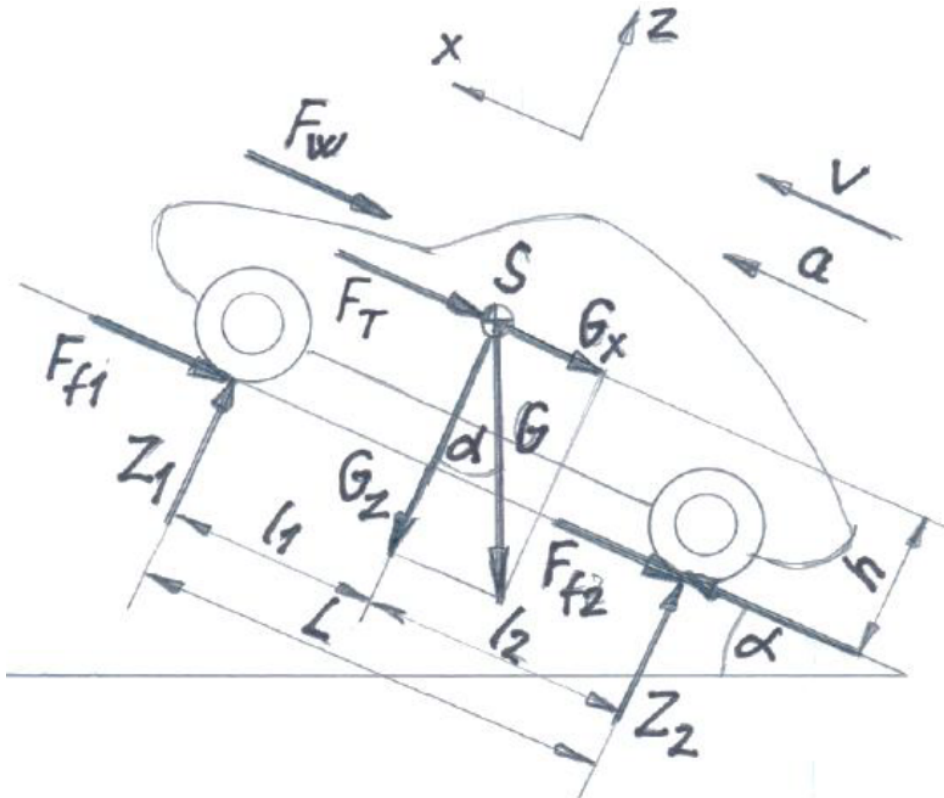
3. Hajtáslánc követelményei^{[2][5][6]}

Az egyik legegyszerűbb sík járműmodellt alapul véve Newton második axiómájából levezethető, hogy a test gyorsulása emelkedőn haladva -- mivel felfelé haladva kell nagyobb nyomatókót kifejteni, ezért csak ezzel az esettel foglalkozunk -- a vonóerő és a rezisztív erők, illetve a jármű tömegének, forgótömegeinek függvénye.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Sigma F_v - \Sigma F_r}{(1+\gamma) \cdot m} \quad \text{Ahol } v: \text{ a jármű sebessége;}$$

m : a jármű tömege;
 γ : forgótömeg tényező;
 F_r : rezisztív erők;
 F_v : aktív erők;

A következő ellenálláserőket vesszük figyelembe:



ábra 1: Jármű modell

Gördülési ellenállás: a kerék és a talaj közt jön létre, a gumiabroncs és a talaj minőségétől függően (f : gördülési ellenállási együttható), illetve a kerékre ható súlyerő (Z) nyomán. $F_{fi} = f \cdot Z_i$; $F_f = \Sigma F_{fi} = f \cdot G \cdot \cos \alpha$; Ahol $G = m \cdot g = \Sigma Z_i$ ahol g a gravitációs állandó

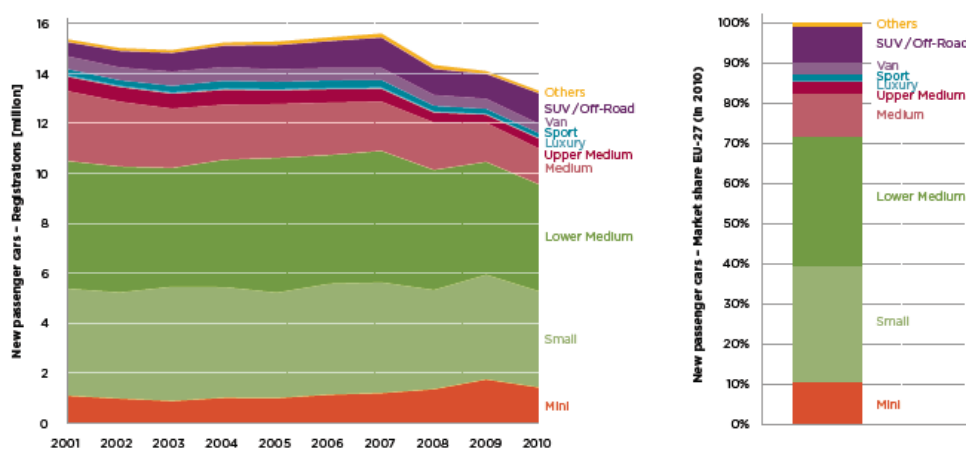
Légellenállás: a jármű alakja meghatározó (c_w alaktényező), a sebességgel négyzetesen arányosan növekvő erő. $F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2$ ahol $v = v_{gk} + v_w$ --tehát a jármű és a szél sebességének előjelhelyes összege--; A a jármű homlokfelülete.

Emelkedési ellenállás: mint az ábrán látható a súlyerőt felbontva egy, a haladási iránnyal ellentétes komponense is adódik. $G_x = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

Tehetlenségi erő: a jármű tömegeinek tehetlenségét kifejező rezisztív erő, nagysága függ a jármű mérlegelhető tömegétől, a forgótömeg tényezőtől, valamint az elszenvedett sebesség változástól: $F_T = m \cdot \gamma \cdot \frac{dv}{dt}$

Ezek tudatában határozzuk meg az ismert mennyiségeket, kezdjük a legjelentősebbel, a jármű tömegével mely az egyik legmeghatározóbb tényező, a dinamikát illetően. Modellünk alapját szolgáltatassa az ICCT --International Council on Clean Transportation-- felmérése alapján legnagyobb piaci részesedéssel bíró C kategória --vagy a köznyelvben Golf-kategória-- átlaga.

New passenger cars: Registrations by vehicle segment



ábra 2: Az ICCT statisztikája, az új autók eladásának megoszlása járműkategóriánként^[8]

A következőkben összeszedtem 12 jelenleg kapható modellt a kategóriából, melyek átlaga fogja majd jelenteni a kiindulási modellünket:

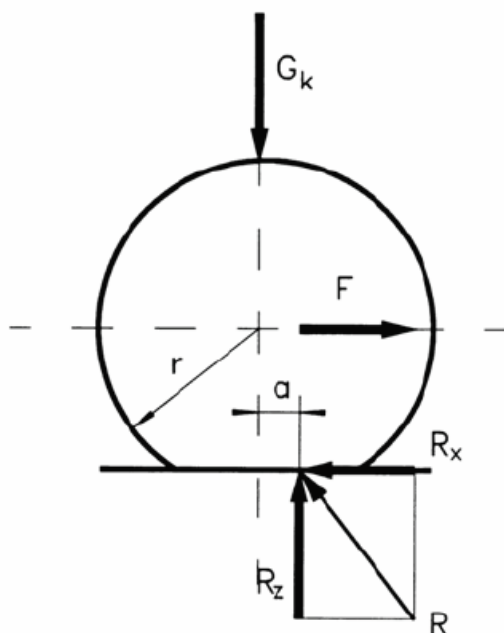
Modell	Menet- kész tö- meg	Maximális terhelhető- ség	Legna- gyobb tel- jesítmény	Gyorsulás 0-100 km/h	Maximális sebesség	Motor típus	Lökettérfo- gat
	kg	kg	kW	s	km/h		cm ³
Kia Ceed	1354	1840	99	9,8	195	I4 CVVT GDI 16v	1591
Toyota Prius V	1485	-	100	10,2	163	I4 VVT-i 16v + PBM	1800
Audi A4 avant quattro	1680	2250	182	6,3	250	V6 CRTDI	2967
Mercedes C 250 estate	1457	2135	150	7,4	233	I4 GDI TC 16v	1796
BMW 328i saloon	1505	1980	180	5,9	250	I4 TPT Valtronic 16v	1997
Alfa Romeo Giulietta	1320	1825	172,5	6,8	242	I4 GDI TC 16v	1742
Škoda Octavia	1430	1985	126	8,3	224	I4 CRTDI	1968
Lancia Delta	1430	1998	123	8,5	214	I4 Multijet2	1956
Peugeot 308 SW	1593	2130	115	8,8	214	I4 THP 16v	1598
Fiat Bravo	1275	1766	103	8,9	204	I4 Multiair 16v	1368
VW Golf	1393	1870	155	6,9	240	I4 TFSI 16v	1984
Ford Focus	1333	1900	110	8,6	210	I4 EcoBoost 16v	1596
Vizsgálati átlag	1438	1971	135	8,0	220		1864

táblázat 2: Jelenleg kapható modellek^[13]

Általánosságban elmondható, hogy a legerősebb modellt választottam, kivétel a prémium szegmensbe tartozó márkák. A hajtáslánccal szemben támasztott elvárás, hogy ezen modellek dinamikáját teljesítse.

A fentiek alapján a menetkész tömeg legyen 1438 kg amihez hozzá kell adnunk a két felnőtt utast -- egyenként 75 kg -- plusz ezek csomagját 20 kg értékben. Tehát a mérlegelhető tömegünk a következő lesz a vizsgálat során: $m=1608 \text{ kg}$.

Csak vontatott kerék



Nézzük meg a gördülési ellenállási együtthatót. Ez az a tényező ami kifejezi a gördülési veszteségek pótlásához szükséges fajlagos vonóerőt. Az ábra jelöléseivel:

$$R_z \cdot a = R_x \cdot r$$

$$\frac{a}{r} = \frac{R_x}{R_z}$$

$$f = \frac{a}{r} = \frac{R_x}{R_z} = \frac{F}{G_k}$$

Mint az ábrából érthető, minél merevebb a felület amin a kerék halad, annál alacsonyabb a gördülési ellenállási tényező. Ugyanakkor látszik a guminyomástól, a gumi anyagától, szerkezetétől való függés is. A szakirodalom ajánlása összehasonlító számításoknál f értékének 0,015 megválasztása. Tehát $f=0,015$

ábra 3: Gördülési ellenállási tényező meghatározása^[6]

A nehézségi gyorsulást vehetjük állandónak tehát $g=9,81 \frac{m}{s^2}$.

Ugyanilyen állandónak vehetjük a közeg -- levegő -- sűrűségét: $\rho=1,293 \frac{kg}{m^3}$

Közép kategóriájú személygépkocsik légellenállása és homlokfelülete

Típus	C_w	A m^2	Típus	C_w	A m^2
Alfa Romeo 156	0,31	2,06	Opel Vectra Caravan	0,32	2,06
Audi A4	0,29	2,03	Peugeot 406 HDI	0,31	2,07
BMW 318i	0,27	2,06	Renault Laguna	0,30	2,07
Citroen Xantia	0,33	2,08	Seat Toledo	0,31	2,11
Fiat Multipla JDT 105	0,32	2,75	Skoda Octavia TDI	0,32	2,06
Ford Mondeo	0,31	2,05	Volvo S40 2.0T	0,32	2,05
Mercedes C 200 CDI	0,30	2,04	VW Passat	0,27	2,15
Opel Vectra	0,28	1,99	VW Passat Variant	0,31	2,16

ábra 4: Egyes C kategóriás járművek ellenállás tényezője -- alaktényező --^[6]

Az alaktényezőt mérésrel szokták megállapítani vagy esetleg CFD szimulációval. Jelen síkmodellünkben csak a felhajtóerő és az ellenállás erő értelmezhető, és nyilvánvaló, hogy a felhajtóerőt elhanyagolhatjuk. Meghatározásához elég a fentebb már ismertetett egyenletet rendezni, amiből kiderül, hogy adott megfúvási irány, sebesség, legnagyobb metszeti felület mellett mérhető maga az ellenállás erő, mely a sebességgel arányosan változik, így az alaktényező csak a forma áramvonalasságától függ. $c_w = \frac{F_w}{\frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2}$ ahol c

az áramlás sebessége. Mint a 7.-es ábrán látható pár példa ez nagyjából 0,33-0,25 között alakul az alapul vett járművek körében. Ezért ha önkényesen kijelöljük, hogy az alaktényező legyen ennek a felső értéke, akkor egy manapság nem túl figyelmesen tervezett modelltől beszélhetünk. Tehát legyen $c_w = 0,33$.

Persze önmagában az alaktényező még nem mond semmit a járműre ható légellenállásról, ezért sokszor az is előfordulhat, hogy egy lényegesen kisebb ellenállás tényezőjű jármű nagyobb ellenállás erőt szenved el. Nagy szerepe ebben a homlokfelületnek van. Elmondható, hogy a kiválasztott járműkategóriában általánosan ez 1,6-2,1 m² körül alakul. Szintén önkényesen, válasszuk meg a homlokfelület nagyságát a következőnek: $A = 2 \text{ m}^2$.

Az emelkedési szögnek a kapaszkodóképesség vizsgálatokor lesz nagy jelentősége. A szakirodalomban^[6] egy 1982-es ajánlás 35%-os emelkedőn való haladást javasol tervezési szempontnak. Ezt elfogadva és durván lefelé kerekítve a lejtő hajlásszöge: $\alpha = 18^\circ$ -- ez több mint 32%-os emelkedésnek felel meg.

A forgótömeg tényező kifejezi a hajtóegység és az általa hajtott gépelemek inerciáját, tehetetlenségét. Egy közelítő képletet fogunk használni ennek meghatározásához, mely a következő alakot ölti fel: $\gamma = 1,03 + a \cdot k^2$ ahol személyautók esetén $a = 0,03 \dots 0,04$ és a k a sebességváltó nyomatékmódosítója. A kezdetekben azonban válasszuk meg ezt is önkényesen: $\gamma = 1,04$.

A kerék sugarát válasszuk egy manapság általános keréktárcsa és gumibroncs párosítást alapul véve -- R16 205/55 --, tehát: $r_{stat} = 0,3 \text{ m}$.

Az elérni kívánt átlagos gyorsulást a 2. táblázatból, a megjelölt modellek átlag

$$\text{gyorsulásaként értelmezzük, tehát } a_{\text{átlag}} = \frac{dv}{dt} = \frac{100}{8} = \frac{3,6}{8} = \frac{27,78}{8} = 3,472 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Rendezzük tehát a mozgásegyenletet:

$$F_v - F_f - F_w - G_x - F_T = 0$$

$$F_v = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot \gamma \cdot \frac{dv}{dt}$$

Ebből tehát a kifejtési kívánt vonóerő -- egyszerűsítésekkel: sík terep, állandó gyorsulás $\frac{da}{dt} = 0$, a sebesség intervallum végén vett légellenállás, szlip elhanyagolása stb. -- nagyságrendileg 6,4 kN amiből megállapítható, hogy a jármű kerekeinek 1900 Nm forgatónyomatékot kell a talajra vinniük összesen.

Most nézzük meg, hogy mekkora állandó kerékteljesítményt igényel a kitűzött végsebességgel való haladás:

$$P_{max} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot v^3$$

$$P_{max} = \frac{1,293}{2} \cdot 2 \cdot 0,33 \cdot \left(\frac{220}{3,6}\right)^3$$

$$P_{max} = 97,381 \text{ kW}$$

A jármű sík terepen halad, és a nagyságrendileg kisebb gördülési ellenállást elhanyagoltuk.

Utoljára pedig nézzük meg a kapaszkodóképesség elvárt szintjéhez szükséges kerékteljesítményt. A szakirodalom ajánlása $v_\alpha = 30 \frac{km}{h}$ minimális haladási sebesség a teljesíteni kívánt emelkedőn.

$$P_{max} = m \cdot g \cdot v_\alpha \cdot \sin(\alpha_{max})$$

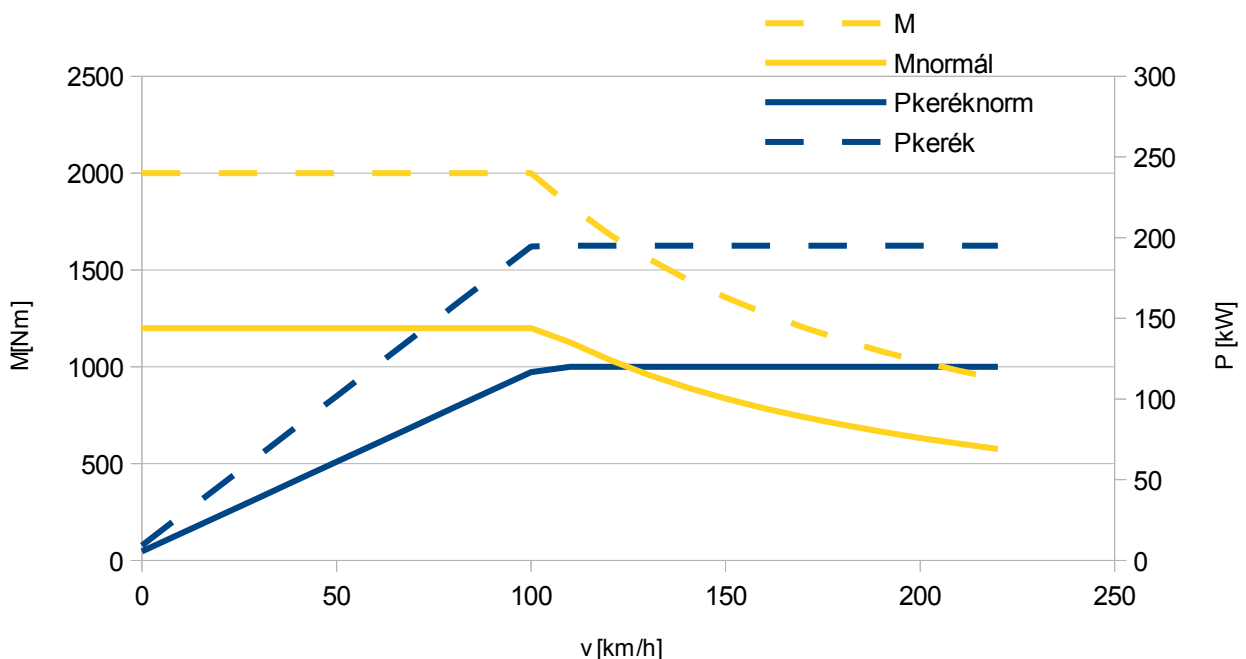
$$P_{max} = 1913 \cdot 9,81 \cdot \frac{30}{3,6} \cdot \sin(18^\circ)$$

$$P_{max} = 48,326 \text{ kW}$$

Ilyenkor a terhelt gépkocsival kell számolni, mely 1438 kg-os üres súlyához öt utas -- 5·75 kg -- és azok csomagjainak --100 kg-- terhelését kell hozzáadni. Ez megfelel

$$M_{max} = \frac{P_{max}}{\omega_{kerék}} = \frac{P_{max} \cdot r_{stat}}{v_{max}} = \frac{53,488 \cdot 0,3}{\frac{30}{3,6}} = 1739,74 \text{ Nm} \quad \text{keréknyomatéknak.} \quad \text{Szintén}$$

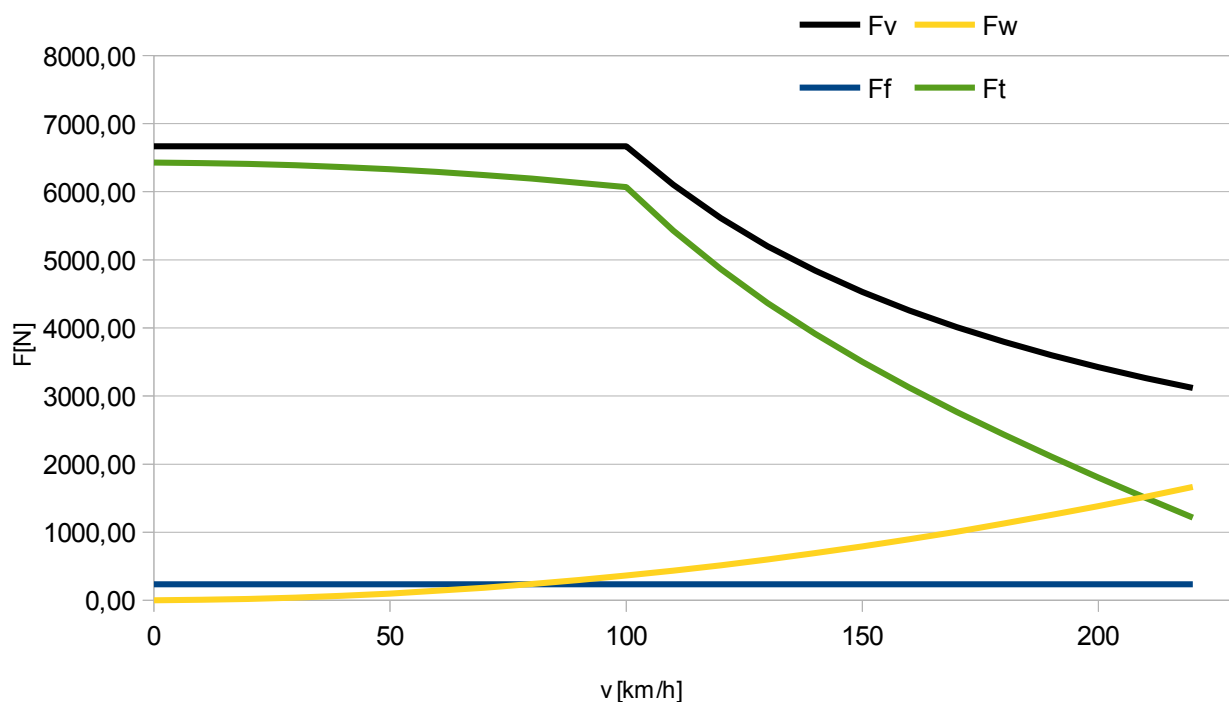
elhanyagoltuk a kisebb nagyságrendű erőket.



ábra 5: Ideális karakterisztikák: túlterhelt -- szaggatott -- és folyamatos

Összegezve tehát a fentieket elmondható, hogy nagyságrendileg 2000 Nm csúcsnyomatékot kell a hajtásrendszernek átadnia a kereknek, viszont legalább 100 kW folyamatos teljesítmény leadására kell képes legyen, ha a végsebesség körüli folyamatos haladás tényleges cél. Ezen keretszámokkal, pontosabb számításokat végezve lépcsős függvényként a fenti ideális karakterisztika adódik.

A következőkben egy olyan gépet, gépcsoportot keresünk, mely ezt a karakterisztikát a legoptimálisabban meg tudja közelíteni.



ábra 6: Egyes erők alakulása a sebesség függvényében -- $m=1608\text{kg}$, $\alpha=0^\circ$, túlterhelt állapot, maximális gyorsítás --

4. Irodalomkutatás

4.1. Elektromos forgógépek^[1]

Az elektromos forgógépeket 3 fő gépcsoportra lehet felbontani:

- indukciós gépek (IM) vagy aszinkron gépek
- reluktancia motorok (SRM)
- permanens mágnes gépek (PM)

Ezek jellemzőit a következő táblázatban foglalom össze J. F. Gieras: *Advancements in Electric Machines* című műve nyomán

	IM	PM	SRM
Teljesítménysűrűség $\frac{kW}{kg}$	Kielégítő	Legnagyobb	Alacsonyabb mint a PM gépeké
Hatásfok η	Kielégítő, megfelelő energiatakarékos megoldásoknak is	Akár 90% fölött is	Pár százalékkal jobb, mint az IM gépek esetén
Teljesítménytényező $\cos\varphi$	0,8-09 között	Akár 1,0 is elérhető	Nem értelmezhető (egyenáramú gép)
Teljesítőképesség alacsony sebesség esetén	Gyenge	Jó	Nagy nyomaték, de rossz hatásfok mellett
Nyomaték-feszültség karakterisztika $T=f\{U\}$	$T \approx U^2$	$T \approx U$	$T \approx U$ konstans csúcsáram mellett
Zaj [dB(A)]	60 alatt	65 alatt	70-82
Nyomaték hullámosság	kevesebb mint 5%	akár 10%	15-25%-ig is akár
Túlterhelés tényező $\frac{T_{\text{túlterhelt}}}{T_{\text{névleges}}}$	1,6-3,2	körülbelül 2	legnagyobb
Teljesítmény elektronika	Nem szükséges állandó sebesség esetén	Szükséges	Szükséges
Költségek	Költséghatékony	Drágább, mint a hasonló IM gépek	Költséghatékony

táblázat 3: Elterjedt elektromos forgógépek összehasonlítása^[1]

A táblázatból jól kivehető, és a mai trendeken is ez figyelhető meg, hogy járműhajtás céljából a legmegfelelőbb az állandó mágneses gép, hisz kiváló a teljesítménysűrűségük, ami egy nagyon nagy előny a mobilitás terén. Hatásfokuk nem csak csúcsteljesítményük leadásánál, hanem alacsony terhelésnél is elfogadható, valamint kedvező a nyomaték és feszültség viszonya is. Persze mindennek ára van, de a járműiparban ez felvállalható, a nyújtott előnyök ellenében. Ezért kutatásunk folytassuk a permanens mágnes gépek fajtáinak megismerésével.

4.2. Permanens mágnes gépek^[4]

Általánosságban 3 fajta hajtást különböztethetünk meg. Értelemszerűen számunkra jelen esetben érdektelen az állandó sebességű, mivel a jármű folyamatosan változtatja mozgásállapotát; és az úgy nevezett servo drive is, hisz nem fontos a pontos és a kelleténél sokkal gyorsabb állapotállítás. Ezért a VSD -- variable-speed-drive -- hajtásokkal foglalkozunk a továbbiakban. Ezt -- és amúgy a másik 2 hajtást is -- 3 féle állandó mágneses géppel érhetjük el:

- egyenáramú, kommutátoros motorral
- kefe nélküli motorral (PMBM) -- ac-dc szinkron motor --
- léptetőmotorral

Kommutátoros motorokkal nem foglalkozunk a kefeszikrázás jelensége, valamint az azonos teljesítményhez tartozó esetenként sokkal nagyobb -- 40-50% PMBM-hez képest -- méretük miatt, és a léptető motorokkal sem, mivel azok alkalmatlanok járműhajtásra.

PMBM motoroknál is van kommutáció, de itt elektromos, amit általában a vezérlő elektronika pozíció alapján végez -- a pozíció jelnek megfelelően kapcsolgatja a tekercsek áramát. Ezt persze meg lehet oldani Hall-szenzor vagy más jeladó segítségével is, de ezen lehetőségekbe egyelőre ne menjünk bele.

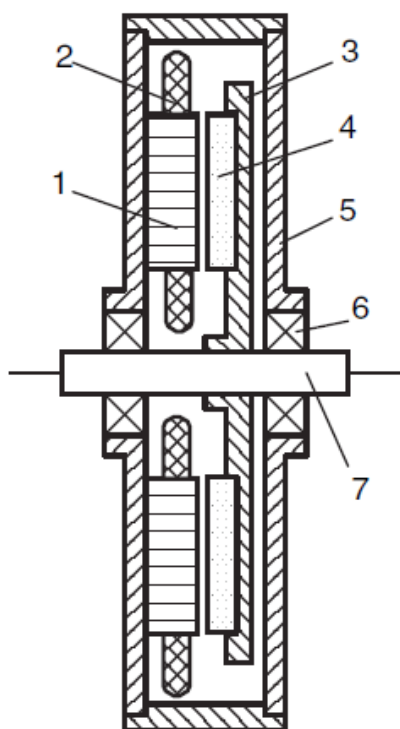
Számos konstrukciós megoldással találkozhatunk: tárcsás, hengeres típusú, osztott, osztatlan tekercselésű, belső állórészű, külső állórészű stb.

Számunkra a következő kritériumok a legfontosabbak -- egyelőre --:

- minél kisebb tömeg
- minél kisebb térfogat
- minél jobb hatásfok
- kellően széles üzemi tartomány

Ha csak ezen kritériumokat tekintjük ma az axiális fluxusú gépek felelnek meg a legjobban.

4.3. Axiális fluxusú gépek^[7]



Az 7-es ábrán egy, a lehető legegyszerűbb konstrukciós megvalósítást látunk. A tengelyhez (7) szilárdan rögzített általában acél tárcsán (3) találhatóak az állandó mágnesek (4). Ezt nevezhetjük rotornak. A ház (5) csapágyakkal (6) vezeti meg a tengelyt (7) és egy fix ponthoz van kötve. A házhoz mereven kötve látható az állótárcsa/-gyűrű (1) és a tekercselés (2), amit így együtt tekinthetünk a klasszikus állórésznek. Természetesen renget kialakítás létezik, hisz egy átmérő nagyság után, már nem előnyös annak növelése a nagyobb teljesítmény érdekében, ezért több tárcsát alkalmaznak. Lehet kétoldalas státorunk, ekkor 2 külső rotor forgathatja a tengelyt, de fordítva, a rotor is lehet belül, a két státor között. Akár a tekercselés is lehet az forgórészben és a mágnesek az állórészben.

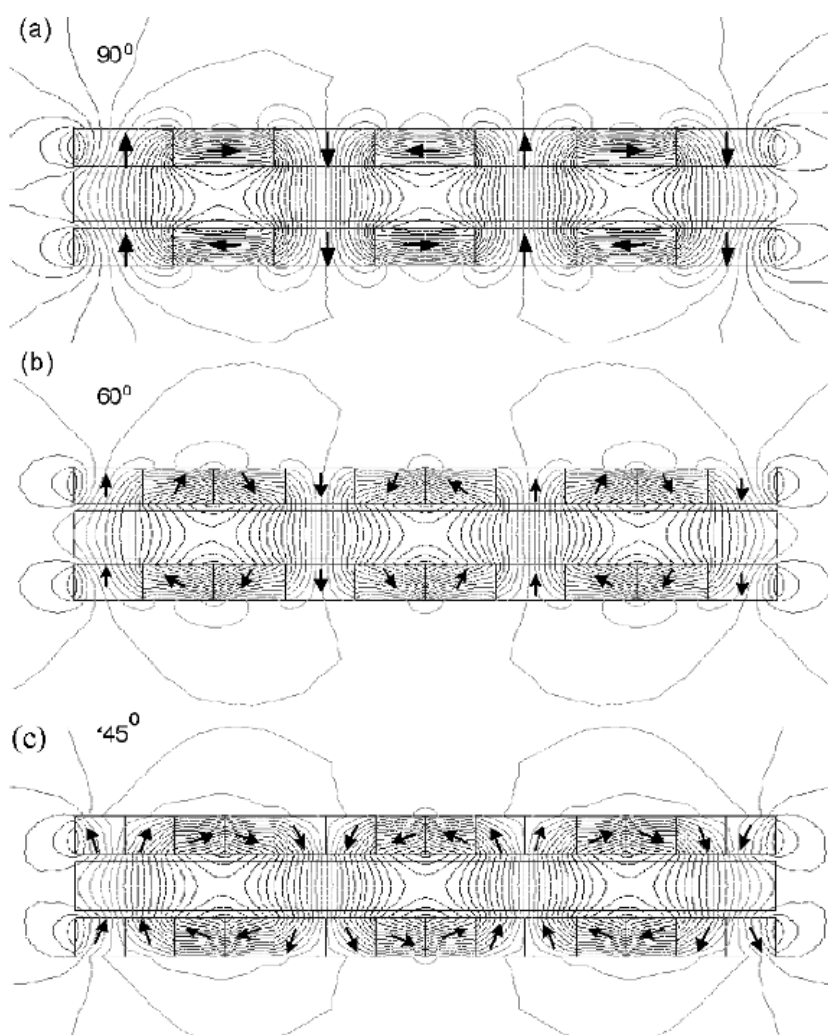
ábra 7: Alap kialakítás^[7]

4.3.1. Hatásfok, veszteségek^[7]

Kialakítástól függően, jelen lehetnek a következő veszteségek:

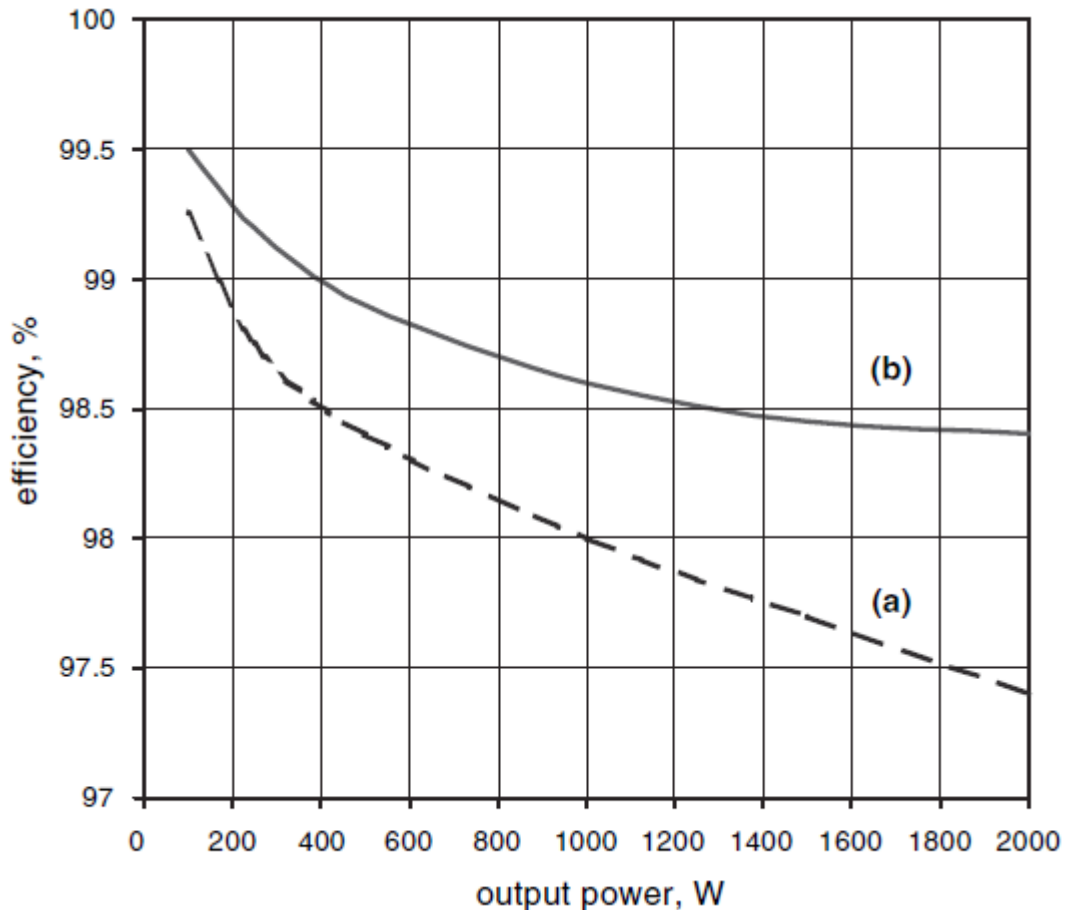
- armatúra tekercs vesztesége
- örvényáram veszteség
- hiszterézis veszteség
- mágnes veszteség
- rotor vasmag vesztesége
- mechanikai veszteségek

Coreless -- vasmag nélküli -- AFPM motoroknál a tárcsák nem ferromágneses anyagokból készülnek, így az ebből adódó veszteségek nem értelmezhetők. Pozitív hozadék még továbbá, hogy így nem ébred normál erő a tárcsák közt, valamint a nyomaték lengés is nagy mértékben csökken. És természetesen a kiváltó anyagok könnyebbsége miatt csökkenő súly párosul a növekvő hatásfokhoz. A tekercselést sem fémfogakba -- slot -- rögzítik, hanem nagy szilárdságú gyantába, vagy műanyagba. Hátránya viszont, hogy a légrésben a lehető legnagyobb fluxus sűrűséget kell létrehozni. Ezt az úgynevezett Halbach elrendezés segíti.



ábra 8: Halbach elrendezés különböző szögekkel^[7]

A mágnesek egy olyan elrendezése mellyel elérhető, hogy kialakuljon az "egy oldalú fluxus", így a koncentrált indukcióvonalak a legnagyobb fluxust hozhatják létre, ráadásul az indukcióvonalak normál irányúak. Ez képes nagy elektromágneses nyomatékot indukálni. Előszeretettel használják kerékagy-motorként, fokozatmentes elektromechanikus hajtásláncban.



ábra 9: Egy kereskedelmi forgalomban kapható 1.8 kW-os névleges teljesítményű vasmag nélküli AFPM motor Surface PM -- felület mágnesezett -- technológiával (a) és Halbach elrendezéssel (b) kifejezetten solar car-okhoz fejlesztve^[7]

4.3.2. Egyszerűsített matematikai leírás^[7]

Egy AFPM elektromos gépnél az elektromágneses nyomatékot közelítőleg a következő egyenletből számíthatjuk:

$$dT_d = 2 \cdot \alpha_i \cdot m_1 \cdot I_a \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot B_{mg} \cdot r \cdot dr$$

Ahol $\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}}$ tehát az átlagos és a maximális mágneses fluxussűrűség aránya a légrésben;

m_1 a fázisok száma;

I_a az armatúra áram;

N_1 egy fázis menetszáma;

$k_{wl} = k_{dl} \cdot k_{pl}$ a tekercs együttható, ami a $k_{dl} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}\right)}$ eloszlási együttható

és a $k_{pl} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right)$ távolság tényező szorzata, melyekben rendre $q_1 = \frac{s_1}{2 \cdot p \cdot m_1}$ a fogak, vágatok -- slot -- hányadosa a pólus szám és a fázis szám szorzatával, valamint

$\beta = \frac{\omega_c(r)}{\tau_c(r)}$ a mag távolság - pólus távolság aránya;

Ahol r a sugár.

Ezt $\frac{D_{out}}{2}$ és $\frac{D_{in}}{2}$ közt integrálva r szerint kapjuk az átlagos nyomatékot:

$$T_d = \frac{1}{4} \cdot \alpha_i \cdot m_1 \cdot I_a \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot B_{mg} \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2)$$

Figyelembe véve, hogy $\Phi_f = \alpha_i \cdot B_{mg} \cdot \frac{\pi}{8p} \cdot D_{out}^2 \cdot (1 - k_d^2)$ és $k_d = \frac{D_{in}}{D_{out}}$ kapjuk hogy:

$$T_d = 2 \cdot \frac{p}{\pi} \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot \Phi_f \cdot I_a$$

Hogy egy szinuszos áram, illetve szinuszos mágneses fluxussűrűség rms nyomatékát megkapjuk ezt még meg kell szoroznunk $\frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{4}$ konstanssal, tehát:

$$T_d = \frac{m_1}{\sqrt{2}} \cdot p \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot \Phi_f \cdot I_a = k_T \cdot I_a$$

Másik fontos paraméter az EMF -- electro-magnetic force -- vagyis az elektromágneses tér munkavégző képessége. A terhelésmentes EMF úgy határozható meg, hogy differenciáljuk a mágneses fluxus hullámalakjának első harmonikusát $\Phi_{fl} = \Phi_f \cdot \sin(\omega \cdot t)$, valamint ezt megszorozzuk $N_1 \cdot k_{wl}$ -gyel.

$$e_f = N_1 \cdot k_{wl} \cdot d \frac{d\Phi_{fl}}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot \Phi_f \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Ahol $\Phi_f = \int_{R_{out}}^{R_{in}} \alpha_i \cdot B_{mg} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot p} \cdot r \cdot dr = \alpha_i \cdot B_{mg} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot (R_{out}^2 - R_{in}^2)$

Az rms értéket a csúcs EMF érték $\sqrt{2}$ -vel való osztásával kapjuk:

$$E_f = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot \Phi_f = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot p \cdot N_1 \cdot k_{wl} \cdot \Phi_f \cdot n_s = k_E \cdot n_s$$

És a következő összefüggés állítható fel a nyomaték és az EMF közt:

$$T_d = \frac{m_1 \cdot E_f \cdot I_a}{2 \cdot \pi \cdot n_s}$$

Jól látható, hogy a számításokat leegyszerűsítik, a gépekre jellemző tényezők -- k_T ; k_E --, amiket a gyártók általában meg is adnak a specifikációk közt.

5. Konstrukciós kialakítás

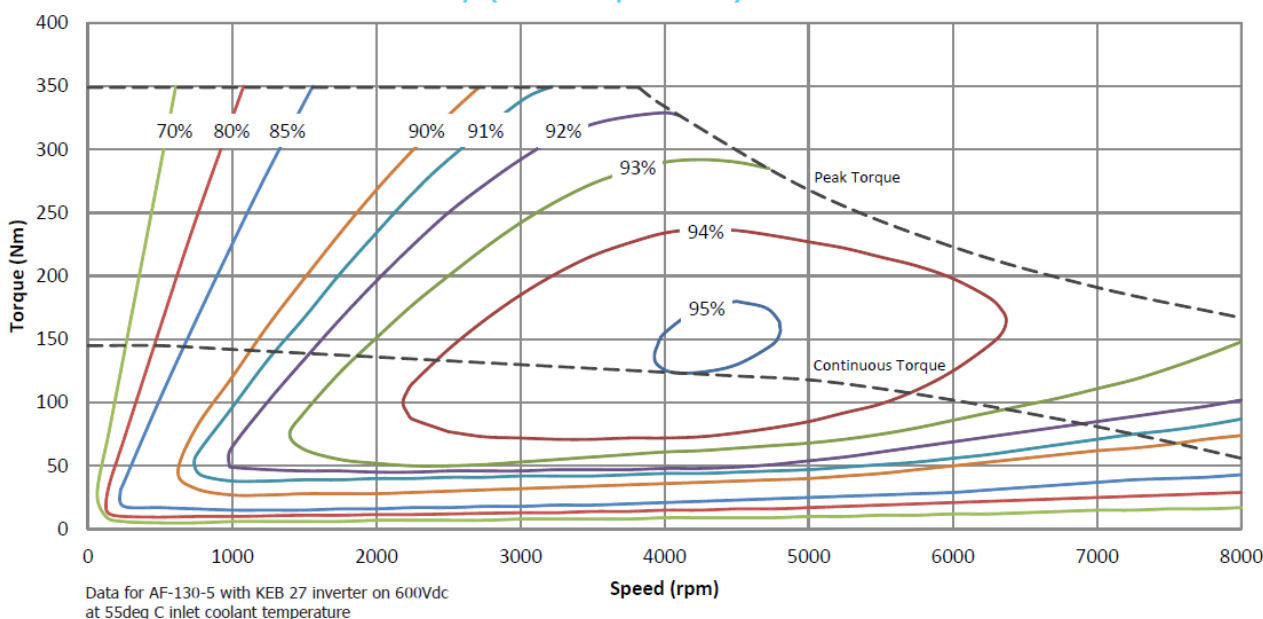
Az előzőekben felállítottunk egy követelményrendszert, illetve megnéztük, hogy járműhajtásra mely motortípus a legalkalmasabb. Most az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy két motor -- melyek generátor üzemre is alkalmasak -- közül választhatunk, mégpedig az **EVO Electric Ltd. AF-130** és **AF-230** típusai közül -- adatlapok mellékletként szerepelnek. Szintén egyszerűsítésként vezessük be, hogy csak egyfokozatú hajtóművet szeretnénk használni. Először nézzük meg azt az esetet, amikor 2 hajtóegységet alkalmazunk:

Nézzük meg, hogy a végsebesség az adott kerékmérettel mekkora szögsebességet

igényel a meghajtó egységtől: $\omega = \frac{v_{max}}{R_{kerék}} = \frac{\frac{220}{3,6}}{0,3} = 203,70 \frac{rad}{s} \Rightarrow n = 1946,12 \frac{ford}{perc}$, tehát

a használt fordulatszám tartomány durván $n = [0 ; 2000] \frac{ford}{perc}$.

Performance and Efficiency (Motor Operation)



ábra 10: AF-130 hatásfok kagylógörbéi^[9]

Vegyük alapul a gyártó által megadott kivitel teljesítményét, és hatásfokát. A maximális sebességhez válasszuk a 90%-os görbe és a folyamatos nyomatékgörbe metszéspontját,

amit $n = 7500 \frac{ford}{perc}$ és $M = 70 Nm$ jellemez. Ekkor egy $i_{össz} = \frac{n_{kerék}}{n_{motor}} = \frac{2000}{7500} = 0,267$

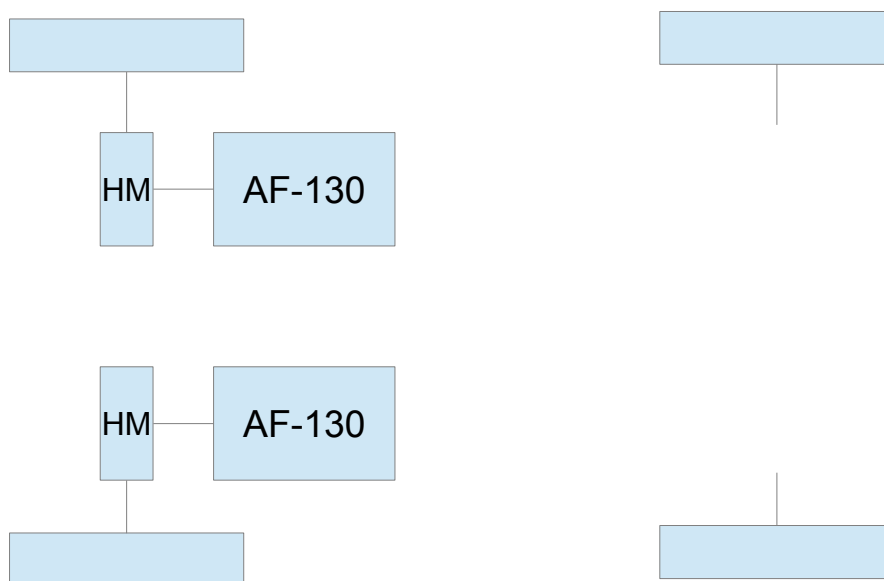
áttételű hajtóműre van szükségünk, melynek nyomaték módosítása $\eta = 0,98$ hatásfok esetén $k = \frac{\eta}{i_{össz}} = \frac{0,98}{0,267} = 3,67$ és így a keréken megjelenő nyomaték

$M_{kerék} = M_{motor} \cdot k = 70 \cdot 3,67 = 256,9 Nm$. Már a kiválasztott pontnál számolható teljesítménynél -- $\sim 55 kW$ -- látható volt, hogy jármű igényeit nem teljesíti kifogástalanul

$220 \frac{km}{h}$ -val való haladáshoz, de kielégítően megközelíti azt. Természetesen túlterheléssel, 2 utassal képes ezt túlfutni is, de ez már egyáltalán nem javasolt

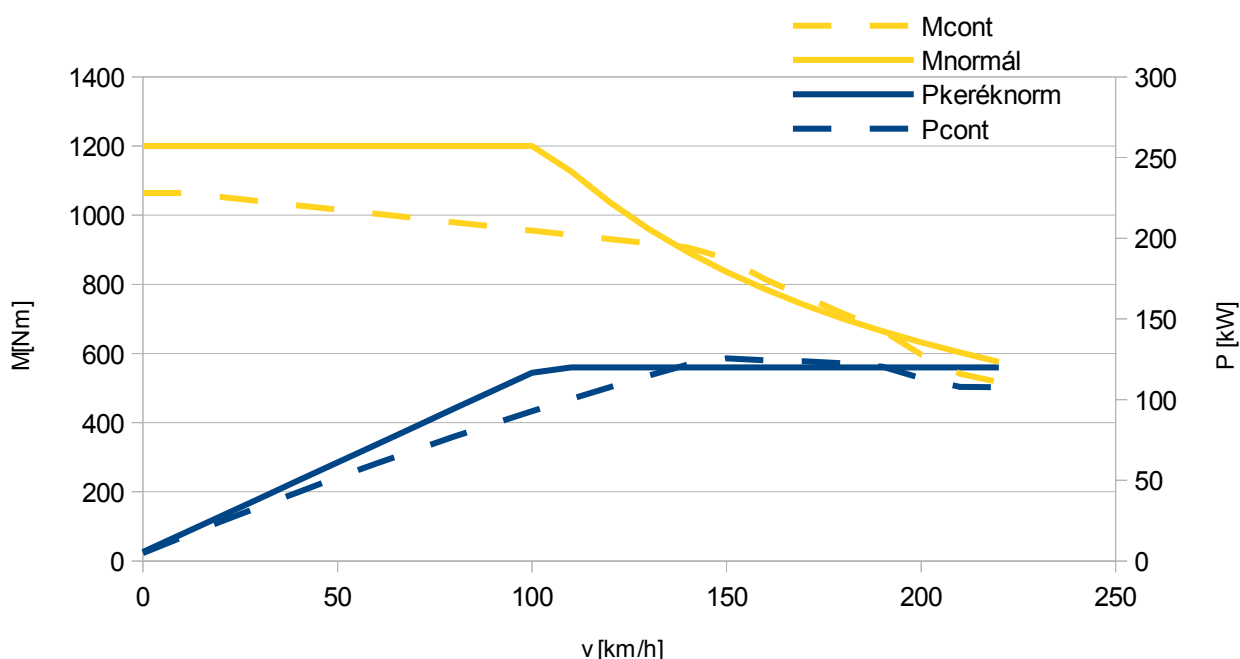
$V_{\text{alsó}}$	$V_{\text{felső}}$	ω	a	t	s	F_t	F_f	F_w	G_x	F_v	$M_{\text{normál}}$	$P_{\text{keréknorm}}$
[km/h]	[km/h]	[rad/s]	[m/s ²]	[s]	[m]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[kW]
0	10	4,63	2,250	1,23	1,71	3762,56	236,62	0,82	0	4000,00	1200	6
10	20	13,89	2,246	2,47	6,87	3755,97	236,62	7,41	0	4000,00	1200	17
20	30	23,15	2,238	3,71	15,49	3742,81	236,62	20,58	0	4000,00	1200	28
30	40	32,41	2,226	4,96	27,62	3723,05	236,62	40,33	0	4000,00	1200	39
40	50	41,67	2,211	6,22	43,33	3696,71	236,62	66,67	0	4000,00	1200	50
50	60	50,93	2,191	7,48	62,70	3663,79	236,62	99,59	0	4000,00	1200	61
60	70	60,19	2,167	8,77	85,84	3624,28	236,62	139,10	0	4000,00	1200	72
70	80	69,44	2,140	10,06	112,88	3578,19	236,62	185,20	0	4000,00	1200	83
80	90	78,70	2,108	11,38	144,00	3525,51	236,62	237,87	0	4000,00	1200	94
90	100	87,96	2,073	12,72	179,36	3466,25	236,62	297,14	0	4000,00	1200	106
100	110	97,22	2,033	14,09	219,21	3400,40	236,62	362,98	0	4000,00	1200	117
110	120	106,48	1,844	15,59	267,32	3084,49	236,62	435,41	0	3756,52	1127	120
120	130	115,74	1,617	17,31	326,95	2704,95	236,62	514,43	0	3456,00	1037	120
130	140	125,00	1,413	19,28	400,65	2363,35	236,62	600,03	0	3200,00	960	120
140	150	134,26	1,226	21,54	491,90	2050,47	236,62	692,22	0	2979,31	894	120
150	160	143,52	1,052	24,18	605,58	1759,49	236,62	790,99	0	2787,10	836	120
160	170	152,78	0,888	27,31	748,93	1485,22	236,62	896,35	0	2618,18	785	120
170	180	162,04	0,732	31,11	933,47	1223,67	236,62	1008,29	0	2468,57	741	120
180	190	171,30	0,581	35,89	1179,14	971,71	236,62	1126,81	0	2335,14	701	120
190	200	180,56	0,435	42,28	1525,32	726,85	236,62	1251,92	0	2215,38	665	120
200	210	189,81	0,291	51,82	2068,40	487,09	236,62	1383,61	0	2107,32	632	120
210	220	199,07	0,150	70,34	3174,62	250,79	236,62	1521,89	0	2009,30	603	120
220	230	208,33	0,010	349,76	20638,29	16,62	236,62	1666,76	0	1920,00	576	120

táblázat 4: Normál állapot, a járműmodell igényei -- $m=1608$ kg, $\alpha=0^\circ$, a pirossal jelzett értékek mértékadóak, ezekből lett származtatva a legtöbb jellemző, ami ezektől függ --



rajz 1: Fronthajtás sematikus rajza, csak a hajtóegységre vonatkoztatva

üzemállapot, sem technikai szempontból, sem közlekedésbiztonsági szempontból. Mint korábban írtam és az 1-es rajzon látható, két hajtóegységet alkalmazunk, de egyelőre nem vizsgáljuk a különböző tengelyeken való elhelyezés hatásait.



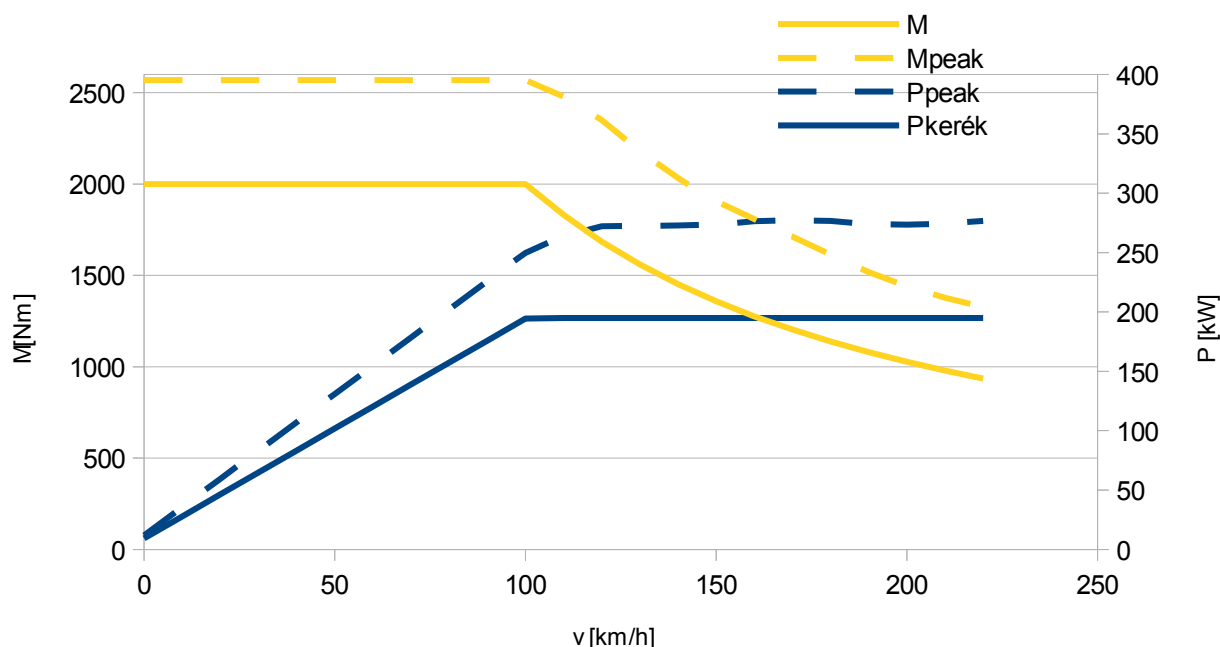
ábra 11: Karakterisztika két darab AF-130 és a fentiekben megjelölt hajtómű esetén, összehasonlítva a megállapított ideális esettel

A választott motor(ok) és hajtómű kielégítően simul az ideálisan elvárt karakterisztikához. A 11-es ábrán a normál, folytonos terhelésre vonatkozó karakterisztika látszik. Az elektromos motor számára ez persze egy maximum görbeként is felfogható. Sík terepen --

$\alpha = 0^\circ$ -- és két utassal -- $m = 1608 \text{ kg}$ -- $t_{0-100} \approx 16 \text{ s}$ alatt gyorsul fel $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ -ra,

de a városi sebességhatárt már $t_{0-60} \approx 10 \text{ s}$ alatt eléri, miközben már $25 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ felett

minimum $\eta=85\%$ hatásfokkal dolgozik -- ehhez persze hozzájön a kerékajtás: féltengely, gömbcsukló; és a hajtómű hatásfoka is; és csak 185 Nm kifejtett össz-keréknyomaték felett érvényes ennél a sebességnél.



ábra 12: Karakterisztika két darab AF-130 és a fentiekben megjelölt hajtómű esetén, összehasonlítva a megállapított ideális túlterhelt esettel

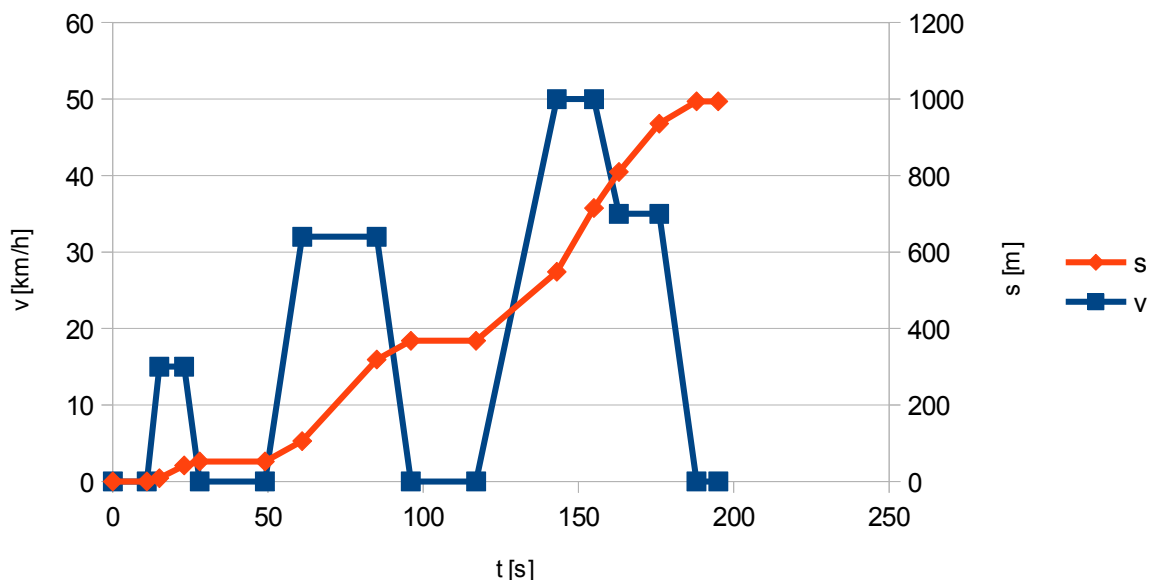
Túlterhelt állapotban azonban bőven az elvárásaink felett teljesít a hajtáslánc. Sík terepen -- $\alpha=0^\circ$ -- és két utassal -- $m=1608\text{ kg}$ -- $t_{0-100}\approx 6\text{ s}$ alatt gyorsul fel $100\frac{\text{km}}{\text{h}}$ - ra, amennyiben a tapadási feltételek ezt lehetővé teszik, de ebben az esetben már csak $60\frac{\text{km}}{\text{h}}$ felett elérhető a $\eta=85\%$ feletti hatásfok -- ehhez persze hozzájön a kerékajtás: féltengely, gömbcsukló; és a hajtómű hatásfoka is; és csak 195 Nm kifejtett össz-keréknyomaték felett érvényes.

5.1. Új európai menetciklus

Most folytassuk vizsgálatunkat menetciklusok alapján, melyből számunkra a legfontosabb az új európai menetciklus -- NEDC^[14]. Az Európai Bizottság ennek segítségével vizsgálja a különböző járművek fogyasztását, károsanyag-kibocsájtását. A ciklus két részből áll, egy városi és egy országúti mérésből. Az összesített fogyasztást 4-szer ismételt városi és 1 országúti mérésből határozzák meg. Természetesen a mérés maga görgős fékerőmérő padon zajlik, számítógép által irányítva és a környezeti körülményeket az előírásban foglaltak szerint előteremtve, így egzakt, összehasonlítható eredményeket kaphatunk. A részletes leírást az [ECE R101](#)-es törvény tartalmazza. Több hiányossága is van az NEDC-nek, köztük az igen "óvatos" gyorsulások -- városi ciklus esetén a maximális gyorsulás $a_{max}=1,04\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, míg országúti ciklus esetén csak

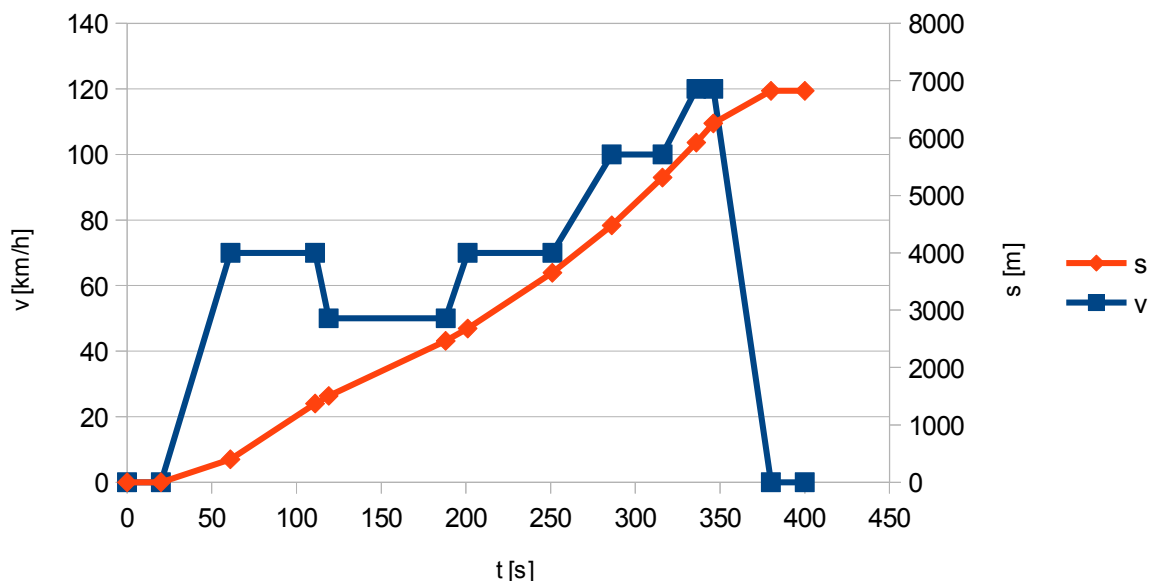
$a_{max}=0,47\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Ezen értékek egy álmos kisvárosban is nehezen tarthatók a valós

körülmények között, így a tájékozatlan emberek gyakran legyintenek a precízen mért fogyasztás értékekre és elfelejtik, hogy viszonyítási alapnak így is megfelelő.



ábra 13: NEDC városi ciklus

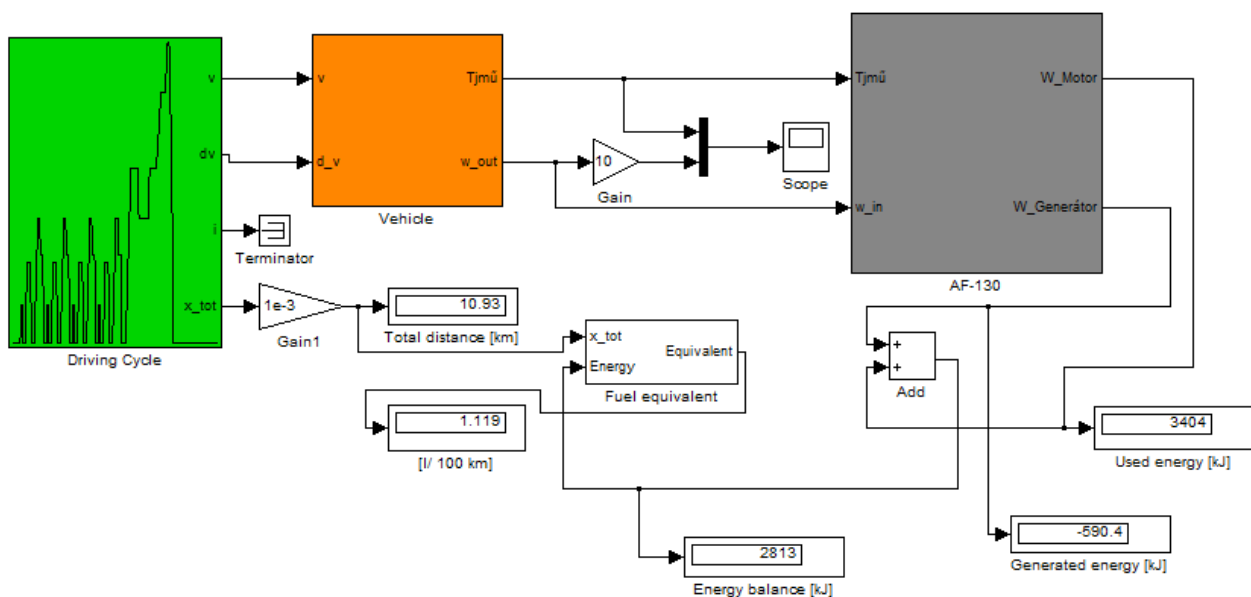
Ezen segít majd a jövőben bevezetendő WLTP ciklus -- Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures -- melynek egy tervezetét majd szintén felhasználom a vizsgálat során.



ábra 14: NEDC országúti ciklus

5.2. Modellezés Matlab környezetben

Mivel az elvégzendő feladat komplexitása megköveteli, ezért Matlab Simulink környezetben modelleztem az eddigieket. Ezáltal nem csak átláthatóbb, könnyebb követhetőséget nyertem, hanem új fajta megközelítési módot is. A modell paramétereit könnyű állítani a kívánt vizsgálatokhoz -- motor karakterisztika, menetciklus, stb. -- . A modell alapjait a [ETH Zürich - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich](http://www.ethz.ch) egyetem [Department of Mechanical and Process Engineering \(MAVT\)](http://www.mavt.ethz.ch) karának The Institute for Dynamic Systems and Control tanszékének dolgozói által gondozott [QuasiStatic Simulation Toolbox \(QSS TB\)](http://www.mavt.ethz.ch) eszköztára adta.^[11]



A menetciklus tömbjét egy-az-egyben átvettem, így a QSS TB betöltése nélkül a modell nem futtatható.

A jármű tömbnek a sebesség és a gyorsulás a bemenete, míg kimenete a jármű által igényelt -- hajtott kerekek tengelyén ébredő -- össznyomaték, illetve a kerekek tengelyeinek szögsebessége. A blokk parametrizálható, így könnyen tesztre szabhatóak a következő jellemzők:

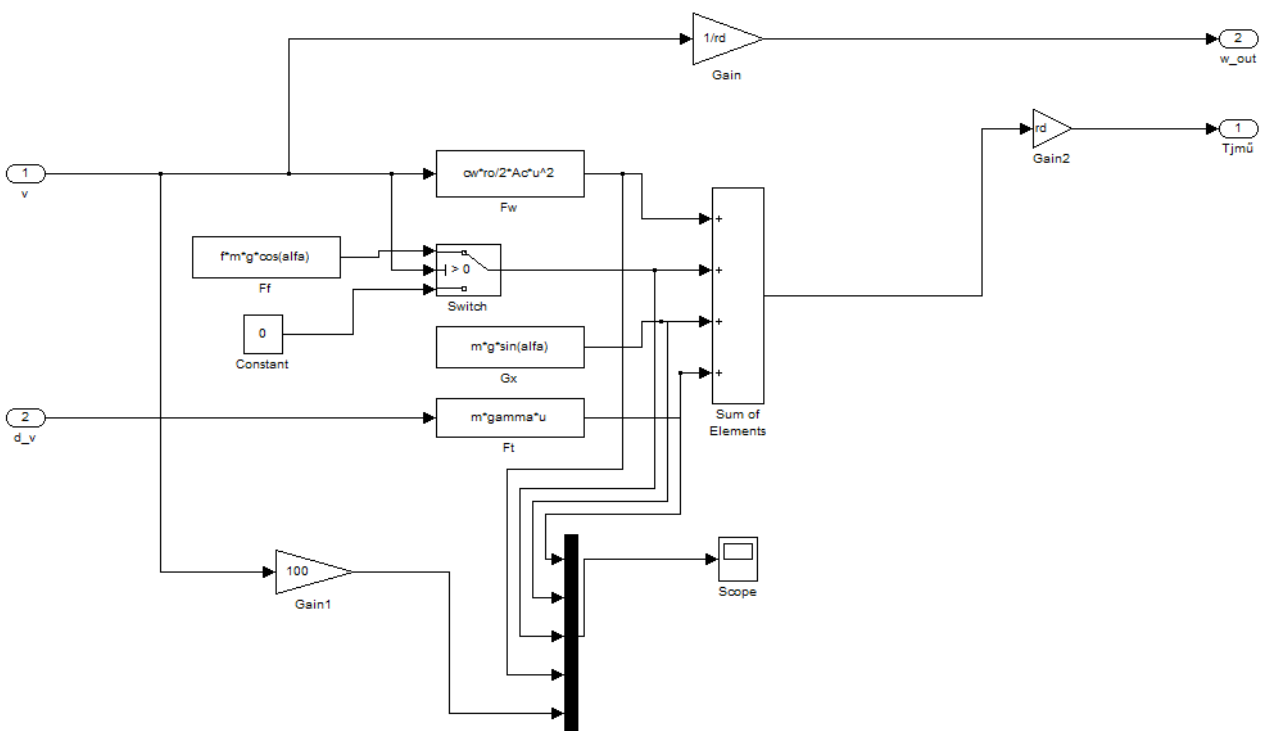
- Jármű tömege;
- Légellenállási tényezője;
- Jármű homlokfelülete;
- Átlagos dinamikus kerék sugár;
- Forgótömeg tényező;
- Gördülési ellenállási tényező;

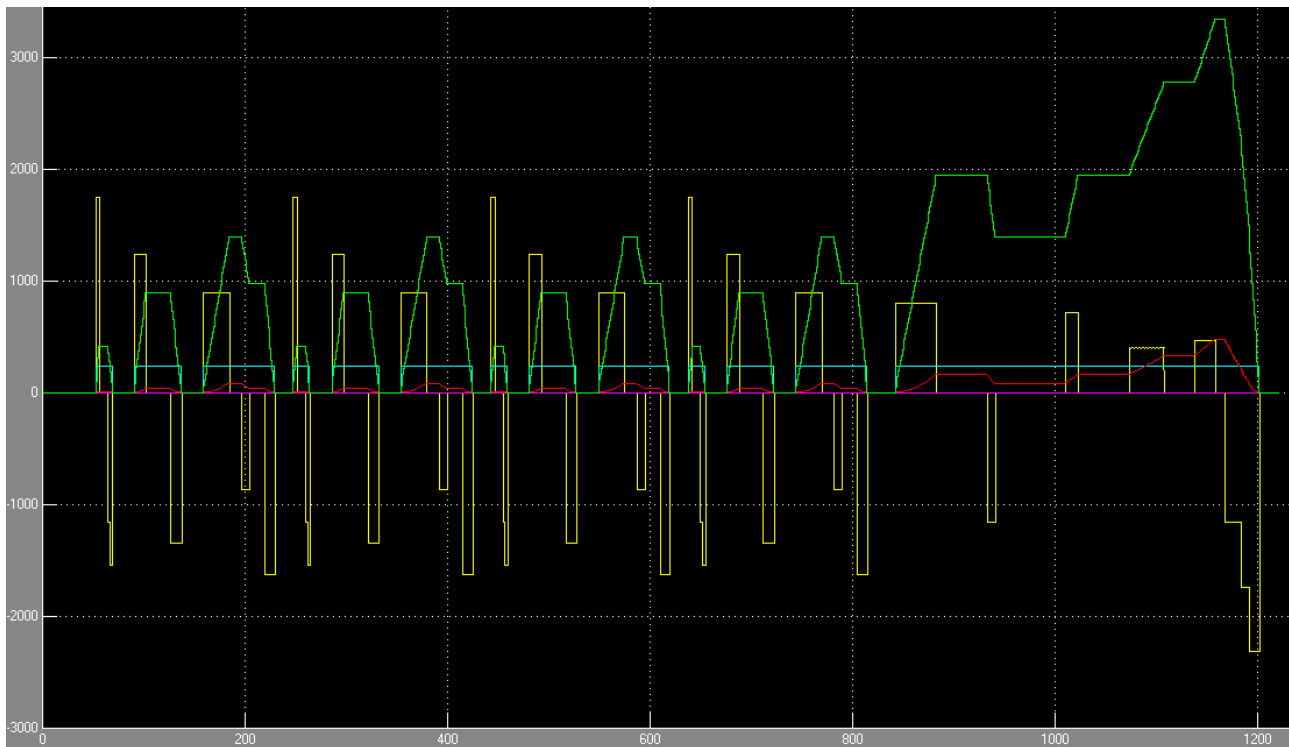
A tömböt mélyebben vizsgálva jól látható, hogy a 4 rezisztív erő összegével kell ellentartania az elektromos motor nyomatékából származó keréktalpi vonóerőnek. A négy komponens számítási módja a fentiekben ismertetettel megegyezik és a 17-es ábráról leolvasható. A gördülési ellenállás csak $v \neq 0$ esetén lett figyelembe véve az egyszerűség kedvéért egy átlagértékként. Az α lejtőszög megadására G_x és F_f függvények blokkparaméter beállításainál van lehetőség, de ezt talán jobb lenne a Jármű tömb paramétereire közé integrálni.

The screenshot shows a Simulink model window titled 'Energy_consumption' and an open 'Function Block Parameters: Vehicle' dialog box. The model includes a 'Driving Cycle' block, a 'Terminator' block, a 'Gain1' block (value 1e-3), and a 'Vehicle' block. The 'Vehicle' block has two outputs: 'w_out' (Speed of the wheel [rad/s]) and 'Tjmű' (Torque on the wheel [Nm]). The 'Function Block Parameters: Vehicle' dialog box contains the following parameters:

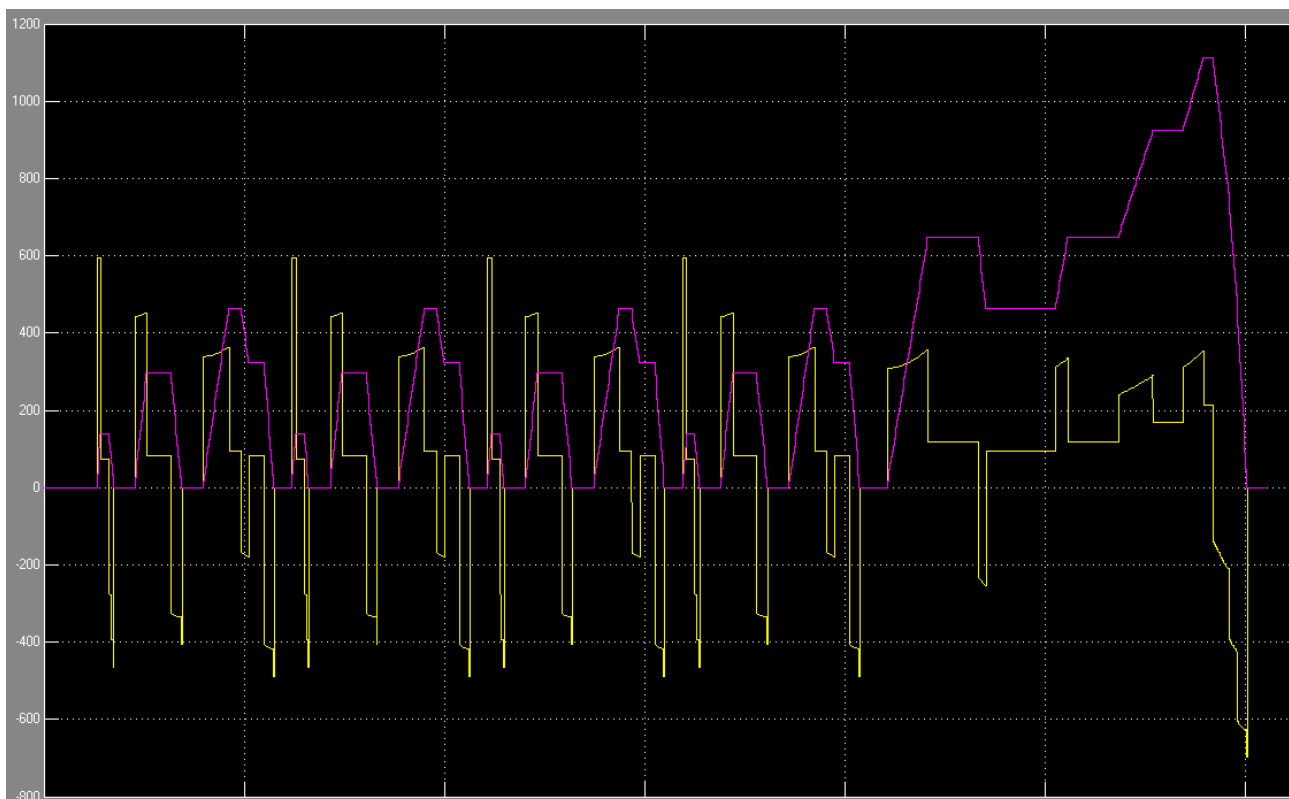
Parameter	Value
Vehicle mass [kg]	1608
Drag coefficient [-]	0.33
Vehicle cross section [m ²]	2
Dynamic rolling --wheel--radius [m]	0.3
Rotating mass factor [-]	1.04
Rolling friction coefficient [-]	0.015

Additional model outputs shown include 'Total distance [km]' (10.93) and 'Energy [kJ]' (404).





A 18-as ábrán zölddel a sebesség $[v]=\frac{m}{s}$ látható 100-szoros értéken -- a jobb áttekinthetőség érdekében --, sárgával a tehetetlenségi erő, türkizkékkel a gördülési

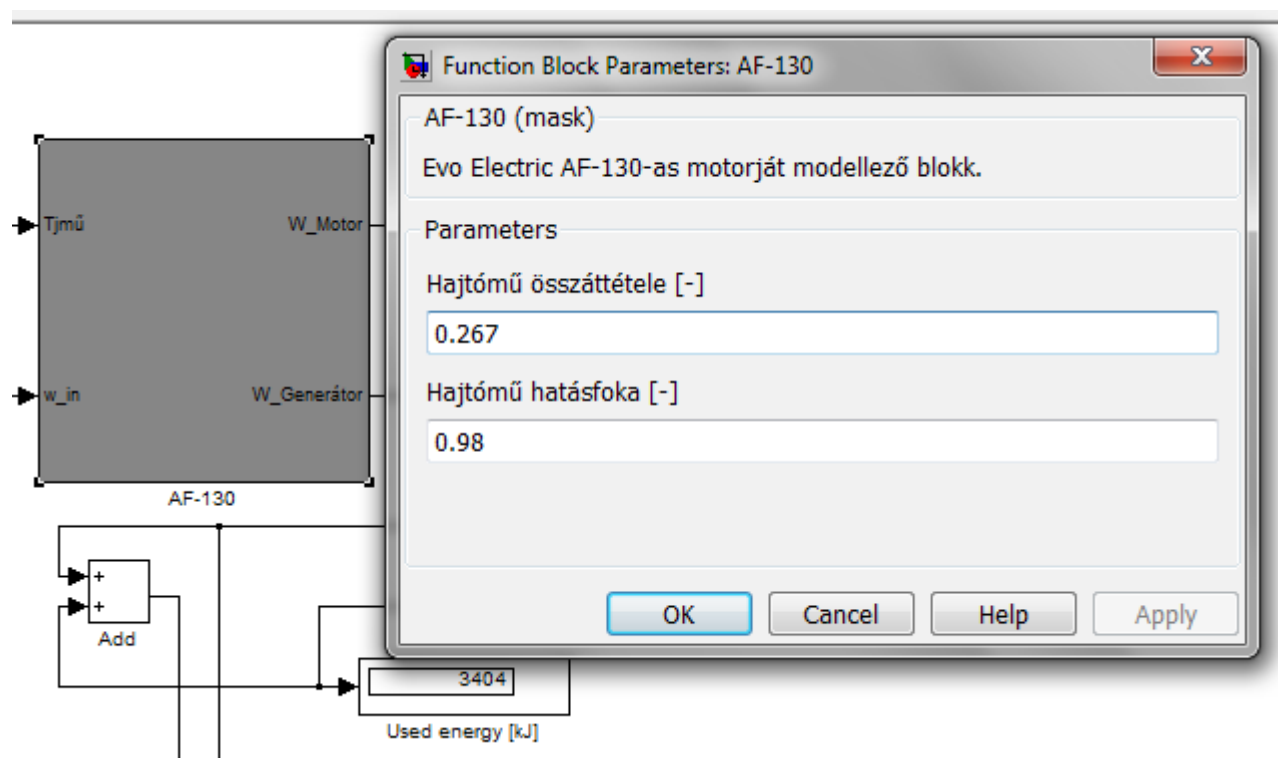


erőhorizontális irányú komponense és pirossal a

légellenállásból származó erő. Az ábra külön mellékletben -- [2. számú melléklet](#) -- is megtekinthető.

A 19-es ábrán látható az előbb tárgyalt erők által igényelt nyomaték és a kerékszögsebesség alakulása az idő függvényében. Szintén mellékletként -- [3. számú melléklet](#) -- megtekinthető.

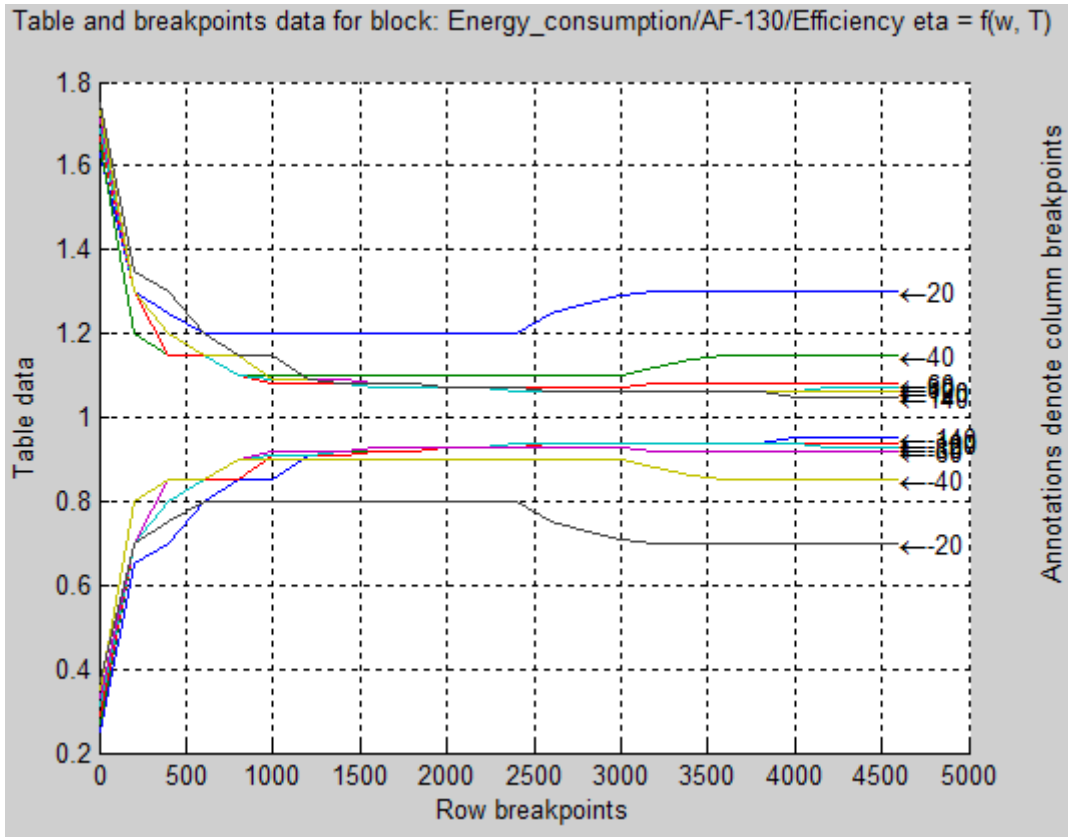
A lenti ábrán látható a kiválasztott motort/motorokat modellező tömb választható paramétereit. A nyomatékmódosítást ezen két bemenő adatból származtatja a blokk.



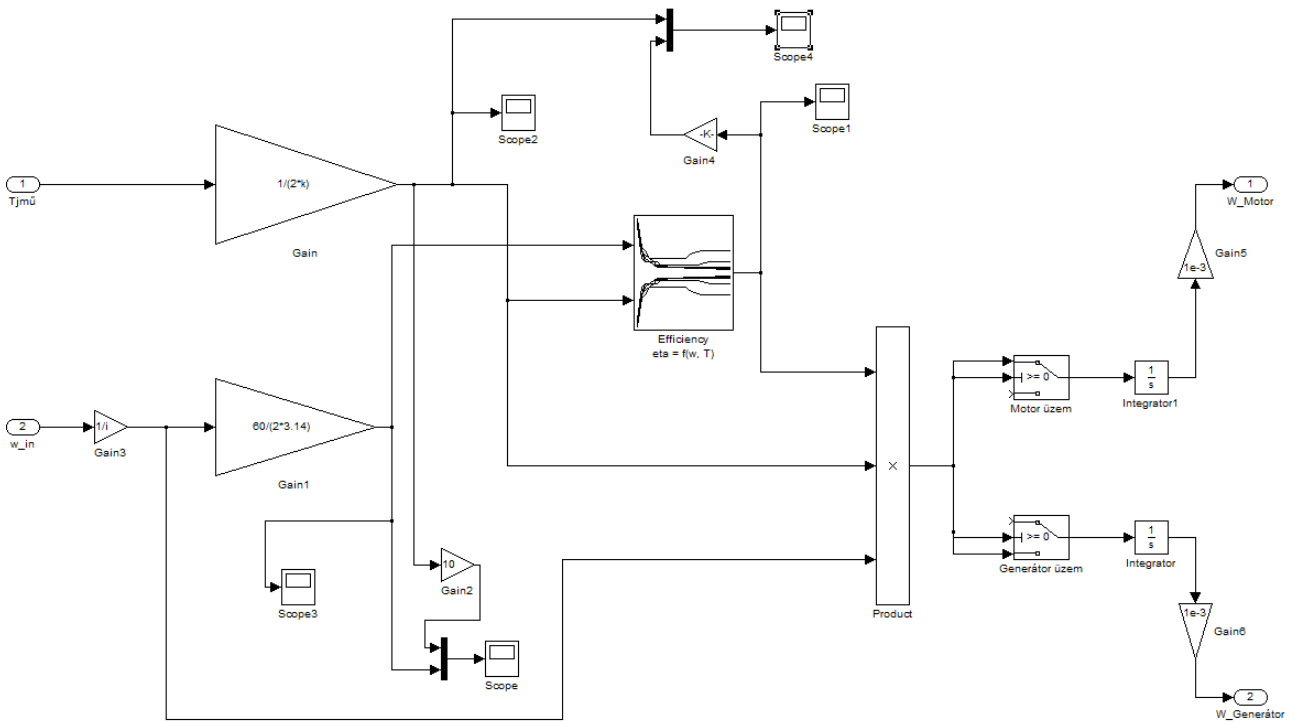
ábra 20: AF-130 Motor tömb állítható paramétereit

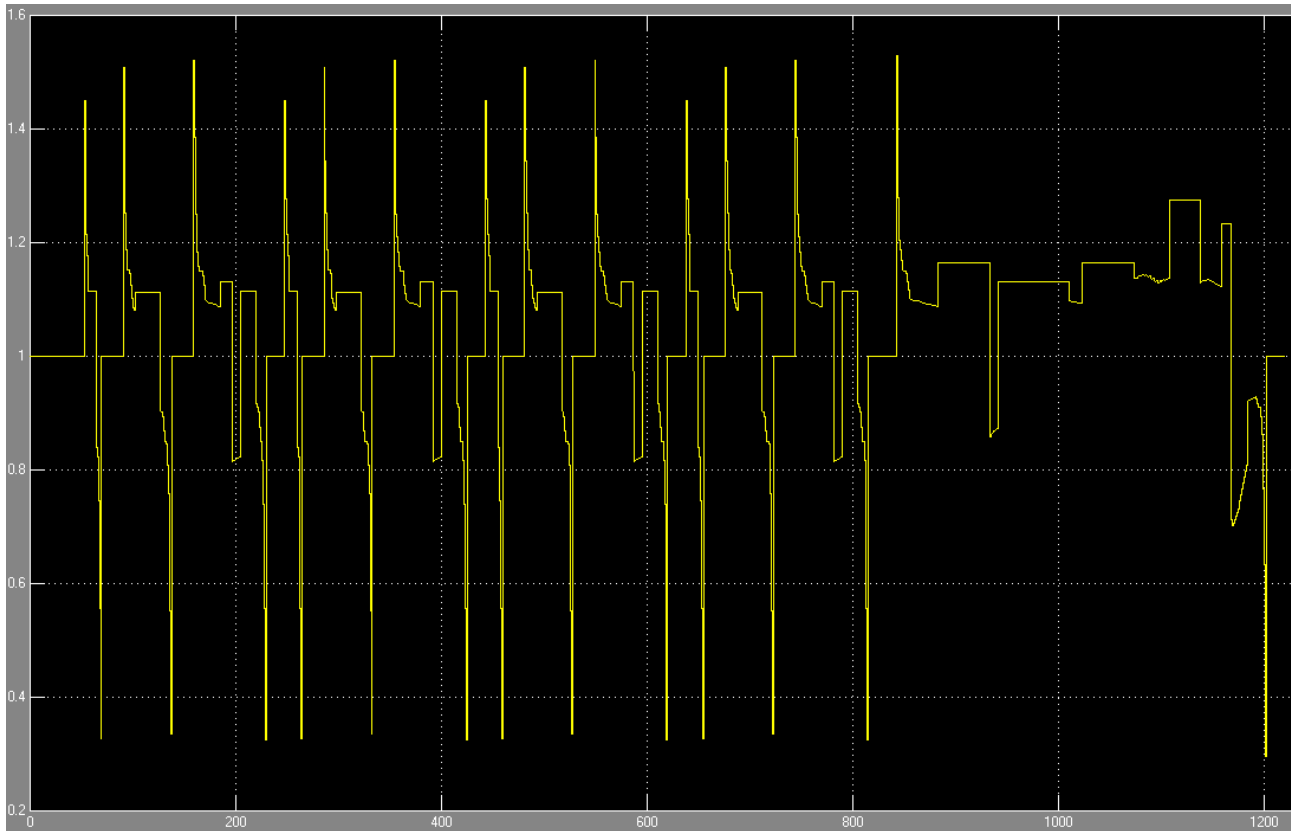
A motor tömbben a bemenő adatok megfelelő konvertálás után egy szorzó blokkba futnak, ahol a hatásfok is megjelenik. A hatásfokot leolvasás alapján egy lookup table segítségével képeztem le, mely az aktuális bemenő fordulatszámhoz és nyomatékhoz rendel egy hatásfokot, pontosabban az annak megfelelő szorzó konstans -- hajtás esetén $\eta_{konstans} = 2 - \eta_{valós}$ és generátor-üzemben $\eta_{konstans} = \eta_{valós}$, így mindig érvényes, hogy $P_{felvett} = \eta_{konstans} \cdot T_{kifejtett} \cdot \omega_{motor}$. A generátor-üzem hatásfokát a lehető legegyszerűbb, ám annál pontatlanabb megoldással -- tükrözéssel -- képeztem le, melyet a 21-es ábra szemléltet. Mint az a 22-es ábrán is látszik, a felhasznált és a generált energia külön került összegzésre, a nyomaték előjellel szeparálva azt.

A 23-as ábrán látható a hatásfok alakulása a menetciklus alatt. Minél jobban közelít az 1 értékhez -- a néhány sorral fentebb kifejtettekkel megegyezően -- annál jobb üzemállapotban tartózkodik. Mellékletként megtekinthető olvashatóbb formában is -- [4. számú melléklet](#).

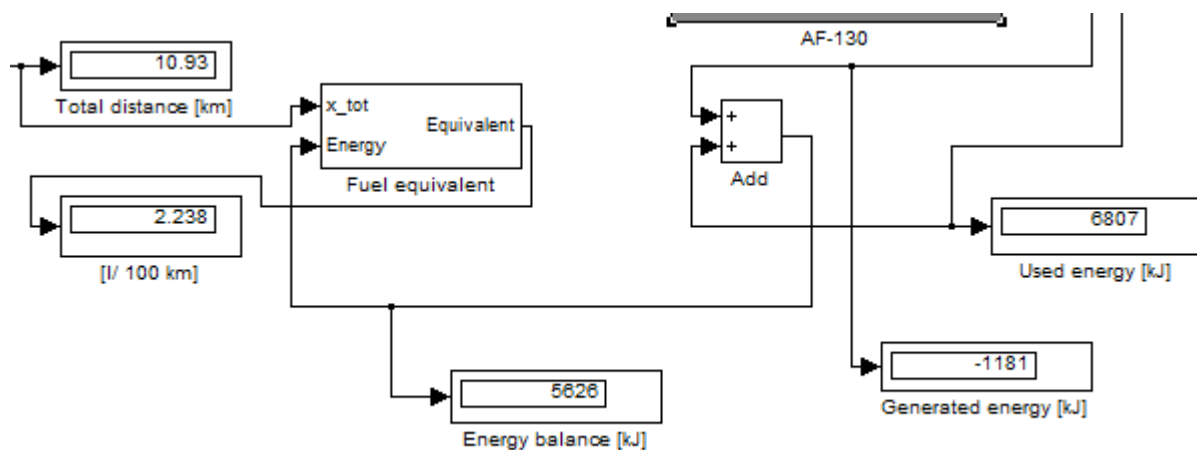


ábra 21: AF-130 Hatásfok Lookup Table-je





Jól látható, hogy állandó sebességű haladáskor messze nem optimális határfokon üzemel a motor. A nagy végsebesség és az egyfokozatú hajtómű választása miatt alakult így, melynél azonban fontosabb a várható üzemi körülmények közti gazdaságos üzem. Ezért vagy rövidebb áttételre van szükség, vagy kétfokozatú hajtóműre. Máshonnan közelítve a problémát, a két motor nincs eléggé kihasználva -- teljesítmény tényezőt nézve --, így ha négy hajtóegységet szeretnénk alkalmazni -- hatékony regeneráció és a teljes járműre vonatkozó menetdinamikai szabályzás preferálása miatt --, akkor azok teljesítménye csak kisebb lehet.



ábra 24: Energiamérleg és üzemanyag ekvivalencia

Ha a motor által elhasznált energiát nézzük és 100%-ban hasznosíthatónak tartjuk a -- már hatásfokkal terhelt -- generátor-üzemben termelt energiát, akkor a modell $W_{used} = 5,626 \text{ MJ}$ mennyiséget emésztett fel a menetciklus alatt. Ebből kiindulva a 100 km-re vetített fogyasztást meghatározva és ezt az energiamennyiséget üzemanyag energiataralmára vonatkoztatva megkaphatjuk, hogy ez hány $\frac{l}{100 \text{ km}}$ fogyasztásnak feleltethető meg. A fenti ábrán LPG-t választva láthatjuk, hogy ez $2,238 \text{ l}$ értékű -- $21 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}$ folyékony halmazállapotú LPG-vel számolva -- ami igen jónak számít, még ilyen optimizálatlan körülmények közt is. Viszont, ha már azt nézzük, hogy a modell nem komplett hajtáslánc, és egy belsőégésű motor és generátor kettőse állítja elő ezen energiát, mely az inverterben, PCM-ben -- Power Control Module -- további veszteségeket hagy, nyugodtan számolhatunk azzal, hogy az üzemanyagban található energiának csak $\frac{1}{3}$ -át tudjuk hasznosítani, ami rögtön $6,6 \text{ l}$ fogyasztásnak felel meg az NEDC-re viszonyítva, mely ma már átlagos eredmény.

6. Összegzés

A projekt jelenlegi állapota kezdetleges, mi sem mutatja jobban, hogy a hajtáslánc még csak egy meghajtó gépelemből áll, melynek energia szükségletét csak elméletben biztosítjuk. Ellenben az is kiderült, hogy az első konfiguráció nem megfelelő, hisz a motor kihasználtsága túlságosan csekély méretékű, így hatásfoka nem kielégítő -- mint ahogy azt az előző fejezetben megállapítottuk. Programozói nyelven: ez még csak alpha állapot.

Ahogy az előszóban íródott, a projekt folytatásában megoldandó feladat az energia ellátás megvalósítása. A jelenlegi tervek alapján ezt egy kis lökettérfogatú gázmotor fogja majd megvalósítani, mely csak egy generátort hajt, szakaszos üzemben, ugyanis az akkumulátor csomag méretét minél kisebbre kívánom szabni -- 30-50 km-es hatótáv biztosítására elegendő kapacitással --, mivel a tömegre -- mint tényezőre -- a legérzékenyebb a fogyasztás. A koncepcióban 4 hajtóegység szerepel, mivel így könnyedén meg lehet valósítani a jármű dinamikai szabályzását -- ellenben a kisebb motorok több veszteséget, nagyobb tömeget jelentenek, így ez is vizsgálandó feladat, hogy ennek a kívánalomnak mekkora a hátránya az egyszerűbb, 1-2 motoros konstrukciókhoz képest.

Továbbá cél még, hogy a hajtásláncok ne csak dinamikailag és energia fogyasztás szempontjából legyenek összehasonlítva -- értelemszerűen a mai kategória társakkal --, hanem költség és tömeg tekintetében is. Ez egy komplex, időigényes feladat, még ennyi egyszerűsítéssel is.

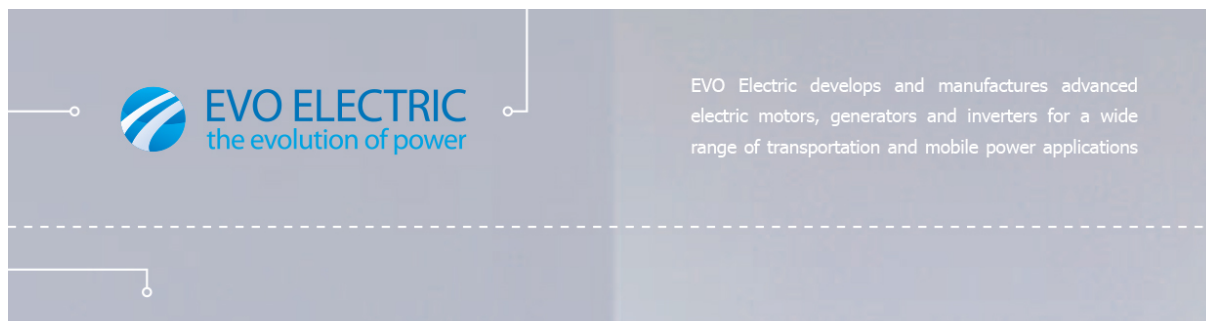
Irodalomjegyzék

1. J. F. Gieras: *Advancements in Electric Machines*
2. Francesco Monti: *Hybrid and electric vehicles*
3. Lino Guzzella, Antonio Sciarretta: *Vehicle Propulsion Systems*
4. J. F. Gieras: *Permanent magnet motor technology*
5. Kádár Lehel: *Közúti járműrendszerek jegyzet*
6. Dr. Ilosvai Lajos: *Gépjárműmechanika jegyzet*
7. J. F. Gieras: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*
8. Martin Campestrini, Peter Mock: *European Vehicle Market Statistics Pocketbook 2011 Edition*
9. EVO Electric Ltd. *motor katalógus*
10. GKN Driveline *eDrive System katalógus*
11. L. Guzzella, A. Amstutz: *The QSS Toolbox Manual*
12. Rotarex India Engineering Ltd.: *Fuel Comparison*
13. Fiat Auto Spa, Ford Motor Company, BMW AG, VW AG, PSA Group, Toyota Motor Corporation, Mercedes AG *különböző gépkocsi típusainak brosúrái*
14. <http://www.unece.org/> United Nations Economic Commission for Europe
15. [Tree Hugger](#)
16. Wikipedia

Mellékletek listája

1. *EVO Electric ltd. AF-130 típusú AFPM motor adatlapja*
2. *A modellre ható erők függvénye az időben*
3. *A jármű által igényel nyomaték és a szögsebesség függvénye az időben*
4. *A motor hatásfokának változása az idő függvényében*

Mellékelt 1

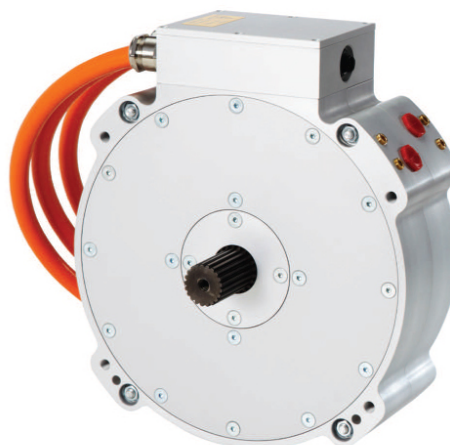


AF-130 Motor | Generator

EVO Electric offers permanent magnet machines based on proprietary axial flux technology that can be used in conjunction with custom built or standard industrial inverters. AF type electric machines combine high performance with low weight and size, ideal for electric and hybrid electric vehicles and a wide range of demanding industrial applications

The AF-130 machine range has the following key features:

- Very high torque and power density
- Low cogging torque
- Compact design with flat front and back faces for mounting
- Integrated resolver for rotor position feedback
- Liquid cooling for enhanced performance
- Through shaft and customised versions available

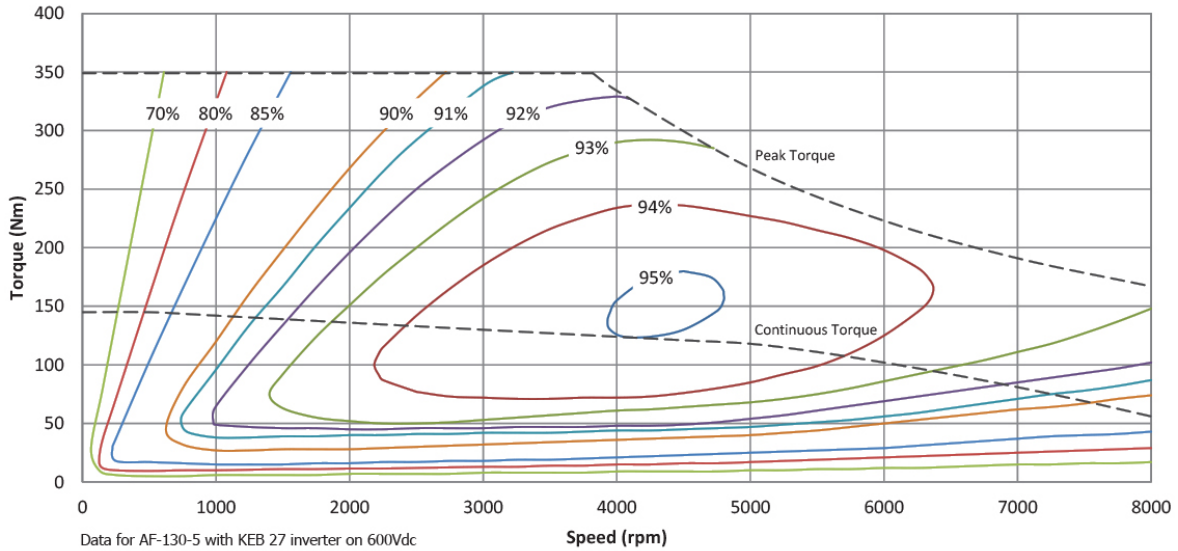


AF-130 Specification

Type	PM Synchronous - Axial Flux
Maximum Speed	8000rpm
Nominal Torque	145Nm
Peak Torque (for up to 60s)	250Nm
Peak Torque (for up to 20s)	350Nm
Nominal Output Power	64kW
Peak Output Power (for up to 60s)	100kW
Peak Output Power (for up to 20s)	140kW
Torque Density	11.5Nm/kg
Power Density	4.6kW/kg
Peak Efficiency	95.1%
Coolant Medium	Water/Glycol (50/50)
Coolant Flow Rate	> 8l/min
Length	110mm
Diameter	300mm
Weight	30.5kg



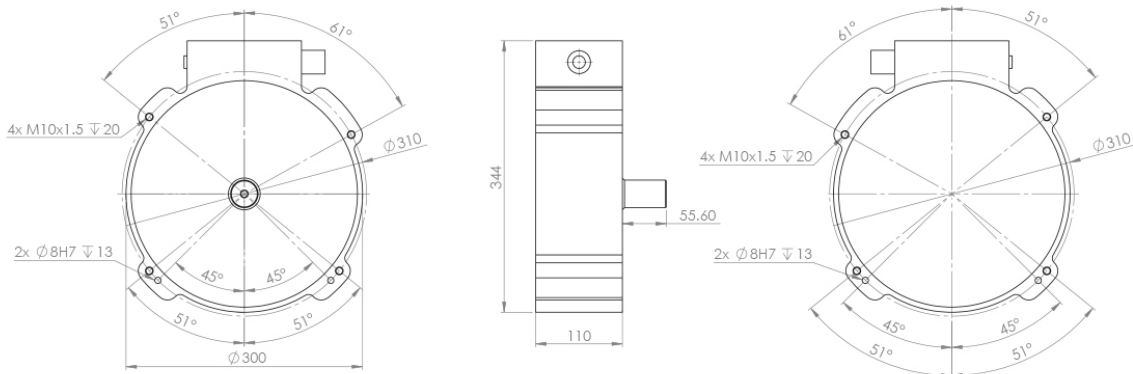
Performance and Efficiency (Motor Operation)



Winding Configurations

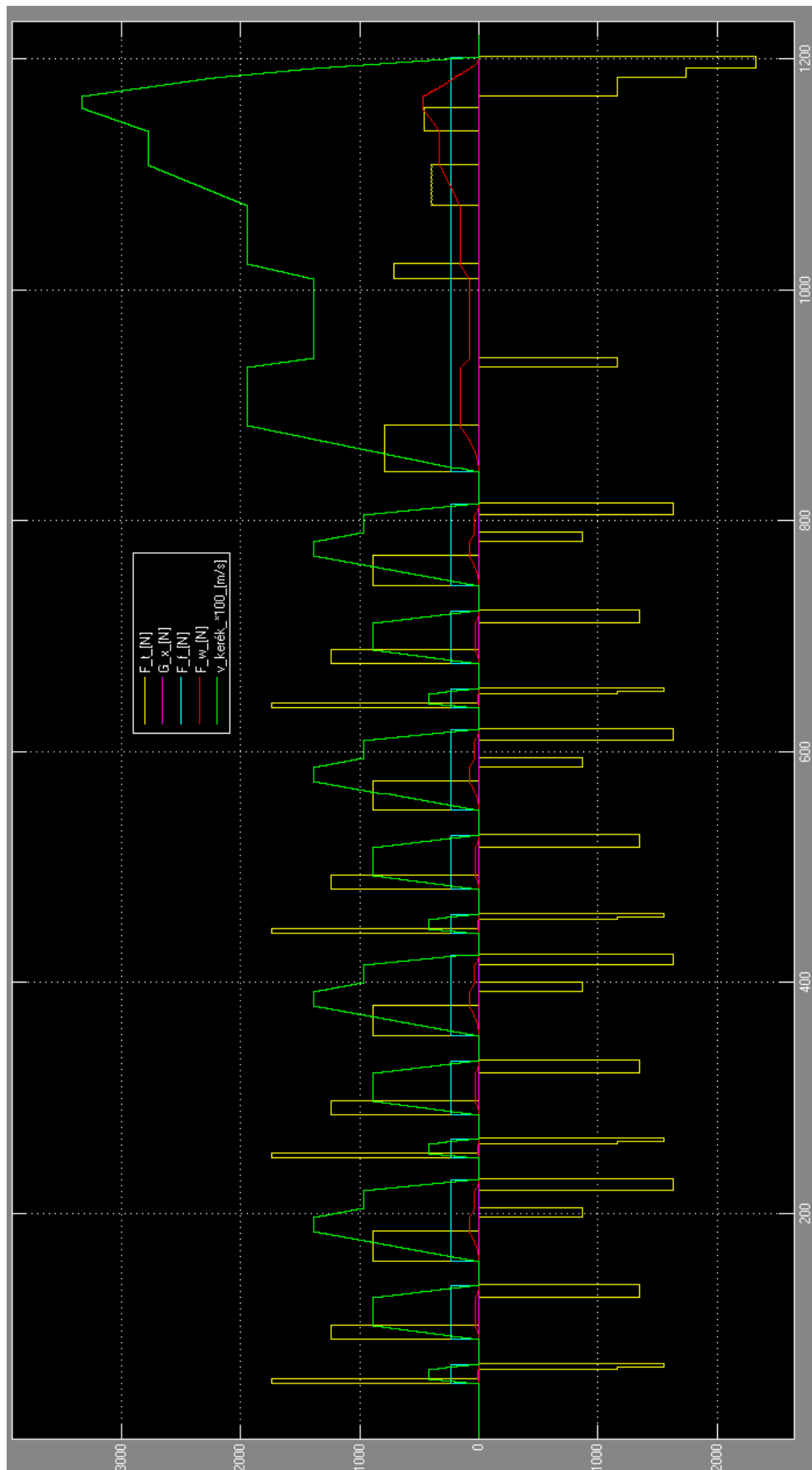
Machine Type	Machine Constants		Base Speed / Inverter Supply Voltage			
	K_T (Nm/A)	K_E (Vs/rad)	320Vdc	360Vdc	480Vdc	600Vdc
AF-130-3	0.8	0.65	3800rpm	4400rpm	6000rpm ¹	N/A
AF-130-4	1.07	0.86	2850rpm	3300rpm	4500rpm	5750rpm ¹
AF-130-5	1.34	1.08	2300rpm	2600rpm	3600rpm	4600rpm
AF-130-6	1.6	1.29	1900rpm	2200rpm	3000rpm	3800rpm

Actual values are temperature dependent. Data shown for 55deg C machine temperature. Base speed at no load. K_T in A_{mmf} , K_E in V_{pk-L} ¹ Limited suitability

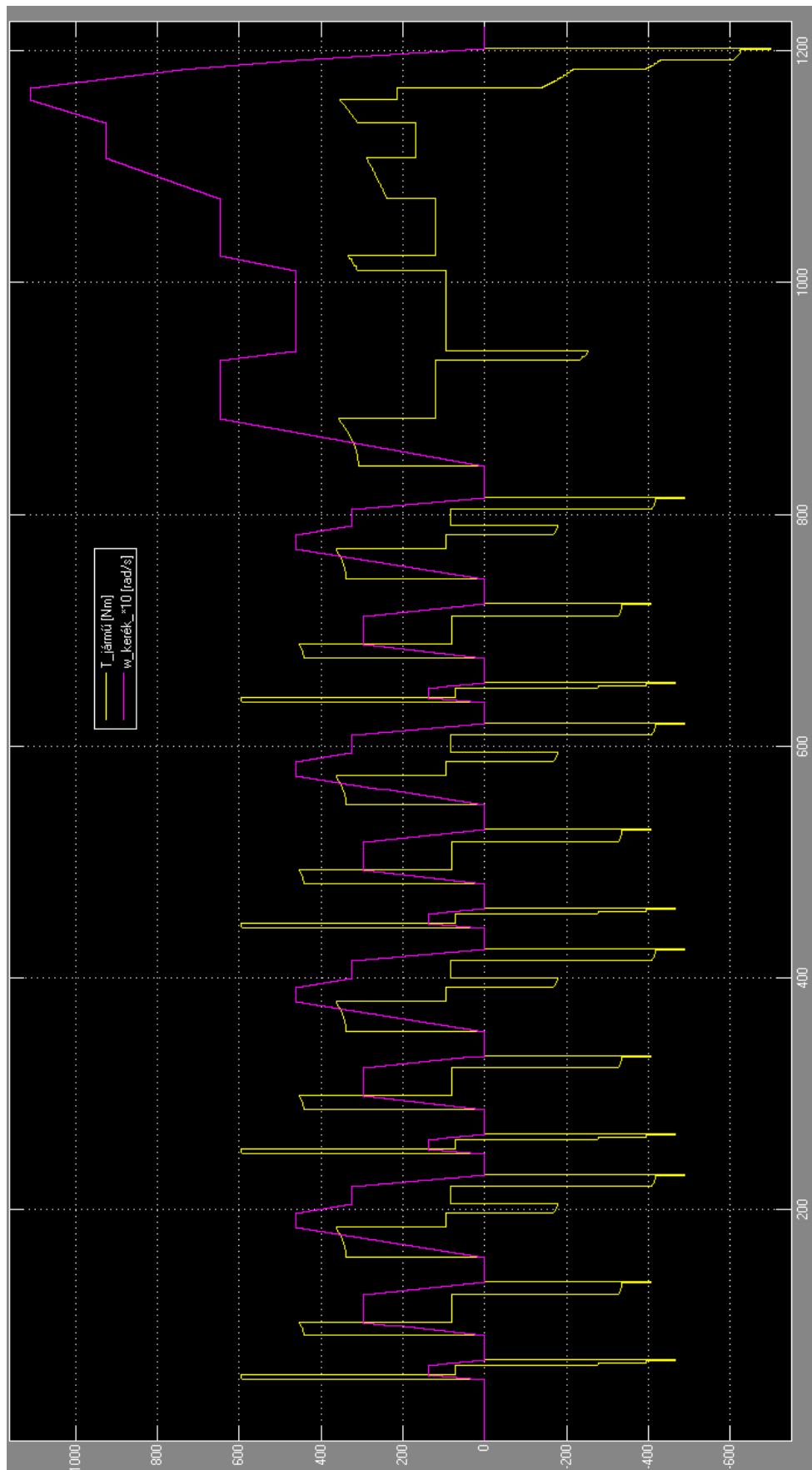


Standard spline to BS 3550:1963, 16/32 pitch, 21 teeth, fillet root side fit, class 1 fit. Effective length: 45mm

Melléklet 2



Mellékelt 3



Mellékelt 4

