



**Elektromos hajtású prototípus versenyautók és hajtásláncok
dinamikai modellezése, szimulációja, optimalizálása és kísérleti
vizsgálata**

EGYETEMI DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

SZERZŐ: SZÁNTÓ ATTILA

TÉMAVEZETŐ: DR. SZIKI GUSZTÁV ÁRON

DEBRECENI EGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI DOKTORI TANÁCS
INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

DEBRECEN, 2024

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Informatikai Doktori Tanács Informatikai Tudományok Doktori Iskola az Informatikai rendszerek és hálózatok ipari alkalmazásokkal programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából. Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 2024. április 2.

.....
Szántó Attila
jelölt

Tanúsítom, hogy Szántó Attila doktorjelölt 2019-2022 között a fent megnevezett Doktori Iskola, az Informatikai rendszerek és hálózatok ipari alkalmazásokkal programjának keretében irányítással végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2024. április 2.

.....
Dr. Sziki Gusztáv Áron
témavezető

Elektromos hajtású prototípus versenyautók és hajtásláncok dinamikai modellezése, szimulációja, optimalizálása és kísérleti vizsgálata

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
az informatika tudományágban

Írta: Szántó Attila okleveles gépészmérnök

Készült a Debreceni Egyetem Informatikai Tudományok Doktori Iskolája
(Informatikai rendszerek és hálózatok ipari alkalmazásokkal programja) keretében

Témavezető: Dr. Sziki Gusztáv Áron

Az értekezés bírálói:

Dr.

Dr.

Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: Dr.

tagok: Dr.

Dr.

Dr.

Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 20..... ..

TARTALOMJEGYZÉK

1 Bevezetés és irodalmi áttekintés	1
2 A vizsgált prototípus versenyautó	6
3 Az alkalmazott járműdinamikai modell.....	8
3.1 A járműdinamikai modell leírása	8
3.2 Az alkalmazott soros gerjesztésű egyenáramú motor modellezése	15
3.3 Kefe nélküli egyenáramú motor, mint alternatív lehetőség. A motor modellezése.....	19
4 A járműdinamikai szimulációs program	25
4.1 A motor szimulációs modulja.....	26
4.1.1 A soros gerjesztésű egyenáramú motor szimulációs modulja	26
4.1.2 A kefe nélküli egyenáramú motor szimulációs modulja	26
4.2 Az erőátviteli rendszer szimulációs modulja	30
4.3 A hátsó kerekek és a hozzá kapcsolódó forgó alkatrészek szimulációs modulja.....	30
4.4 Az első kerekek és a hozzá kapcsolódó forgó alkatrészek szimulációs modulja.....	33
4.5 A járműfelépítmény szimulációs modulja.....	34
4.6 A szimulációs programmal előállítható menetdinamikai függvények és azok bizonytalansága	34
5 A szimulációs program bemenő adatainak kísérleti meghatározása a soros gerjesztésű egyenáramú motor esetében	43
5.1 A vizsgálathoz alkalmazott mérőrendszer leírása.....	43
5.1.1 Motor tesztpad.....	44
5.1.2 Vezérlőpult, kapcsolószekrény és terhelő ellenállás.....	48
5.1.3 Változtatható feszültségű és frekvenciájú váltakozó áramú energiaforrás.....	52
5.2 A bemenő adatok és karakterisztikák kísérleti meghatározása a soros gerjesztésű egyenáramú motor esetében	53
5.2.1 Az elektromágneses jellemzők meghatározása	54
5.2.2 A dinamikai jellemzők meghatározása	59

5.3 A kimenő függvények hitelesítése tesztmérésekkel	88
5.3.1 Statikus tesztmérések	88
5.3.2 Dinamikus tesztmérések	91
6 A járműadatok optimalizálása adott járműdinamikai célokhoz.....	97
6.1 Az optimális műszaki adatok meghatározása (közelítése) grafikus módszerrel.....	99
6.2 Az optimális műszaki adatok meghatározása „szimulált hűtés” alkalmazásával	102
6.2.1 A szimulált hűtési algoritmus általános leírása	103
6.2.2 Az algoritmus alkalmazása a versenyautó paramétereinek optimalizálására	106
6.3 Az eredmények elemzése	111
7 Összefoglalás, tudományos tézisek.....	114
Első tézispont	114
Második tézispont	115
Harmadik tézispont	115
8 Jövőbeli tervek	117
9 Hivatkozások	118
Köszönetnyilvánítás.....	129

1 BEVEZETÉS ÉS IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A közúti közlekedésben, a belsőégésű motorok mellett, egyre nagyobb szerepet kapnak a különböző alternatív járműhajtások. Ezek közül is a legszélesebb körben az elektromos és hibrid elektromos rendszereket alkalmazzák [1], [2], [3], [4]. A nagy energiahatékonyságú, alacsony karbantartási igényű és kevésbé környezetszennyező elektromos járművek önmagukban is nagyszerű alternatívát kínálnak a belső égésű motorral hajtott járművekkel szemben. A jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható elektromos autók hatótávja már sok esetben meghaladja az 500 km-t, miközben a töltési idő 10-15 percre csökkenthető.

Ahogy a belsőégésű motoros, úgy az elektromos és hibrid hajtású járművek esetén is fontos az üzemanyag/energia fogyasztás csökkentése. Ráadásul, az általánosan jellemző kisebb hatótávolság, és a korlátozott számú töltőállomás miatt, az elektromos járművek esetén ez még inkább fontos feladat. A fogyasztás csökkentése – egyéb műszaki (pl. menetdinamikai) jellemzők javítása mellett – a jármű műszaki adatainak optimalizálásával érhető el [5], [6], [7], [8]. A téma kiemelt jelentősége, valamint a Debreceni Egyetem Műszaki Karának a különböző járműipari cégekkel folyamatosan bővülő kapcsolatrendszere miatt, kutatócsoportunk is a fenti tématerületen kezdett kutatni. Első lépéseként a helyben hozzáférhető és kísérletileg is könnyebben vizsgálható hallgatói prototípus versenyautók vizsgálatát végeztük el.

A téma előzményeihez tartozik, hogy a Debreceni Egyetem Műszaki Karán régóta foglalkozunk alternatív (elektromos vagy penumatikus) hajtású járművek, hajtásláncok tervezésével, fejlesztésével és kivitelezésével. Ezen tevékenység részeként az elmúlt évtizedben a Kar hallgatói csapatai számos alternatív hajtású versenyautót terveztek és kiviteleztek, melyekkel eredményesen szerepeltek hazai és nemzetközi versenyeken. Ilyen verseny volt például az MVM Energia Futam, amelyet a Magyar Villamos Művek támogatott és rendezett meg Budapesten 2014 és 2017 között minden évben. Egy elektromos hajtású prototípus versenyautóval [9], amelyet a Gépészmérnöki Tanszéken terveztünk és építettünk, a 2014 és 2015 évi MVM Energia Futamokon 2. és 1. helyezést értünk el.

2014 óta én is tagja vagyok a Műszaki Kar hallgatói járműfejlesztő csapatának, mint gépészmérnök hallgató, így részt vettem az említett autó tervezésében, kivitelezésében, valamint a 2015. évi versenyen. Ezáltal gyakorlatot szereztem a versenyautó tervezésében, valamint a különböző versenyekre való felkészítésében. A verseny típusától és a pályától függően a versenycélok eltérőek lehetnek: lehet kör-, időmérő-, gyorsulási- illetve fogyasztási verseny.

2016 és 2018 között a Műszaki Kar csapata minden évben részt vett a Shell ECO-Marathon nemzetközi versenyen egy elektromos hajtású prototípus versenyautóval. A verseny lényege, hogy egy adott hosszúságú versenypályát a jármű a lehető legalacsonyabb fogyasztással teljesítse, úgy, hogy az átlagsebessége legalább 25 km/h legyen. A fenti versenyen további gyakorlatot szereztem a járműfejlesztésben, és az optimális elektromos motor kiválasztásában.

Az elektromos versenyautók mellett, a Kar hallgatói rendszeresen részt vesznek pneumobilok tervezésében, és kivitelezésében is. Ezek saját fejlesztésű, pneumatikus hajtású versenyautók, ahol a hajtáshoz az energiát nagynyomású levegővel töltött tartályok biztosítják. Itt is számos különböző versenyszám van, mint például gyorsulási verseny, időmérő futam, és távolsági verseny.

2019-ben megalapítottuk a DE MK Motorsport elnevezésű csapatot, amelyből a későbbi DEAC Motorsport csapat fejlődött ki, amelynek jelenleg a vezetője vagyok. A csapat a Magyar Nemzeti Autósport Szövetség (MNASZ) által indított Országos Szlalom Bajnokságban versenyez különböző széria és épített autókkal, ahol 2021-ben és 2023-ban a 2., 2022-ben pedig az 1. helyezést értük el.

A tudatosabb tervezés, fejlesztés, valamint az eredményesebb versenyzés érdekében szükségesnek láttuk egy olyan moduláris felépítésű műszaki adat optimalizáló szoftver kidolgozását, amellyel a jármű műszaki adatainak optimális értékei meghatározhatók egy adott versenyfeladathoz. (Ilyen feladat lehet például azon optimális áttétel meghatározása a hajtásláncban, amellyel egy gyorsulási versenyen adott pályaszakasz a legrövidebb idő alatt teljesíthető.)

A fenti szoftver két fő modulból épül fel. Az egyik egy saját fejlesztésű járműdinamikai szimulációs modul, amely a jármű műszaki adataiból kiszámítja annak menetdinamikai függvényeit (gyorsulás-, sebesség- és út-idő függvények). Az említett műszaki adatok értékét mérés útján tudjuk meghatározni, vagy, ha elérhető, használhatjuk a szakirodalomban szereplő, vagy a gyártó által közölt értékeket [10], [11], [12]. A másik egy optimalizációs modul, amely a szimulációs modul által generált függvényértékeket felhasználva, kiszámítja a jármű műszaki adatainak optimális értékeit.

A fejlesztéseknél fontos szempont volt a moduláris felépítés, így a szimulációs program esetén, a jármű egyes szerkezeti egységeit (motor, erőátviteli rendszer, első és hátsó futómű, járműfelépítmény) egymástól függetlenül modellezhetjük és szimulálhatjuk. Ez azért fontos, mivel a különböző típusú járművek különböző felépítésűek (pl. a motor lehet elektromos, pneumatikus vagy belsőégésű, és az erőátviteli rendszer is eltérő lehet). Az egész program átalakítása (pl. egy eltérő típusú motor alkalmazása esetén) rendkívül munkaigényes lenne, amit a moduláris

szerkezet kialakításával elkerülhetünk. Az optimalizációs modul esetén különböző algoritmusok, eljárások alkalmazására van lehetőség, attól függően, hogy hány adatra (változóra) kívánjuk elvégezni az optimalizációt, és mekkora az elvárt pontosság.

A BSc és MSc képzésem során a fent bemutatott témából négy TDK dolgozatot készítettem (elért eredményeim a kari fordulón: 2015: 1. helyezés, 2016: 3. helyezés, 2017: 2. helyezés, 2018: 2. helyezés), és 2017-ben és 2019-ben részt vettem az Országos Tudományos Diákköri Konferencián (OTDK) is.

Az értekezés 2. fejezete annak a prototípus versenyautónak [9] a részletes leírását tartalmazza, amelyen a vizsgálataimat végeztem, és amely a 2014 és 2015-ben megrendezett MVM Energia Futamon 1., illetve 2. helyezést ért el. A doktori képzés keretében a fenti versenyautóhoz dolgoztam ki a korábban említett moduláris szerkezetű műszaki adat optimalizáló szoftvert, amely fejlesztésnek része volt a járműdinamikai modell és szimulációs program megalkotása [9], [13], valamint azon belül az elektromos motorok szimulációja [13], [14] és kísérleti vizsgálata [15], [16], [17].

A 3. fejezetben az említett járműdinamikai modellt mutatom be, amelynek kidolgozása a saját munkám, amelyet a témavezetőm irányításával végeztem. Az ezzel kapcsolatos eredményeimet az első tézispontban ismertetem. A járműmodellek alapvetően két fő csoportba sorolhatók, ezek az egyszerűsített és a valós modellek. [18] Az egyszerűsített modellek esetében valamely irány, vagy irányok vizsgálatától eltekintünk, így a modell nem tartalmazza például a hossz-, oldal- vagy függőleges irányok vizsgálatát. Erre az egyszerűsítésre egyrészt azért van szükség, mert vannak olyan analitikai, becslési és szabályozási eljárások, amelyek alkalmazása csak egyszerűsített modell alapján lehetséges. Másrészt az egyszerűsítés alkalmazásával a modellre épülő szimulációs program futási ideje jelentősen csökkenthető. Az egyszerűsített modellek típusuk szerint lehetnek longitudinális, laterális és vertikális modellek [12], [18], [19], [20]. A dolgozatom 3. fejezetében én egy saját fejlesztésű longitudinális modellt ismertetek [9].

A korszerű járműhajtásokban számos különböző típusú villanymotort alkalmaznak a gyártók, illetve alkalmazunk mi is a versenyeken. Ilyen például a soros gerjesztésű egyenáramú (SWDC), a kefe nélküli egyenáramú (BLDC), az állandómágneses szinkron (PMS), vagy az indukciós (aszinkron) (IM) motor. A dolgozatomban én ezek közül csak az SWDC és BLDC motorok modellezésével foglalkozom. Az ehhez kapcsolódó irodalmi áttekintést, valamint az alkalmazott modellek leírását a 3.2 és 3.3 fejezet tartalmazza. Itt meg kell jegyezni, hogy az SWDC és BLDC motorok modellezése nem része a téziseimnek, mivel ezeknél csak a szimulációs modulok elkészítésében vettem részt.

A 4. fejezetben a járműdinamikai modell alapján, MATLAB/Simulink környezetben létrehozott szimulációs programot [9] mutatom be, amely a saját munkám. Az ehhez kapcsolódó eredményeket az első tézispontban ismertetem.

Az 5. fejezetben a szimulációs modulok bemeneti adataiként szolgáló motorjellemzők meghatározásával, és a modulok által generált függvények hitelesítésével kapcsolatos kísérleti vizsgálatokat ismertetem [16], [15], [17], valamint bemutatom a vizsgálatokhoz kifejlesztett összetett mérőrendszert [21]. Emellett részletesen ismertetem a fenti mérésekhez alkalmazott mérőelrendezéseket, mérési és kiértékelési eljárásokat.

Az 5.1 fejezetben bemutatott mérőrendszer [21] kifejlesztése és telepítése a kutatócsoportunk összehangolt munkájának eredménye. Én az egyes munkafolyamaban - kisebb részfeladatok megoldásával - részt vettem, de összességében ezeket nem tekintem saját vizsgálataimnak, így azok eredménye a tézispontjaimban sem szerepel.

Az 5.2 fejezetben bemutatom a vizsgált prototípus versenyautóban alkalmazott SWDC motor elektromágneses (5.2.1 fejezet) és dinamikai (5.2.2 fejezet) jellemzőinek kísérleti meghatározásával kapcsolatos vizsgálatokat. Az elektromágneses motorjellemzők kísérleti meghatározásában [17] részt vettem, de szerepem nem volt meghatározó, így az nem része a téziseimnek.

Az 5.2.2.1 fejezetben részletes irodalmi áttekintést adok a dinamikai jellemzők, azon belül a forgórész tehetetlenségi és ellenállási (súrlódási) nyomatékának kísérleti meghatározására alkalmazott eljárásokról [22].

Az 5.2.2.2 fejezetben a dinamikai jellemzők meghatározásával kapcsolatos saját vizsgálataimat, fejlesztéseimet ismertetem [15], [16]. Ezen belül az 5.2.2.2.1 fejezetben azokat, amelyek az említett SWDC motor dinamikai jellemzőinek (a forgórész tehetetlenségi és ellenállási nyomatéka) meghatározásával foglalkoznak, és amelyeknél először a tehetetlenségi nyomatékot határozzuk meg (lásd 5.2.2.1 fejezet, 2. csoport) [15]. Az itt kapott eredmények a saját eredményeim, így ezek a harmadik tézispontomban is szerepelnek.

Az 5.2.2.2.2 fejezetben ismertetett saját vizsgálataim, fejlesztéseim a tehetetlenségi és ellenállási nyomaték szimultán meghatározásának témakörébe tartoznak (lásd 5.2.2.1 fejezet, 3. csoport), közvetlen kísérleti eljárás alkalmazásával [16]. Az itt kapott eredményeim szintén a saját eredményeim, így azok a harmadik tézispontomban is szerepelnek.

Az 5.3 fejezetben a vizsgált SWDC motoron elvégzett tesztméréseket és azok eredményeit ismertetem [15]. A vizsgálatok során felhasználtuk az 5.2 fejezetben

meghatározott elektromágneses és dinamikai jellemzőket, mint bemenő adatokat. Az 5.3.1 fejezetben ismertetett statikus tesztmérésekben [17], és a hozzájuk kapcsolódó kiértékelésekben részt vettem, de szerepem nem volt meghatározó, így azok eredménye a téziseimben nem szerepel. Az 5.3.2 fejezetben bemutatott dinamikus tesztmérések a saját vizsgálataim, így azok eredményei a harmadik tézispontban is szerepelnek.

A 6. fejezet elején áttekintem az optimalizációval kapcsolatos alapvető fogalmakat, valamint a különböző mérnöki optimalizálási feladatok megoldására alkalmazott algoritmusokat és módszereket, ezen belül azokat, amelyeket járművek, vagy azok részegységeinek optimalizálására használnak. Ezt követően az optimalizációs modult mutatom be, amelyet két eljárással dolgoztam ki, amelyekkel a járműparaméterek optimális értékei meghatározhatók egy adott versenyfeladathoz [23]. A két eljárás közül az egyik egy „grafikus módszer” (6.1 fejezet), a másik a „szimulált hűtés” alkalmazása (6.2 fejezet). A 6.2.1 fejezetben részletesen bemutatom a „szimulált hűtés” általános algoritmusát, ez követően a 6.2.2 fejezetben a módszer alkalmazásával kapcsolatos saját vizsgálataimat. A 6. fejezetben ismertetett vizsgálatok a saját vizsgálataim, amelyeket a témavezetőm irányításával végeztem, így azok eredményei az első tézispontomban is szerepel.

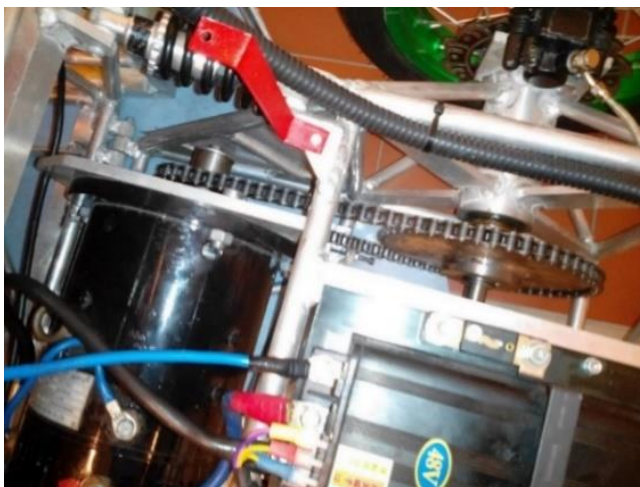
Bár a szakirodalomban számos közlemény foglalkozik a „szimulált hűtés” járműipari alkalmazásával, a 6.2 fejezetben bemutatott eljárás a szimulált hűtés módszerének egy teljesen új alkalmazási területe. Összefoglalva elmondható, hogy az általam kidolgozott műszaki adat optimalizáló szoftver, az alkalmazott járműdinamikai szimulációs programmal és optimalizációs modullal hatékony segítséget nyújt a versenycsapatoknak a különböző hazai és nemzetközi versenyekre való felkészülésben.

2 A VIZSGÁLT PROTOTÍPUS VERSENYAUTÓ

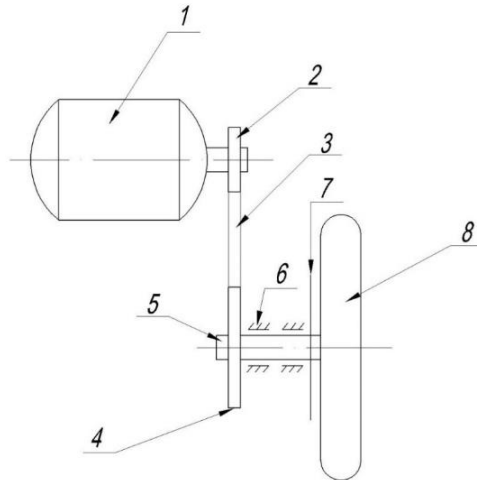
A versenyautó, amelyen a vizsgálataimat végeztem, és amelyre a műszaki adat optimalizáló szoftvert kidolgoztam, az MVM Energia Futam „Prototípus” kategóriájának versenyszabályzata szerint készült, és először a 2014. évi versenyen szerepelt. A jármű váza egy alumínium csövekből illetve zártszelvényekből összehegesztett térhálós szerkezet, amelyet az 1. ábra szemléltet [9].



1. ábra A versenyautó burkolatok és akkumulátor nélkül [9]



2. ábra Az autó hajtásláncja [9]



3. ábra A hajtáslánc sematikus rajza [9]

A járműfelépítményhez egy független, kettős keresztlengőkaros első kerékfelfüggesztés, valamint az önállóan rugózó hátsó hajtóegység kapcsolódik (2. és 3. ábra). Az utóbbi magában foglalja a motort, motorvezérlést, lánchajtást, és a hátsó kerekeket. A vázszerkezet részét képezi még a járművezető mellett két oldalon kialakított akkumulátortartó, valamint a biztonsági szempontok figyelembe vételével kialakított bukókeret. A hajtásról egy soros gerjesztésű, 4 [kW] névleges teljesítményű egyenáramú motor (1) gondoskodik, amely lánchajtáson keresztül (2, 3 és 4) adja át a teljesítményt a meghajtott, kúpgörgőkkel (6) csapágyazott hátsó tengelynek (5), és az ahhoz mereven kapcsolódó keréknek (8). A jármű fékezéséről kétkörös fékrendszer gondoskodik, kerekenként külön tárcsafékkal (7) [9].

Az alkalmazott SWDC motor típusát, és főbb műszaki jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza:

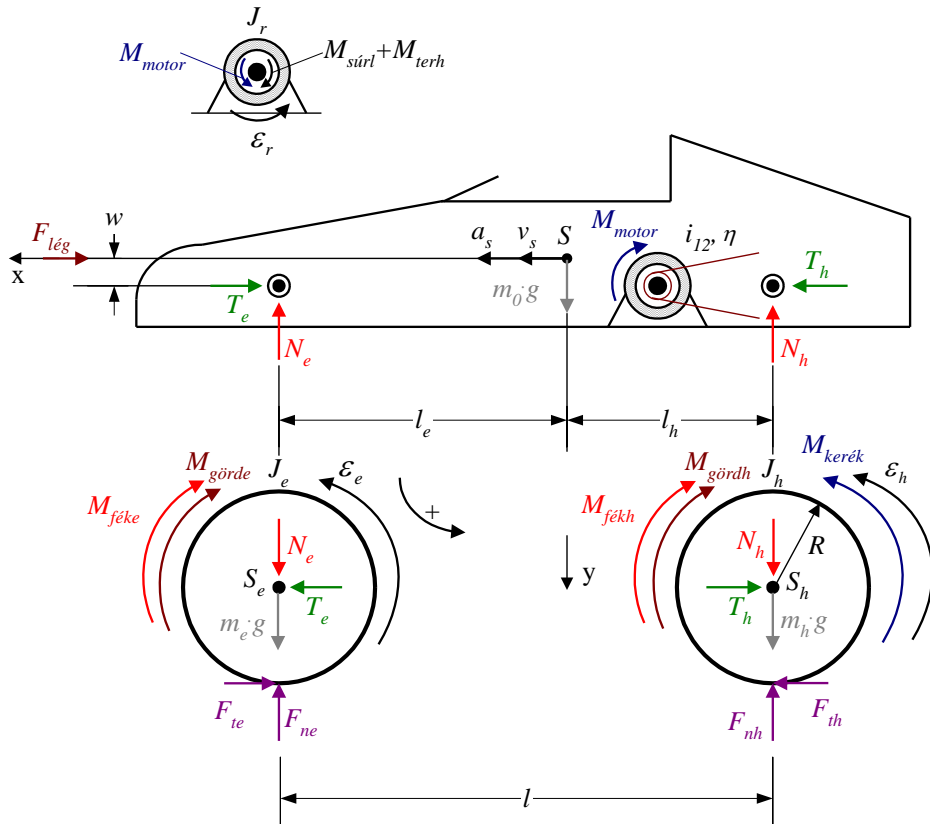
1. táblázat A motor típusa és műszaki adatai [9]

Típus	Névleges feszültség [V]	Névleges teljesítmény [kW]	Névleges áramerősség [A]	Névleges fordulatszám [1/min]	Névleges nyomaték [Nm]	Tömeg [kg]
DC/T4-48	48	4	104	2800	14,7	28

3 AZ ALKALMAZOTT JÁRMŰDINAMIKAI MODELL

3.1 A JÁRMŰDINAMIKAI MODELL LEÍRÁSA

A járműdinamikai szimulációs program [9] kidolgozásának első lépése egy általános járműdinamikai modell létrehozása volt, egyenes pályán történő mozgás vizsgálatához. (A későbbiekben tervezzük a modell továbbfejlesztését íves pályaszakaszok vizsgálatához is.) A modellalkotás során az autót négy szerkezeti egységre bontottuk (4. ábra.).



4. ábra A kifejlesztett járműdinamikai modell a különböző szerkezeti egységekre ható erőkkel és nyomatékokkal [9]

Ezek az egységek a következők:

- 1) A szabadon forgó első kerekek a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészekkel.
- 2) A hajtott hátsó kerekek a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészekkel.
- 3) A járműfelépítmény, beleértve az elektromos motor házát és állórészét.
- 4) Az elektromos motor forgórésze.

A fenti szerkezeti elemekre – a 4. ábra alapján – külön-külön mozgásegyenleteket írtunk fel, a külső erők és nyomatékok mellett figyelembe véve a különböző szerkezeti elemek között fellépő (belső) erőket és nyomatékokat (Newton III. törvénye alapján) [9]. Ebből adódóan a modell alapján a külső erők és nyomatékok mellett a belső erők és nyomatékok (pl. a tengelyterhelések) is számíthatók.

A járműdinamikai modell kidolgozásánál az alábbi feltételezésekkel és megkötésekkel éltünk:

- A jármű tömegeloszlása az xy síkra (4. ábra) szimmetrikus. (Ezt mérés ellenőriztük, jó közelítéssel teljesül.)
- A járművet merev rendszernek tekintjük. (Ez a feltételezés helytálló, mivel az első és hátsó futómű rendkívül kemény rugózású.)
- A légellenállási erő eredője keresztül megy a jármű súlypontján, és párhuzamos a jármű haladási irányával.

A modell kialakításánál arra törekedtünk, hogy minden olyan tényezőt figyelembe vegyünk, amely számottevően befolyásolja a jármű mozgását.

Mozgásegyenletek a szabadon futó első kerekre és az azokkal együtt forgó alkatrészekre:

$$\sum_i F_{ix} = T_e - F_{te} \equiv m_e \cdot a_s \rightarrow T_e = m_e \cdot a_s + F_{te} \quad (1)$$

$$\sum_i F_{iy} = -F_{ne} + N_e + m_e \cdot g \equiv 0 \quad (2)$$

$$\sum_i M_{i(S_e)} = -M_{görd_e} - M_{csapágy} + F_{te} \cdot R - M_{fék_e} \equiv J_e \cdot \varepsilon_e \quad (3)$$

Mozgásegyenletek a meghajtott hátsó kerekre és az azokkal együtt forgó alkatrészekre:

$$\sum_i F_{ix} = F_{th} - T_h \equiv m_h \cdot a_s \rightarrow T_h = -m_h \cdot a_s + F_{th} \quad (4)$$

$$\sum_i F_{iy} = -F_{nh} + N_h + m_h \cdot g \equiv 0 \quad (5)$$

$$\sum_i M_{i(S_h)} = -M_{görd_h} - M_{csapágy} - M_{fék_h} - F_{th} \cdot R + M_{kerék} \equiv J_h \cdot \varepsilon_h \quad (6)$$

Mozgásegyenletek a járműfelépítményre:

$$\sum_i F_{ix} = T_h - T_e - F_{lég} \equiv m_0 \cdot a_s \quad (7)$$

$$\sum_i F_{iy} = -N_e - N_h + m_0 \cdot g \equiv 0 \quad (8)$$

$$\sum_i M_{i(S)} = -M_{motor} - N_e \cdot l_e + N_h \cdot l_h + T_e \cdot w - T_h \cdot w \equiv 0 \quad (9)$$

Mozgásegyenlet a motor forgórészére (csak forgómozgásra):

$$\sum_i M_i = M_{motor} - M_{súrl} - M_{terh} \equiv J_r \cdot \varepsilon_r \equiv J_r \cdot i_{12} \cdot \varepsilon_h \quad (10)$$

ahol:

$$\varepsilon_h = \varepsilon_r \cdot \frac{1}{i_{12}} \quad (11)$$

$$M_{motor} = L_{sr} \cdot I^2 \quad (12)$$

$$M_{terh} = -\frac{M_{kerék}}{\eta \cdot i_{12}} \quad (13)$$

$$i_{12} = \frac{z_2}{z_1} \quad (14)$$

A fenti egyenletekben szereplő jelöléseket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat A járműdinamikai modellben alkalmazott jelölések.

Jelölés	Magyarázat
$M_{kerék}$ [Nm]	a lánchajtáson keresztül a motor által a hátsó tengelyre kifejtett forgatónyomaték nagysága
M_{motor} [Nm]	a motor állórésze által a motor forgórészére kifejtett forgatónyomaték nagysága
$M_{görd_e}$ $M_{görd_h}$ [Nm]	az első és hátsó kerekekre ható gördülési ellenállási nyomaték nagysága
$M_{csapágy}$ [Nm]	az első vagy hátsó tengelyen lévő kerékcsapágyak ellenállási nyomatékának összege
$F_{lég}$ [N]	a légellenállási erőrendszer eredőjének nagysága
F_{te} F_{th} [N]	az első és hátsó kerekekre ható súrlódási erő nagysága
F_{ne} F_{nh} [N]	a talaj által az első és hátsó kerekekre kifejtett nyomóerő nagysága
T_e T_h [N]	menetirányú terhelés az első és hátsó tengelyen
N_e N_h [N]	menetirányra merőleges terhelés az első és hátsó tengelyen
S_e S_h S	az első és hátsó kerekek, valamint az egész jármű súlypontja
$M_{fék_e}$ $M_{fék_h}$ [Nm]	az első és hátsó kerekekre ható fékező nyomaték
η	a lánchajtás hatásfoka
z_1 z_2	a hajtó és hajtott lánckerekek fogszáma
i_{12}	a lánchajtás áttétele
ε_r [rad/s ²]	a motor forgórészének szöggyorsulása
ε_h [rad/s ²]	a hajtott hátsó kerekek szöggyorsulása
ε_e [rad/s ²]	az első kerekek szöggyorsulása
ω_r [rad/s]	a motor forgórészének szögsebessége
$M_{súrl}$ [Nm]	a motor csapágyellenállási és kefesúrlódási nyomatékának összege

M_{terh} [Nm]	a motor terhelő nyomatéka
l [m]	a jármű tengelytávolsága
l_e l_h [m]	a járműfelépítmény súlypontjának első és hátsó tengelytől mért vízszintes irányú távolsága
w [m]	a járműfelépítmény súlypontjának tengelyektől mért függőleges irányú távolsága
m_0 [kg]	a járműfelépítmény tömege a sofőrrel együtt
m_e m_h [kg]	az első és hátsó kerekek és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészek együttes tömege
J_e J_h [kg · m ²]	az első és hátsó kerekek és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészek együttes tehetetlenségi nyomatéka
J_r [kg · m ²]	a motor forgórészének tehetetlenségi nyomatéka
R [m]	a kerék effektív sugara
ξ	kerékcsúszás (slip)
v_s [m/s]	a jármű – és egyben a kerekek – tömegközéppontjának sebessége
a_s [m/s ²]	a jármű – és egyben a kerekek – tömegközéppontjának gyorsulása

További összefüggések

Feszültség-egyenlet az SWDC motorra [17], [24]:

$$U - U_{kefe} - (R_s + R_r + R_{vezetékek}) \cdot I - (L_s(I) + L_r(I)) \cdot \frac{dI}{dt} - L_{sr}(I) \cdot \omega_r \cdot I = 0 \quad (15)$$

ahol U a motor tápfeszültsége, U_{kefe} a kefefeszültség, R_s és R_r az álló és forgórész tekercseinek elektromos ellenállása, $R_{vezetékek}$ a motort és az akkumulátort összekötő vezetékek eredő ellenállása, I a motoron átfolyó áram erőssége, L_s és L_r az álló- és forgórész tekercseinek dinamikus öninduktivitása, L_{sr} a két tekercs közötti kölcsönös statikus induktivitás és ω_r a motor forgórészének szögsebessége. Az SWDC motor modellezésével és szimulációjával részletesebben a 3.2 és 4.1.1 fejezetekben foglalkozok, míg a szimulációhoz szükséges bemenő adatok kísérleti meghatározásával az 5.2 fejezetben.

Kerékmodellek:

A szimulációs programban alacsony sebességek esetén ($v_s < 1-2$ [m/s]) a LuGre kerékmodellt, míg a fölött a Pacejka modellt („varázs” formulát) alkalmaztam. A Pacejka modell egy statikus modell, amely egy állandó összefüggést ír elő a relatív érintő irányú sebesség (és az abból számolt kerékcsúszás), valamint a kerék kerületén fellépő súrlódási erő között. A LuGre modell ezzel szemben egy dinamikus modell, amely egy extra állapotváltozót (z) vezet be a súrlódási állapot, vagyis a

kerékcsúszás vagy tapadás mértékének jellemzésére. Ezt a változót a súrlódási modellből adódó differenciálegyenlet írja le. A dinamikus modellek jobban leírják a súrlódási erő "felépülését" a nyugalomból induló kerék mozgásának kezdeti szakaszában, mint a statikus modellek. A statikus modellek viszont egyszerűségük, ezáltal jó számítási hatékonyságuk miatt jól alkalmazhatóak a nagyobb sebességek esetén. Ebből adódóan kis sebességek esetén a LuGre, míg nagyobb sebességeknél a Pacejka modellt alkalmaztuk. A modellek rövid leírása:

Pacejka modell:

A hosszirányú (longitudinális) kerékcsúszást („slip”), az első és hátsó kerekek esetében egyaránt, az alábbi összefüggésekkel számítjuk:

$$\xi = \frac{\omega \cdot R - v_s}{\omega \cdot R} \quad (16)$$

$$\xi = \frac{\omega \cdot R - v_s}{v_s} \quad (17)$$

ahol ω és R a kerék szögsebessége és effektív sugara, v_s pedig a kerék, és egyben a jármű tömegközéppontjának sebessége. [9], [20]

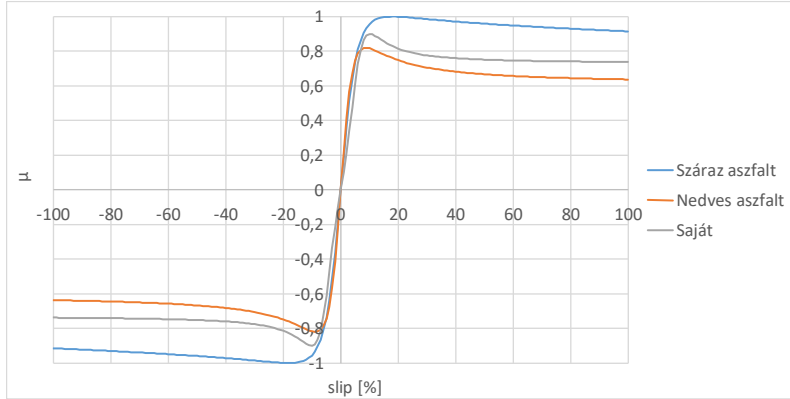
Az, hogy a (16) vagy (17) összefüggéssel számol a program, az $\omega \cdot R - v_s$ relatív sebesség előjelétől függ. Ha a relatív sebesség pozitív, akkor a (16), ha negatív, akkor a (17) összefüggéssel számítjuk a kerékcsúszást. (Másképpen fogalmazva az $\omega \cdot R$ és v_s sebességek közül a nagyobbal kell osztani.)

A „slip” kiszámolására vonatkozó összefüggéssel szemben elvárás, hogy az $\omega \cdot R$ és v_s értékeit felcserélve a „slip” nagysága ne, csak előjele változzon. A megadott (16) és (17) összefüggések esetében ez teljesül.

A súrlódási tényezőt, amely a talaj által a kerekekre kifejtett hosszirányú és normál irányú erők hányadosa, a Pacejka „varázs” („magic”) formulával (18) számítottuk [10], [11], [12], [25]:

$$\frac{F_t}{F_n} = \mu \equiv c_1 \cdot \sin \left(c_2 \cdot \operatorname{atan} \left(c_3 \cdot \xi - c_4 \cdot \left(c_3 \cdot \xi - \operatorname{atan}(c_3 \cdot \xi) \right) \right) \right) \quad (18)$$

ahol c_1 , c_2 , c_3 és c_4 a gumiabroncs kísérleti vizsgálatával meghatározható konstansok, amelyek elnevezése merevségi, alaki, csúcsi és görbületi együtthatók [10], [19].



5. ábra A Pacejka „varázs” formula [10] grafikonja. A saját vizsgálatok [9] esetén: $c_1 = 0,9$, $c_2 = 1,4$, $c_3 = 7,936$, $c_4 = -10$

Az 5. ábrán a száraz és nedves aszfaltburkolatra vonatkozó görbéket is feltüntettük [10]. Látható, hogy az általunk használt értékek a száraz és nedves aszfaltburkolat közötti átmeneti állapotot jellemzik.

LuGre kerékmodell:

A LuGre modell a kerék sörté alapú felfogásán alapszik, amely szerint a kerék-talaj kapcsolat a kerék kerületén elhelyezkedő rugalmas sörték úthoz tapadása révén valósul meg. Érintő irányú erő fellépése esetén a rugalmas sörtéelemek deformálódnak, aminek következtében súrlódási erő és csúszási jelenség lép fel. A LuGre modell esetén a kerekre ható súrlódási erő az alábbi összefüggéssel számítható [26]:

$$F_{th} = (\sigma_0 \cdot z + \sigma_1 \cdot \dot{z} + \sigma_2 \cdot v_r) \cdot F_{nh} \quad (19)$$

ahol:

$$\dot{z} = v_r - \frac{\sigma_0 \cdot |v_r|}{g(v_r)} \cdot z \quad (20)$$

$$g(v_r) = \mu_c + (\mu_s - \mu_c) \cdot e^{(-|v_r/v_{str}|^{1/2})} \quad (21)$$

$$v_r = \omega \cdot R - v_s \quad (22)$$

A fenti összefüggésekben F_{nh} a kerekre ható normál irányú erő, v_{str} a „Stribeck” sebesség, μ_s és μ_c a tapadási és csúszási (Coulomb) súrlódási tényező, a z változó a keréksörték átlagos elhajlását, ezáltal a súrlódási állapotot jellemzi, σ_0 , σ_1 és σ_2 pedig a sörték átlagos merevsége, csillapítási tényezője és a viszkozus súrlódási tényező.

3. táblázat Az általam használt paraméterértékek [27]:

v_{str} [m/s]	μ_s	μ_c	σ_0 [1/m]	σ_1 [s/m]	σ_2 [s/m]
4,553	0,9	0,74	395,86	1,1	0,0012

Légellenállási erő:

A légellenállási erő nagyságát az alábbi összefüggéssel számítjuk [12]:

$$F_{lég} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A \cdot \rho \cdot v_s^2 \quad (23)$$

ahol C a jármű alaki tényezője, A a homlokl felülete, amely a menetirányra merőleges legnagyobb keresztmetszetet jelenti, ρ a levegő sűrűsége és v_s a jármű tömegközéppontjának a levegőhöz viszonyított sebessége [9].

Gördülési ellenállási nyomaték:

A gördülési ellenállási nyomatékot a jármű első és hátsó kerekére egyaránt az alábbi összefüggéssel számítottuk [25]:

$$M_{görd} = k \cdot F_n \quad (24)$$

ahol F_n a talaj által a kerékre kifejtett normál irányú erő (nyomóerő), k a gördülési ellenállás karja. A gördülési ellenállás karja az alábbi összefüggéssel számítható:

$$k = \mu_{görd}(v_s) \cdot R \quad (25)$$

ahol $\mu_{görd}(v_s)$ a gördülési ellenállási tényező a jármű sebességének függvényében, R az effektív keréksugár. A gördülési ellenállási tényező sebesség függését az alábbi összefüggéssel adhatjuk meg [25]:

$$\mu_{görd}(v_s) = \mu_{görd0} \cdot \tanh\left(\frac{4 \cdot v_s}{1}\right) \cdot (1 + (0,006 \cdot v_s)^2) \quad (26)$$

ahol $\mu_{görd0}$ egy állandó.

A fenti állandó egy adott gumibroncs esetén függ az útfelület minőségétől, a hőmérséklettől, valamint a kerék belső nyomásától [25]. Rövidebb időtartamú versenyek esetén (pl. gyorsulási verseny) a kerék hőmérsékletének és nyomásának változása elhanyagolható. A gördülési ellenállási tényező kísérleti meghatározását a keréknyomás függvényében a [28] és [29] közlemények tárgyalják.

Csapágyellenállási nyomaték:

A versenyautó kerékcsapágyai SKF 32205 BJ2/Q kúpgörgős csapágyak. A csapágyellenállási (súrlódási) nyomatékot az SKF katalógus [30] alapján számítottuk a talaj által a kerékre kifejtett normál irányú erő (nyomóerő) függvényében:

$$M_{csapágy}(F_n) = \frac{1}{2} \cdot d \cdot \mu_{csap} \cdot F_n \quad (27)$$

A fenti összefüggésben d a csapágy belső furatának átmérője, μ_{csap} a csapágsúrlódási tényező, amelyet konstans értékkel vettünk figyelembe.

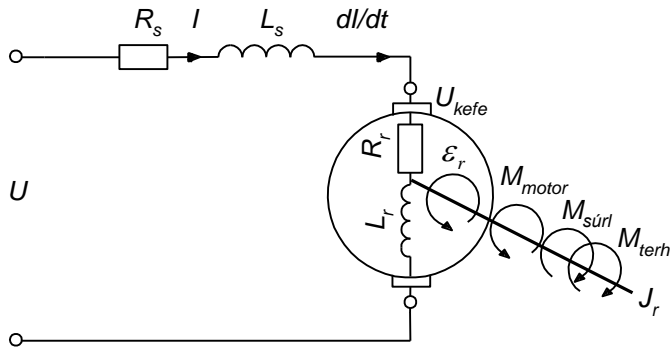
A pontos szimulációhoz fontos a fenti bemenő adatok minél pontosabb ismerete. A legtöbb esetben ezek méréssel határozhatók meg, amelyhez adott esetben összetett mérőrendszer szükséges. A geometriai jellemzők, a tömegek és a súlypont helye ($l, l_e, l_h, w, m_0, m_e, m_h, R$) egyszerűen mérhetők vagy kísérletileg meghatározhatók. A kerekek tehetetlenségi nyomatékának, valamint a villanymotor különböző elektromágneses és dinamikai jellemzőinek ($U, R_{vezeték}, R_s, R_r, L_s, L_r, L_{sr}, M_{súrl}, J_r$) mérése már összetettebb feladat, kísérleti meghatározásukhoz összetett mérőrendszer szükséges. Egy ilyen mérőrendszert megvalósítottunk a Műszaki Karon, amelyet az 5.1 fejezetben részletesen bemutatok. Így a fenti paraméterek többségét sikerült meghatároznunk, a többi esetben pedig a szakirodalomban található értékeket használtuk. Az alkalmazott SWDC motor elektromágneses és dinamikai jellemzőinek kísérleti meghatározásával az 5.2 fejezetben foglalkozom.

3.2 AZ ALKALMAZOTT SOROS GERJESZTÉSŰ EGYENÁRAMÚ MOTOR MODELLEZÉSE

A járművek hajtására használt villanymotorok egyik típusa a soros gerjesztésű egyenáramú (SWDC) motor. Ennek a motornak üresjáratú fordulatszáma nem értelmezhető, legnagyobb nyomatékát induláskor adja le, amely a fordulatszám növekedésével fokozatosan csökken. [31] Ebből adódóan ideális járművek hajtására (pl. trolibusz, villamos, metró, vasút), sok esetben sebességváltó beépítése nélkül, így a versenyautóknak tervezésekor is erre a típusra esett a választás. Ezekben a motorokban mind az álló, mind a forgórész tekercselt, amelyek sorba vannak kapcsolva. Az elektromos kapcsolatot az álló és forgórész között a kommutátor felületén csúszó szénkefék biztosítják.

Az SWDC motorok matematikai modellezésével, ahol a mágneses nemlinearitás jelentős szerepet játszik, számos tudományos közlemény foglalkozik [32], [17], [33], [34], [24], [35], [36], [37], [38], [39]. A következőkben a motor különböző modellezési eljárásait tekintem át.

A 6. ábra az SWDC motor modelljét mutatja.



6. ábra Az SWDC motor modellje [9]

A Kirchhoff féle huroktörvény alapján az SWDC motorra felírható az alábbi feszültség-egyenlet:

$$U = (R_s + R_r) \cdot I + U_s + U_r + U_{sr} + U_{kefe} \quad (28)$$

ahol U a motor tápfeszültsége, R_s és R_r az álló és forgórész tekercseinek elektromos ellenállása, I a motoron átfolyó áram erőssége, U_s és U_r az önindukció során az álló és forgórészben, U_{sr} pedig a kölcsönös indukció során az állórész által a forgórészben indukált elektromotoros erő, valamint U_{kefe} a kefefeszültség. [39]

Az U_s , U_r és U_{sr} elektromotoros erők modellezése során alkalmazhatunk mágneselesen lineáris és nemlineáris közelítést. A lineáris közelítés esetén a fenti elektromotoros erők az alábbi összefüggésekkel számíthatók:

$$U_s = L_s \cdot \frac{dI}{dt} \quad (29)$$

$$U_r = L_r \cdot \frac{dI}{dt} \quad (30)$$

$$U_{sr} = L_{sr} \cdot \omega_r \cdot I \quad (31)$$

ahol L_s és L_r az álló- és forgórész öninduktivitása, L_{sr} a két tekercs közötti kölcsönös induktivitás, ω_r a forgórész szögsebessége [32], [17], [34], [24], [35]. A fenti lineáris közelítés esetén az L_s , L_r és L_{sr} induktivitások értékei állandóak.

A lineáris modell esetében feltételezzük, hogy az önindukció során az álló és forgórészben, valamint a kölcsönös indukció során az állórész által a forgórészben keltett mágneses fluxusok egyenesen arányosak a motoron (tekercseken) átfolyó áram erősségével:

$$\Psi_s(I) = L_s \cdot I \quad (32)$$

$$\Psi_r(I) = L_r \cdot I \quad (33)$$

$$\Psi_{sr}(I) = L_{sr} \cdot I \quad (34)$$

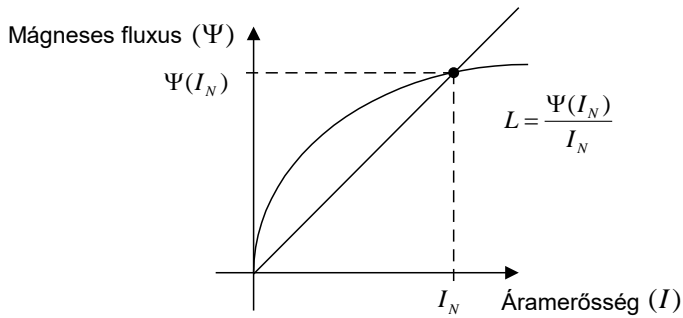
azaz:

$$L_s = \frac{\Psi_s(I)}{I} \equiv \text{állandó} \quad (35)$$

$$L_r = \frac{\Psi_r(I)}{I} \equiv \text{állandó} \quad (36)$$

$$L_{sr} = \frac{\Psi_{sr}(I)}{I} \equiv \text{állandó} \quad (37)$$

A mágnesesen lineáris modell esetében az induktivitásokat a névleges értékekből határozzuk meg (7. ábra).



7. ábra Az induktivitás meghatározása a névleges értékekből a mágnesesen lineáris modell esetén

Az állórész mágneses fluxusa és az állórész által a forgórészben keltett mágneses fluxus között fennáll az alábbi kapcsolat:

$$\Psi_{sr}(I_N) = K_e \cdot \Psi_s(I_N) \quad (38)$$

Felhasználva az (28), (31) és (38) összefüggéseket, valamint azt, hogy állandó áramerősség esetén $\frac{dI}{dt} = 0$, a K_e konstansra a (39) összefüggés adódik [33], [37], [38]:

$$K_e = \frac{\Psi_{sr}(I_N)}{\Psi_s(I_N)} \equiv \frac{L_{sr} \cdot I_N}{\Psi_s(I_N)} \equiv \frac{U_N - (R_s + R_r) \cdot I_N - U_{kefe}}{\Psi_s(I_N) \cdot \omega_N} \quad (39)$$

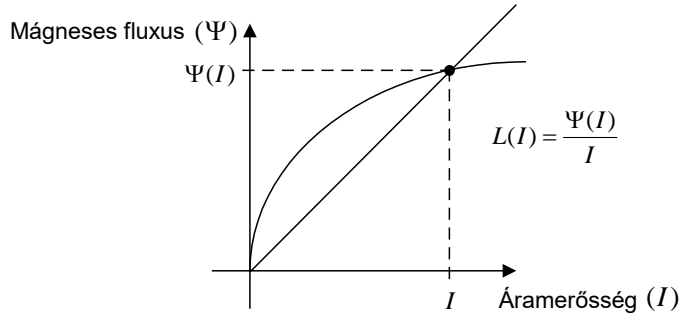
A nemlineáris modell esetében a mágneses fluxusok és a motoron átfolyó áram erőssége közötti lineáris kapcsolat nem áll fenn. Ebben az esetben alapvetően kétféle megközelítés létezik, az elsőben statikus, a másodikban dinamikus induktivitásokat értelmezünk. A statikus induktivitásokat az alábbi összefüggések értelmezik:

$$L_s(I) = \frac{\Psi_s(I)}{I} \quad (40)$$

$$L_r(I) = \frac{\Psi_r(I)}{I} \quad (41)$$

$$L_{sr}(I) = \frac{\Psi_{sr}(I)}{I} \quad (42)$$

Azaz az induktivitások itt már függenek a motoron átfolyó áram erősségétől, tehát értékük nem állandó.



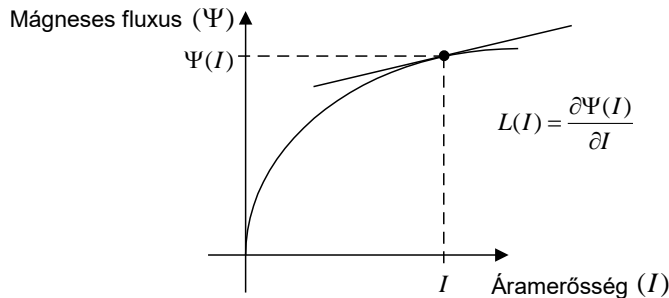
8. ábra A statikus induktivitás értelmezése a mágnesesen nemlineáris modell esetén

A dinamikus induktivitásokat a mágneses fluxus áramerősség szerinti praciális deriváltjaiként értelmezzük:

$$L_s(I) = \frac{\partial \Psi_s(I)}{\partial I} \quad (43)$$

$$L_r(I) = \frac{\partial \Psi_r(I)}{\partial I} \quad (44)$$

$$L_{sr}(I) = \frac{\partial \Psi_{sr}(I)}{\partial I} \quad (45)$$



9. ábra A dinamikus induktivitás értelmezése a mágnesesen nemlineáris modell esetén

Meg kell jegyezni, hogy általános esetben, a fenti modellek közül a dinamikus induktivitások alkalmazásával érhető el a legnagyobb pontosság. A pontosság tovább növelhető a Jiles-Atherton modell [40], [41] alkalmazásával, amely a mágneses nemlinearitások mellett a vasmaggal kapcsolatos veszteségeket is figyelembe veszi [39].

A motor forgórészére korábban felírt mozgásegyenlet (lásd (10) egyenlet) az alábbi:

$$J_r \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{motor} - M_{terh} - M_{súrl} \quad (46)$$

ahol M_{motor} , M_{terh} és $M_{súrl}$ az elektromágneses, terhelő és súrlódási nyomaték, J_r pedig a forgórész tehetetlenségi nyomatéka.

Az elektromágneses nyomaték az alábbi összefüggéssel számítható [35]:

$$M_{motor} = \Psi_{sr}(I) \cdot I \quad (47)$$

Az állórész által a forgórészben keltett mágneses fluxus, statikus induktivitások alkalmazása esetén, a (42) összefüggéssel közelíthető. Ebből adódóan:

$$M_{motor} = L_{sr}(I) \cdot I^2 \quad (48)$$

A súrlódási nyomaték magában foglalja a csapágyakban és a kommutátorokon csúszó szénkeféken fellépő, valamint a forgórész légellenállásából adódó nyomatékokat. A súrlódási nyomatékok modellezése összetett feladat, erre itt nem térünk ki, de a téma részletes leírása megtalálható a [42] közleményben.

A csapágyellenállási nyomaték számítására elfogadott a következő közelítés:

$$M_{súrl} = k_f \cdot \omega_r \quad (49)$$

ahol k_f a csapágysúrlódási tényező. Itt meg kell jegyezni, hogy a szögsebesség és csapágysúrlódás közötti lineáris kapcsolat csak nagyobb fordulatszámok esetén ad jó közelítést, ahol már a viszkózus súrlódás a domináns. Pontosabb számításokhoz az ellenállási nyomatékot kísérleti úton kell meghatározni a fordulatszám függvényében. Ilyen kísérleti eljárásra mutatok példát az 5.2.2 fejezetben. Emellett az 5.2.2 fejezetben részletesen tárgyalom, hogy milyen egyéb tényezők befolyásolják a csapágysúrlódási nyomaték értékét.

A motor terhelő nyomatéka azonos nagyságú, de ellentétes értelmű azzal a nyomatékkal, amit a motor forgórésze kifejt a meghajtott gépelemre.

A modell alapján az SWDC motorra elkészült szimulációs program leírását a 4. fejezetben ismertetem. A fenti programban dinamikus öninduktivitásokat és statikus kölcsönös induktivitást alkalmaztam. Mérési úton is ezeket határoztuk meg (lásd 5.2.1 fejezet).

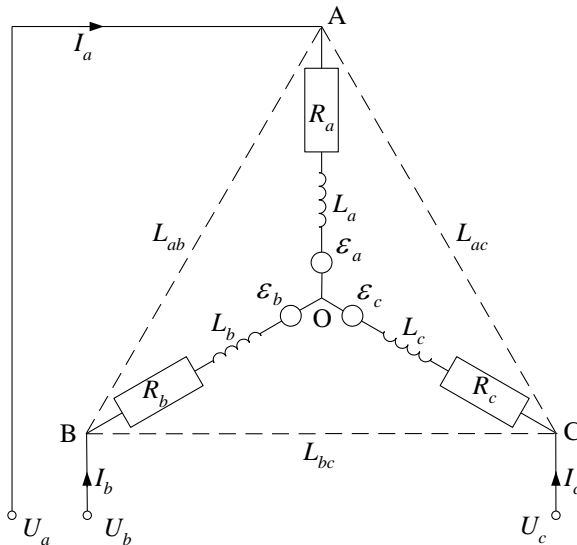
3.3 KEFE NÉLKÜLI EGYENÁRAMÚ MOTOR, MINT ALTERNATÍV LEHETŐSÉG. A MOTOR MODELLEZÉSE

Ahogy azt a 3.1 és 3.2 fejezetekben említettem, a prototípus versenyautó hajtására egy SWDC motort alkalmaztunk, amelyhez az elkészült modellt a 3.2 fejezetben mutattam be. Szerettük volna azt is megvizsgálni, hogy egy más típusú villanymotor alkalmazásával, a versenyautóval milyen menetdinamikai

tulajdonságok érhetőek el. A választásunk végül egy korszerű, BLDC motorra esett, mivel 48 [V]-os egyenfeszültségről ugyanúgy üzemeltethető, mint az SWDC motor, és elterjedten alkalmazzák kisebb elektromos járművek hajtására. Ebben a fejezetben bemutatjuk a BLDC motorhoz készített modellt, majd a 4.2 fejezetben a ráépülő szimulációs programot.

A fenti motor tulajdonképpen egy szinkron villanymotor egyenáramú táplálással, ami elektronikusan vezérelt kommutációs rendszerrel rendelkezik a kefések kommutáció helyett. Az említett kommutációs rendszer megfelelő fázisokban kapcsolja az egyenfeszültséget az egyes tekercsekre, így biztosítva a folytonos forgást. Ehhez a forgórész pozícióját HALL szenzorok [43] érzékelik. A motor forgórésze erős állandómágneseket tartalmaz, míg az állórész tekercselt. Felépítését tekintve különböző kivitelekben gyártják; a forgórész lehet belső vagy külső kivitelű, a tekercselés lehet csillag vagy deltakapcsolású. Esetünkben a csillagkapcsolású és belső forgórészű kivittel foglalkoztunk. Számos tudományos cikk [44], [45], [46], [47] foglalkozik BLDC motor modellezésével és szimulációjával. Ezek gyakran más-más megközelítést alkalmaznak, de a leírások általában nem elég részletesek ahhoz, hogy azok alapján az olvasó elkészítse a saját szimulációs programját. Ebből adódóan úgy döntöttünk, hogy az irodalmi forrásokra támaszkodva kidolgozzuk a saját modellünket és a ráépülő szimulációs programot [13].

A 10. ábrán az alkalmazott – csillagkapcsolású állórészrel szerelt – BLDC motor modellje látható.



10. ábra A BLDC motor modellje [13]

A modell alapján az alábbi egyenletek írhatók fel [44], [45]:

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + L_{ab} \cdot \frac{dI_b}{dt} + L_{ac} \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_a \quad (50)$$

$$U_b = R_b \cdot I_b + L_{ba} \cdot \frac{dI_a}{dt} + L_b \cdot \frac{dI_b}{dt} + L_{bc} \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_b \quad (51)$$

$$U_c = R_c \cdot I_c + L_{ca} \cdot \frac{dI_a}{dt} + L_{cb} \cdot \frac{dI_b}{dt} + L_c \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_c \quad (52)$$

ahol U_a , U_b és U_c az A, B és C pontok elektromos potenciálja, R_a , R_b , R_c , L_a , L_b és L_c az egyes tekercsek elektromos ellenállásai és öninduktivitásai, L_{ab} , L_{ac} , L_{ba} , L_{bc} , L_{ca} és L_{cb} a tekercspárok között fellépő kölcsönös induktivitások, ε_a , ε_b és ε_c a visszaható elektromotoros erők (Counter vagy Back EMF), amelyeket az állandómágneses forgórész kelt az állórész tekercseiben.

A vezérlő elektronika egy adott pillanatban valamely pontra (pl.: A) az akkumulátor pozitív, ezzel egyidejűleg egy másikra (pl.: B) a negatív pólusát kapcsolja, a harmadik pont (C) potenciálja ekkor $\frac{(U_a+U_b)}{2} = 0$. Tehát a három pont potenciálja az említett pillanatban: $U_a = \frac{U_{akku}}{2}$, $U_b = -\frac{U_{akku}}{2}$, $U_c = 0$, ahol U_{akku} az akkumulátor kapcsolófeszültsége. Ha a pontok potenciálértékeit megfelelő ütemezés szerint (11. ábra) változtatjuk, akkor az állórészben létrejön a forgó mágneses mező, amely "viszi magával" a forgórészt. Az elmondottakból adódóan, a csillagpont potenciálja nulla.

Egy póluspár, és 2 [V] tápfeszültség esetén a motorvezérlő elektronika által az egyes tekercsre adott feszültségek a következő alakban adhatók meg az elektromos szög (θ_e) függvényében [13]:

$$U_a = U(\theta_e) \equiv \left\{ \begin{array}{ll} -1 & \text{ha } \frac{4\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \\ 0 & \text{ha } 0 \leq \theta_e < \frac{\pi}{3} \text{ vagy } \pi \leq \theta_e < \frac{4\pi}{3} \\ 1 & \text{ha } \frac{\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \end{array} \right\} \quad (53)$$

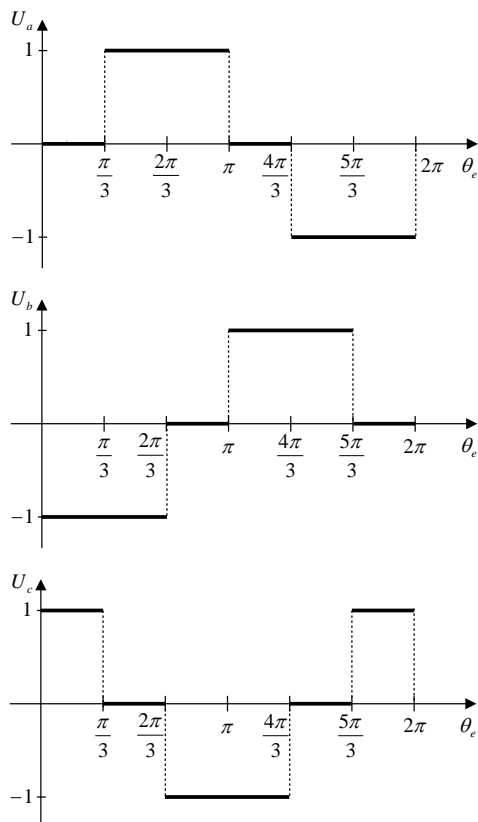
$$U_b = U\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (54)$$

$$U_c = U\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (55)$$

Az elektromos szög a forgórész szögpozíciójából (θ_r) az alábbi összefüggéssel számolható:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \cdot \theta_r \quad (56)$$

ahol $\frac{p}{2}$ a forgórészben lévő állandómágnesek póluspárjainak száma. Az alábbi ábra az U_a , U_b és U_c feszültségeket szemlélteti az elektromos szög függvényében 2 [V] tápfeszültség és egy póluspár ($\frac{p}{2} = 1$) esetén.



11. ábra Az U_a , U_b és U_c feszültségek az elektromos szög függvényében 2 [V] tápfeszültség és egy póluspár ($\frac{p}{2} = 1$) esetén

A vezérlő elektronika, azon belül az elektronikusan vezérelt kommutációs rendszer leírásával itt nem foglalkozok.

A tekercsek egymással minden szempontból azonosak, emellett a modellezés során mágnesesen lineáris közelítést alkalmazunk, azaz az induktivitások értéke állandó:

$$R = R_a \equiv R_b \equiv R_c \quad (57)$$

$$L = L_a \equiv L_b \equiv L_c \quad (58)$$

$$M = L_{ab} \equiv L_{ba} \equiv L_{ac} \equiv L_{ca} \equiv L_{bc} \equiv L_{cb} \quad (59)$$

ahol R és L az egyes tekercsek elektromos ellenállásai és öninduktívásai, M a tekercspárok között fellépő kölcsönös induktívás.

Következésképpen:

$$U_a = R_a \cdot I_a + L \cdot \frac{dI_a}{dt} + M \cdot \frac{dI_b}{dt} + M \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_a \quad (60)$$

$$U_b = R_b \cdot I_b + M \cdot \frac{dI_a}{dt} + L \cdot \frac{dI_b}{dt} + M \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_b \quad (61)$$

$$U_c = R_c \cdot I_c + M \cdot \frac{dI_a}{dt} + M \cdot \frac{dI_b}{dt} + L \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_c \quad (62)$$

Az O csillagpontra (10. ábra) Kirchhoff csomóponti törvényét alkalmazva:

$$I_a + I_b + I_c = 0 \Rightarrow \frac{dI_a}{dt} + \frac{dI_b}{dt} + \frac{dI_c}{dt} = 0 \quad (63)$$

Ebből adódóan:

$$\frac{dI_b}{dt} + \frac{dI_c}{dt} = -\frac{dI_a}{dt} \quad (64)$$

$$\frac{dI_a}{dt} + \frac{dI_c}{dt} = -\frac{dI_b}{dt} \quad (65)$$

$$\frac{dI_a}{dt} + \frac{dI_b}{dt} = -\frac{dI_c}{dt} \quad (66)$$

Ezt felhasználva:

$$U_a = R \cdot I_a + (L - M) \cdot \frac{dI_a}{dt} + \varepsilon_a \quad (67)$$

$$U_b = R \cdot I_b + (L - M) \cdot \frac{dI_b}{dt} + \varepsilon_b \quad (68)$$

$$U_c = R \cdot I_c + (L - M) \cdot \frac{dI_c}{dt} + \varepsilon_c \quad (69)$$

A visszaható elektromotoros erők az alábbiak szerint számíthatók [13]:

$$\varepsilon_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} \equiv -\frac{d\Psi_a}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \equiv -\frac{d\Psi_a}{d\theta_r} \cdot \omega_r \equiv -k_B \cdot F(\theta_e) \cdot \omega_r \quad (70)$$

$$\varepsilon_b = -\frac{d\Psi_b}{dt} \equiv -\frac{d\Psi_b}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \equiv -\frac{d\Psi_b}{d\theta_r} \cdot \omega_r \equiv -k_B \cdot F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \cdot \omega_r \quad (71)$$

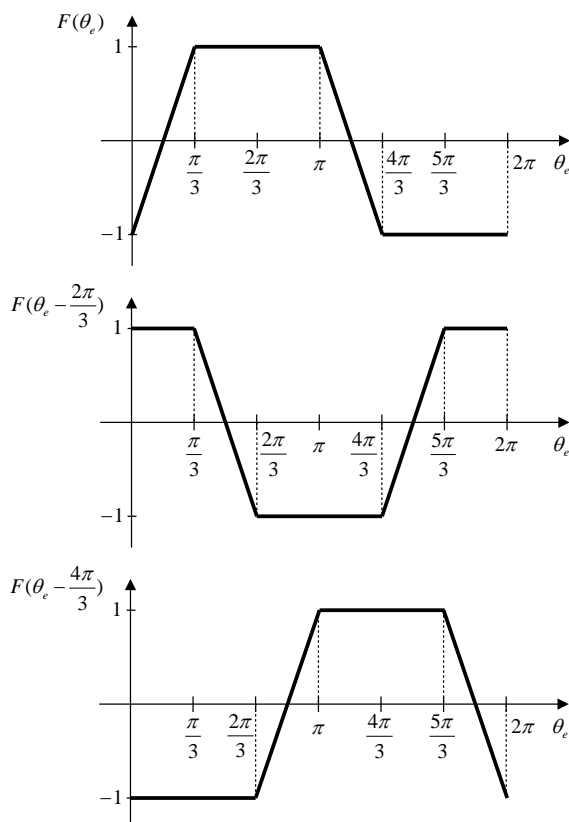
$$\varepsilon_c = -\frac{d\Psi_c}{dt} \equiv -\frac{d\Psi_c}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \equiv -\frac{d\Psi_c}{d\theta_r} \cdot \omega_r \equiv -k_B \cdot F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \cdot \omega_r \quad (72)$$

A fenti egyenletekben ω_r a forgórész szögsebessége, $\frac{d\Psi_a}{d\theta_r}$ az a tekercs mágneses fluxusának θ_r szög szerinti deriváltja, amit hagyományosan $-k_B \cdot F(\theta_e)$ alakban adnak meg, ahol k_B a Counter EMF állandó és az $F(\theta_e)$ függvényt a (73) összefüggés értelmezi egy póluspár esetén:

$$F_a = F(\theta_e) = \begin{cases} \frac{6}{\pi} \cdot \theta_e - 1 & \text{ha } 0 \leq \theta_e < \frac{\pi}{3} \\ 1 & \text{ha } \frac{\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -\frac{6}{\pi} \cdot \theta_e + 7 & \text{ha } \pi \leq \theta_e < \frac{4\pi}{3} \\ -1 & \text{ha } \frac{4\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (73)$$

$$F_b = F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (74)$$

$$F_c = F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (75)$$



12. ábra Az $F(\theta_e)$, $F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)$ és $F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)$ függvények

A BLDC motorok esetén általában trapéz jelalakú Counter EMF a jellemző, míg szinuszos jelalak leginkább az állandómágneses szinkronmotor (PMSM) esetén (amelynek felépítése hasonló a BLDC motorhoz).

A motor forgórészére vonatkozó mozgásegyenlet megegyezik a 3.1 fejezetben szereplő (10) egyenlettel.

Az elektromágneses nyomaték itt az alábbi összefüggéssel számítható:

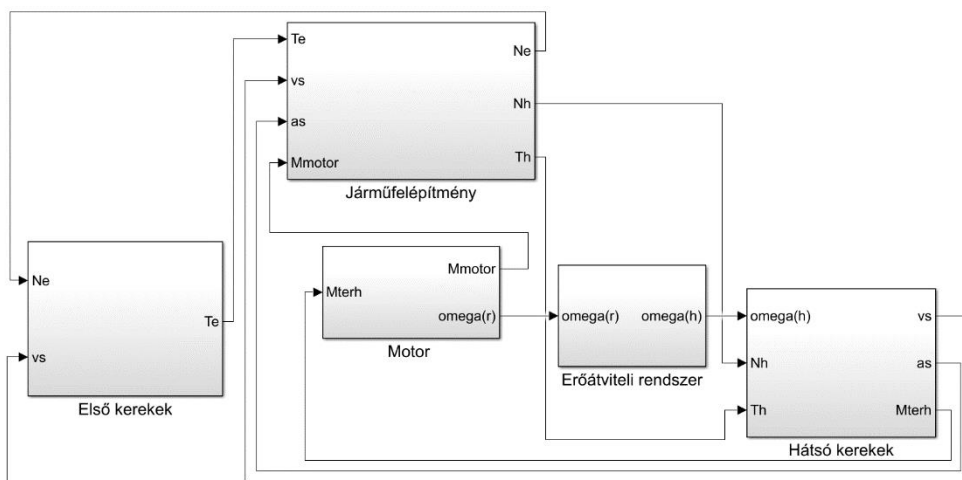
$$\begin{aligned}
 M_{motor} &= \frac{P}{\omega_r} \equiv \frac{\varepsilon_a \cdot I_a + \varepsilon_b \cdot I_b + \varepsilon_c \cdot I_c}{\omega_r} \equiv \frac{-k_B \cdot \omega_r \cdot (F(\theta_e) \cdot I_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \cdot I_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \cdot I_c)}{\omega_r} \equiv \\
 &\equiv -k_B \cdot (F(\theta_e) \cdot I_a + F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \cdot I_b + F(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \cdot I_c) \quad (76)
 \end{aligned}$$

ahol P a motor teljesítménye.

A modell alapján elkészült szimulációs programot a 4. fejezetben ismertetem.

4 A JÁRMŰDINAMIKAI SZIMULÁCIÓS PROGRAM

A 3. fejezetben bemutatott modell alapján Matlab/Simulink környezetben felépítettük a szimulációs programunkat, amely a jármű műszaki adataiból (lásd 3.1 fejezet, 10. oldal) kiszámítja annak menetdinamikai függvényeit. Az említett menetdinamikai függvényeket a 4.6 fejezetben mutatom be. A program blokkdiagramja a 13. ábrán látható. [9]

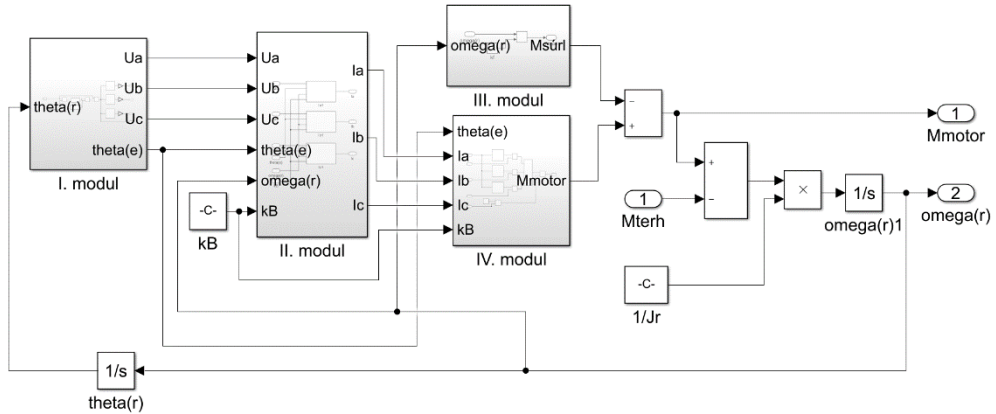


13. ábra A MATLAB Simulink környezetben létrehozott szimulációs program blokkdiagramja [9]

A járműmodellhez igazodva a szimulációs program öt modulból épül fel, melyek a következők:

- motor,
- erőátviteli rendszer,
- hátsó kerekek és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészek,
- első kerekek és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészek,
- járműfelépítmény.

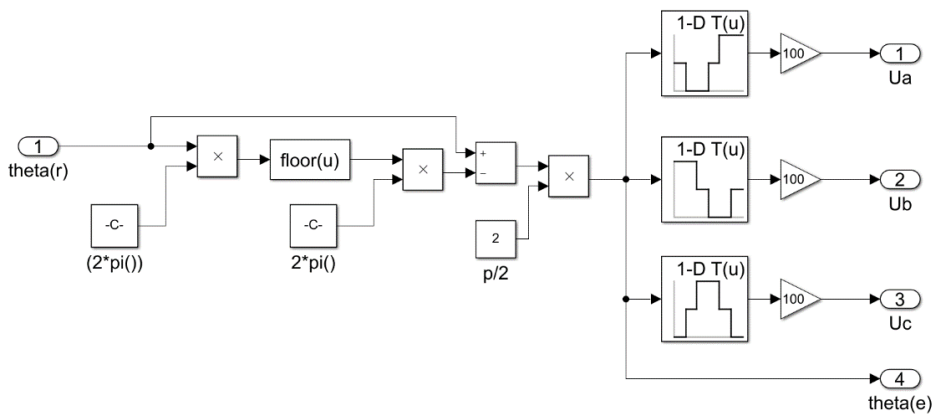
A moduláris felépítés azért előnyös, mert így a jármű bármely szerkezeti egységének módosítása vagy cseréje esetén (pl. más típusú elektromos motor beépítése) nem szükséges a teljes modellt módosítani. Emellett a program sokkal egyszerűbben áttekinthető, így az esetleges fejlesztések, módosítások elvégzése lényegesen egyszerűbb. A továbbiakban részletesen bemutatom a szimulációs program felépítését, működését, valamint a programmal előállítható menetdinamikai függvényeket.



15. ábra A BLDC motor szimulációs modulja [13]

A továbbiakban részletesen ismertetem az egyes modulok belső felépítését és működését. A szimulációs modulokban bemenő adatként felhasznált motorjellemzők értékeit a [13] és [48] közlemények tartalmazzák. Ezek a következők: névleges teljesítmény: 1,4 [kW]; névleges egyenfeszültség: 100 [V], tekercs ellenállás: 0,28 [Ω], tekercs inuktivitás: 0,24 [mH], póluspárok száma: 2; Counter EMF konstans: 0,0033 [V/(r/min)]; forgórész tehetetlenségi nyomatéka: 0,002139 [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$], k_f konstans: 0,001 [Nm·s].

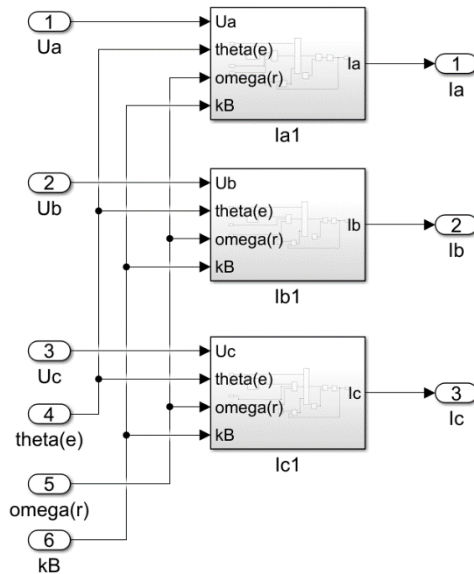
Az I. modul leírása:



16. ábra A BLDC motor szimulációjának I. modulja [13]

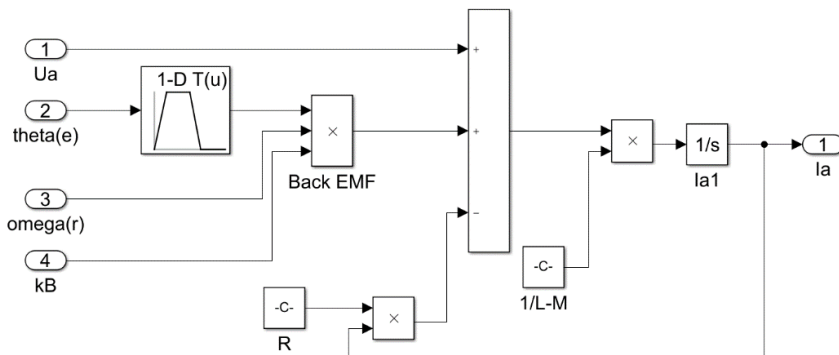
A modul a forgórész szögpozíciójából (θ_r), a póluspárok számából ($\frac{p}{2}$) a 3.3 fejezetben lévő (53-56) egyenletek alapján számítja az U_a , U_b és U_c feszültségeket, valamint az elektromos szöget (θ_e). A 11. ábrán látható U_a , U_b és U_c feszültség jelalakokat az elektromos szög függvényében „look-up table” formájában építettük be, majd ezeket szoroztuk a névleges feszültség nagyságával (100 [V]).

A II. modul leírása:



17. ábra A BLDC motor szimulációjának II. modulja [13]

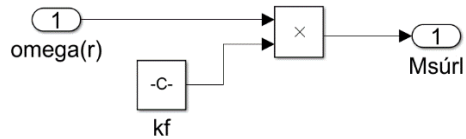
A modul az I. modul által kiszámolt U_a , U_b és U_c feszültségeket és az elektromos szöget (θ_e), valamint a forgórész szögsebességét (ω_r) és a Counter EMF állandót (k_B) olvassa be az I_a , I_b és I_c áramerősségek kiszámításához. Az áramerősségeket külön belső modulokban számítja a 3.3 fejezetben lévő (67-75) egyenletek alapján. A 18. ábra az I_a áramerősség számítását végző belső modul felépítését mutatja. (Az I_b és I_c áramerősségek esetén a modulok felépítése hasonló.)



18. ábra Az I_a áramerősség számítását végző belső modul felépítése [13]

Az I_a áramerősség számítását végző belső modulban a (73) egyenletben szereplő trapézfüggvény (12. ábra) „look-up table” formájában van beépítve, míg a többi motorjellemző (R, L, M) konstans formájában szerepel.

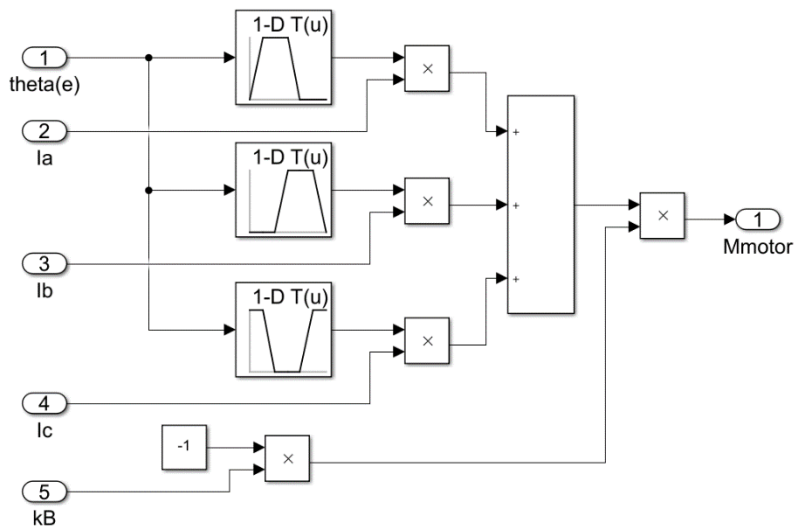
A III. modul leírása:



19. ábra A BLDC motor szimulációjának III. modulja [13]

A modul a motor csapágyellenállási (súrlódási) nyomatékát ($M_{súrl}$) számítja a (49) egyenlet alapján a forgórész szögsebességéből (ω_r), valamint a csapágyúrlódási tényező (k_f) értékéből.

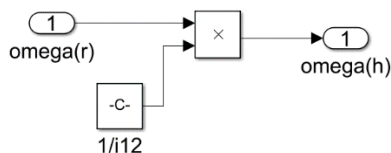
A IV. modul leírása:



20. ábra A BLDC motor szimulációjának IV. modulja [13]

A modul a II. modul által kiszámolt I_a , I_b és I_c áramerősségeket, az elektromos szöget (θ_e), valamint a Counter EMF állandót (k_B) olvassa be a motor elektromágneses nyomatékának (M_{motor}) számításához a 3.3 fejezetben lévő (76) egyenlet alapján. Az egyenletben szereplő trapézfüggvények (12. ábra), amelyek a Counter EMF alakját adják meg az egyes tekercsek esetén, „look-up table” formájában vannak beépítve.

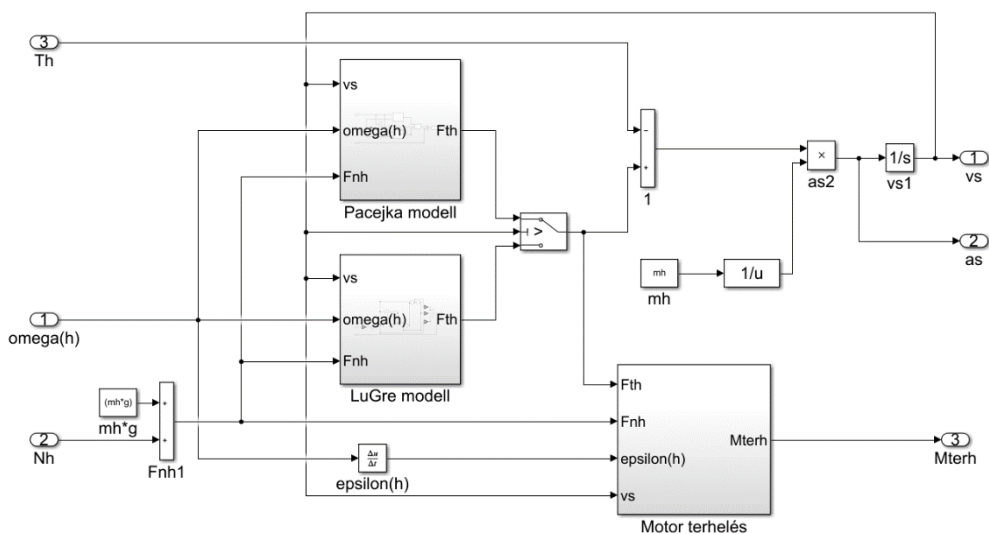
4.2 AZ ERŐÁTVITELI RENDSZER SZIMULÁCIÓS MODULJA



21. ábra Az erőátviteli rendszert leíró programmodul [9]

A modul kiszámítja a hajtott hátsó kerekek szögsebességét (ω_h) a motor szögsebességéből (ω_r) és a lánchajtás áttételéből (i_{12}).

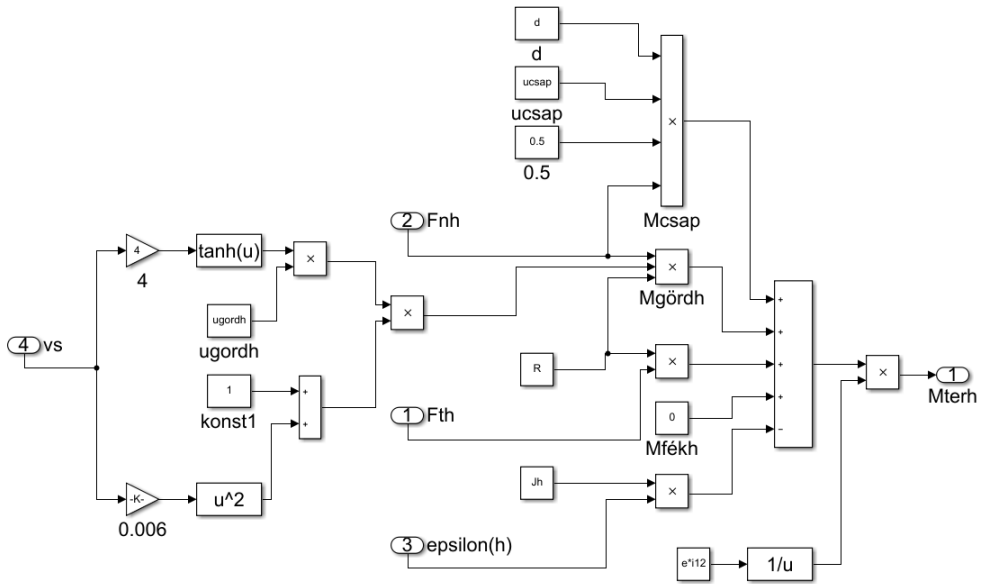
4.3 A HÁTSÓ KEREKEK ÉS A HOZZÁ KAPCSOLÓDÓ FORGÓ ALKATRÉSZEK SZIMULÁCIÓS MODULJA



22. ábra A hátsó kerekek és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészek szimulációját leíró programmodul [9]

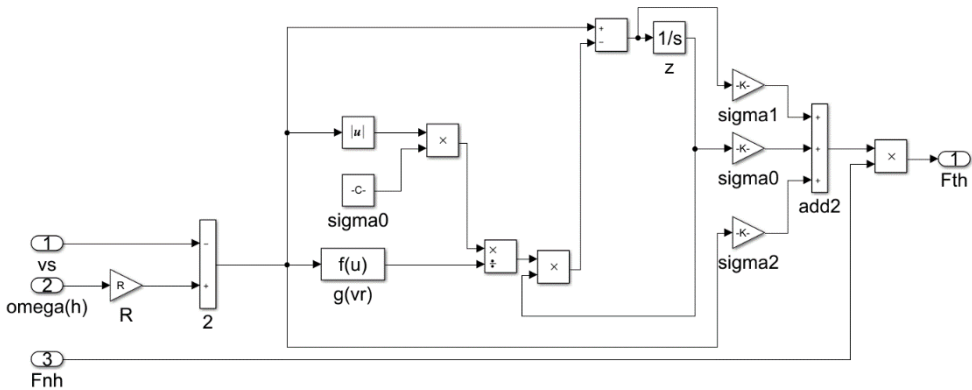
A programmodul, amely a hátsó kereket és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészeket írja le, számítja a motor terhelését (M_{terh}), a jármű súlypontjának gyorsulását (a_s) és sebességét (v_s) a hátsó tengely menetirányú (T_h) és arra merőleges irányú (N_h) terheléseiből, valamint a hátsó kerék szögsebességéből (ω_h) a 3.1 fejezetben lévő (4), (5) és (6) egyenletek alapján.

A modulban további belső modulok vannak. Az egyik számítja a motor terhelését (M_{terh} , 23. ábra), a másik kettő pedig a hátsó kerekekre a talaj által kifejített súrlódási erőt (F_{th}) a LuGre és Pacejka kerékmodellek alapján (24. és 25. ábra).



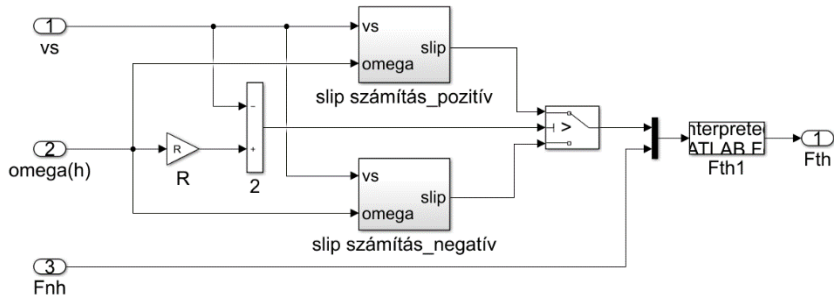
23. ábra A motor terhelését számító belső modul felépítése [9]

A 23. ábrán látható modul a motor terhelését a talaj által a hátsó kerekre kifejtett menetirányú (F_{th}) és arra merőleges irányú (F_{nh}) erőkből, a jármű sebességéből (v_s), valamint a kerek szöggyorsulásából (ε_h) számítja. Ez a 3.1 fejezet (6), (13) és (24-27) egyenletei alapján történik.



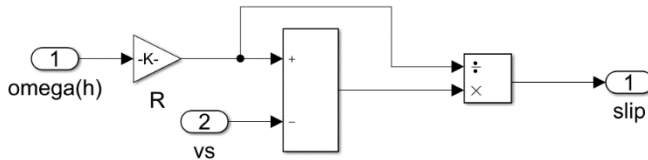
24. ábra A LuGre modell moduljának belső felépítése

A 24. ábrán látható modul a talaj által a hátsó kerekre kifejtett menetirányú (súrlódási) erőt (F_{th}) számítja a jármű sebességéből (v_s), a kerék szögsebességéből (ω_h), valamint a talaj által a hátsó kerekre kifejtett normál irányú (F_{nh}) erőből a 3.1 fejezet (19-22) egyenletei alapján.

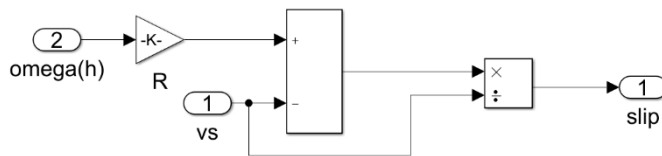


25. ábra A Pacejka modell moduljának belső felépítése

A 25. ábrán látható modul a talaj által a hátsó kerekre kifejtett menetirányú erőt (F_{th}) számítja a jármű sebességéből (v_s), a kerék szögsebességéből (ω_h), valamint a talaj által a hátsó kerekre kifejtett normál irányú (F_{nh}) erőből alkalmazva a 3.1 fejezetben lévő (18) összefüggést. A modulban két további belső modul van, amelyek a kerékcúszást („slip”) számítják a a 3.1 fejezetben lévő (16) és (17) egyenletek alapján. Ha az $(\omega \cdot R - v_s)$ összefüggéssel értelmezett relatív sebesség pozitív, akkor a (16), ha negatív, akkor a (17) összefüggést alkalmazzuk. A modulok belső felépítését a 26. és 27. ábra mutatja.

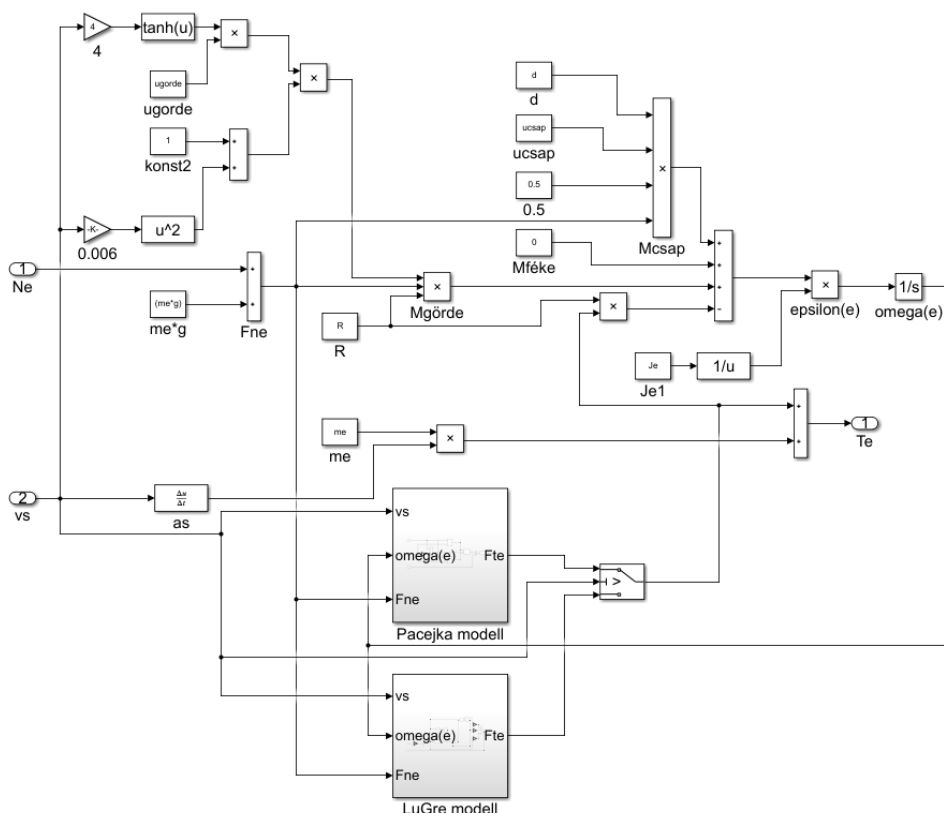


26. ábra A kerékcúszást pozitív relatív sebesség esetén számító programmodul [9]



27. ábra A kerékcúszást negatív relatív sebesség esetén számító programmodul [9]

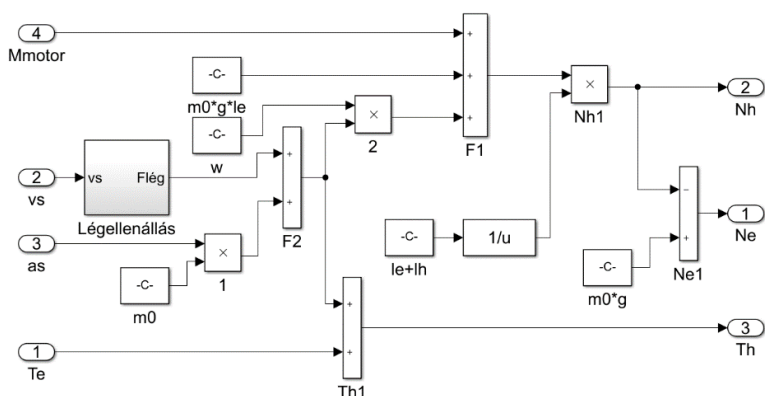
4.4 AZ ELSŐ KEREKES ÉS A HOZZÁ KAPCSOLÓDÓ FORGÓ ALKATRÉSZEK SZIMULÁCIÓS MODULJA



28. ábra Az első kerekek és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészek szimulációját leíró programmodul [9]

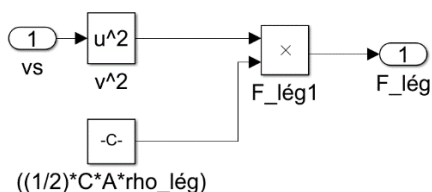
A programmodul, amely az első kerekeket és a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészeket írja le, kiszámítja a menetirányú tengelyterhelést (T_e) a jármű sebességéből (v_s) és a menetirányra merőleges tengelyterhelésből (N_e) a 3.1 fejezet (1), (2), (3) és (24-27) egyenletei alapján. Továbbá a modul kiszámítja még az első kerekek szögsebességét (ω_e) függetlenül a jármű sebességétől, valamint ezt felhasználva a talaj által az első kerekekre kifejtett menetirányú (súrlódási) erőt (F_{te}) a Pacejka és LuGre kerékmodellek alapján, hasonlóan, mint a hátsó kerekeket leíró modul.

4.5 A JÁRMŰFELEPÍTÉMÉNY SZIMULÁCIÓS MODULJA



29. ábra A járműfelépítményt leíró programmodul [9]

A járműfelépítményt leíró programmodul számítja a hátsó tengelyre ható menetirányú és arra merőleges terheléseket (N_h , T_h), és az első tengelyre ható menetirányú terhelést (N_e) a motor által leadott nyomatékból (M_{motor}), a jármű sebességéből (v_s) és gyorsulásából (a_s), valamint az első tengelyre ható menetirányú terhelésből (T_e) a 3.1 fejezetben szereplő (7), (8) és (9) egyenletek alapján. A modulban található belső modul számítja a légellenállási erő nagyságát ($F_{lég}$). A modul felépítését a 30. ábra mutatja.



30. ábra A légellenállási erőt számító belső modul [9]

A légellenállási erőt számító modul a 3.1 fejezetben szereplő (23) egyenleten alapul.

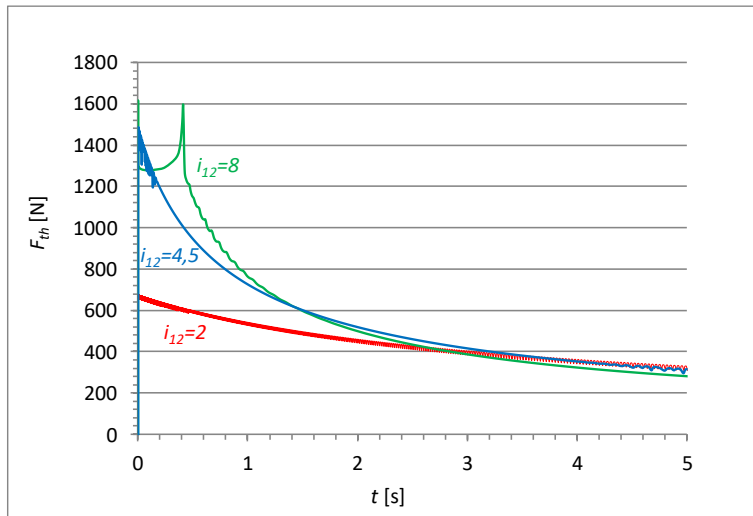
4.6 A SZIMULÁCIÓS PROGRAMMAL ELŐÁLLÍTHATÓ MENETDINAMIKAI FÜGGVÉNYEK ÉS AZOK BIZONYTALANSÁGA

A szimulációs programmal az alábbi mennyiségeket számíthatjuk az idő függvényében:

- A jármű tömegközéppontjának gyorsulása (a_s), sebessége (v_s) és a jármű által megtett távolság (s)
- Az első és hátsó kerekek szögsebessége és szöggyorsulása ($\omega_e, \omega_h, \varepsilon_e, \varepsilon_h$)
- A talaj által az első és hátsó kerekekre menetirányban és arra merőlegesen kifejtett erők ($F_{te}, F_{th}, F_{ne}, F_{nh}$)

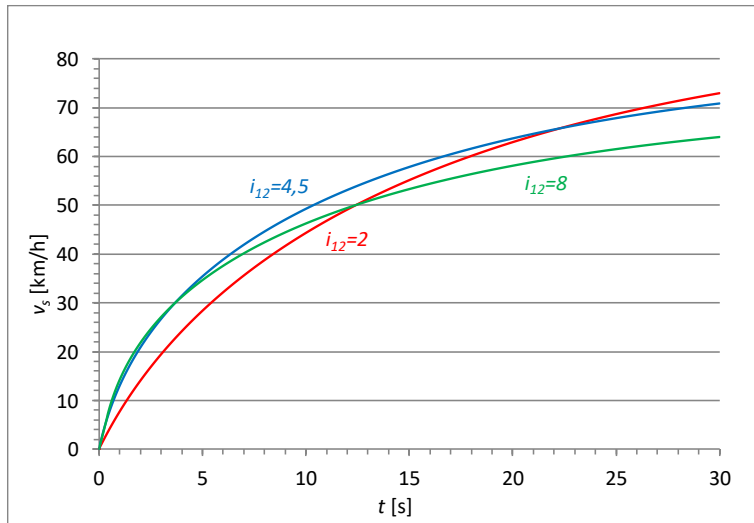
- Az első és hátsó tengelyekre ható menetirányú és arra merőleges terhelések (T_e, T_h, N_e, N_h)
- Gördülési ellenállási nyomatékok ($M_{görd_e}, M_{görd_h}$)
- Légellenállási erő nagysága ($F_{lég}$)
- Kerékcsúszás (ξ)
- A motoron átfolyó áram erőssége az SWDC motor esetén (I)
- A motor által leadott nyomaték és szögsebessége (M_{motor}, ω_r)

A továbbiakban bemutatok néhány példát azokra a menetdinamikai függvényekre, amelyeket a járműdinamikai szimulációs program számol a 2. fejezetben bemutatott prototípus versenyautó szimulációja esetén. A bemutatott példák esetében az SWDC motort alkalmaztuk a járműben. A 31. ábra a talaj által a hátsó kerekekre kifejtett menetirányú erőt (vonóerőt, F_{th}) szemlélteti a menetidő függvényében különböző, az erőátviteli rendszerben (lánchajtásban) alkalmazott áttételek esetén. Az áttételen kívül a bemenő adatok mindhárom esetben megegyeznek. A legnagyobb, 8-as áttétel esetében a kerék az induláskor megcsúszik (kipörög), majd ahogy csúszva gördülésből átmegy tiszta gördülésbe, a vonóerő hirtelen megnő. Ez a magyarázata a vonóerő-idő függvényen megjelenő éles csúcsnak. Látható, hogy a 2-es áttétel alkalmazása esetén, a gyorsítás kezdeti szakaszában, lényegesen kisebb a vonóerő, mint a másik két áttétel alkalmazása esetén. [9]



31. ábra A vonóerő a hátsó kerekeken a menetidő függvényében [9]

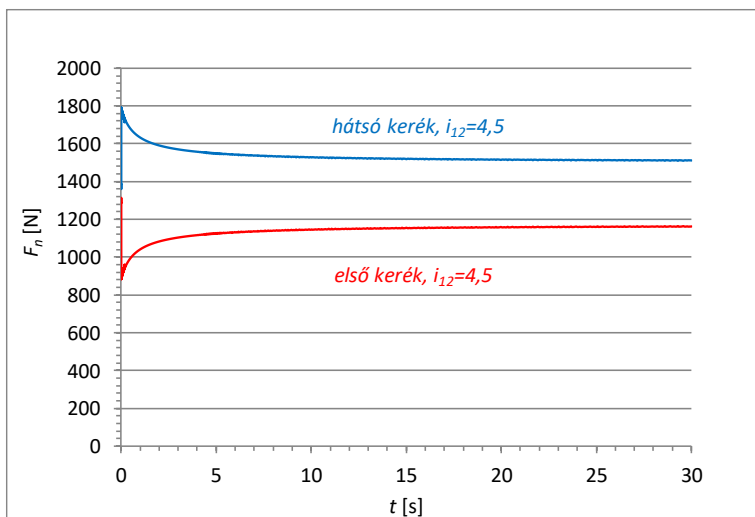
A 32. ábrán a jármű sebesség-idő függvényei láthatóak. A bemenő adatok ugyanazok, mint a 31. ábra esetén.



32. ábra A jármű sebesség-idő függvénye különböző láncáttelek mellett [9]

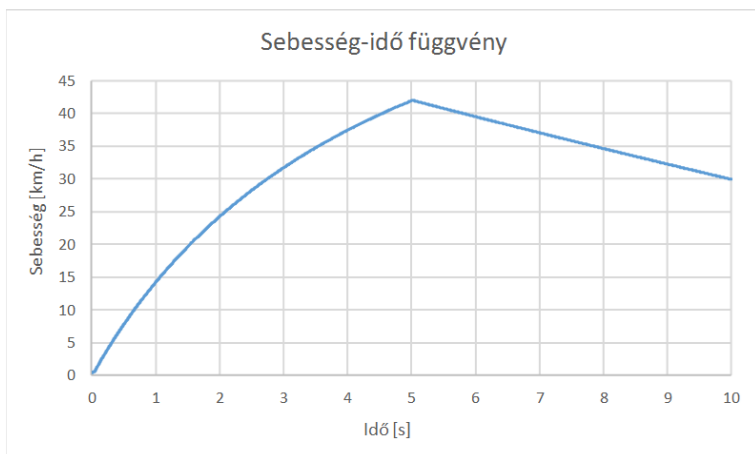
Az ábrán látható, hogy az első öt másodpercben a 4,5 és 8-as áttételek alkalmazása esetén a sebesség-idő függvények átfednek, azaz a 8-as áttétel alkalmazása a 4,5-es áttételhez képest – a kerék megcsúszása (kipörgése) miatt – már nem eredményez számottevő többlet gyorsulást. A 2-es áttétel alkalmazása az első tíz másodpercben lényegesen alacsonyabb sebességet eredményez, mint a másik két áttétel alkalmazása, viszont az elérhető végsebesség nagyobb.

A 33. ábra a talaj által az első és hátsó kerekekre kifejtett nyomóerőt szemlélteti a menetidő függvényében. Az ábrán látható, hogy az indulást követően a hátsó kerekekre ható nyomóerő hirtelen megnő, majd a jármű gyorsulásának csökkenésével csökken, majd beáll egy állandó értékre, amikor a jármű eléri a végsebességét. Az első kerekek esetében pontosan a fordított jelenség figyelhető meg, ami megfelel a gyakorlati tapasztalatoknak.



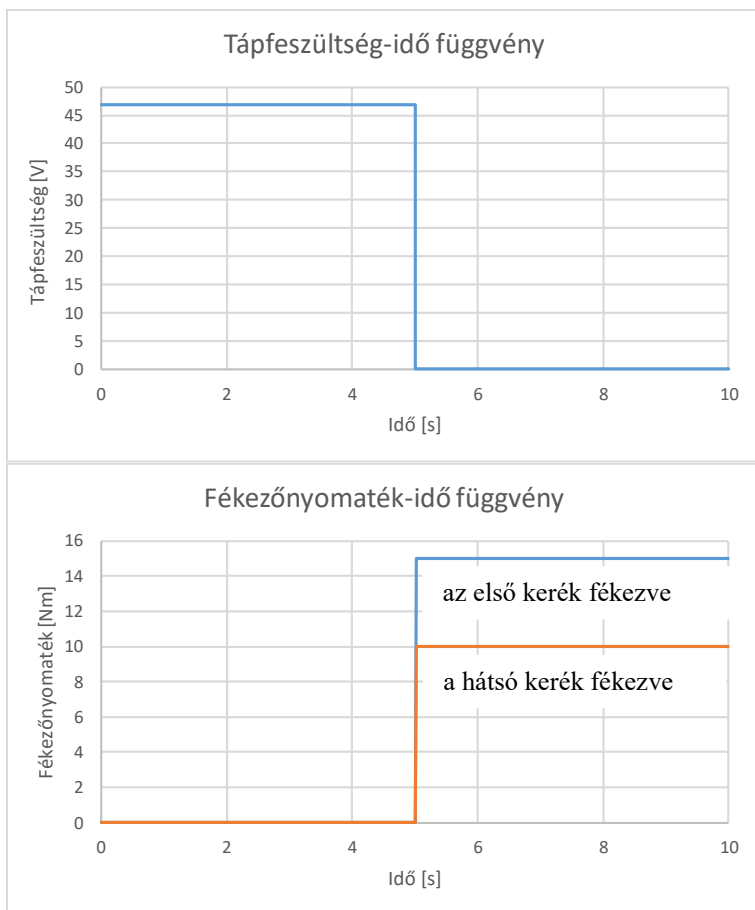
33. ábra A talaj által az első és hátsó kerekre kifejtett nyomóerő a menetidő függvényében [9]

A 34. ábra a jármű sebesség-idő függvényét mutatja 5 másodpercig tartó gyorsítás, majd azt követő fékezés esetén.



34. ábra A jármű sebesség-idő függvénye gyorsítás majd fékezés során [9]

A gyorsítási szakaszon állandó 48 [V] értékű feszültséget alkalmaztunk a motoron, a lassítási szakaszon pedig 15 és 10 [Nm] fékezőnyomatékokat az első és hátsó kerek esetén. Az alkalmazott tápfeszültséget és fékező nyomatékokat a 35. ábra mutatja a menetidő függvényében.



35. ábra Az alkalmazott tápfeszültség és fékezőnyomatékok a menetidő függvényében [9]

A továbbiakban azt vizsgálom, hogy a szimulációs program által generált függvényértékek bizonytalansága (hibája) hogyan függ a bemenő adatok bizonytalanságaitól (hibáitól). Az itt bemutatott példában a versenyautó álló helyzetből 40 [km/h] sebességre gyorsul, és megadom a szimulált sebességek bizonytalanságát a bemenő adatok bizonytalanságainak függvényében. Kétféle vizsgálatot végzek el: az elsőben megbecsülöm az egyes bemenő adatok bizonytalanságát, majd a Gauss-féle hibaterjedési törvénnyel (77) [49] kiszámítom, hogy ezek a bizonytalanságok milyen bizonytalanságot okoznak a szimulált sebességekben.

$$\Delta v_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial v}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \Delta x_i^2} \quad (77)$$

A (77) összefüggésben Δx_i és Δv_s az x_i bemenő adat és a v_s szimulált járműsebesség bizonytalanságai. A $\frac{\partial v}{\partial x_i}$ parciális deriváltat az x_i adat 5% relatív bizonytalanságokhoz tartozó Δv_i és Δx_i bizonytalanságok hányadosával közelítettem.

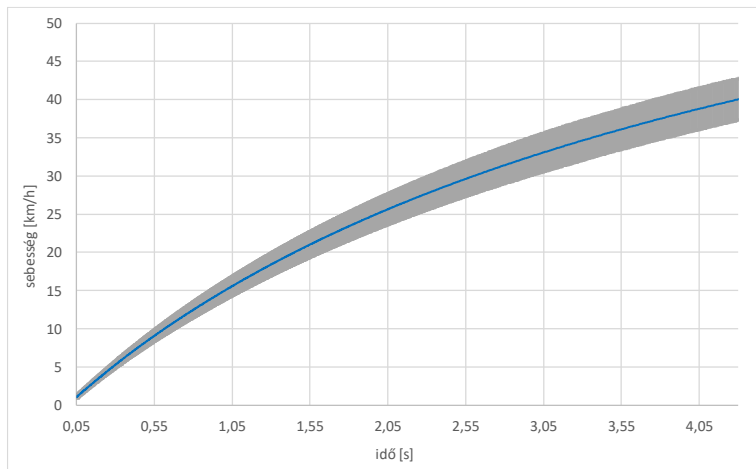
A 4. táblázatban az egyes bemenő adatok becsült bizonytalanságait tüntettem fel.

4. táblázat Az egyes bemenő adatok becsült bizonytalanságai

l_e [m]	l_h [m]	w [m]	m_0 [kg]	m_e [kg]	m_h [kg]
$0,735 \pm 0,007$	$0,615 \pm 0,030$	$0,240 \pm 0,012$	$247,7 \pm 0,500$	$8,000 \pm 0,010$	$16,90 \pm 0,017$
J_e [kg·m ²]	J_h [kg·m ²]	J_r [kg·m ²]	i_{12}	η	R
$0,182 \pm 0,010$	$0,230 \pm 0,011$	$0,020 \pm 0,001$	$4,000 \pm 0,004$	$0,970 \pm 0,020$	$0,220 \pm 0,011$
C	A [m ²]	$\mu_{görd_e}$	$\mu_{görd_h}$	μ_{csap}	d [m]
$0,300 \pm 0,060$	$1,000 \pm 0,100$	$0,014 \pm 0,001$	$0,018 \pm 0,002$	$0,002 \pm 0,0002$	$0,025 \pm 0,00002$
U [V]	U_{kefe} [V]	R_r [Ω]	R_s [Ω]	$R_{vezeték}$ [Ω]	$M_{sűrű}$ [Nm]
$48,00 \pm 2,400$	$1,200 \pm 0,120$	$0,01 \pm 0,0001$	$0,016 \pm 0,0002$	$0,006 \pm 0,0001$	$0,600 \pm 0,030$
ρ_{tev} [kg/m ³]	L_{sr} [H]	L_s [H]	L_r [H]	μ_s és μ_c	
$1,200 \pm 0,024$	$0,00120 \pm 0,00012$	$0,000340 \pm 0,000034$	$0,00010 \pm 0,00001$	$0,90 \pm 0,09$ és $0,74 \pm 0,074$	

A becslést az alapján végeztem, hogy a gyakorlatban milyen bizonytalansággal tudjuk megadni (pl. mérni) az egyes adatokat.

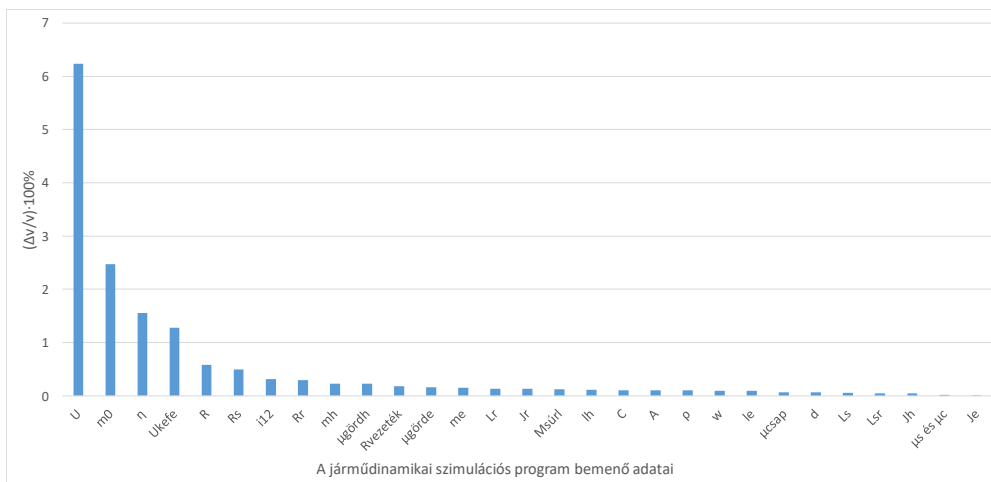
A szimulált sebességeket és azok bizonytalanságait a 36. ábra szemlélteti a 4. táblázatban szereplő bemenő adatok és bizonytalanságok esetén.



36. ábra Szimulált sebességek és bizonytalanságaik

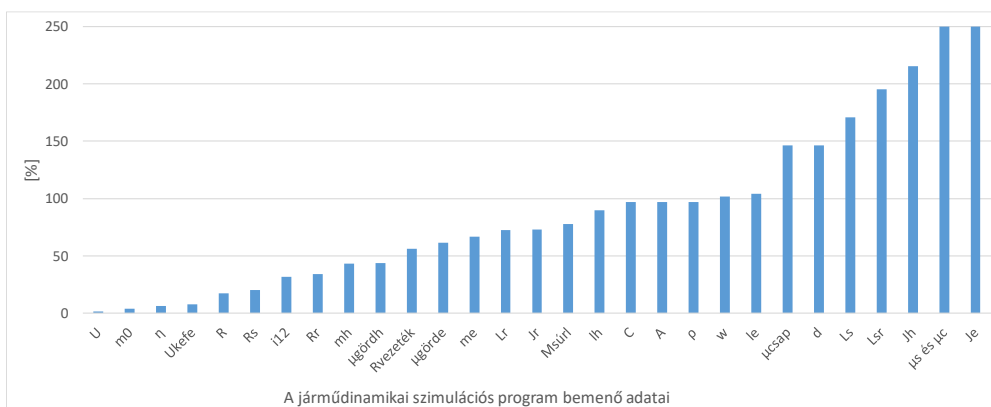
A számítások eredményei alapján megállapítható, hogy a szimulált sebességek relatív bizonytalanságai 5-9% között változnak a vizsgált 1-40 [km/h] sebességtartományban.

A második vizsgálatnál kiszámoltam, hogy az egyes bemenő adatok 5% relatív bizonytalansága milyen bizonytalanságot okoz a maximális (40 [km/h]) sebesség értékében. Az eredményeket a 37. ábra szemlélteti.



37. ábra Az egyes paraméterek 5%-os bizonytalanságai által a szimulált járműsebességben okozott relatív százalékos bizonytalanságok a maximális 40 [km/h] sebességnél

A 38. ábrán megadtam az egyes bemenő adatok azon relatív százalékos bizonytalanságait, amelyek a maximális 40 [km/h] járműsebességben 2% relatív bizonytalanságot okoznak.



38. ábra A maximális (40 [km/h]) járműsebességben okozott 2%-os bizonytalansághoz tartozó relatív százalékos bizonytalanságok az egyes bemenő adatok esetében

Könnyen belátható, hogyha a jármű sebességét ~10% alatti bizonytalansággal szeretnénk szimulálni, akkor az egyes bemenő adatok által okozott bizonytalanságoknak kisebbnek kell lennie, mint 2%, feltéve, hogy az okozott bizonytalanságok egymással egyenlőek. A 38. ábra alapján látható, hogy például az akkumulátor kapocsfeszültségének (U) és a jármű tömegének (m_0) 1,6% és 4% bizonytalansága, ugyanúgy 2% bizonytalanságot okoz a szimulált járműsebességben, mint a forgórész elektromos ellenállásának (R_r) 34% bizonytalansága. Ez a gyakorlat szempontjából azt jelenti, hogy az U és m_0 értékét lényegesen pontosabban kell ismernünk, mint az R_r értékét. Természetesen, ha lehetőségünk van rá, célszerű az

összes adatot a lehető legpontosabban megadni, de ha ez, például a forgórész elektromos ellenállása esetében csak 20-30% hibával lehetséges, az nem okoz majd túl nagy hibát a szimulált járműsebességben.

A vizsgált példa esetében elmondható, hogy célszerű a bemenő adatokat a 38. ábrán megadott, vagy az alatti bizonytalanságokkal megadni. Ez az akkumulátor kapcsolófeszültsége (U) esetén ~2%, vagy az alatti bizonytalanságot jelent, amihez szükség lehet az akkumulátor részletesebb dinamikai modellezésére [50], [51]. A járműtömeg (m_0) esetében ~4%, vagy az alatti bizonytalanság szükséges, de mivel bármely tömeg (m_0 , m_e és m_h) 1% alatti bizonytalansággal egyszerűen mérhető, ez nem jelent problémát. A lánchajtás hatásfokát (η) célszerű ~7% alatti bizonytalansággal ismerni, de a szakirodalom alapján az jellemzően ~2%, vagy az alatti bizonytalansággal ismert [52]. A kefefeszültség (U_{kefe}) esetén ~8% alatti bizonytalanság szükséges, ehhez már célszerű a kefefeszültség értékét kimérni a motoron átfolyó áramerősség függvényében (lásd 5.2.1 fejezet). A motor tekercseinek elektromos ellenállását (R_r és R_s) ajánlott ~20%, vagy az alatti bizonytalansággal megadni, de tekintve, hogy azok 2% alatti bizonytalansággal mérhetőek (lásd 5.2.1 fejezet), ez nem jelent problémát. A keréksugár (R) és a láncátétel (i_{12}) esetében szükséges ~20%, vagy az alatti bizonytalanság szintén egyszerűen biztosítható. A gördülési ellenállási tényezőket ($\mu_{görd_e}$ és $\mu_{görd_h}$) célszerű ~40% alatti bizonytalansággal ismerni, ami mérés útján, vagy szakirodalmi forrásokból vett becslült értékek felhasználásával egyaránt megoldható. Az adott példa esetében a motor L_r , J_r és $M_{súrl}$ jellemzőit elegendő ~70% alatti, míg az L_s és L_{sr} jellemzőket ~170% alatti bizonytalansággal ismerni. Itt meg kell jegyezni, hogyha a motorszimulációs modult önmagában szeretnénk hitelesíteni, akkor a fenti adatok jóval pontosabb ismerete szükséges, így katalógusadatok hiányában mérés útján kell azokat meghatározni (lásd 5.2 fejezet). Egy másik példa (versenyfeladat) esetében szintén szükség lehet a fenti adatok lényegesen pontosabb ismeretére. A többi bemenő adat esetében becslült értékeket nyugodtan használhatunk, bizonyos paramétereket (pl. μ_{csap}) akár ki is vehetünk a bemenő adatok közül, ez nem fog számottevő hibát okozni a szimulált sebességben.

Általánosan elmondható, hogy attól függően, hogy mi a versenyfeladat más és más paraméterek lehetnek azok, amelyeket pontosan kell ismerni. Tehát egy másik versenyfeladat esetén a 37. és 38. ábrán ugyanazon bemenő adat esetében teljesen más százalékos értékek szerepelhetnek.

Fontos kihangsúlyozni, hogy azon bemenő adatok kiválasztása előtt, amelyekre egy adott versenyfeladat esetében optimalizálni szeretnénk, szintén ajánlott elkészíteni, és elemezni a 37. és 38. ábrán szereplő diagrammokat. Ennek oka az, hogy az elemzés

során kiderülhet, hogy a vizsgált adat változtatása olyan kis mértékben változtatja a szimulált függvény értékét, hogy nem értemes rá elvégezni az optimalizációt.

Mint azt majd a 6. fejezetben bemutatom, felhasználva a szimulációs program által generált menetdinamikai függvényeket, egy adott járműdinamikai célhoz (versenyfeladathoz) meghatározhatók a jármű optimális műszaki jellemzői (adatai). Azaz a műszaki adatok azon értékei, amellyel egy adott járműdinamikai cél (versenyfeladat) a legjobb eredménnyel teljesíthető. Meghatározható például egy 200 méteres gyorsulási verseny esetén az az áttétel, amellyel a legrövidebb idő alatt teljesíthető a versenytáv.

5 A SZIMULÁCIÓS PROGRAM BEMENŐ ADATAINAK KÍSÉRLETI MEGHATÁROZÁSA A SOROS GERJESZTÉSŰ EGYENÁRAMÚ MOTOR ESETÉBEN

5.1 A VIZGÁLATHOZ ALKALMAZOTT MÉRŐRENDSZER LEÍRÁSA

Ahogy a korábbi fejezetekben láttuk, a különböző típusú elektromos motorok szimulációjához számos elektromágneses és dinamikai jellemző, mint bemenő adat, megadása szükséges. Ezeket, amennyiben más forrásból nem ismertek, kísérleti úton tudjuk meghatározni, amelyhez egy összetett mérőrendszer szükséges. A fenti igény kielégítésére a DE Műszaki Karának Gépelemek laboratóriumában felépítettünk egy egyedi, saját fejlesztésű mérőrendszert [21]. Az egyedi fejlesztés főleg azért volt fontos, hogy a mérőrendszer különböző típusú elektromos motorokhoz és mérésekhez rugalmasan illeszthető, módosítható legyen. A fenti mérőrendszer kifejlesztése és telepítése a kutatócsoportunk összehangolt munkájának az eredménye. Én az alábbi tervezési és kivitelezési munkafolyamatokban láttam el részfeladatokat: a tesztpad tervezése és kivitelezése, a motorok és különböző szenzorok (nyomaték-, fordulatszám- és hőmérsékletmérő) telepítése és hitelesítése, a kapcsolószekrény és vezérlőpult tervezése, a változtatható feszültségű és frekvenciájú váltakozó áramú energiaforrás tervezése és kivitelezése, a terhelő ellenállások telepítése. A mérőrendszerrel készült fényképet a 39. ábra mutatja.



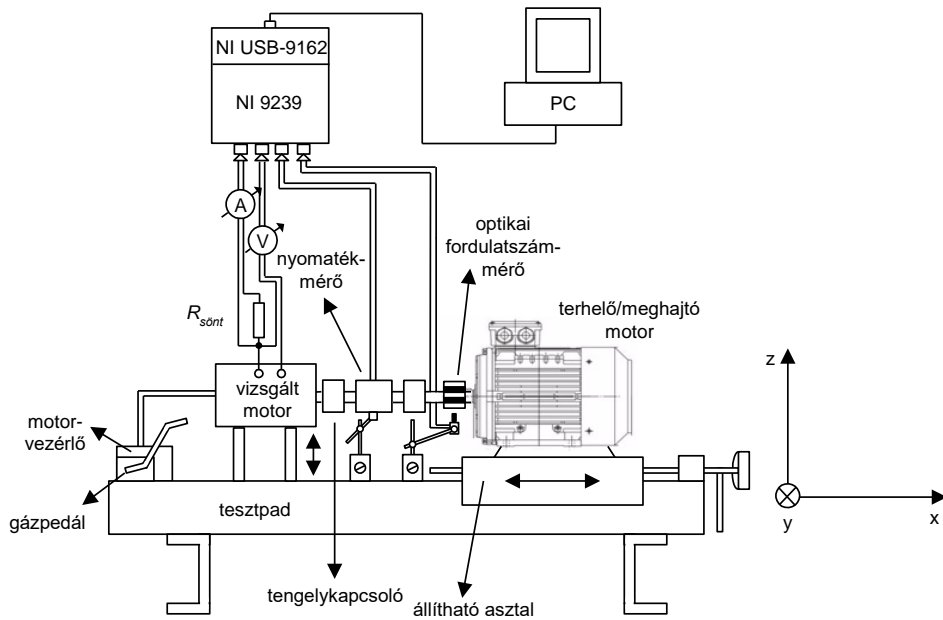
39. ábra Az elektromos motorok vizsgálatára kifejlesztett egyedi mérőrendszer [21]

A mérőrendszer három fő egységből épül fel, amelyek a következők:

- 1) Motor tesztpad, amely magában foglalja a vizsgált és terhelő/meghajtó motorokat, a tengelykapcsolókat, valamint a teljes adatgyűjtő rendszert.
 - 2) Vezérlőpult és kapcsolószekrény, beleértve a nagy teljesítményű terhelő ellenállást.
 - 3) Változtatható feszültségű és frekvenciájú váltakozó áramú energiaforrás.
- A fenti szerkezeti egységek leírását az 5.1.1, 5.1.2 és 5.1.3 fejezetekben részletezem.

5.1.1 MOTOR TESZTPAD

A tesztpadot a 40. és 41. ábrák szemléltetik.



40. ábra A tesztpad felépítésének sematikus rajza [21]



41. ábra Fénykép a tesztpadról [21]

A vizsgált és terhelő/meghajtó motorokat egy, a padlóra felfogatott, merev, hegesztett alapkeretre erősítjük egyedileg gyártott rögzítő elemek segítségével. Peremes és talpas motorok rögzítése egyaránt lehetséges. Az egytengelyűség beállításához a terhelő/meghajtó motor tengelyirányban (x) valamint kismértékben arra merőlegesen (y irány) mozgatható. A z irányú beállítás a vizsgált motor mozgatásával történik. Az egytengelyűség pontos beállítása mérőóra, valamint lézeres egytengelyűség beállító eszköz alkalmazásával történik.

A terhelő/meghajtó motor egy 3 fázisú, 2,2 [kW] teljesítményű, aszinkron motor, amely kettős funkciójú:

- 1) 0-400 [V] szabályozható egyenfeszültséggel táplálva terhelő (fékező) motorként üzemel.
- 2) 0-400 [V] között szabályozható 50 [Hz] frekvenciájú, vagy 400 [V] feszültségű 0-50 [Hz] között szabályozható frekvenciájú váltófeszültséggel táplálva meghajtó motorként üzemel.

Meghajtó üzemmódban a frekvencia, ezáltal a fordulatszám szabályozására frekvenciaváltó szolgál, amíg a feszültség szabályozása toroid transzformátor alkalmazásával történik. A vizsgált motor külső motorral történő terhelése vagy meghajtása számos kísérleti vizsgálat esetében szükséges.

A vizsgált motor tetszőleges típusú elektromos motor lehet, amelyhez vezérlőegység és gázpedál is tartozhat, amelyeket szintén a merev alapkerethez rögzítünk.

5.1.1.1 ADATGYŰJTŐ RENDSZER

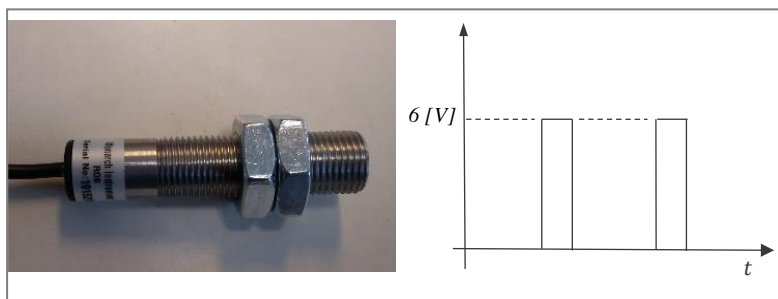
Az alkalmazott adatgyűjtő rendszer elemei a 40. ábrán láthatók, amelyek részletezve a következők:

- 1) Optikai LED szenzor (ROS-P, Monarch Instrument) a szögsebesség mérésére.
- 2) Forgótengelyes nyomatékmérő szenzor (HBM T22/200) a forgatónyomaték mérésére.
- 3) Sönt ellenállás a motor tekercsein átfolyó áramok erősségének széles tartományban történő pontos méréséhez.
- 4) NI 9239 négy csatornás analóg-digitál (AD) modul és NI USB-9162 USB adapter.
- 5) Saját fejlesztésű szoftver az adatgyűjtéshez, feldolgozáshoz és tároláshoz [53].

Az említett szenzorok a forgatónyomatékot, a szögsebességet és az áramerősséget feszültség jelekké alakítják, amelyeket betáplálunk az AD modulba, amely USB adapteren keresztül csatlakozik az asztali számítógéphez (PC).

A motor fordulatszámának mérése egy optikai LED szenzorral történik. Az eszköz által kibocsátott fénysugár visszaverődik a motor forgórészére ragasztott fóliacsíkról,

majd visszatér az eszközbe. A szenzor a visszatérő fényimpulzust érzékeli, és ráadja a tápfeszültséget (6 [V], DC) az eszköz kimenetére. Tehát ha a fénysugár a fóliacsíkra esik, akkor a kimeneti feszültség 6 [V], egyébként 0 [V]. Minél több fóliacsíkot helyezünk el a motor forgórészén, egymástól egyenlő távolságokban, annál jobb felbontással tudjuk mérni annak fordulatszámát. Egy fóliacsík felhelyezése esetén az eszközzel mérhető maximális fordulatszám 250.000 [RPM]. A 42. ábrán az optikai LED szenzort és annak kimeneti feszültségjeleit láthatjuk.



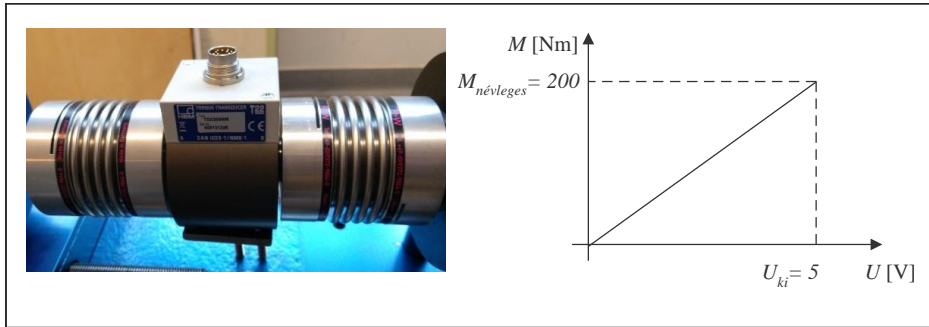
42. ábra Az optikai LED szenzor és a kimeneti feszültségjelei [21]

A fenti feszültségjeleket egy a kutatócsoportunk által, NI LabVIEW környezetben kifejlesztett programkód [53] megszámlolja, majd kiszámítja a forgórész szögsebességét az alábbi összefüggéssel:

$$\omega = \frac{2\pi}{\Delta t} \cdot \frac{N_{jel}}{N_{csík}} \quad (78)$$

ahol N_{jel} egy rövid, rögzített Δt időtartam alatt beérkező feszültségjelek, $N_{csík}$ pedig a forgórészen elhelyezett fóliacsíkok száma. A Δt időtartamot a vizsgált fordulatszám tartomány és az alkalmazott fóliacsíkok számát figyelembe véve célszerűen kell megválasztani.

A forgótengelyes nyomatékmérőt a hozzá tartozó tengelykapcsolókkal csatlakoztatjuk a vizsgált, valamint a terhelő/meghajtó motorokhoz. A nyomatékmérő mérési tartományát és a tengelykapcsolók maximális terhelhetőségét a mért forgatónyomaték várható maximális értékének megfelelően kell megválasztani. Az általunk alkalmazott forgótengelyes nyomatékmérővel maximálisan 200 [Nm] forgatónyomaték mérhető, az eszköz pontossági osztálya 0,5%. Jelenleg két különböző tengelykapcsoló pár áll rendelkezésünkre, 20 és 200 [Nm] maximális terhelhetőséggel. A nyomatékszenzor kimenő feszültségjele egyenesen arányos a mért forgatónyomatékkal, értéke 200 [Nm] esetén 5 [V]. A 43. ábra a forgótengelyes nyomatékmérőt, valamint annak kimenő feszültség-forgatónyomaték karakterisztikáját szemlélteti.



43. ábra A forgótengelyes nyomaték-mérő és annak kimenő feszültség-forgatónyomaték karakterisztikája [21]

A vizsgált motor tekercsein átfolyó áramok erősségének méréséhez sönt ellenállásokat használunk (44. ábra).



44. ábra Sönt ellenállások az áramerősség méréséhez [21]

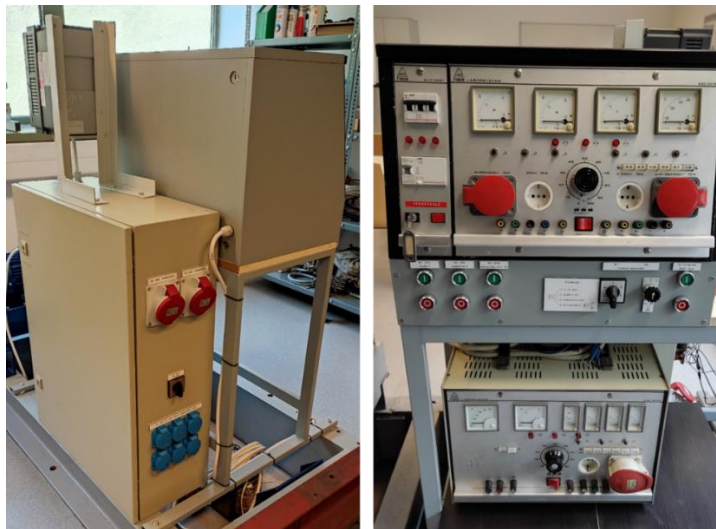
A jelenleg rendelkezésünkre álló két ellenálláson eső feszültség 60 és 75 [mV] 100 és 300 [A] névleges áramerősség esetén. A pontossági osztály mindkét ellenállás esetében 0,5. Azaz a két ellenállás alkalmazásával hitelesen mérhető maximális áramerősségek 100 és 300 [A].

A sönt ellenállásokon eső, valamint az optikai LED és nyomaték-mérő szenzorokból érkező feszültségjeleket az AD modulba tápláljuk, amelynek bemeneti feszültsége a 0-10 [V] tartományban változhat. Az említett modul analóg bemeneti csatornái egymástól elektronikusan el vannak választva, így a teljes rendszer védett a káros feszültségcsúcsoktól és a földhurkok által okozott mérési hibáktól. Amennyiben a mérendő feszültség nagyobb, mint 10 [V], akkor feszültségosztót alkalmazunk,

tipikusan 1:11 osztásarányal. A feszültségmodul maximális mintavételi frekvenciája és analóg bemeneti felbontása 50 [kHz] és 24 bit, amely a mi méréseink során felmerülő követelményeknek tökéletesen megfelel. A fenti modul egy USB adapteren keresztül csatlakozik a számítógéphez. A mért adatok valós időben történő megfigyelése, grafikus megjelenítése és adatbázisban történő tárolása egy a kutatócsoportunk által NI LabVIEW, JAVA SE és VBA környezetben kifejlesztett parancssoros programmal történik, amelyhez egy MySQL adatbázis is tartozik [53].

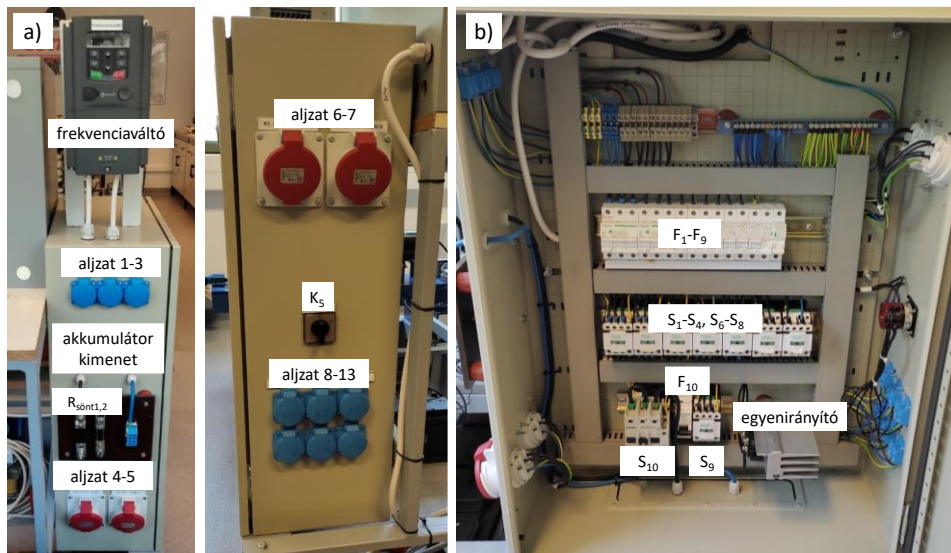
5.1.2 VEZÉRLŐPULT, KAPCSOLÓSZEKRENY ÉS TERHELŐ ELLENÁLLÁS

A mérőrendszer elektromos eszközeinek (vizsgált és terhelő/meghajtó motorok, frekvenciaváltók, szenzorok, akkumulátortöltők, stb.) működtetéséhez megfelelő energiaforrások szükségesek. Ezek biztosítására egy többfunkciós elektromos kapcsolószekrényt és vezérlőpultot fejlesztettünk ki. A berendezésről készült képek a 45. ábrán láthatók.



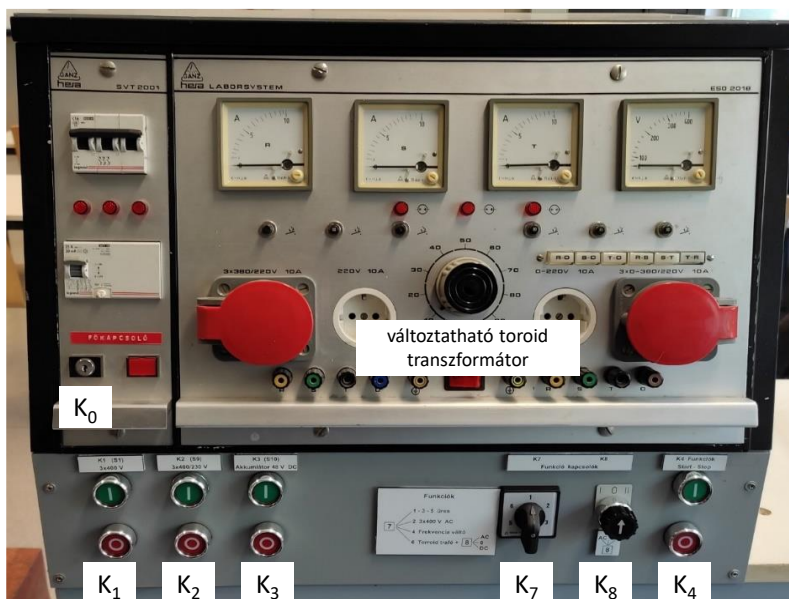
45. ábra Az elektromos kapcsolószekrény és vezérlőpult [21]

A 46. ábra a) és b) része a kapcsolószekrény külső és belső kialakítását mutatja. Az ábrán a könnyebb érthetőség kedvéért az egyes egységeket feliratoztuk.



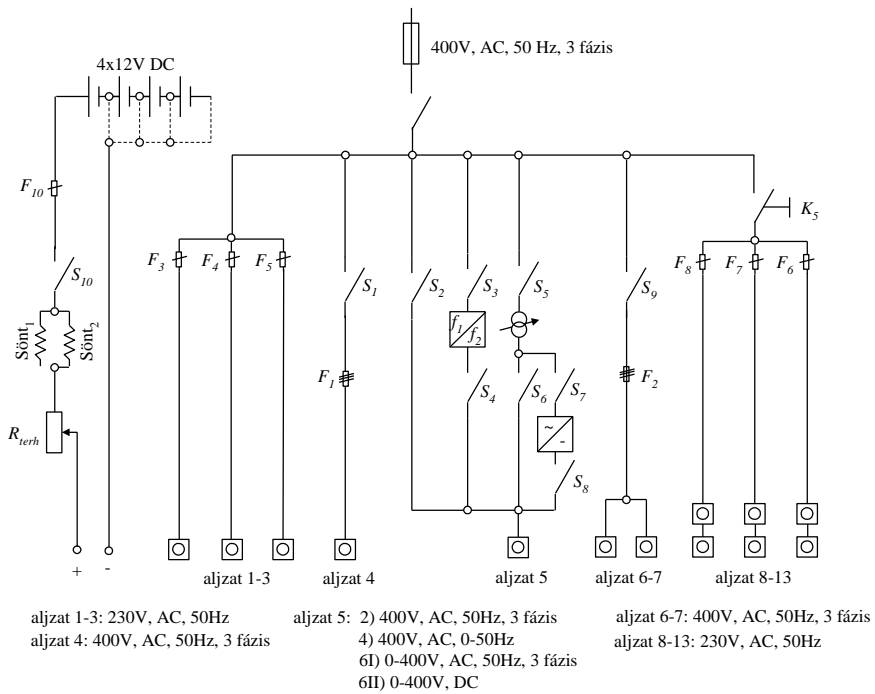
46. ábra A kapcsolószekrény külső és belső kialakítása [21]

A mágneskapcsolókat (S_1-S_4 , S_6-S_{10}), a biztosítékokat (F_1-F_{10}) és az egyenirányítót (háromfázisú, kétutas, hat ütemű) a kapcsolószekrényben helyezték el (46. ábra). A csatlakozó aljzatokat (aljzat 1-13, akkumulátor kimenet) valamint a sönt ellenállásokat ($R_{sönt1,2}$) a kapcsolószekrény külső falára rögzítették, a frekvenciaváltót a szekrény tetején helyezték el. Az S_5 jelzésű mágneskapcsoló a vezérlőpultban kapott helyet. A felhasználó a kapcsolószekrényt a vezérlőpultról (47. ábra) tudja működtetni.

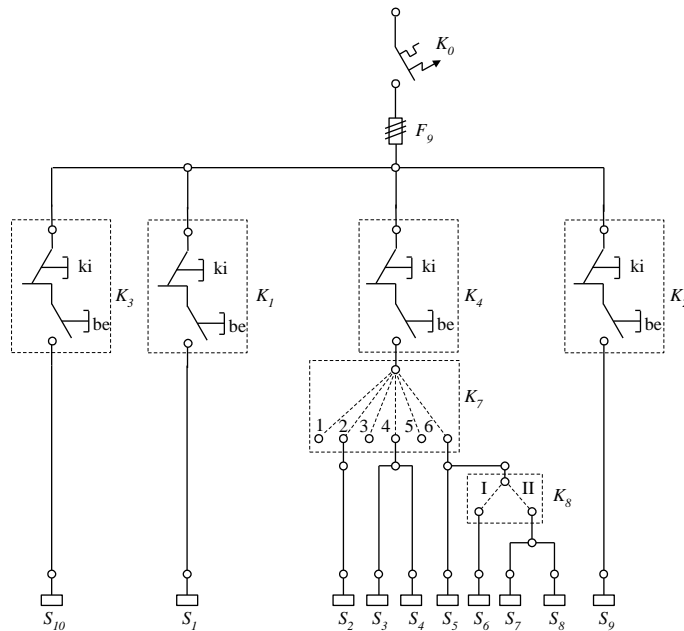


47. ábra A vezérlőpult [21]

A 48. és 49. ábra a kapcsolószekrény és vezérlőpult elektromos kapcsolási rajzait mutatja.



48. ábra Kapcsolási rajz – 1 [21]



49. ábra Kapcsolási rajz – 2 [21]

A 48. és 49. ábrán K_0 - K_5 és K_7 , K_8 jelöli a különböző kapcsolókat, R_{terh} a terhelő ellenállást. A kapcsolási rajz alapján az alábbi kombinációk adódnak:

1) Ha a K_0 kapcsoló zár, akkor az 1-3 csatlakozó aljzatokon 230 [V] feszültségű, 50 [Hz] frekvenciájú, egyfázisú váltakozó áram jelenik meg.

2) Ha a K_0 és K_5 kapcsolók zárnak, akkor a 8-13 csatlakozó aljzatokon 230 [V] feszültségű, 50 [Hz] frekvenciájú, egyfázisú váltakozó áram jelenik meg.

3) Ha a K_0 és K_1 kapcsolók zárnak, akkor a 4-es csatlakozó aljzaton 400 [V] feszültségű, 50 [Hz] frekvenciájú, háromfázisú váltakozó áram jelenik meg.

4) Ha a K_0 és K_2 kapcsolók zárnak, akkor a 6-os és 7-es csatlakozó aljzatokon 400 [V] feszültségű, 50 [Hz] frekvenciájú, háromfázisú váltakozó áram jelenik meg.

5) Ha a K_0 , K_4 és $K_{7/2}$ kapcsolók zárnak, akkor az 5-ös csatlakozó aljzaton 400 [V] feszültségű, 50 [Hz] frekvenciájú, háromfázisú váltakozó áram jelenik meg.

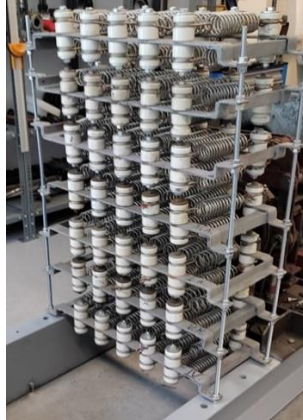
6) Ha a K_0 , K_4 és $K_{7/4}$ kapcsolók zárnak, akkor az 5-ös csatlakozó aljzaton 400 [V] feszültségű, 0-50 [Hz] tartományban változtatható frekvenciájú háromfázisú váltakozó áram jelenik meg. A frekvencia változtatása frekvenciaváltó alkalmazásával történik.

7) Ha a K_0 , K_4 , $K_{7/6}$ és $K_{8/I}$ kapcsolók zárnak, akkor az 5-ös csatlakozó aljzaton 0-400 [V] tartományban változtatható feszültségű, 50 [Hz] frekvenciájú, háromfázisú váltakozó áram jelenik meg. A feszültség változtatása toroid transzformátor alkalmazásával történik.

8) Ha a K_0 , K_4 , $K_{7/6}$ és $K_{8/II}$ kapcsolók zárnak, akkor az 5-ös csatlakozó aljzaton 0-400 [V] tartományban változtatható egyenfeszültség jelenik meg. A feszültség változtatása toroid transzformátor alkalmazásával történik. Az egyenfeszültséget ebben az esetben váltakozó feszültség egyenirányításával hozzuk létre.

9) Ha a K_0 és K_3 kapcsolók zárnak, akkor az akkumulátorokról tudunk egyenáramot biztosítani. Ehhez 4 db 12 [V]-os személygépkocsi akkumulátort használunk. A fenti egyenáram erősségét a terhelőellenállás értékének változtatásával tudjuk szabályozni.

A terhelőellenállás (50. ábra) egy nagyteljesítményű ellenállás, amely eredetileg egy villamos indítóellenállásaként szolgált, és a Debreceni Közlekedési Vállalattól (DKV) szereztük be.

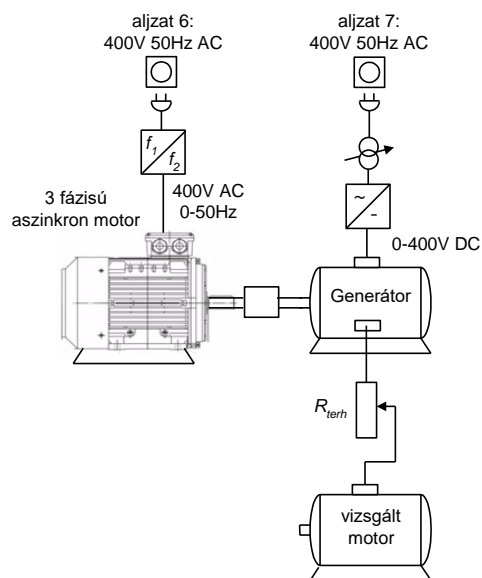


50. ábra A terhelő ellenállás (R_{terh}) [21]

A 6) és 7) kombinációt akkor használjuk, amikor az aszinkron motort meghajtó, míg a 8) kombinációt akkor, amikor fékező motorként üzemeltetjük. Emellett a 7), 8) és 9) kombinációk tápfeszültséget biztosítanak a vizsgált, különböző típusú, egyen vagy váltakozó áramú motorokhoz. A 9) kombinációt olyan vizsgálatok esetében is alkalmazhatjuk ahol fontos a széles tartományban változtatható erősségű, tiszta egyenáram. A fenti vizsgálatokra példa, a motorokban lévő tekercsek elektromos ellenállásának vagy kölcsönös statikus induktitásának mérése (lásd 5.2.1 fejezet) [17].

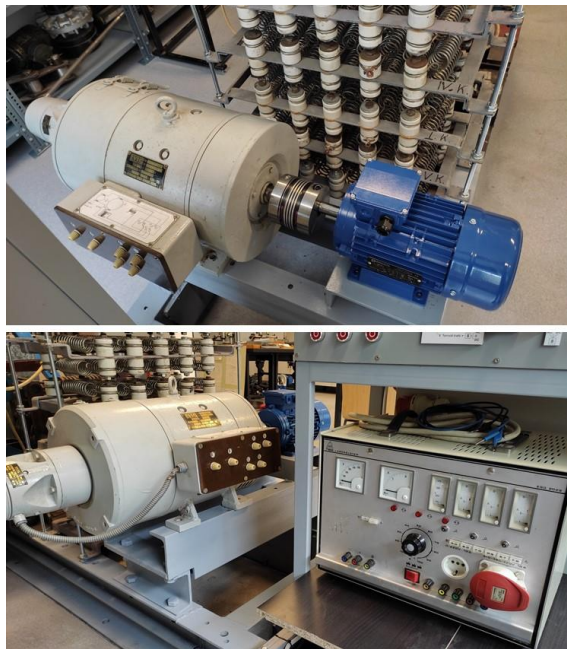
5.1.3 VÁLTOZTATHATÓ FESZÜLTSGŰ ÉS FREKVENCIAJÚ VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ ENERGIAFORRÁS

Az 51. ábra az energiaforrás sematikus rajzát mutatja.



51. ábra Az energiaforrás sematikus rajza [21]

Az energiaforrás a kimenetén tisztán szinuszos, változtatható erősségű és frekvenciájú (5-50 [Hz]) háromfázisú váltakozó áramot biztosít. Ennek előállítására egy külső gerjesztésű generátort használunk, amelynek a gerjesztő tekercseire (állórészére) változtatható erősségű egyenfeszültséget kapcsolunk, meghajtásáról pedig egy háromfázisú aszinkron motor gondoskodik, amely egy frekvenciaváltóról kapja a 0-50 [Hz] tartományban változtatható frekvenciájú tápfeszültséget. Ezáltal az energiaforrás kimeneti frekvenciája megegyezik a frekvenciaváltón beállított értékkel, kimeneti feszültségének nagyságát a generátor gerjesztő tekercseire kapcsolt egyenáram erősségével tudjuk szabályozni. Az energiaforrás fontos szerepet játszik az elektromos motorokban található tekercsek dinamikus öninduktívitásának mérésénél. Meg kell jegyezni, hogy a fenti méréseknél az energiaforrás háromfázisú kimenetéből csak egy fázist használunk. Az 52. ábra az energiaforrást mutatja.



52. ábra Az energiaforrás [21]

A dinamikus öninduktívások meghatározásához tartozó mérési eljárást az 5.2.1 fejezetben ismertetem.

5.2 A BEMENŐ ADATOK ÉS KARAKTERISZTIKÁK KÍSÉRLETI MEGHATÁROZÁSA A SOROS GERJESZTÉSŰ EGYENÁRAMÚ MOTOR ESETÉBEN

Ahogy korábban említettem, a megfelelő pontosságú járműdinamikai szimulációhoz ismernünk kell a jármű, azon belül a villanymotor mindazon műszaki jellemzőit,

amelyek a szimulációs program bemenő adataiként szolgálnak. A 2. fejezetben bemutatott prototípus versenyautóban alkalmazott SWDC motor esetében a fenti jellemzők a következők: az álló és a forgórész tekercseinek elektromos (ohmos) ellenállása, dinamikus öninduktivitása, a tekercsek kölcsönös statikus induktivitása, a forgórész tehetetlenségi, csapágyellenállási és kefesúrlódási nyomatékai, valamint a kefefeszültség értéke [17].

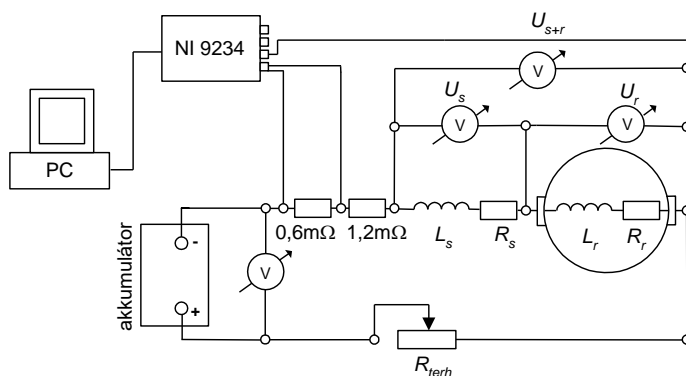
Ebben a fejezetben röviden bemutatom azokat a kísérleti eljárásokat, amelyekkel a fenti jellemzők meghatározhatók, valamint megadom a mért jellemzők értékeit (5.2.1 és 5.2.2 fejezetek) [17]. Ezek után bemutatom a motoron elvégzett hitelesítő méréseket (statikus és dinamikus tesztméréseket), valamint azok eredményét (5.3.1 és 5.3.2 fejezetek) [17], [15]. Ezekkel a mérésekkel a szimulációs program kimenő függvényeinek, valamint közvetett módon a mért motorjellemzőknek a pontosságát ellenőriztük.

Itt megjegyzem, hogy az 5.2.1 és 5.3.1 fejezetekben szereplő eredmények nem a doktori képzés alatt született saját eredményeim, de a kísérletek tervezésében, elvégzésében és a mért adatok kiértékelésében tevékenyen részt vettem. Az 5.3.2 fejezetben ismertetett vizsgálatokban szerepem meghatározó volt, így azok a téziseimben is szerepelnek.

5.2.1 AZ ELEKTROMÁGNESES JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA

5.2.1.1 ELEKTROMOS (OHMOS) ELLENÁLLÁS

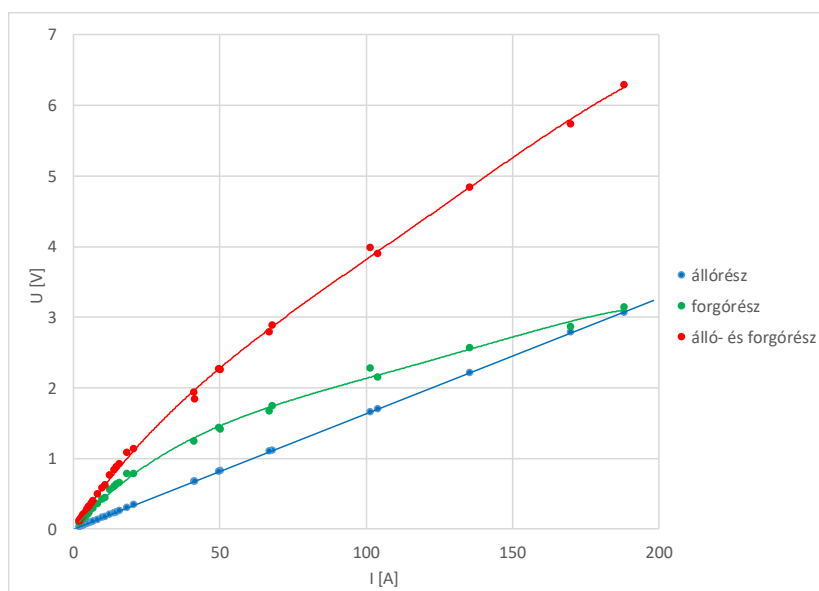
Az 53. ábra az elektromos ellenállások méréséhez alkalmazott mérőelrendezést mutatja.



53. ábra Mérőelrendezés az elektromos ellenállások kísérleti meghatározásához [17]

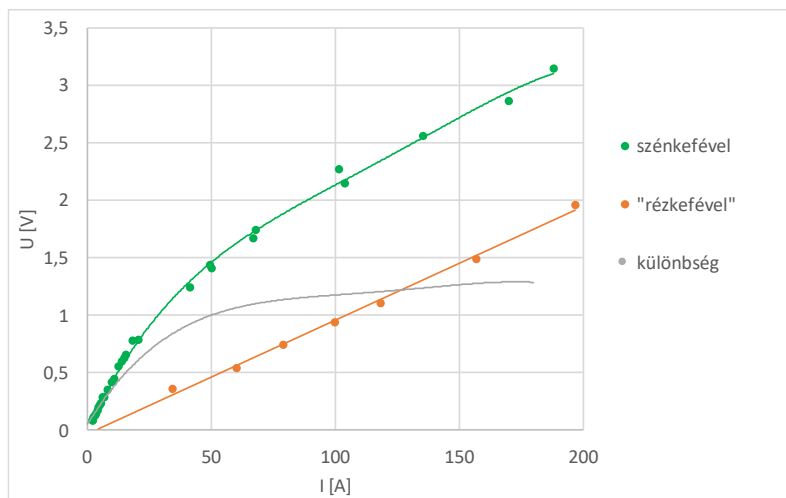
A mérések során a motor forgórészét egy tárcsafékkal rögzítettük, így kiküszöbölve az egyik tekercs által a másokban indukált feszültséget. A mérések során a szigorúan állandó erősségű egyenáramot egy 12 [V] névleges feszültségű gépkocsi akkumulátor

biztosította. A terhelőellenállás értékének (R_{terh}) változtatásával a tekercsen átfolyó áram erősségét szabályozhattuk, így a méréseket a 0-190 [A] tartományba eső számos különböző áramerősség esetén el tudtuk végezni. Az áramerősség mérését egy sönt ellenálláson (0,6 [mΩ]) eső feszültség mérésére vezettük vissza. A feszültségeket egy NI 9234 analóg-digitál (AD) modullal mértük, amelyet egy NI USB-9162 USB adapteren keresztül csatlakoztattunk a számítógéphez. (Ezeknél a korábbi méréseknél a mérőrendszerünkben az NI 9239 helyett az NI 9234 típusú eszközt alkalmaztuk.) Mértük külön az álló és külön a forgórészen, valamint a két sorba kapcsolt tekercsen, együttesen eső feszültséget. Az 54. ábra a két tekercsen külön-külön, valamint együttesen mért feszültségeket mutatja az átfolyó áram erősségének függvényében.



54. ábra A forgó és állórészen külön-külön, és együttesen eső feszültségek az átfolyó áram erősségének függvényében [54]

Az ábrán látható, hogy az állórész esetében fennáll az Ohm törvényének megfelelő lineáris kapcsolat, míg a forgórész esetében ez nem teljesül. Itt meg kell jegyezni, hogy a forgórészen eső feszültséget a szénkeféken keresztül mértük. A lineáris kapcsolattól való eltérést a szénkefék és a réz szegmensek között fellépő kontaktfeszültség okozza. Azért, hogy a fenti hatást kiküszöböljük, és tisztán az ohmos ellenállást mérjük, a méréseket szénkefék helyett „rézkefék” alkalmazásával is elvégeztük. Az 55. ábra a forgórészen – a szénkeféken és a „rézkeféken” keresztül – mért feszültségeket, valamint a két feszültség különbségeként adódó kefefeszültséget mutatja az átfolyó áram erősségének függvényében.

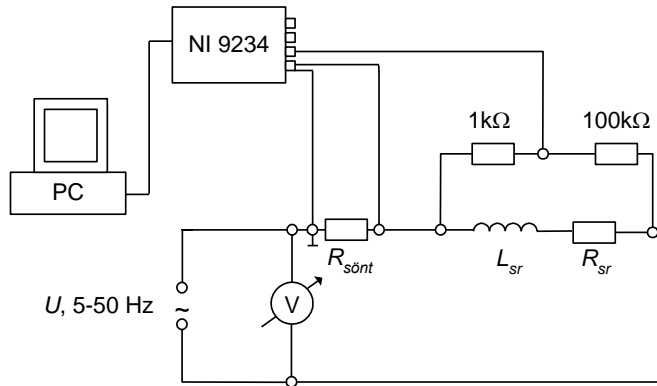


55. ábra A forgórészen mért feszültség a szénkeféken és a „rézkeféken” keresztül, valamint a két feszültség különbségeként adódó kefefeszültség az átfolyó áram erősségének függvényében [17]

Amint látható, a kefefeszültség értéke függ a forgórészen átfolyó áram erősségétől. Itt meg kell jegyezni, hogy a kefefeszültség szögsebességtől való függését nem vizsgáltuk, erre vonatkozó információ a [55] közleményben található. A szimulációk során a kefefeszültséget végül 1 [V] értékű konstans feszültségként vettük figyelembe. A tisztán ohmos ellenállásokon mért $U(I)$ karakterisztikákra végül a legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztettünk, amelynek meredeksége megadta az ohmos ellenállások értékét.

5.2.1.2 DINAMIKUS ÖNINDUKTIVITÁSOK

Az álló és forgórész dinamikus öninduktívitásainak mérése során a tekercseket az 5.3.1 fejezetben ismertetett berendezéssel gerjesztettük. A gerjesztést különböző frekvenciájú (5, 10, 50 [Hz]), az egyes frekvenciákon számos különböző csúcsértékű váltófeszültséggel elvégeztük. A tekercseken átfolyó áram erősségét ($I(t)$) minden esetben egy sönt ellenállás alkalmazásával mértük az idő függvényében. A tekercseken eső feszültség mérésénél 1:100 arányú feszültségosztót alkalmaztunk, hogy a feszültség értéke ne haladja meg az NI 9234 típusú eszköznél maximálisan megengedett 5 [V] bemeneti feszültség értékét. Az 56. ábra az alkalmazott mérőelrendezést mutatja.

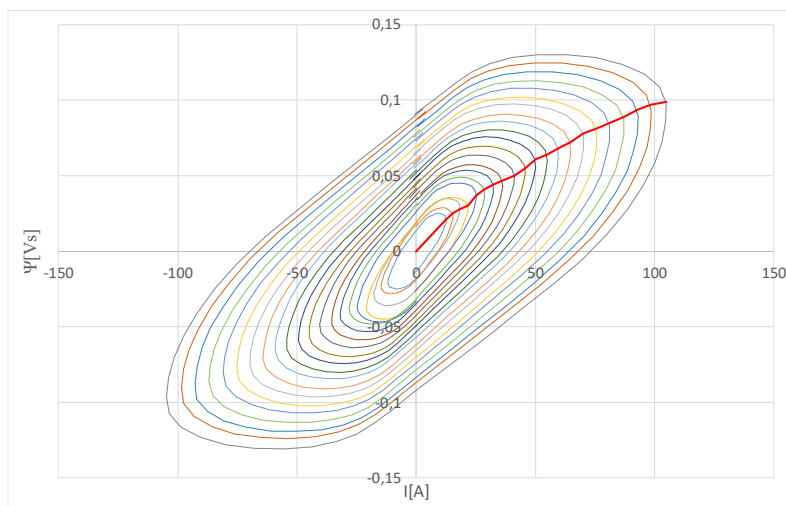


56. ábra Mérőelrendezés a dinamikus öninduktivitások meghatározásához [17]

A tekercsen eső feszültségből ($U(t)$) és a rajta átfolyó áram erősségéből ($I(t)$) a tekercs mágneses fluxusa az idő függvényében az alábbi összefüggéssel számítható [17]:

$$\psi(t) = \int_0^t (U(\tau) - I(\tau) \cdot R) d\tau + \psi(0) \quad (79)$$

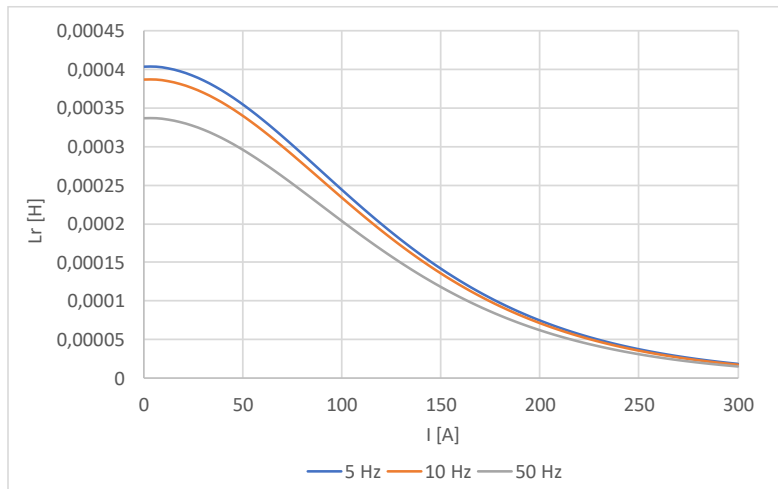
A fenti összefüggésben $U(\tau) - I(\tau) \cdot R$ a tekercsben önindukálódott feszültség. A számítást a MATLAB program Simulink moduljával végeztük el. A $\psi(t)$ és $I(t)$ függvények ismeretében a mágneses fluxus megadható az áramerősség függvényében ($\psi(I)$, 57. ábra).



57. ábra Az állórész mágneses fluxusa az átfolyó áramerősség függvényében [17]

Az 57. ábrán látható, hogy egy adott csúcsértékű váltakozó áram esetén a fluxust ábrázolva az áramerősség függvényében önmagába záródó görbét kapunk. A nagyobb csúcsértékű váltakozó áramhoz nagyobb kerületű görbe tartozik. Az áramcsúcsokhoz tartozó pontokat összekötve (piros vonal) megkapjuk a $\psi(I)$

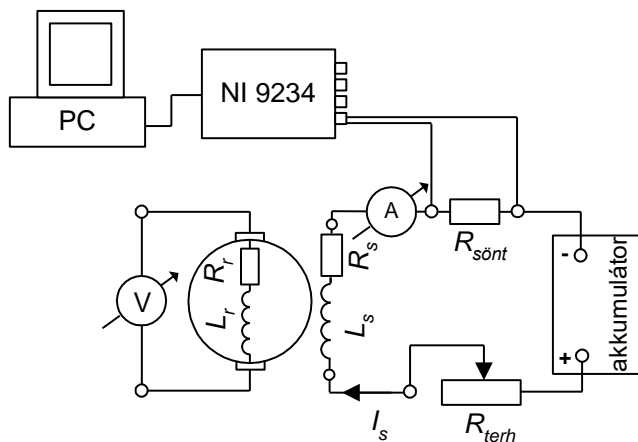
karakterisztikát. A $\psi_s(I)$ és $\psi_r(I)$ karakterisztikák I változó szerinti deriváltja megadja az $L_s(I)$ és $L_r(I)$ dinamikus öninduktivásokat az áramerősség függvényében. Az 58. ábra a forgórész dinamikus öninduktívását mutatja a tekercsen átfolyó áram erősségének függvényében különböző gerjesztő frekvenciák esetén. [17]



58. ábra A forgórész dinamikus öninduktívása az áramerősség függvényében különböző gerjesztő frekvenciák esetén [17]

5.2.1.3 KÖLCSÖNÖS STATIKUS INDUKTIVÁS

Az álló és a forgórész kölcsönös statikus inductívásának meghatározásához az alábbi mérőelrendezést alkalmaztuk:



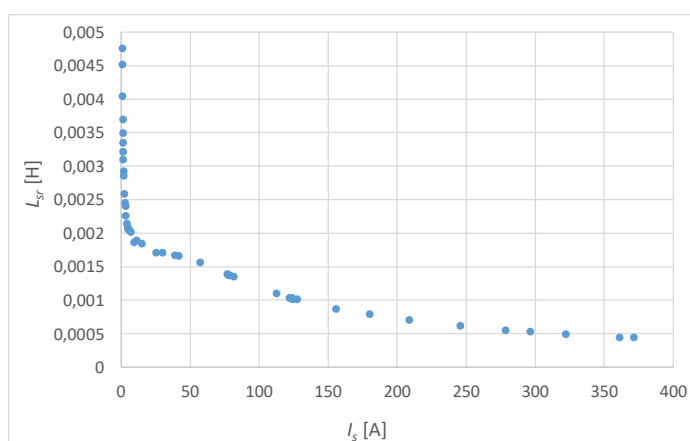
59. ábra Mérőelrendezés a kölcsönös statikus inductívás meghatározásához [17]

A mérésekhez a forgó és állórész közötti elektromos kapcsolatot megszüntettük, majd az állórészt egy 12 [V] névleges feszültségű gépkocsi akkumulátorral

egyenárammal tápláltuk. Ezt követően az állórész mágneses terében állandó szögsebességgel (ω) megforgattuk a forgórészt és mértük a benne indukálódott feszültséget (U_r). A forgórész megforgatásához a terhelő/meghajtó motorunkat (5.1.1 fejezet) alkalmaztuk. Az állórészen átfolyó áram erősségét (I_s) – különböző értékű terhelő ellenállások alkalmazásával (5.1.2 fejezet, 50. ábra) – a 0-380 [A] tartományban változtattuk. Az U_r , I_s és ω értékek ismeretében a kölcsönös statikus induktivitás az alábbi összefüggéssel számítható [17]:

$$L_{sr} = \frac{U_r}{\omega \cdot I_s} \quad (80)$$

A forgórész szögsebessége (ω) mindegyik mérés esetében ugyanaz a rögzített érték (400 [1/min]) volt. A 60. ábra a kölcsönös statikus induktivitást mutatja az I_s áramerősség függvényében.



60. ábra Kölcsönös statikus induktivitás a forgórészen átfolyó áramerősség függvényében [17]

Itt meg kell jegyezni, hogy kísérletileg ellenőriztük, hogy egy másik szögsebesség (800 [1/min]) alkalmazása esetén is ugyanez a függvény adódik.

Lineáris esetben, azaz, ha az állórész által a forgórészben keltett mágneses fluxus egyenesen arányos az állórészen átfolyó áram erősségével, akkor a 60. ábrán megadott kölcsönös statikus induktivitás fordítottan arányos a fenti áramerősséggel. A 60. ábrán, a nemlinearitás miatt, ehhez képest jelentős eltérés tapasztalunk.

5.2.2 A DINAMIKAI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA

A motor dinamikai jellemzői alatt a forgórész tehetetlenségi és ellenállási (súrlódási) nyomatékát értjük. Az ellenállási nyomaték magába foglalja a csapágyak, a szénkefék vagy csúszógyűrű súrlódásából, valamint a légellenállásból adódó nyomatékokat. A légellenállás egyaránt tartalmazza a forgó test és a ventilátorok légellenállását. Mivel az ellenállási nyomaték függ a forgórész szögsebességétől, így azt a motor teljes

fordulatszám tartományában meg kell határozni. A forgórész tehetetlenségi nyomatéka szerepelhet a motor katalógusában, de ezalól számos kivétel van. Az általunk vizsgált SWDC motor esetében például a gyártó nem közölt ilyen adatot, és emailben történő megkeresésünkre sem adta azt meg. Az említett dinamikai jellemzők nem csak azért fontosak, mert a különböző szoftverkörnyezetekben (Matlab/Simulink, NI LabVIEW Control Design and Simulation Module, Ansys-Maxwell RMXprt) kifejlesztett szimulációs programok bemenő adataiként szolgálnak, hanem azért is, mert a különböző elektromos motorok szabályozási eljárásainak tesztelésénél is fontos szerepük van [56].

Bár az említett dinamikai jellemzők kísérleti meghatározására számos eljárás ismert, megfelelő pontosságú mérésük általában jelentős kihívást jelent. A következő két fejezetben összefoglalom a szakirodalomból ismert eljárásokat, és a témához kapcsolódó saját vizsgálataimat és fejlesztéseimet, amelyek a tudományos téziseimben is szerepelnek.

5.2.2.1 A SZAKIRODALOMBÓL ISMERT ELJÁRÁSOK ÁTTEKINTÉSE A FORGÓRÉSZEK TEHETETLENSÉGI ÉS ELLENÁLLÁSI (SÚRLÓDÁSI) NYOMATÉKÁNAK MEGHATÁROZÁSÁHOZ

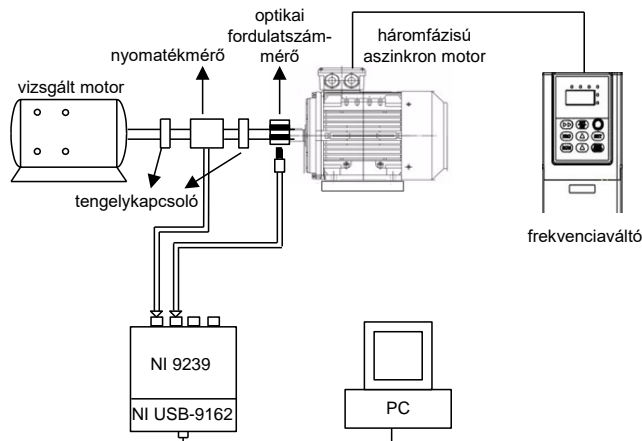
A fenti két mennyiség meghatározására alkalmazott módszerek alapvetően három csoportba sorolhatók:

- 1) Az ellenállási nyomaték-szögsebesség karakterisztika közvetlen mérése, majd a mért adatokat felhasználva, a tehetetlenségi nyomaték meghatározása.
- 2) A tehetetlenségi nyomaték kísérleti meghatározása, majd a mért adatot felhasználva, az ellenállási nyomaték-szögsebesség karakterisztika kísérleti meghatározása.
- 3) A tehetetlenségi és ellenállási nyomatékok szimultán meghatározása.

A továbbiakban, a szakirodalomban fellelhető források alapján, röviden bemutatom az említett csoportokba tartozó módszereket, részletezem az alkalmazott kísérleti elrendezéseket és körülményeket, és ahol elérhető, megadom a módszerekkel elérhető pontosságot.

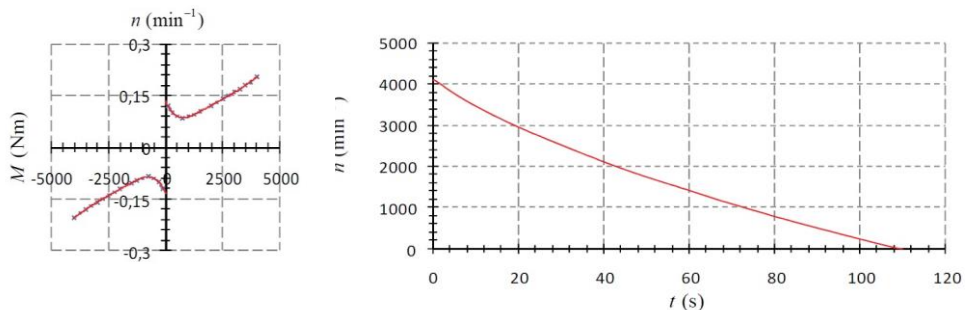
1. Az ellenállási nyomaték közvetlen mérésén alapuló módszerek

Ennél a módszernél a forgórész ellenállási (súrlódási) nyomatékát közvetlenül mérjük a szögsebesség függvényében. Ez leggyakrabban egy forgótengelyes nyomatékmérő alkalmazásával kivitelezhető. A 61. ábra egy tipikus mérőelrendezést mutat a fenti célra.



61. ábra Tipikus mérőelrendezés a forgórész ellenállási nyomatékának méréséhez

A mérések során a vizsgált motor forgórészét egy másik motor (pl. háromfázisú aszinkronmotor) segítségével különböző fordulatszámokon megforgatjuk, és az egyes állandó fordulatszámokon, egy forgótengelyes nyomatékmérő alkalmazásával, mérjük a vizsgált motorban fellépő ellenállási (súrlódási) nyomatékot. Az ellenállási nyomaték mérését követően a forgórész tehetetlenségi nyomatéka valamilyen független eljárással meghatározható. A különböző eljárások közül talán a legegyszerűbb az, amely a motoron elvégzett kifutási kísérleten alapul. Az [24] közleményben a fenti módszert alkalmazták egy SWDC motor dinamikai jellemzőinek meghatározására. A kísérletileg meghatározott ellenállási nyomaték-fordulatszám karakterisztikát, valamint az ezt követően elvégzett kifutási kísérlet eredményeként kapott fordulatszám-idő függvényt a 62. ábra mutatja.



62. ábra Egy SWDC motorra kísérletileg meghatározott ellenállási nyomaték-fordulatszám karakterisztika, valamint a kifutási kísérlet eredményeként nyert fordulatszám-idő függvény [24]

A fordulatszám-idő függvényből meghatározható a szögsebesség-idő függvény, ez utóbbiból pedig deriválással a forgórész szöggyorsulása (ε) az idő függvényében. A szöggyorsulás-szögsebesség ($\varepsilon(\omega)$), valamint az ellenállási nyomaték-szögsebesség

($M_{súrl}(\omega)$) karakterisztikákból a tehetetlenségi nyomaték a különböző szögsebességeken az alábbi összefüggéssel számolható:

$$J_r(\omega) = \frac{M_{súrl}(\omega)}{\varepsilon(\omega)} \quad (81)$$

Helyesen kivitelezett mérések esetén a $J_r(\omega)$ függvény, széles fordulatszám tartományban, jó közelítéssel állandó.

A [24] közleményben a tehetetlenségi nyomatéokra kapott érték, valamint az ellenállási nyomatékok hibái nincsenek megadva, emellett a módszerrel elérhető pontosságra sincs közölt adat.

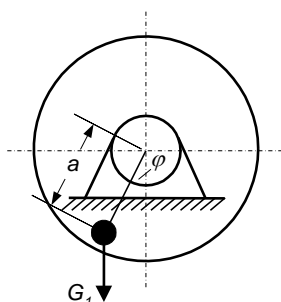
Itt fontos megjegyezni, hogy az ellenállási nyomatékot megfelelő pontossággal mérni csak olyan nyomatékmérő alkalmazásával lehet, amelynek alacsony a névleges nyomatéka. A fenti célra alkalmas, a kereskedelmi forgalomban kapható forgótengelyes nyomatékmérőre vonatkozó tipikus értékek: névleges nyomaték: 0,5 [Nm], pontossági osztály: 0,5%. Mivel az elektromos motorok ellenállási nyomatéka sok esetben 0,1 [Nm] vagy az alatti, így önmagában a nyomatékmérő alkalmazásából adódó relatív hiba 2,5% vagy a feletti. Figyelembe véve a mérések pontosságát befolyásoló egyéb tényezőket, a fenti hiba ennél jelentősen nagyobb lehet. A forgórész tehetetlenségi nyomatékának meghatározása esetén a fenti hiba mellett még figyelembe kell venni a kifutási kísérletekből adódó szöggyorsulások bizonytalanságait, így a tehetetlenségi nyomaték meghatározásának becsült hibája 4% vagy a feletti.

2. A tehetetlenségi nyomaték kísérleti meghatározásán alapuló módszerek

Ennél az eljárásnál először a forgórész tehetetlenségi nyomatékát határozzuk meg, majd felhasználva a kísérleti úton nyert értékeket, meghatározzuk az ellenállási (súrlódási) nyomatékot a szögsebesség függvényében. Az ellenállási nyomaték meghatározása különböző eljárásokkal történhet, de a legegyszerűbb módja a motoron elvégzett kifutási kísérleten alapul. A fenti kísérlet eredményeként kapott szögsebesség-idő függvényből meghatározhatjuk a forgórész szöggyorsulását a szögsebesség függvényében. Ezt követően a fenti függvényt megszorozva a korábban kísérleti úton meghatározott tehetetlenségi nyomatékkal, megkapjuk a motor ellenállási nyomatékát a szögsebesség függvényében ((81) egyenlet).

A [57] közlemény áttekinti azokat a kísérleti eljárásokat, amelyekkel egy merev test tehetetlenségi nyomatéka meghatározható. Az ismertetett eljárások közül a többszálú torziós ingára alapozott módszer a legpontosabb [57], [58], az elérhető pontosság, a kísérletek gondos kivitelezése esetén, 1% vagy az alatti. A [59] közlemény a fizikai inga-módszert vizsgálja merev testek tehetetlenségi

nyomatékának meghatározására, megadva az elérhető pontosságot a felfüggesztési tengely és a test tömegközéppontja között mért távolság függvényében. A cikkben vizsgált távolságtartományban a pontosság 2,5 és 5% között változik. A cikk megállapítása szerint a 2,5%-os minimális értékhez tartozó optimális távolság némileg kisebb, mint az a távolság, amelyre az inga egy pontba redukált össztömegét kell elhelyezni ahhoz, hogy a kapott matematikai inga tehetetlenségi nyomatéka megegyezzen az eredeti, fizikai inga tehetetlenségi nyomatékával [59]. Azaz a fizikai inga-módszerrel elérhető hiba nem lehet 2,5% alatti. A fizikai inga-módszerhez hasonló módszereket elektromos motorok esetében is alkalmaznak a forgórész tehetetlenségi nyomatékának meghatározására. Ennek legegyszerűbb módja, ha a forgórészhez excentrikusan (pl. egy ismert tehetetlenségi nyomatékú vékony körlemez segítségével) egy m_1 tömegű pontszerű testet erősítünk a forgástengelytől egy adott a távolságban (63. ábra), majd az így kapott fizikai ingát lengésbe hozzuk.



63. ábra A forgórész tehetetlenségi nyomaték kísérleti meghatározása fizikai inga-módszerrel

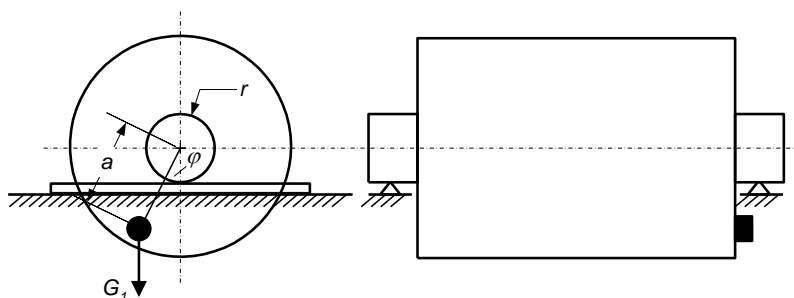
Ezt követően a forgórész tehetetlenségi nyomatéka az alábbi összefüggéssel számítható [60]:

$$J_r = G_1 \cdot a \cdot \left(\frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} - \frac{a}{g} \right) \quad (82)$$

A tehetetlenségi nyomaték tartalmazza a vékony körlemez tehetetlenségi nyomatékát, ha az nem elhanyagolható. Ahol T a rendszer lengésideje, g a gravitációs gyorsulás nagysága, G_1 pedig a pontszerű testre ható gravitációs erő nagyságát jelöli ($G_1 = m_1 \cdot g$). Meg kell jegyezni, hogy a fenti módszer lineáris közelítésből adódó hibája $\sim 0,1$ radiánnál kisebb szögkitérés esetén elhanyagolható, míg 0,4 radián alatti szögek esetén kisebb, mint 1%. Ebből adódóan a módszer alkalmazása 0,4 radiánnál nagyobb szögkitérés mellett már jelentős hibát eredményez. Emellett a lengésidejő annál pontatlanabban mérhető, minél nagyobb a forgórészre ható ellenállási (súrlódási) nyomaték, ezáltal a módszerrel elérhető pontosság is jelentősen csökken. Ebből adódóan a forgórész tehetetlenségi

nyomatékának meghatározására a gyakorlatban elérhető pontosság lényegesen alacsonyabb, mint a [59] közleményben megadott ideális érték.

A fizikai inga-módszer egy módosított, pontosabb változatához tartozó mérési elrendezést a 64. ábra mutatja.



64. ábra A fizikai inga-módszer egy módosított, pontosabb változatához tartozó mérési elrendezés

Ennél a módszernél a forgórészt kiszereljük a motorból. Ezt követően egy m_1 tömegű pontszerű testet rögzítünk excentrikusan a forgórészre, majd azt két ideális, vízszintes és párhuzamos élre helyezük ([60], 64. ábra). Az egyensúlyi helyzetből kimozdítva a rendszert, az lengésbe jön. A forgórész tehetetlenségi nyomatéka az (83) összefüggéssel számítható [60]:

$$J_r = G_1 \cdot a \cdot \left(\frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} - \left(\frac{a}{g} + \frac{r^2}{a \cdot g} \right) \right) \quad (83)$$

A fenti összefüggésben r a tengely sugara, G_1 pedig a pontszerű testre ható gravitációs erő nagyságát jelöli ($G_1 = m_1 \cdot g$). A módszer lineáris közelítésből adódó hibája $\sim 0,1$ radiánál kisebb szögkitérés esetén elhanyagolható, míg $0,4$ radián alatti szögek esetén kisebb, mint 1%. Ebből adódóan a módszer alkalmazása $0,4$ radiánál nagyobb szögkitérés mellett már jelentős hibát eredményez. Emellett csak akkor kapunk pontos eredményt, ha az élek, valamint a tengely ideálisan merevek és sima felületűek. Emellett, az a és G_1 paraméterek értékét optimálisan kell megválasztani, figyelembe véve az adott forgórész tehetetlenségi nyomatékát (J_r), és tengelyének sugarát (r). Továbbá, az összefüggésben szereplő minden mennyiséget a lehető legpontosabban kell mérni.

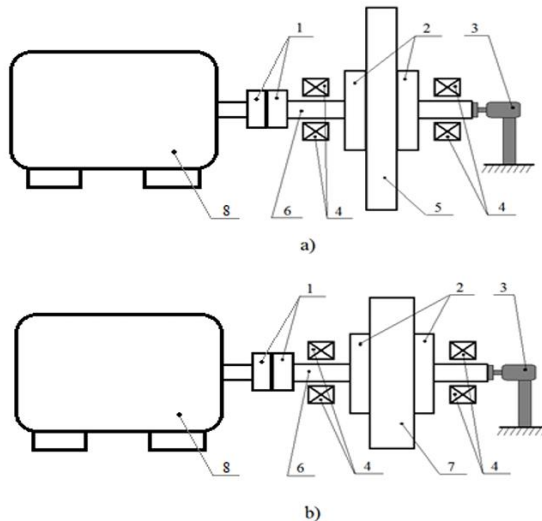
Összefoglalva, a lengésmódszerek alkalmazásával általában csak akkor érhető el megfelelő pontosság, ha a forgórészt kiszereljük a motorból. Emellett a módszerek alkalmazása jelentős pontatlanságokhoz vezethet, ha a forgórész nincs megfelelően kiegyensúlyozva, valamint jelentős problémát jelent az optimális mérési paraméterek (a és G_1) meghatározása. Emellett a forgórész kiszerelése károsíthatja

a motort, továbbá munkaigényes és számos esetben szakértelmet, speciális eszközöket igényel. Ebből adódóan általában nem javasolt.

Az elmondottak ellenére mi is kidolgoztunk és alkalmaztunk egy olyan, a tehetetlenségi nyomatók kísérleti meghatározásán alapuló saját eljárást, amelyhez a forgórészt ki kellett szerelni a motorból [15]. Ezt az eljárást az 5.2.2.2 fejezetben ismertetem, és a téziseimben is szerepel.

3. A tehetetlenségi és ellenállási nyomatók szimultán meghatározása

Ennél a módszernél a tehetetlenségi és ellenállási nyomatókat egyidejűleg határozzuk meg a motor szétszerelése nélkül. A szimultán meghatározással számos közlemény foglalkozik [16], [61], [62], [63], [64]. Az alkalmazott módszerek alapvetően két csoportba sorolhatóak. Az első csoport esetében a fenti mennyiségek meghatározása közvetlen kísérleti eljárással történik [16], [65], [66]. A másik csoportot azok a módszerek alkotják, amelyeknél kísérleti adatokra modellfüggvényeket illesztünk, és az ismeretlen motorparamétereket, mint illesztési paramétereket határozzuk meg, felhasználva valamilyen fejlett algoritmust (pl. genetikus algoritmust [67]) [68], [69], [70], [71]. Egy, az első csoportba tartozó eljárást mi is kidolgoztunk ([16], 5.2.2.2 fejezet), amely az [65] és [66] közleményekben ismertett eljárás továbbfejlesztett, a kísérleti körülmények szempontjából optimalizált változata. A [66] közleményben alkalmazott mérőelrendezést a 65. ábra mutatja.



65. ábra A [66] közleményben alkalmazott mérőelrendezés

A 65. ábrán látható szerkezeti elemek az alábbiak: (1) oldható tengelykapcsoló, (2) szorítógyűrűk, (3) fordulatszámérő, (4) tartócsapágyak, (5) és (7) terhelő acél

hengerek, (6) tengely, (8) vizsgált motor. Az eljárás négy független mérésen alapul. Mind a négy mérés esetében a vizsgált motorral gyorsítják (pörgetik) fel a rendszert álló helyzetből, majd a maximális fordulatszám elérését követően lekapcsolják a feszültséget a motorról. Az első két mérés esetében a rendszert úgy hagyják lassulni, hogy a vizsgált motor és a terhelő hengerek közötti tengelykapcsolatot megszüntetik, míg a másik két mérés esetében a tengelykapcsolat mindvégig megmarad, ezáltal a vizsgált motor és a terhelő hengerek együtt lassulnak, egészen az álló helyzet eléréséig. Az említett két-két mérés esetében az (5) és (7) terhelő hengerek tehetetlenségi nyomatéka különböző, de tömegük megegyezik. Az azonos tömegek biztosítják a tartócsapágyak azonos sugárirányú terhelését, ezáltal adott fordulatszám és hőmérséklet esetén az azonos súrlódási nyomatékokat a csapágyakban. A kísérletek során a rendszer fordulatszámát mérik az idő függvényében. A négy független kísérlet kifizetési szakaszára négy független dinamikai egyenlet írható fel, majd az így kapott egyenletrendszerből kiszámítható a motor forgórészének tehetetlenségi és ellenállási (súrlódási) nyomatéka. A felírt dinamikai egyenleteket és a részletes számítási eljárást az 5.2.2.2.2 fejezetben, a saját vizsgálataimnál ismertetem.

A fenti, [66] közleményben ismertetett eljárás a [65] közleményben bemutatott eljárás továbbfejlesztett változata. A [65] közlemény esetében a tartócsapágyak (4) tehetetlenségi nyomatékát és a bennük ébredő ellenállási nyomatékokat nem vették figyelembe. Erre a problémára ad megoldást a [66] közlemény, azáltal, hogy a két terhelő henger tömegét azonosra választja, így biztosítva a tartócsapágyak azonos radiális irányú terhelését. Így a tartócsapágyakban – feltételezve, hogy hőmérsékletük megegyező – bármely fordulatszám esetén azonos ellenállási nyomatékok ébrednek. Ezáltal a tartócsapágyak esetében, két ismeretlen ellenállási nyomaték helyett csak eggyel kell számolni. Ebből adódóan a két dinamikai egyenletben, amelyeknél a vizsgált motor le van csatlakoztatva a hengerekről, már csak két ismeretlen mennyiség szerepel: a hengeren kívüli forgó alkatrészek (szorítógyűrűk, csapágyak, tengely) együttes tehetetlenségi nyomatéka, valamint a tartócsapágyak ellenállási nyomatéka. Így a fenti két egyenletből a két említett mennyiség meghatározható. Ezt követően a vizsgált motor forgórészének tehetetlenségi és ellenállási nyomatéka a maradék két egyenletből – amikor a vizsgált motor csatlakozik a tárcsákhoz – már meghatározható. Az elmondottakból adódóan a [66] közleményben ismertetett, továbbfejlesztett eljárás pontosabb, mint a korábbi [65].

A szimultán meghatározás második csoportjába tartozó legismertebb módszerek a „Locked (Blocked) Rotor” teszt [68], a „No-Load” teszt [69] és a „Load” teszt [70]. A „Locked Rotor” teszt esetében a motor forgórészét rögzítik, míg a „No-Load” és „Load” teszteknel a forgórész mechanikai terhelés nélkül, vagy különböző terhelések

alkalmazása mellett, szabadon elfordulhat. A tesztek során a vizsgált motorra feszültséget kapcsolnak, és a rákapcsolás pillanatától mérik a rajta eső feszültséget, a rajta átfolyó áram erősségét, a forgórész fordulatszámát, az általa kifejtett forgatónyomatékat az idő függvényében. Az említett módszerek mellett a paramétermeghatározáshoz felhasználhatjuk még szabad kifutási kísérletek („Retardation” teszt) eredményeit. Ezen kísérletek során a motorra feszültséget kapcsolva (vagy egy külső motor alkalmazásával) a forgórészt egy adott fordulatszámra gyorsítjuk, majd a feszültséget lekapcsolva hagyjuk szabadon leállni. A leállítás során mérjük a fordulatszámot az idő függvényében.

Az összes említett eljárás esetében a mért értékekre különböző modellfüggvényeket illesztve, egy fejlett algoritmus (pl. genetikus algoritmus [67]) alkalmazásával meghatározhatók a modellfüggvényekben szereplő, a motort jellemző ismeretlen paraméterek. Ilyen paraméterek lehetnek például a motorban lévő tekercsek elektromos ellenállása, ön- és kölcsönös induktivitása, vagy a mag-, csapágy- és légellenállási veszteségeket jellemző paraméterek. A második csoportba tartozó paraméter meghatározási módszerek nagy előnye, hogy alkalmazásukkal számos, bizonyos esetekben, a modellben szereplő összes paraméter egyidejűleg meghatározható. A hátrányuk, hogy a paraméter meghatározás pontosságát, a kísérleti meghatározott értékek hibái mellett, az alkalmazott modell és algoritmus hibái is jelentősen befolyásolják. Emellett a különböző motortípusokhoz egyedi modellek kidolgozása szükséges. A továbbiakban példaként ismertetek néhány közleményt, amelyek a fenti paraméter meghatározási eljárásokkal foglalkoznak.

A [61], [62], [64] közlemények paraméter meghatározási módszereket mutatnak be indukciós motorokat tartalmazó hajtásokra. A [61] közleményben ismertetett módszer kifutási kísérletekből nyert és elméleti úton meghatározott szögsebesség-idő függvények összehasonlításából határozza meg a hajtás ismeretlen paramétereit. Ehhez genetikus algoritmust alkalmaz felhasználva a különböző mechanikai veszteségekre vonatkozó modelleket és az átlagos négyzetes hibafüggvényt. De a fenti közlemény a meghatározott paraméterek pontosságát nem adja meg. A [62] közlemény egy új megközelítést alkalmaz egy indukciós motor ismeretlen paramétereinek meghatározására, szabad gyorsulási és lassulási tesztekkel nyert tranziens adatok felhasználásával. A fenti módszer esetében csak az állórészen eső feszültség és a rajta átfolyó áram erősségének mérése szükséges. A forgórész tehetetlenségi nyomatékának meghatározása a szabad gyorsulási tesztek során felvett forgatónyomaték-idő függvényekből történik. A nagyobb pontosság érdekében egy új típusú algoritmus is bevezetésre kerül. Ezt követően a fenti eljárással kapott paraméter értékeket összehasonlítják egy hagyományos „Locked-Rotor” és „No-Load” tesztekkel nyert paraméter értékekkel. A két eljárással kapott értékek közötti relatív százalékos eltérés megadott értéke 3% körüli. A fenti

közleményben a különböző mechanikai veszteségeket jellemző modellparamétereket nem határozták meg. A [64] közlemény egy indukciós motorra kidolgozott modell elektromágneses és dinamikai paramétereit határozza meg genetikus algoritmus alkalmazásával. A fenti paramétermeghatározás egy olyan kísérletből származó tranziens adataiból történik, amely során a motor álló helyzetből egy adott szögsebességig gyorsul, majd szabadon kifut, amíg meg nem áll.

A következő fejezetben az elektromos motorok dinamikai jellemzőinek meghatározásával kapcsolatos saját vizsgálataimat, fejlesztéseimet és azok eredményeit ismertetem. Ezek a téziseimben is szerepelnek.

5.2.2.2 SAJÁT VIZSGÁLATOK, FEJLESZTÉSEK A FORGÓRÉS Z TEHETETLENSÉGI ÉS ELLENÁLLÁSI (SÚRLÓDÁSI) NYOMATÉKÁNAK KÍSÉRLETI MEGHATÁROZÁSÁHOZ

Az 5.2.1 fejezetben ismertettem azokat a kísérleti vizsgálatokat, amelyekkel a 2. fejezetben bemutatott prototípus versenyautó SWDC motorjának elektromágneses jellemzőit meghatároztuk. Ebben a fejezetben a dinamikai jellemzők meghatározásával kapcsolatos saját vizsgálataimat, fejlesztéseimet ismertetem. Az 5.2.2.2.1 fejezetben ezen belül azokat, amelyek az említett SWDC motor dinamikai jellemzőinek – nevezetesen a forgórész tehetetlenségi és ellenállási (súrlódási) nyomatékának – meghatározásával foglalkoznak. Ezek a vizsgálatok a tehetetlenségi nyomaték kísérleti meghatározásán alapulnak (lásd 5.2.2.1 fejezet, 2. csoport). Az 5.2.2.2.2 fejezetben ismertetett saját vizsgálatok, fejlesztések a tehetetlenségi és ellenállási nyomaték szimultán meghatározásának témakörébe tartoznak (lásd 5.2.2.1 fejezet, 3. csoport), közvetlen kísérleti eljárás alkalmazásával.

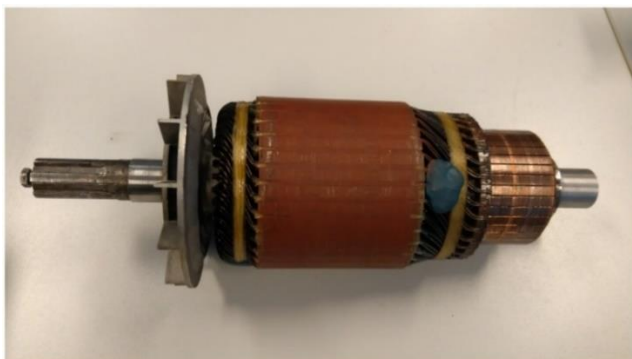
5.2.2.2.1 A tehetetlenségi nyomaték kísérleti meghatározásán alapuló saját vizsgálatok, fejlesztések

A vizsgált SWDC motor forgórészének tehetetlenségi nyomatékát először a 63. ábrán szemléltetett fizikai inga módszerrel próbáltuk meghatározni. Ehhez a forgórészt nem kellett kiszerezni a motorból, csak a szénkeféket kellett eltávolítani a kommutátor felületéről, ezáltal minimalizálva a forgórészre ható ellenállási nyomatékot. A kísérletek során a forgórészhez egy könnyű, ismert tehetetlenségi nyomatékú vékony körlemez segítségével egy pontszerűnek tekinthető, acélból készült testet rögzítettünk, majd az így kapott rendszert lengésbe hoztuk. Problémát jelentett, hogy a kísérletek pontos elvégzéséhez maximálisan javasolt szögkitérés ($\sim 0,4$ rad) alkalmazása esetén (lásd 5.2.2.1 fejezet) – a csapágyakban fellépő ellenállási nyomaték miatt – a lengésidőt csak jelentős hibával tudtuk mérni. Ebből adódóan a módszer alkalmazását elvetettük, és további módszereket kerestünk.

Következő lépésben a 64. ábrán látható eljárást próbáltuk meg alkalmazni. Ehhez a motorból kiszereztük a forgórészt, és a tengelyéhez, az előző eljárásban ismertetett módon, egy pontszerű, acélból készült testet rögzítettünk. Ezt követően az így kapott

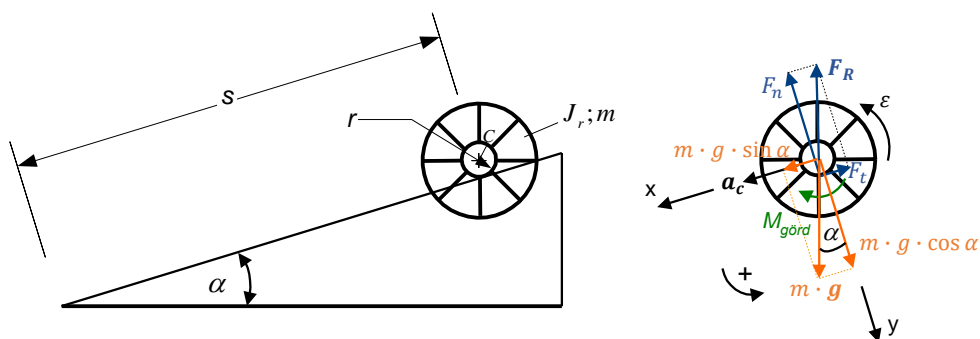
rendszert két ideális, vízszintes és párhuzamos acélból készült élre helyeztük, majd lengésbe hoztuk. Azonban, az előző esethez hasonlóan, a lengésidőt itt sem sikerült megfelelő pontossággal mérni. Ennek oka a jelentős mértékű gördülési ellenállás volt, amit nem sikerült csökkenteni. Így végül ennek a módszernek az alkalmazását is elvetettük.

Ezt követően egy egyedi, saját eljárás kifejlesztése mellett döntöttünk, amelynél a kiszerelt forgórész (66. ábra) egy lejtőn gördül le.



66. ábra A versenyautó SWDC motorjának forgórésze [15]

Az ötletet az adta, hogy rendelkezésünkre állt egy kísérleti eszköz, amelyet korábban fejlesztettünk ki oktatási célra a gördülő mozgás vizsgálatához. Az eszköz részletes leírását a [72] közlemény tartalmazza. A fenti eszköz alkalmazásával, a forgórész tehetetlenségi nyomatékának (J_r) meghatározásához, végül a 67. ábrán szereplő kísérleti elrendezést alkalmaztuk.



67. ábra A legördítési kísérlethez alkalmazott elrendezés és paraméterei [15]

Az ábrán feltüntettük a forgórészre ható összes erőt és gördülési ellenállási nyomatékot ($M_{görd}$), valamint a forgórész szöggyorsulását (ϵ) és tömegközéppontjának gyorsulását (a_c). Az ábrán m a forgórész tömege, r a gördülési sugár, α a lejtő hajlásszöge és s a henger tömegközéppontja által befutott pályaszakasz hossza. A forgórész által a lejtőre kifejtett erők nem szerepelnek az

ábrán. A kísérlet során a lejtőhöz egy centiméter skálát rögzítettünk, majd a forgórészt a lejtő tetejéről, álló helyzetből elindítottuk. A gördülés során a mozgást egy nagyfelbontású kamerával rögzítettük, majd egy számítógépes program (Apowersoft videószerkesztő) alkalmazásával leolvastuk a skálán lévő egyes beosztásokhoz tartozó gördülési időket, így megkaptuk a forgórész tömegközéppontjának hely-idő ($s(t)$) függvényét. A hely-idő függvényt Microsoft Excel diagramon ábrázoltuk, majd a grafikonra másodfokú trendvonalat illesztettünk, így megkaptuk a hely-idő függvény analitikus alakját. Ennek a függvénynek az idő szerinti második deriváltja megadta a forgórész tömegközéppontjának gyorsulását (a_c).

Mivel a gördülési ellenállási nyomaték ($M_{görd}$) a forgórész és a lejtő között nem hanyagolható el, két, egymástól független gördítési kísérletre volt szükség különböző lejtőszögek (α_1 és α_2) alkalmazása mellett. Az α_1 és α_2 szögek értéke egyaránt 2 fok alatti (lásd 5. táblázat), így a forgórész tiszta gördülése feltételezhető. A két gördítési kísérletre a következő dinamikai egyenletek írhatók fel:

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha_1 - F_{t1} = m \cdot a_{c1} \quad (84)$$

$$m \cdot g \cdot \cos \alpha_1 - F_{n1} = 0 \quad (85)$$

$$F_{t1} \cdot r - M_{görd1} = J_r \cdot \varepsilon_1 \quad (86)$$

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha_2 - F_{t2} = m \cdot a_{c2} \quad (87)$$

$$m \cdot g \cdot \cos \alpha_2 - F_{n2} = 0 \quad (88)$$

$$F_{t2} \cdot r - M_{görd2} = J_r \cdot \varepsilon_2 \quad (89)$$

A fenti egyenletekben F_t a tapadási súrlódási erő, F_n a nyomóerő, ε a forgórész szöggyorsulása. A gördülési ellenállási nyomatékok az alábbi összefüggésekkel számíthatók:

$$M_{görd1} = f \cdot F_{n1} \quad (90)$$

$$M_{görd2} = f \cdot F_{n2} \quad (91)$$

ahol f a gördülési ellenállás karja. Mivel a forgórész csúszás nélkül gördül:

$$\varepsilon_1 = \frac{a_{c1}}{r} \quad (92)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{a_{c2}}{r} \quad (93)$$

A fenti (84-93) egyenletekből a forgórész tehetetlenségi nyomatékát kifejezve az alábbi összefüggést kapjuk [15]:

$$J_r = m \cdot r^2 \cdot \left(g \cdot \frac{\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1}{\frac{a_{c2}}{\cos\alpha_2} - \frac{a_{c1}}{\cos\alpha_1}} - 1 \right) \quad (94)$$

Itt meg kell jegyezni, hogy egy szokásos kísérlet során a forgórész tömegközéppontjának sebessége 1 [km/h] alatti [15]. Így egy 1,5 [cm] gördülési sugarú forgórész [15] esetén a szögsebesség kisebb, mint 19 [rad/s]. A forgórész tengelyére ható normál irányú terhelés közelítőleg 120 [N]. A fenti feltételek mellett, a kapcsolódó szakirodalom [25], [73], [74], [75] alapján, a gördülési ellenállás karja jó közelítéssel állandó.

Az 5. táblázat a kísérleti adatokat és a tehetetlenségi nyomaték számított értékét tartalmazza. A tehetetlenségi nyomaték hibáját a Gauss-féle hibaterjedési törvénnyel [49] számítottuk ki a hajlásszögek és gyorsulások bizonytalanságainak ismeretében. A hajlásszöget annak tangenséből számoltuk vissza, ezért a hajlásszög bizonytalansága a távolságmérésre használt eszköz (tolómérő) pontatlanságából adódott. A gyorsulások bizonytalanságait öt független kísérletből kapott gyorsulásértékek szórásából számoltuk. A gördülési sugár bizonytalanságát – mivel azt digitális mikrométerrel mértük, melynek pontossága 0,001 [mm] – elhanyagoltuk. A tömegmérés esetén a hiba szintén elhanyagolható, mivel a digitális mérleg mérési bizonytalansága 0,001 [kg].

5. táblázat A kísérleti adatok és a tehetetlenségi nyomaték számított értéke. [15]

m [kg]	r [m]	α_1 [°]	α_2 [°]
12,350	0,015	$1,063 \pm 0,003$	$1,539 \pm 0,005$
a_{c1} [m/s ²]	a_{c2} [m/s ²]	J_r [kg·m ²]	
$0,0215 \pm 0,0001$	$0,0315 \pm 0,0002$	$0,01987 \pm 0,00060$	

A mérési eljárásunk pontosságának további ellenőrzéséhez egy hitelesítő mérést is elvégeztünk, amely során egy ismert tehetetlenségi nyomatékú homogén acél hengert gördítettünk le a lejtőn. A hitelesítéshez alkalmaztattunk acélhenger számított, és kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomatékát, valamint az egyéb kísérleti adatokat a 6. táblázat tartalmazza.

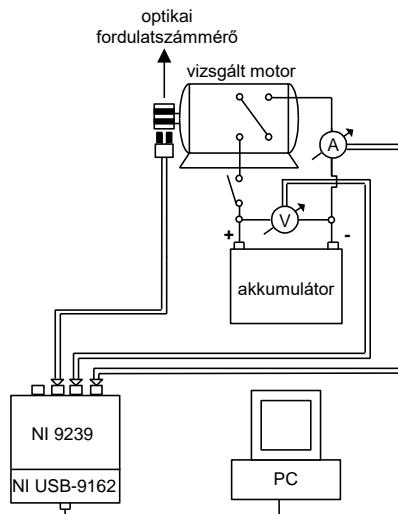
6. táblázat A hitelesítéshez alkalmazott acélhenger számított, és kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomatéka, valamint az egyéb kísérleti adatok. [15]

m [kg]	r [m]	α_1 [°]	α_2 [°]
2,304	0,025	$0,4797 \pm 0,0014$	$1,2021 \pm 0,0036$

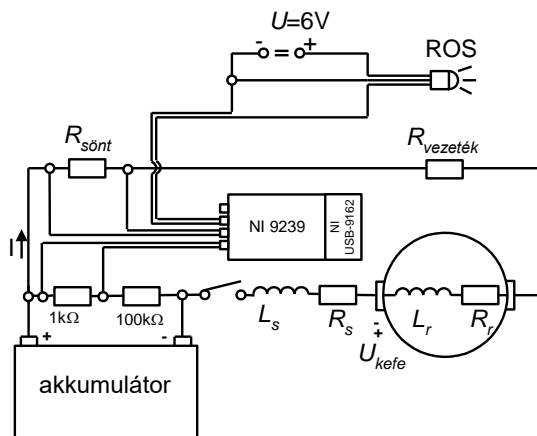
a_{c1} [m/s ²]	a_{c2} [m/s ²]	J_r (kísérleti) [kg·m ²]	J_r (számított) [kg·m ²]
0,0485 ± 0,0003	0,1316 ± 0,0007	0,000702 ± 0,000023	0,000720

A kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomaték relatív százalékos hibája 3,28%, és látható, hogy a számított (elméleti) érték ezen a hibahatáron belül esik. Ez a pontosság megfelelő elektromos motor forgórészek tehetetlenségi nyomatékának meghatározásához. A módszer legnagyobb hátránya, hogy alkalmazásához a forgórészt ki kell szerelni a motorból, amely általában munkaigényes, sok esetben szakértelmet, valamint speciális szerszámokat igényel. Emellett egy precízen kivitelezett „lejtőre” is szükség van, és fontos az összes kísérleti paraméter megfelelő pontosságú mérése.

A forgórész ellenállási nyomatékának meghatározása egy kifutási kísérlet segítségével történt. A fenti kísérleteknél alkalmazott mérőelrendezés sematikus és elektromos kapcsolási rajzát a 68. és 69. ábrák mutatják.



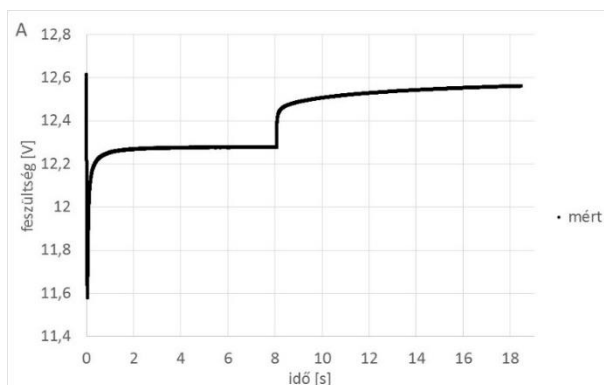
68. ábra A kifutási kísérletnél alkalmazott mérőelrendezés sematikus rajza [15]

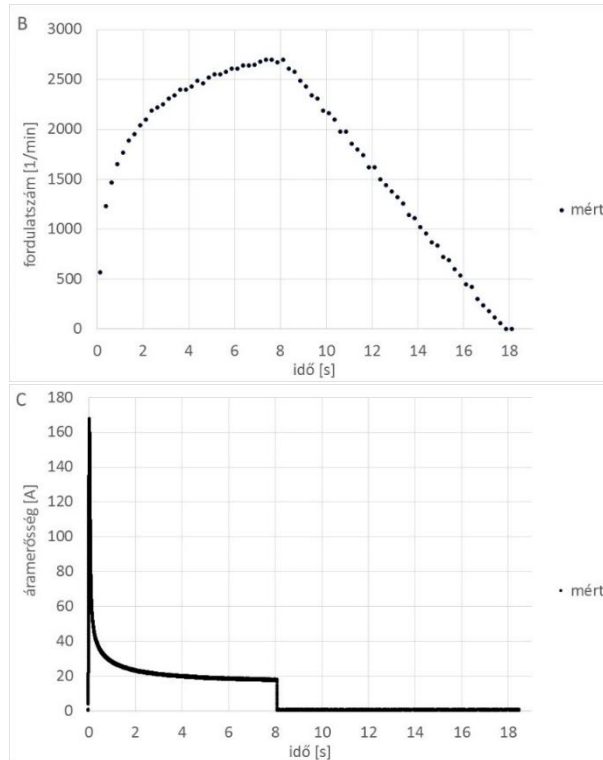


69. ábra A kivitási kísérlethez tartozó elektromos kapcsolási rajz [15]

A kísérlet során, egy kis tömegű bordás hüvelyt (melynek tehetetlenségi nyomatéka: $J_{bh} = 0,00001576 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$) húztunk a motor tengelyére, és a fordulatszám méréshez alkalmazott fényvisszaverő csíkokat arra rögzítettük. A bordás hüvelyre ható nehézségi erőből adódó, a forgórész csapágyaira kifejtett sugárirányú terhelés elhanyagolható, így az nem befolyásolja az ellenállási nyomaték értékét. A bordás hüvely jól kiegyensúlyozott volt, így az általunk vizsgált 0-3000 [1/min] fordulatszám tartományon sugárirányú erőhatást (ütést) nem éreztünk.

A kísérlet elvégzéséhez a motorra feszültséget kapcsoltunk, és hagytuk, hogy a forgórész elérje a maximális fordulatszámát. A feszültséget egy 12 [V]-os gépkocsi akkumulátor biztosította. Ezt követően a feszültséget lekapcsoltuk, így a forgórész fokozatosan lassult, majd megállt. A kísérlet során mindvégig mértük a forgórész fordulatszámát, az akkumulátor kapcsolófeszültségét, valamint a motoron átfolyó áram erősségét (lásd 70. ábra A, B és C része).





70. ábra A) Az akkumulátor kapcsolófeszültsége, B) A forgórész fordulatszáma, C) A motoron átfolyó áram erőssége az idő függvényében [15]

A leállási (kifutási) szakaszból meghatároztuk a forgórész ellenállási (súrlódási) nyomatékát. Mivel a kifutási szakaszon a fordulatszám az idővel lineárisan csökkent, így a forgórész szöggyorsulása időben állandó. A mért szögsebesség-idő függvény meredekségéből meghatároztuk a szöggyorsulás (ε) nagyságát, amely esetünkben $30,331 \text{ [rad/s}^2\text{]}$. Ezt követően az ellenállási nyomaték az alábbi összefüggéssel számolható:

$$M_{súrl} = (J_r + J_{bh}) \cdot \varepsilon \quad (95)$$

Azaz, az így a kapott ellenállási nyomaték a fordulatszámtól független állandó érték ($M_{súrl} = 0,6075 \text{ [Nm]}$).

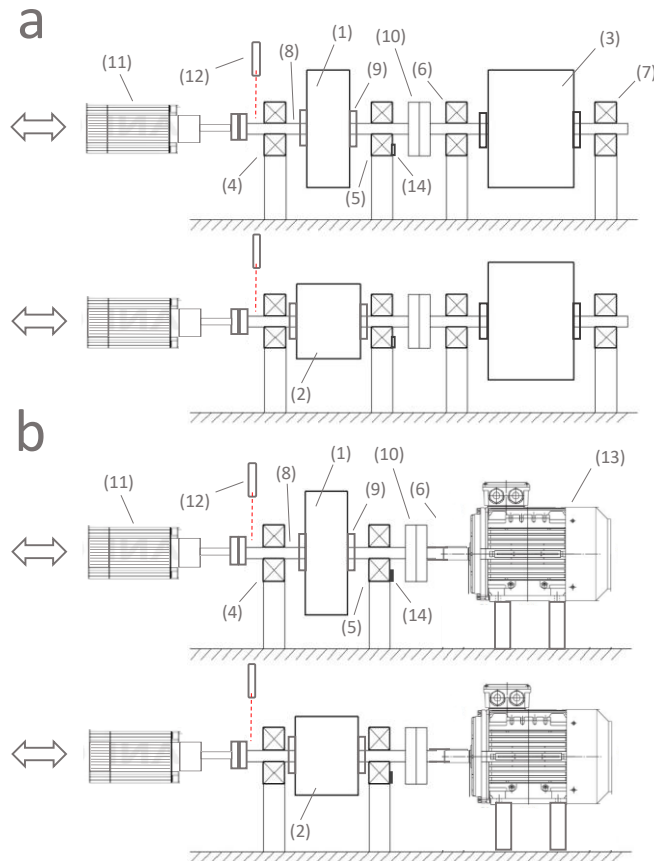
A kísérlet gyorsulási szakasza alkalmas a motorhoz kidolgozott modell, és az arra épülő szimulációs program hitelesítésére. A hitelesítés során a kísérletileg meghatározott és szimulált fordulatszám- és áramerősség-idő függvényeket hasonlítjuk össze, amely információval szolgál a modell és a szimulációs program megfelelő működéséről. Az ezzel kapcsolatos saját vizsgálataimat az 5.3.2 fejezetben ismertetem. Ezek a vizsgálatok a téziseimben is szerepelnek.

5.2.2.2.2 A tehetetlenségi és ellenállási nyomaték szimultán meghatározásán alapuló saját vizsgálatok, fejlesztések

Mint korábban említettem, az 5.2.2.2.1 ismertetett eljárás legnagyobb hátránya, hogy a tehetetlenségi nyomaték meghatározásához a forgórészt ki kell szerelni a motorból. Emiatt döntöttünk úgy, hogy egy olyan eljárást is kidolgozunk, amellyel a fenti két dinamikai jellemző a motor szétszerelése nélkül, szimultán meghatározható. Ezzel kapcsolatos saját vizsgálataimat ebben a fejezetben ismertetem. Ezek a vizsgálatok részei a téziseimnek.

Az 5.2.2.1 fejezetben ismertetett részletes szakirodalmi áttekintés során kiderült, hogy a [66] közleményben ismertetett közvetlen mérési eljárásokon alapuló szimultán meghatározás esetében van két fontos tényező, amely jelentősen befolyásolja a módszer pontosságát, viszont a szerzők nem vették figyelembe. Az egyik tényező, hogy mekkora tehetetlenségi nyomatékú terhelő tárcsákat válasszunk a kísérletekhez, hogy a keresett mennyiségek meghatározásának hibája minimális legyen. Más szóval, hogy mekkorák a terhelő tehetetlenségi nyomatékok optimális értékei. A másik tényező, hogy a tartócsapágyak melegedésének milyen hatása van a módszer pontosságára, illetve, hogy az ebből adódó hibát hogyan tudjuk minimalizálni. Ebben a fejezetben a fenti tényezőket részletesen megvizsgálom, ezáltal lényegesen továbbfejlesztve, megbízhatóbbá és pontosabbá téve a [66] közleményben bemutatott eljárást.

Az eljárás pontosságának meghatározásához, valamint az említett két tényező vizsgálatához először hitelesítő méréseket végeztünk. Ezt követően méréseket végeztünk egy elektromos motoron, meghatározva annak tehetetlenségi és ellenállási nyomatékát. Itt meg kell jegyezni, hogy az általunk korábban vizsgált, SWDC motor [17], [15] már nem állt rendelkezésünkre a vizsgálatok idején, így azokat példaképp, egy kalickás forgórészű, háromfázisú aszinkronmotoron végeztük el. Mivel a későbbiekben ennek a motornak is tervezzük a vizsgálatát, így az itt kapott eredmények hasznosulni fognak a jövőben. Emellett természetesen az eljárást más típusú elektromos motorok, vagy akár a versenyautóban szereplő más típusú forgó alkatrészek tehetetlenségi és ellenállási nyomatékának meghatározására is alkalmazhatjuk. A 71. ábra a) része a hitelesítő méréshez, b) része pedig az ismeretlen dinamikai jellemzőjű (ez esetben aszinkron) motoron elvégzett méréshez kifejlesztett kísérleti elrendezést mutatja.



71. ábra A hitelesítő méréseknél (a) és az aszinkronmotoron történő méréseknél (b) alkalmazott kísérleti összeállítás sematikus rajza [16]

Az ábrán (1) és (2) jelöli az azonos tömegű (m), de eltérő tehetetlenségi nyomatékú (J_1, J_2) terhelő acélhengereket. Az egyenlő tömeg, bármely fordulatszámon, azonos nagyságú radiális terhelést, ezáltal azonos ellenállási nyomatékot ($M_{súrl}$) biztosít a (4) és (5) jelzésű tartócsapágyakban a mérések során. A (3) jelzésű acélhengert a hitelesítő méréseknél használtuk, amelynek tömegét (m_3) és geometriai méreteit megmértük, majd abból a tehetetlenségi nyomatékát (J_3) kiszámítottuk. Mivel a tömeg és a geometriai méretek 0,1%, vagy az alatti relatív hibával mérhetők, így a számolt tehetetlenségi nyomaték hibája elhanyagolható. A (4), (5) és (6), (7) jelzésű tartócsapágyakban az ellenállási nyomatékok ($M_{súrl}$ és $M_{súrl}^*$) értékei ismeretlenek. Itt meg kell jegyezni, hogy a (4), (5), (6) és (7) jelzésű csapágyak azonos típusúak (FAG UCP 205), valamint a gyárilag alkalmazott kenőanyag is azonos. A szimmetriából adódóan a (4) és (5) jelzésű, valamint a (6) és (7) jelzésű csapágyak sugárirányú terhelése, ebből adódóan a bennük ébredő csapágysúrlódási nyomaték ($M_{súrl}$ és $M_{súrl}^*$) megegyezik. (Emellett a megegyező körülmények miatt feltételezhető, hogy

a csapágycsoportok hőmérséklete is egyező.) A hengerek a (8) jelzésű – minden szempontból azonos – tengelyekre vannak rögzítve négy darab szorítógyűrű (9) segítségével, és az (1) és (2) jelzésű hengerek a (3) jelzésű hengerhez egy ismert tehetetlenségi nyomatékú tengelykapcsolón (10) keresztül csatlakoznak. A 7. táblázatban megadtuk minden szerkezeti elem tömegét és tehetetlenségi nyomatékát. A tömegeket, a hengerek esetében is alkalmazott digitális mérleggel mértük, míg a tehetetlenségi nyomatékokat a mért tömegekből és geometriai adatokból számoltuk. A tengelyek és szorítógyűrűk tehetetlenségi nyomatékainak hibái a korábban említett okok miatt elhanyagolhatóak. A tengelykapcsoló tehetetlenségi nyomatéka annak gyári katalógusában szerepelt. A (4), (5), (6) és (7) tartócsapágycsoportok esetén a belső gyűrűk tömegeit és tehetetlenségi nyomatékait a mérhető geometriai adatokból és az acél sűrűségéből becsültük. Itt meg kell jegyezni, hogy tehetetlenségi nyomatékuk igen jó közelítéssel elhanyagolható a teljes forgó rendszer tehetetlenségi nyomatékához viszonyítva.

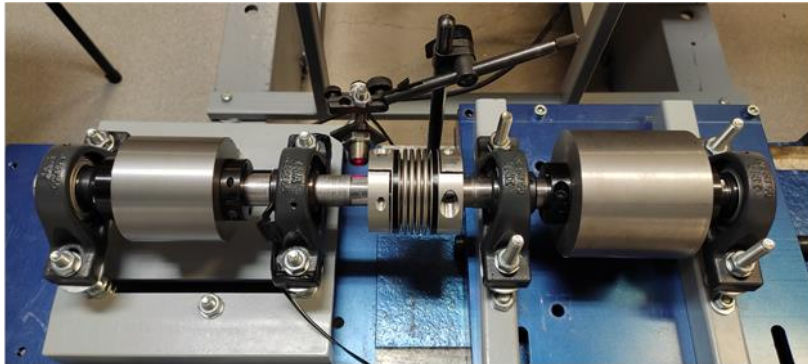
7. táblázat A mérőelrendezésben található forgó szerkezeti elemek tömegei és tehetetlenségi nyomatékuk. [16]

	henger (1)	henger (2)	henger (3)	tengely (8)
m [kg]	2,508	2,509	5,030	0,368
J [kg·m ²]	0,00222	0,00713	0,00651	0,00004
	szorítógyűrű (9)	belső gyűrű	tengelykapcsoló (10)	
m [kg]	0,136	~ 0,075	0,410	
J [kg·m ²]	0,00007	~ 0,00002	0,00018	

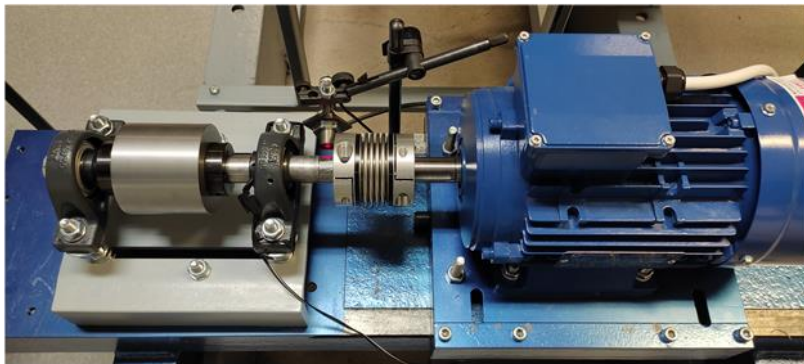
A mérőrendszer egytengelyűségét, minden egyes mérés előtt, egy lézeres tengelybeállító műszer segítségével ellenőriztük, és ha szükséges volt, beállítottuk. A hitelesítő méréseknél a (3) jelzésű henger a tengellyel (8), a két szorítógyűrűvel (9) és a (6) és (7) jelzésű tartócsapágycsoportokkal együttesen játszotta a vizsgált motor szerepét. A meghajtó motort (11) egy oldható tengelykapcsolóval csatlakoztattuk a mérőelrendezés tengelyéhez. Miután a rendszer elérte a kívánt fordulatszámot, a meghajtó motort – a tengelykapcsolót oldva – leválasztottuk a rendszerről, és hagytuk, hogy a magára hagyott forgó tömegek fokozatosan lassulva megálljanak. A kísérlet során a szögsebességet folyamatosan mértük a korábban már bemutatott optikai LED szenzor (12) segítségével, így meg tudtuk adni a forgó rendszer szögsebességét az idő függvényében. Az (5) jelzésű tartócsapágycsoport külső gyűrűjének hőmérsékletét a mérések során egy PT100 típusú ellenállás hőmérővel (14) monitoroztuk. A teljes mérési eljárás négy független mérést foglal magában. Az első mérésnél csak az (1) jelzésű hengert gyorsítjuk (pörgetjük) fel, majd a másodiknál a (10) jelzésű tengelykapcsolóval összekapcsolt (1) és (3) jelzésű hengereket. A

harmadik mérésnél az összekapcsolt (2) és (3) jelzésű hengereket, végül a negyediknél önmagában a (2) jelzésű hengert.

Amikor az ismeretlen tehetetlenségi és ellenállási nyomatékú motoron mérünk, ugyanezt a négy kísérletet végezzük el, de ekkor a (3) jelzésű henger és a hozzá kapcsolódó forgó alkatrészeket a vizsgált motor (13) helyettesíti (71. ábra b része). A 72. ábrán a hitelesítő, valamint a vizsgált motoron történő mérésekhez alkalmazott mérőelrendezésekről készült fényképek láthatók.



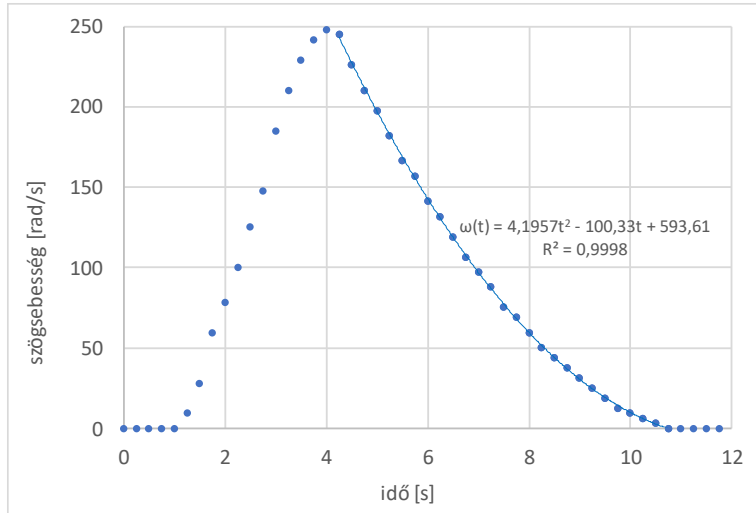
a,



b,

72. ábra A hitelesítő (a), valamint a vizsgált motoron történő (b) mérésekhez alkalmazott mérőelrendezésekről készült fényképek [16]

A 73. ábrán a hitelesítő mérések során kapott szögsebesség-idő függvény látható, az (1) és (3) jelzésű összekapcsolt hengerek esetén. A meghajtó motort a negyedik másodperc végén választottuk le a forgó rendszerről, amely azután fokozatosan lassulva leállt.



73. ábra A kísérlet során kapott szögsebesség-idő függvény az összekapcsolt (1) és (3) jelzésű hengerek esetében [16]

A kapott függvény kifutási szakaszára a Microsoft Excel segítségével egy másodfokú trendvonalat illesztettünk, így megkaptuk a függvény analitikus alakját. A fenti függvényből a forgó rendszer szöggyorsulás-idő függvénye deriválással meghatározható. A szögsebesség-idő és a szöggyorsulás-idő függvényekből a forgó rendszer szöggyorsulása megadható a szögsebesség függvényében. Ebből adódóan a négy kifutási kísérlet eredménye a négy eltérő forgó rendszer szöggyorsulása a szögsebesség függvényében.

A négy kísérlet hitelesítő mérések esetén ajánlott sorrendje:

- 1-es henger
- 1-es és 3-as henger
- 2-es henger
- 2-es és 3-as henger

A fenti négy kísérlet esetén a dinamikai egyenletek [16]:

$$2 \cdot M_{súrl} = (J_1 + J_{egyéb1}) \cdot \varepsilon_1 \quad (96)$$

$$2 \cdot (M_{súrl} + M_{súrl}^*) = (J_1 + J_3 + J_{egyéb2}) \cdot \varepsilon_{13} \quad (97)$$

$$2 \cdot M_{súrl} = (J_2 + J_{egyéb1}) \cdot \varepsilon_2 \quad (98)$$

$$2 \cdot (M_{súrl} + M_{súrl}^*) = (J_2 + J_3 + J_{egyéb2}) \cdot \varepsilon_{23} \quad (99)$$

ahol:

$$J_{egyéb1} = J_t + 2 \cdot J_{szgy} + 2 \cdot J_{bgy} \quad (100)$$

$$J_{egyéb2} = 2 \cdot J_t + 4 \cdot J_{szgy} + 4 \cdot J_{bgy} + J_{tk} \quad (101)$$

A fenti egyenletekben $M_{súrl}$ és $M_{súrl}^*$ a (4) vagy (5) és a (6) vagy (7) jelzésű tartócsapágycsoportokban fellépő ellenállási nyomatékok, $J_1, J_2, J_3, J_t, J_{szgy}, J_{tk}, J_{bgy}$ az (1), (2) és (3) jelzésű hengerek, egy tengely (8), egy szorítógyűrű (9), a tengelykapcsoló (10), és egy belső csapágycsoport tehetetlenségi nyomatékai, $\varepsilon_1, \varepsilon_{13}, \varepsilon_2, \varepsilon_{23}$ pedig a négy független kísérlet során meghatározott szöggyorsulás.

A fenti egyenletekből a (3) jelzésű henger tehetetlenségi nyomatéka, valamint a (6) vagy (7) jelzésű csapágycsoportban ébredő ellenállási nyomaték:

$$J_3 = \frac{J_2 \cdot \varepsilon_{23} - J_1 \cdot \varepsilon_{13}}{(\varepsilon_{13} - \varepsilon_{23})} - J_{egyéb2} \quad (102)$$

$$M_{súrl}^* = (J_2 - J_1) \cdot \frac{\varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{23}}{2 \cdot (\varepsilon_{13} - \varepsilon_{23})} - (J_1 + J_{egyéb1}) \cdot \frac{\varepsilon_1}{2} \quad (103)$$

Alkalmazva a Gauss-féle hibaterjedési törvényt, a J_3 és $M_{súrl}^*$ mennyiségek hibájára az alábbi összefüggések adódnak:

$$\Delta J_3 = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{23} \cdot (J_1 - J_2)}{(\varepsilon_{13} - \varepsilon_{23})^2}\right)^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_{13}}^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13} \cdot (J_2 - J_1)}{(\varepsilon_{13} - \varepsilon_{23})^2}\right)^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_{23}}^2} \quad (104)$$

$$\Delta M_{súrl}^* = \sqrt{\frac{(J_2 - J_1)^2 \cdot (\varepsilon_{23}^4 \cdot \sigma_{\varepsilon_{13}}^2 + \varepsilon_{13}^4 \cdot \sigma_{\varepsilon_{23}}^2) + (J_1 + J_{egyéb1})^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_1}^2}{2 \cdot (\varepsilon_{13} - \varepsilon_{23})^2}} \quad (105)$$

A (104) és (105) egyenletekben $\sigma_{\varepsilon_{13}}, \sigma_{\varepsilon_{23}}$ és σ_{ε_1} az $\varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}$ és ε_1 szöggyorsulások, öt független mérési eredményből számolt szórásai.

A célunk egy adott, vizsgált motor esetén azon J_1 és J_2 terhelő tehetetlenségi nyomatékok meghatározása volt, amelyek alkalmazásával az eljárásunkkal meghatározott tehetetlenségi nyomaték hibája a legkisebb. Tekintve a (104) egyenletet, ezt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy egy adott J_3 tehetetlenségi nyomatékkal jellemzett forgórész esetén, azon J_1 és J_2 értékeket kell meghatározni, amelyek alkalmazása esetén a ΔJ_3 hiba a legkisebb. Ebből adódóan a J_3 tehetetlenségi nyomatéknak meg kell jelennie a (104) összefüggésben. Azért, hogy ezt megtegyük, az ε_{13} és ε_{23} szöggyorsulásokat kifejezzük a (97) és (99) egyenletekből, és behelyettesítjük a (104) egyenletbe (lásd (106) összefüggés).

$$\Delta J_3 = \frac{(J_1 + J_3 + J_{egyéb2}) \cdot (J_2 + J_3 + J_{egyéb2})}{2 \cdot (J_2 - J_1) \cdot (M_{súrl}^* + M_{súrl})} \cdot \sqrt{(J_1 + J_3 + J_{egyéb2})^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_{13}}^2 + (J_2 + J_3 + J_{egyéb2})^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_{23}}^2} \quad (106)$$

Célszerű bevezetni az alábbi jelöléseket:

$$J^* = J_3 + J_{egyéb2} \quad (107)$$

$$M^* = 2 \cdot M_{súrl}^* + 2 \cdot M_{súrl} \quad (108)$$

A kísérletek eredményeit látva megállapítottuk, hogy a $\sigma_{\varepsilon_{23}}$ és $\sigma_{\varepsilon_{13}}$ szórások aránya az [50;150] [rad/s] tartományon állandónak tekinthető. Bevezetve az r konstanst:

$$r = \frac{\sigma_{\varepsilon_{23}}}{\sigma_{\varepsilon_{13}}} \quad (109)$$

Felhasználva a (107), (108) és (109) összefüggéseket a (106) egyenlet az alábbi alakba írható:

$$\Delta J_3 = \frac{(J_1+J^*) \cdot (J_2+J^*) \cdot \sigma_{\varepsilon_{13}}}{(J_2-J_1) \cdot M^*} \cdot \sqrt{(J_1+J^*)^2 + (J_2+J^*)^2 \cdot r^2} \quad (110)$$

Azért, hogy minimalizáljuk a ΔJ_3 hibát, a vizsgált J_3 tehetetlenségi nyomatékhoz meg kellett határozni azon optimális J_1 és J_2 értékeket, amelyek esetén a hiba a legkisebb, valamint minimalizálni kellett a szöggyorsulások szórásait ($\sigma_{\varepsilon_{13}}$, $\sigma_{\varepsilon_{23}}$). A hitelesítő méréseknél alkalmazott henger tehetetlenségi nyomatéka $J_3 = 0,00650$ [kg · m²] volt. (Ez a henger játszotta az ismeretlen forgórész szerepét.) Ehhez a tehetetlenségi nyomatékhoz kívántuk meghatározni az optimális J_1 és J_2 értékeket.

Ehhez a [75;100] [rad/s] tartományon kiszámítottuk a J^* , M^* , $\sigma_{\varepsilon_{13}}$ és $\sigma_{\varepsilon_{23}}$ mennyiségek átlagértékeit, amelyeket a 8. táblázat tartalmaz.

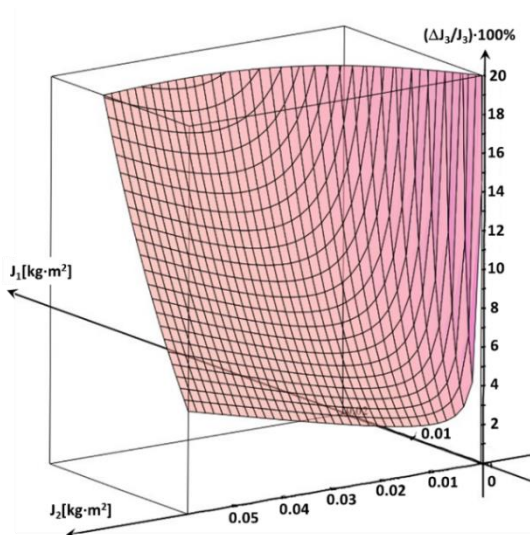
8. táblázat. A J^* , M^* , $\sigma_{\varepsilon_{13}}$ és $\sigma_{\varepsilon_{23}}$ paraméterek értékei. [16]

J^* [kg·m ²]	M^* [Nm]	$\sigma_{\varepsilon_{13}}$ [rad/s ²]	$\sigma_{\varepsilon_{23}}$ [rad/s ²]
0,00710	0,580	0,60	0,3690

Behelyettesítve a J^* , M^* , $\sigma_{\varepsilon_{13}}$ és $\sigma_{\varepsilon_{23}}$ paraméterek értékeit a (106) egyenletbe:

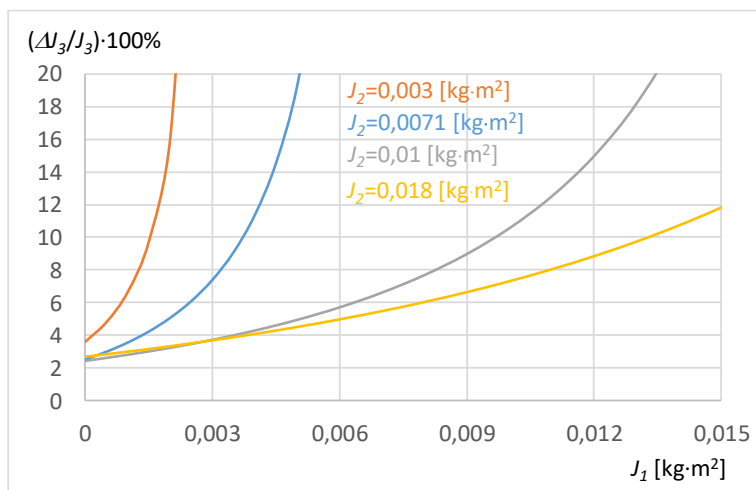
$$\Delta J_3 = \frac{(J_1+0,0071) \cdot (J_2+0,0071) \cdot \sqrt{(J_1+0,0071)^2 + (J_2+0,0071)^2 \cdot 1,626^2}}{(J_2-J_1) \cdot 0,9666} \quad (111)$$

A 74. ábra a J_3 kísérletileg meghatározott értékének relatív százalékos hibáját (ΔJ_3) mutatja a J_1 és J_2 terhelő tehetetlenségi nyomatékok függvényében.



74. ábra A J_3 kísérletileg meghatározott értékének relatív százalékos hibája a J_1 és J_2 terhelő tehetetlenségi nyomatékok függvényében [16]

A 75. ábrán a fenti J_3 tehetetlenségi nyomaték relatív százalékos hibája van megadva a J_1 tehetetlenségi nyomaték függvényében, különböző rögzített J_2 értékek esetén.



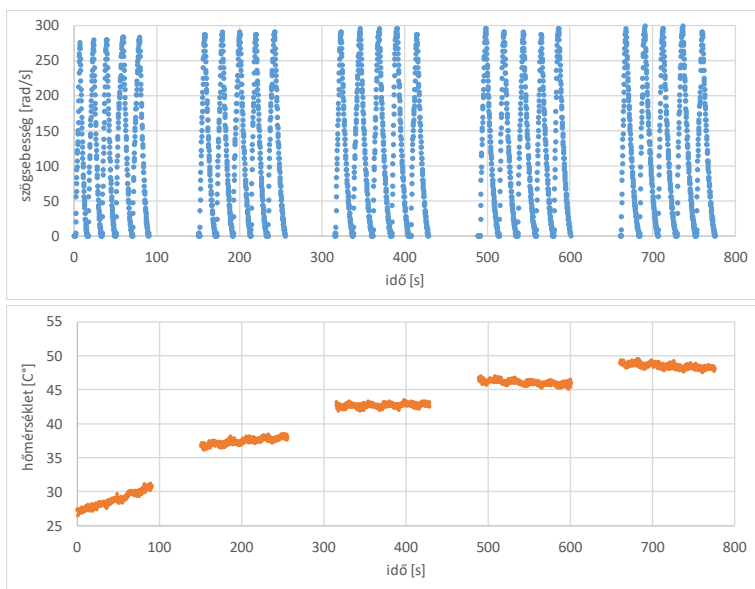
75. ábra A J_3 tehetetlenségi nyomaték relatív százalékos hibája a J_1 tehetetlenségi nyomaték függvényében, különböző rögzített J_2 értékek esetén [16]

A 74. és 75. ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy a J_1 és J_2 terhelő tehetetlenségi nyomatékok optimális megválasztásával a kísérletileg meghatározott J_3 tehetetlenségi nyomaték relatív százalékos hibája 3% alá csökkenthető. Tekintve, hogy a két terhelő henger azonos tömegű, az ideális J_1 és J_2 tehetetlenségi nyomatékokhoz tartozó geometriai méretek nem biztos, hogy ténylegesen megvalósíthatók (elférnek) az adott mérőrendszerünkön. Végül a 74. és 75. ábra

alapján, figyelembe véve az adott geometriai peremfeltételeket, $J_1 = 0,0022 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$ és $J_2 = 0,0071 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$ tehetetlenségi nyomatékú hengerek alkalmazása mellett döntöttünk. Az adott geometriai peremfeltételek miatt, ezek nem az elméletileg meghatározott optimális, csak azok közelébe eső értékek.

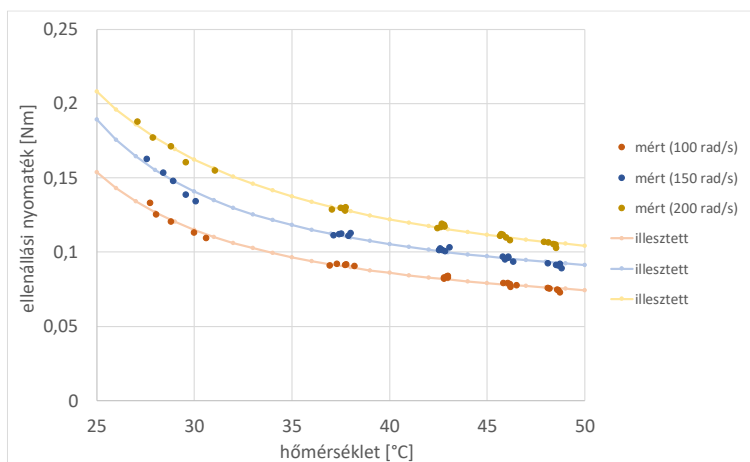
A kísérletileg meghatározott tehetetlenségi és ellenállási nyomatékok hibáit tovább csökkenthetjük, ha a kísérletileg meghatározott szöggyorsulások szórásait csökkentjük. A vizsgálataink során szerzett tapasztalataink alapján megállapítható, hogy a fenti szórások erősen függenek a csapágyak – egy adott mérésorozat során bekövetkező – hőmérsékletváltozásaitól. Ennek oka, hogy a csapágyakban lévő kenőanyag viszkozitása – ezáltal az ellenállási nyomaték – függ a csapágy hőmérsékletétől. Ennek szemléltetésére a következő kísérletet végeztük el:

A meghajtó motorral felgyorsítottuk a (2) jelzésű hengert a lehetséges legnagyobb fordulatszámra, majd oldottuk a meghajtó motor és a henger közötti tengelykapcsolót. Ezt követően a henger fokozatosan lassulva leállt. Ezt egymás után ötször megismételtük. Ezután egy percre folyamatosan a maximális fordulatszámon járatuk a rendszert. (Ezen egy percre sem a fordulatszámot, sem a hőmérsékletet nem jegyeztük fel.) Ezt követően a teljes eljárást még négyszer megismételtük (lásd 76. ábra). A kísérlet során a szögsebesség mellett, folyamatosan mértük a hőmérsékletet az (5) jelzésű tartócsapágy külső gyűrűjén. A 76. ábra a kapott mérési eredményeket mutatja.



76. ábra A (2) jelzésű henger szögsebesség-idő függvénye, valamint az (5) jelzésű tartócsapágy külső gyűrűjén mért hőmérséklet az idő függvényében [16]

Abból a célból, hogy bemutassuk az ellenállási nyomaték hőmérséklet függését, mind a 25 kifizési szakaszon meghatároztuk a rendszer szöggyorsulását három különböző szögsebesség értéknél (100, 150, 200 [rad/s]), majd ezen szögsebesség értékeknél kiszámoltuk az ellenállási nyomatékok értékeit a (98) egyenlet alkalmazásával. Ezt követően a három rögzített szögsebesség mellett ábrázoltuk az ellenállási nyomatékokat a hozzájuk tartozó hőmérsékletek függvényében (77. ábra).



77. ábra Az (5) jelzésű tartócsapágy ellenállási nyomatéka a külső gyűrűjén mért hőmérséklet függvényében három különböző szögsebesség esetén [16]

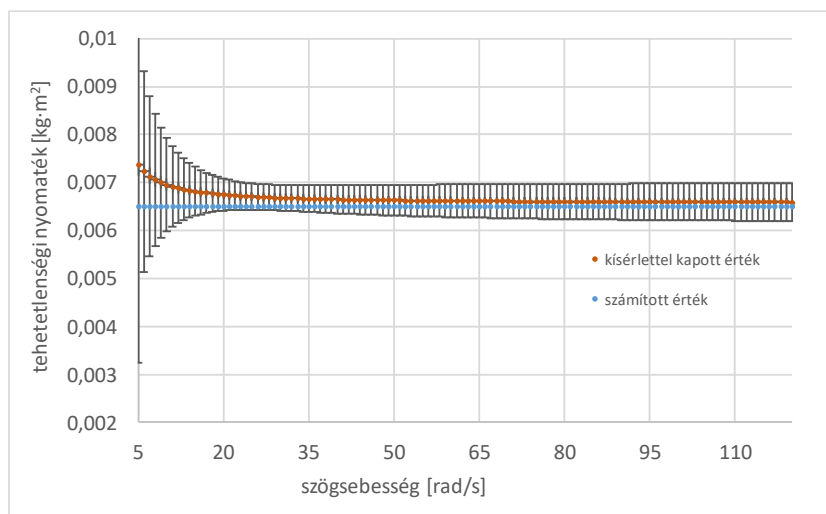
A fenti ábrán jól látható, hogy az ellenállási nyomaték erősen függ a hőmérséklettől. Ennek oka, ahogy korábban említettem, hogy a csapágyban lévő kenőanyag viszkozitása csökken a hőmérséklet növekedésével. A viszkozitás hőmérsékfüggését a Vogel–Fulcher–Tammann (VFT) összefüggés adja meg [76], [77]. Mivel az ellenállási nyomaték a viszkozitással arányos, egy, a VFT összefüggéshez hasonló összefüggést alkalmaztunk ((112) összefüggés) a 77. ábrán látható kísérleti adatok illesztésére.

$$M(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T-c}} \quad (112)$$

A fenti összefüggésben A , B és C illesztési paraméterek, T a csapágy külső gyűrűjén mért hőmérséklet. A hőmérséklet, ezáltal az ellenállási nyomaték változása egy adott mérésorozat során, jelentősen növeli a szöggyorsulások szórásait, ezáltal a kísérletileg meghatározott tehetetlenségi és ellenállási nyomatékok hibáit. Hogy ezt elkerüljük, a csapágyak hőmérsékletváltozását minimalizálni kell. Ezt úgy tudjuk elérni, hogy két egymást követő mérés (felpörgetés) között hosszabb szünetet tartunk, hagyva a csapágyakat ezáltal visszahűlni a kiindulási hőmérsékletükre. Tovább csökkenthetjük a hőmérsékletváltozást, ha az egyes méréseknél alacsonyabb fordulatszámra pörgetjük fel a rendszert. Ha magasabb szögsebesség tartományban is szükségünk van az ellenállási nyomaték értékére, akkor javasolt a (4), (5), (6) és (7) jelzésű tartócsapágyak hűtése a mérések során. A mi esetünkben az alkalmazott

maximális szögsebesség 120 [rad/s] volt, és 5 perc szünetet tartottunk két egymást követő mérés között. Ezáltal a hőmérséklet változást sikerült minimalizálnunk a kísérlet során.

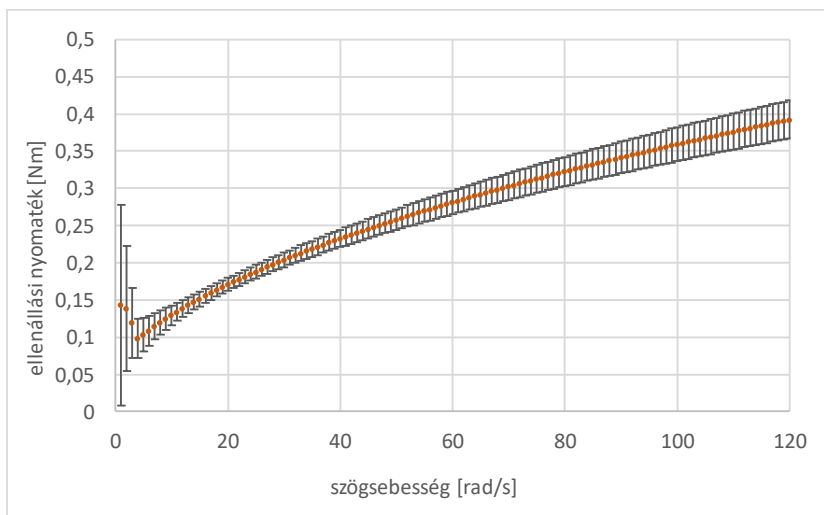
A 78. ábra a (3) jelzésű henger kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomatékát mutatja (barna jelölő) különböző szögsebesség értékek mellett. A henger számítással meghatározott tehetetlenségi nyomatékát (hitelesítő érték) is feltüntettem az ábrán (kék jelölő).



78. ábra A (3) jelzésű henger kísérletileg meghatározott, és számított tehetetlenségi nyomatéka [16]

A kísérletileg meghatározott értékeket a mért szöggyorsulásokból (ε_{13} , ε_{23}) számoltuk, behelyettesítve azokat a (102) összefüggésbe. Az ábrán jelölt hibákat a (103) összefüggés alkalmazásával számoltuk a mért ε_{13} és ε_{23} szöggyorsulásokból, és azok $\sigma_{\varepsilon_{13}}$ és $\sigma_{\varepsilon_{23}}$ szórásaiból. Az ábrán látható, hogy a kísérletileg meghatározott J_3 tehetlenségi nyomaték értéke, az [50;120] [rad/s] tartományon független a szögsebességtől, amely érték: $J_3 = 0,00661 \pm 0,00035$ [kg · m²]. A megadott hiba az [50;120] [rad/s] tartományon vett átlagos hiba, amelynek relatív százalékos értéke 5,3%. Az ábrán jól látható, hogy a számított (hitelesítő) érték (0,00650 [kg·m²]) belül esik a kísérletileg meghatározott érték hibahatárán.

A 79. ábrán a (6) és (7) jelzésű tartócsapágyak együttes ellenállási nyomatéka látható a szögsebesség függvényében. A hitelesítő méréseknél a fenti ellenállási nyomaték játsza a vizsgált motor ellenállási nyomatékának szerepét. A mérések során a csapágyak külső gyűrűjének hőmérséklete (T) közelítőleg 26 [C°] volt, a csapágyakra ható normál irányú terhelések összege (N) közelítőleg 50 [N].



79. ábra A (6) és (7) jelzésű tartócsapágyságok együttes ellenállási nyomatéka a szögsebesség függvényében ($T = \sim 26$ [C°], $N = \sim 50$ [N]) [16]

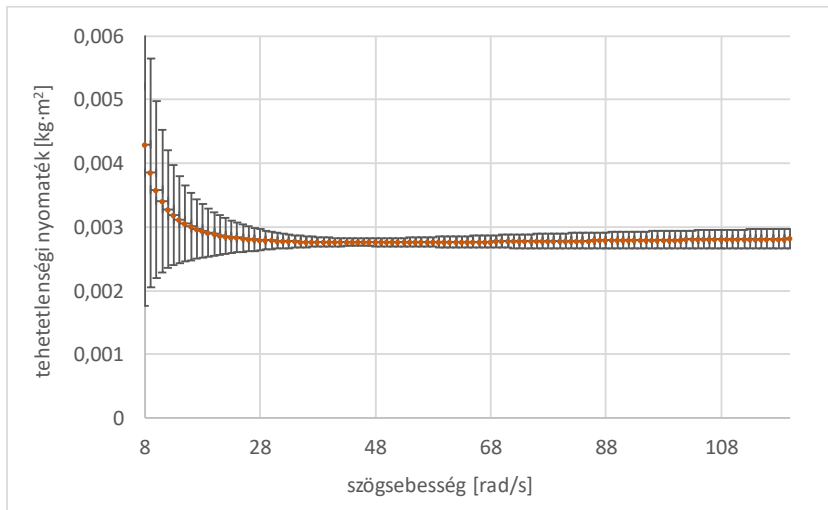
A 79. ábrán megadott értékek és hibáik a (103) és (105) egyenletekkel lettek kiszámítva. A kísérletileg meghatározott ellenállási nyomaték relatív százalékos hibája 5-6% között változik a [20;120] [rad/s] szögsebesség tartományon. A 79. ábrán szereplő ellenállási nyomaték magában foglalja a csapágysúrlódásból és a légellenállásból származó nyomatékokat. Ha feltételezzük, hogy a légellenállás elhanyagolható, és ebből adódóan a 79. ábrán szereplő görbe kizárólag a csapágysúrlódási nyomatékokat szemlélteti a szögsebesség függvényében, akkor abból a csapágó normál irányú terhelésének (N), valamint a kenőanyag adott hőmérsékleten vett viszkozitásának (η) ismeretében a csapágysúrlódási tényező a Hersey-szám (H) függvényében (azaz a Stribeck görbe [78]) meghatározható. A Hersey-számot az alábbi összefüggés értelmezi:

$$H = \frac{\eta \cdot n}{N} \quad (113)$$

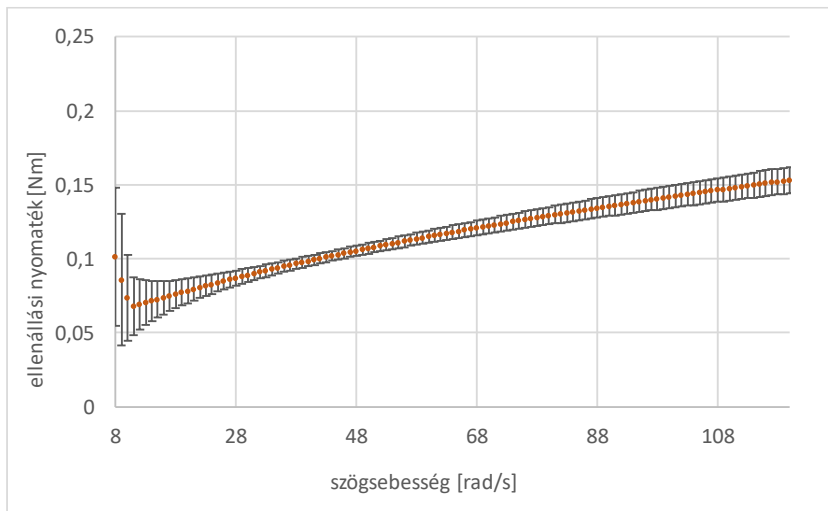
ahol n a fordulatszám. A Stribeck görbét hagyományosan három szakaszra bontják, amelyek elnevezése: határréteg, vegyes és hidrodinamikai súrlódási szakaszok. A 79. ábrán a hidrodinamikai súrlódási szakasz tisztán beazonosítható, a vegyes súrlódási szakasz, kis szögsebességek esetén szintén megjelenik, de a csapágysúrlódási nyomaték ezen a szakaszon nagy hibával terhelt.

Ezt követően elvégeztük a méréseket a korábban említett háromfázisú aszinkronmotoron, hogy meghatározzuk a forgórész ismeretlen tehetetlenségi és ellenállási nyomatékát. A mérésekhez ugyanazokat a J_1 és J_2 tehetetlenségi nyomatékú terhelő hengereket használtuk, mint a hitelesítő mérésekhez. Mivel valószínűsíthető volt, hogy a fenti aszinkronmotor forgórészének tehetetlenségi

nyomatéka kisebb, mint a hitelesítő méréseknél használt J_3 tehetetlenségi nyomaték, várható volt, hogy a J_1 és J_2 tehetetlenségi nyomatékok, az aszinkronmotor esetén, közelebb álltak az optimális értékekhez, mint a hitelesítő mérések esetén. Ebből adódóan döntöttünk úgy, hogy ezekhez a mérésekhez nem gyártunk új terhelő hengereket. A 80. és 81. ábra az aszinkronmotor kísérletileg meghatározott tehetetlenségi és ellenállási nyomatékát mutatja különböző szögsebességek mellett.



80. ábra Az aszinkronmotor kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomatéka a szögsebesség függvényében [16]



81. ábra Az aszinkronmotor kísérletileg meghatározott ellenállási nyomatéka a szögsebesség függvényében [16]

A 80. ábrán látható tehetetlenségi nyomatékok a (102) összefüggéssel, míg a hozzá tartozó hibák a (104) összefüggéssel lettek kiszámolva, de ezeknél a méréseknél a $J_{egyéb2}$ értéke a következő:

$$J_{egyéb2} = J_t + 2 \cdot J_{szgy} + 2 \cdot J_{bgy} + J_{tk} \quad (114)$$

A motor forgórészének, az [50;120] [rad/s] tartományon kísérletileg meghatározott átlagos tehetetlenségi nyomatéka és annak hibája: $J_r = 0,0028 \pm 0,00012$ [kg · m²]. Tehát az átlagos relatív százalékos hiba itt 4,3%. A 81. ábrán bemutatott ellenállási nyomaték értékeit a (103) összefüggéssel, míg a hozzá tartozó hibákat a (105) összefüggéssel számoltuk, majd az értékeket kettővel megszoroztuk. Erre azért volt szükség, mert két csapágy van a motorban. A kísérletileg meghatározott ellenállási nyomaték relatív százalékos hibája, a [30;120] [rad/s] szögsebesség tartományon 3-6% között változik.

A módszer rutinszerű és megfelelő pontosságú alkalmazásához a következők szükségesek:

- Azonos tömegű, és kis lépésközzel növekvő tehetetlenségi nyomatékú terhelő hengerekből álló készlet.
- Előmérés végrehajtása az optimális terhelő hengerek fenti készletből történő kiválasztásához.
- A tartócsapágyak hűtése a kísérletek során.

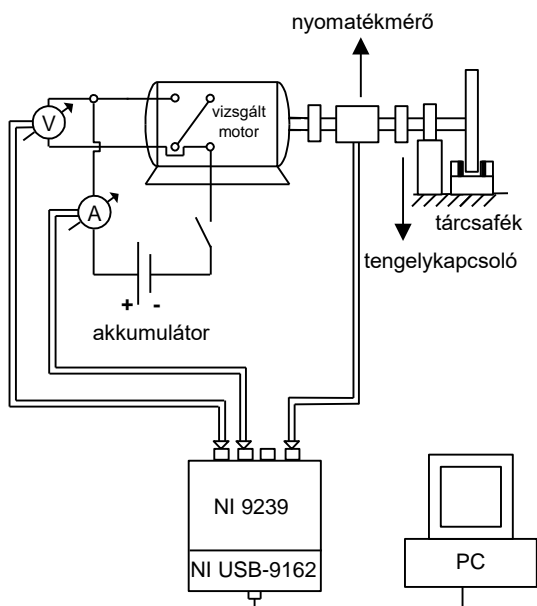
5.3 A KIMENŐ FÜGGVÉNYEK HITELESÍTÉSE TESZTMÉRÉSEKKEL

Ebben a fejezetben a vizsgált SWDC motoron elvégzett tesztméréseket és azok eredményeit ismertetem. A tesztmérések eredményeit összehasonlítva az ugyanazon bemenő adatokkal elvégzett szimulációk eredményeivel, visszajelzést kapunk a modellünk helyességéről, a szimulációs program megfelelő működéséről, valamint a bemenő adatok pontosságáról. Másként fogalmazva, hitelesíthetjük a szimulációs program által előállított kimeneti függvényeket. A vizsgálatok során felhasználtuk az 5.2 fejezetben meghatározott elektromágneses és dinamikai jellemzőket, mint bemenő adatokat. Az 5.3.1 fejezetben ismertetett statikus tesztmérésekben, és a hozzájuk kapcsolódó kiértékelésben részt vettem, de szerepem nem volt meghatározó. Az 5.3.2 fejezetben bemutatott dinamikus tesztmérések a saját vizsgálataim, az itt bemutatott eredmények a téziseimben is szerepelnek.

5.3.1 STATIKUS TESZTMÉRÉSEK

A rögzített forgórészű motoron elvégzett statikus tesztméréssel részben a kísérletileg meghatározott elektromágneses jellemzők (lásd 5.2.1 fejezet) pontosságát, részben a szimulációs program megfelelő működését vizsgálhatjuk az

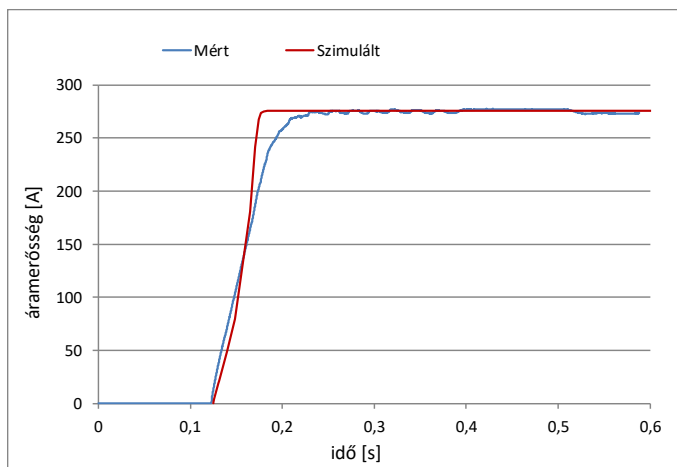
adott „statikus” körülmények között. Ezek a mérések, mivel a motor forgórésze rögzített, nem szolgáltatnak információt a dinamikai jellemzők pontosságáról. A 82. ábra a statikus tesztmérés során alkalmazott mérőelrendezést mutatja.



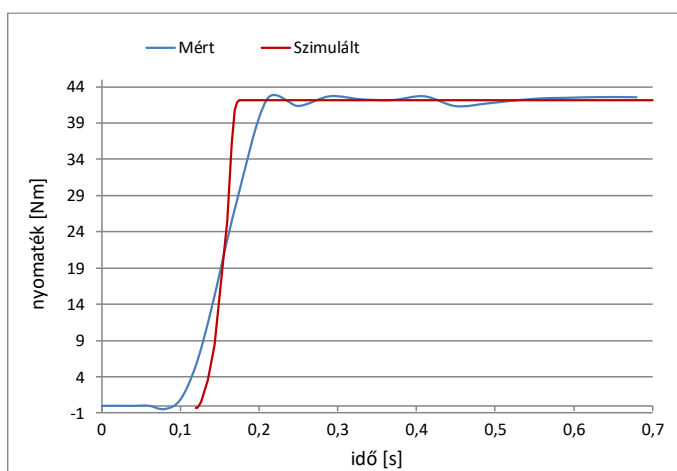
82. ábra A statikus tesztmérés során alkalmazott mérőelrendezés

A fenti mérőelrendezésben a motor forgórésze két tengelykapcsolón és egy közülük beiktatott forgótengelyes nyomatékmérőn (lásd 5.1.1.1 fejezet) keresztül egy saját készítésű tárcsafékhez kapcsolódik. A mérések során a tárcsaféket rögzítettük, így a motor forgórésze nem tudott elfordulni. Ezt követően a motorra ráadtuk egy 12 [V]-os gépkocsi akkumulátor feszültségét, és mértük a motoron eső feszültséget, a rajta átfolyó áramerősséget és az általa leadott forgatónyomatékot az idő függvényében.

Ezt követően a szimulációs programot a korábban kísérletileg meghatározott (lásd 5.2 fejezet) motorjellelmezőkkel lefutattuk, a szögsebesség értékét zérusnak választva, így szimulálva a rögzített forgórészt. A rögzített forgórészt úgy is szimulálhatjuk, hogy annak tehetetlenségi nyomatékára „végtelen nagy” értéket állítunk be a programban. A tesztmérések során, és a szimulációval kapott áramerősség- és forgatónyomaték-idő függvények a 83. és 84. ábrákon láthatók.



83. ábra A tesztmérések során és a szimulációval kapott áramerősség-idő függvények [17]

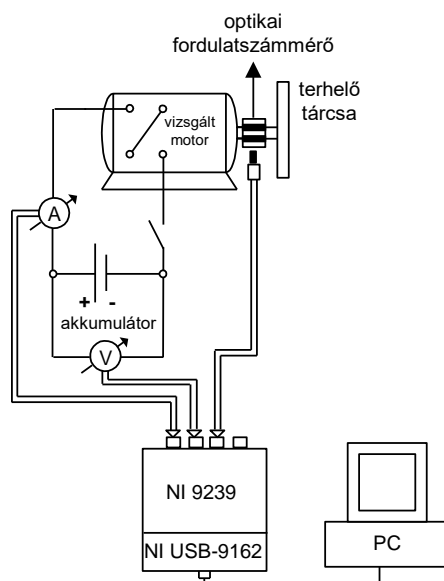


84. ábra A tesztmérések során és a szimulációval kapott forgatónyomaték-idő függvények [17]

A mért és szimulált függvények relatív százalékos eltérése a telítési szakaszon (0,25 [s] felett) kisebb, mint 1%, míg a felfutási szakaszon a szimulált függvények némileg meredekebbek, mint a mérték. Ennek magyarázata lehet a forgórész kismértékű elfordulása, amely a tengelykapcsolók, nyomatékmérő és tárcsafék rugalmasságából adódik, valamint az alkalmazott modell és a mért elektromágneses jellemzők pontatlansága. Összességében az eredmények megerősítik a modell helyességét és a szimulációs program megfelelő működését. Emellett visszajelzéssel szolgálnak a bemenő adatként szolgáló elektromágneses jellemzők pontosságára.

5.3.2 DINAMIKUS TESZTMÉRÉSEK

A dinamikus tesztmérések során alkalmazott mérőelrendezést a 85. ábra mutatja.

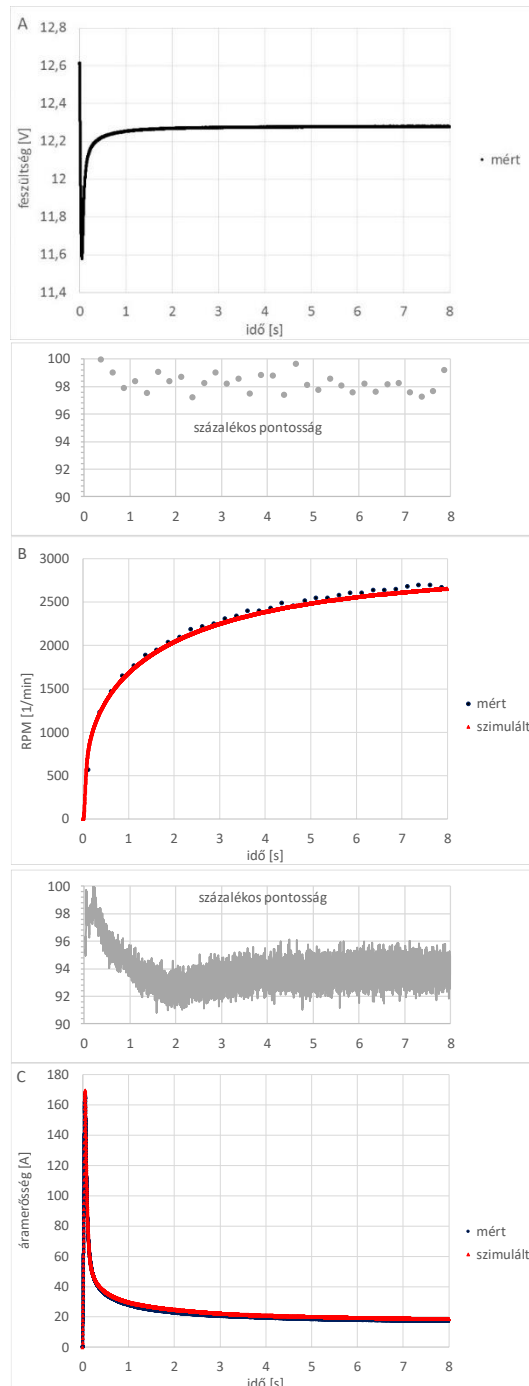


85. ábra A dinamikus tesztmérések során alkalmazott mérőelrendezés

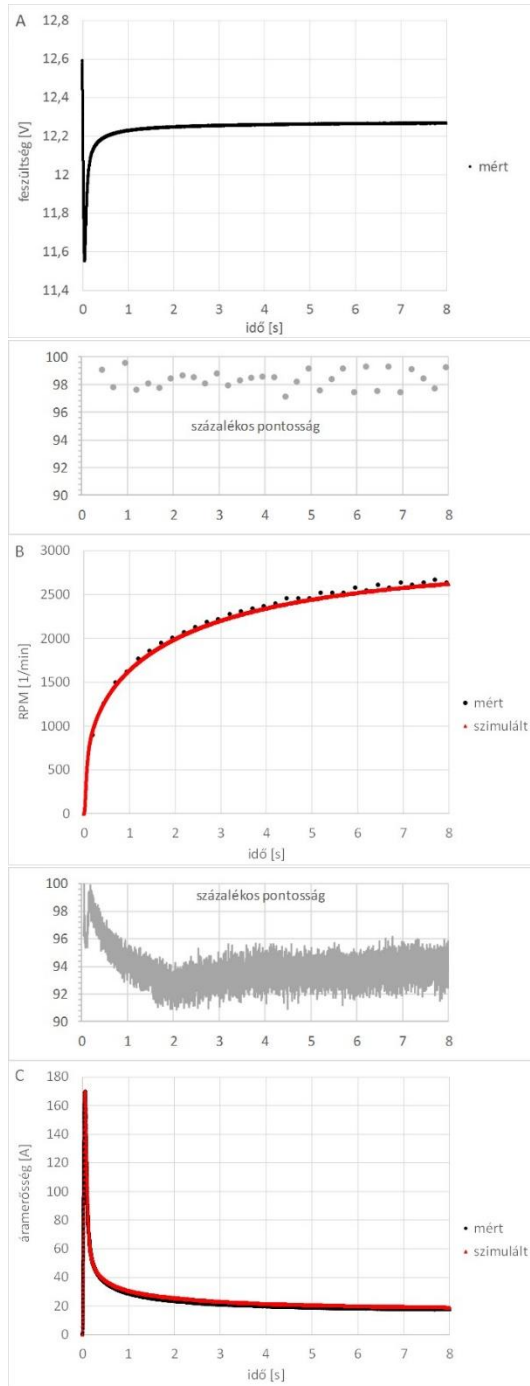
A dinamikus tesztméréseket, a motor tengelyére rögzített, különböző tehetetlenségi nyomatékú terhelő tárcsákkal végeztük el. A mérések során a motorra ráadtuk egy 12 [V]-os gépkocsi akkumulátor feszültségét, így az álló helyzetből felpörgött, miközben mértük az akkumulátoron eső feszültséget, a motor fordulatszámát és a rajta átfolyó áram erősségét az idő függvényében (lásd a további részleteket az 5.1 fejezetben).

Ezt követően a szimulációs programot a korábban kísérletileg meghatározott (lásd 5.2 fejezet) elektromágneses és dinamikai motorjellemzőkkel lefuttattuk a terhelő forgatónyomaték (M_{terh}) értékét nullának választva. Az egyes tesztméréseknél csak a terhelő tehetetlenségi nyomaték (J_{terh}) értéke különbözött, minden más kísérleti körülmény megegyezett. Ebből adódóan a szimulációs programban is csak a terhelő tehetetlenségi nyomaték értékét változtattuk. A program az akkumulátoron ténylegesen mért feszültség-idő függvényeket (86., 87., 88. és 89. ábrák A része) olvassa be "look-up table" formájában, és abból számolja a motoron eső feszültséget, az akkumulátort és a motort összekötő vezetékek elektromos ellenállásának ismeretében. A 86., 87., 88. és 89. ábrákon a mért és szimulált eredményeket hasonlítom össze különböző terhelő tehetetlenségi nyomatékok alkalmazása esetén. Az ábra A, B és C része az akkumulátor feszültségét, a motor fordulatszámát és a motoron átfolyó áram erősségét szemlélteti az idő függvényében. Az ábrákon a mért (fekete) és szimulált (piros) értékek mellett a

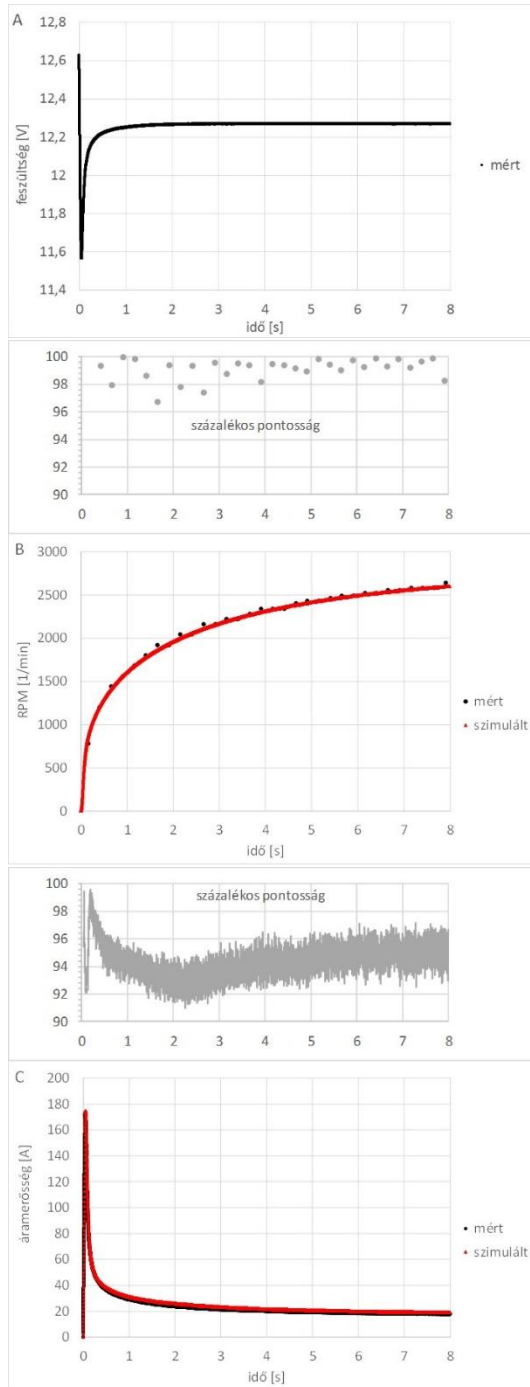
szimulált és mért értékek egymáshoz viszonyított százalékos pontosságát is feltüntettem.



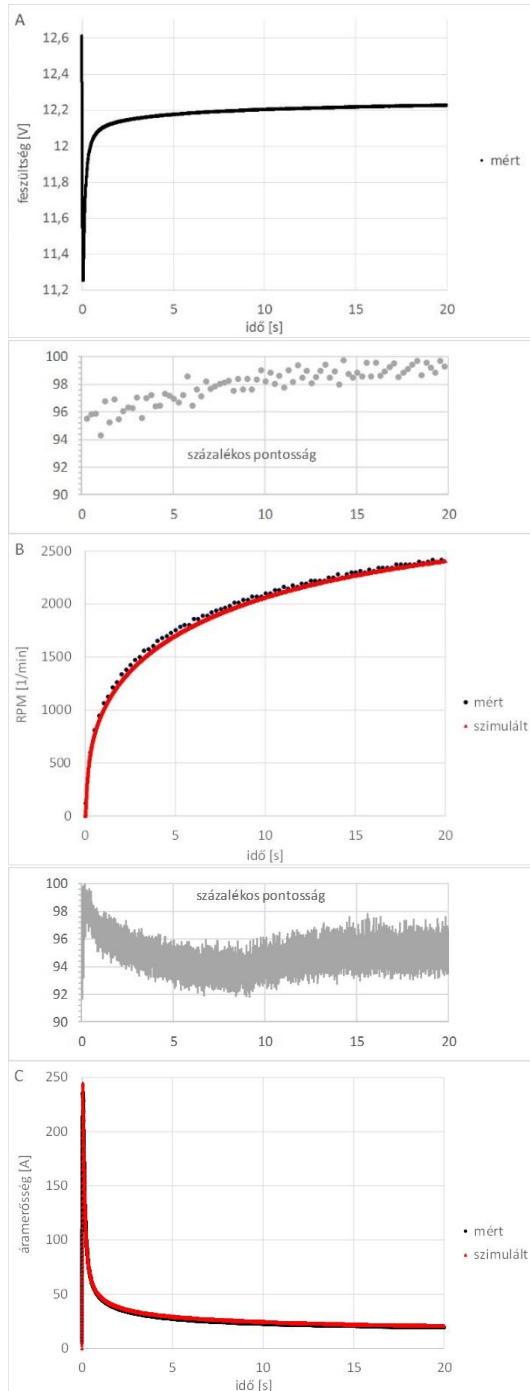
86. ábra A dinamikus tesztmérés és a szimuláció eredményeinek összehasonlítása ($J_{terh} = 0,0001576 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{)] [15]$



87. ábra A dinamikus tesztmérés és a szimuláció eredményeinek összehasonlítása ($J_{terh} = 0,0018561 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$) [15]



88. ábra A dinamikus tesztmérés és a szimuláció eredményeinek összehasonlítása ($J_{terh} = 0,0035496 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$) [15]



89. ábra A dinamikus tesztmérés és a szimuláció eredményeinek összehasonlítása ($J_{terh} = 0,06785 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{)] [15]$

A fenti ábrákon adott százalékos pontosságot az alábbi összefüggéssel számoltuk:

$$\text{százalékos pontosság} = \left(1 - \frac{|M-SZ|}{SZ}\right) \cdot 100\% \quad (115)$$

ahol M és SZ jelöli a mért és a szimulált értéket.

Az ábrákat elemezve az alábbi megállapításokat tehetjük:

Mielőtt a feszültséget rákapcsoljuk a motorra, az akkumulátor kapocsfeszültsége megegyezik az üresjáratú feszültséggel ($\sim 12,6$ [V]). A feszültség rákapcsolását követően az áram erőssége, ezzel párhuzamosan az akkumulátor belső ellenállásán eső feszültség gyorsan növekszik, ebből adódóan az akkumulátor kapocsfeszültsége csökken. Ezt követően az áram erőssége eléri a csúcserőértékét, az akkumulátor kapocsfeszültsége pedig minimumát. A továbbiakban az áramerősség értéke fokozatosan csökken, ezzel párhuzamosan az akkumulátor kapocsfeszültsége növekszik, míg mindkettő be nem áll egy adott konstans értékre, azaz beáll az állandósult állapot. Mindeközben a motor fordulatszám, álló helyzetből indulva, kezdetben gyorsan, majd egyre lassabban növekszik, míg a fordulatszám be nem áll egy adott állandó értékre.

A 86-89. ábrák alapján megállapítható, hogy a terhelő tehetetlenségi nyomaték növekedésével az áramerősség csúcserőértéke növekszik, a szöggyorsulás értéke pedig csökken.

Kiseb terhelő tehetetlenségi nyomatékok esetén (86-88. ábra) a szimulált és mért fordulatszámok egymáshoz viszonyított százalékos pontossága 98-99%, míg nagyobb terhelés mellett (89. ábra) 96-99% között változik. Az áramerősség esetén, a megfelelő tartományok 93-98% és 94-99%. Tehát megállapítható, hogy a szimulált és mért értékek relatív százalékos eltérése a fordulatszám esetén mindenütt kisebb vagy egyenlő, mint 4%, míg az áramerősségek esetén 7%. Tehát a dinamikus tesztmérések megerősítik az alkalmazott motormodell helyességét, a motorszimulációs programmodul megfelelő működését, és visszajelzést adnak a mért elektromágneses és dinamikai jellemzők (lásd 5.2 fejezet) pontosságára. Összefoglalva elmondható, hogy a kifejlesztett motorszimulációs modul, feltöltve a mért bemenő adatokkal, megfelelő pontossággal működik ahhoz, hogy beépítsük a járműdinamikai szimulációs programunkba.

6 A JÁRMŰADATOK OPTIMALIZÁLÁSA ADOTT JÁRMŰDINAMIKAI CÉLOKHOZ

Kutatásaim egyik fő célja egy olyan összetett eljárás kidolgozása volt, amellyel optimalizálni tudjuk a DE Műszaki Karán kifejlesztett prototípus versenyautók műszaki adatait különböző járműdinamikai célokhoz (versenyfeladatokhoz). Ennek megvalósítására egy moduláris szerkezetű műszaki adat optimalizáló szoftvert dolgoztam ki. Ennek egyik modulja a 4. fejezetben ismertetett járműdinamikai szimulációs modul, a másik egy optimalizációs modul, amely a szimulációs modul által generált függvényértékeket felhasználva, kiszámítja a jármű műszaki adatainak optimális értékeit. Ez utóbbi modult, amelyhez két független optimalizációs eljárást dolgoztam ki, ebben a fejezetben ismertetem.

A járműadat optimalizálása nem csak a közúti közlekedésben fontos (például a lehető legkisebb energiafogyasztásra törekedve), hanem fontos szerepet játszik a versenysportban is, hiszen egy járműkonstrukció csak akkor lehet igazán versenyképes, ha az adott verseny célhoz illesztjük (állítjuk be) a jármű műszaki adatainak értékét. A továbbiakban először az optimalizációval kapcsolatos általános fogalmakat tisztázom [79], [80].

A versenyautó véges számú műszaki adattal jellemezhető. Ezen adatok közül tervezési paramétereknek nevezzük azokat, amelyek értéke az optimalizálási eljárás során valamilyen technikai, vagy egyéb okból kifolyólag rögzített. Azokat az adatokat, amelyek értéke módosítható, tervezési változóknak nevezzük. Ezen adatok együttesen egyértelműen meghatározzák az adott járműkonstrukciót.

A tervezési paraméterek bevezetése azért szükséges, mert a legtöbb esetben a jármű összes adatát (műszaki jellemzőjének értékét) nem választhatjuk meg szabadon. Ennek számos oka lehet, ezek közül néhány: az adott jellemző értékét a versenyszabályzat rögzíti, de lehet valamilyen gazdasági ok (például, egy meglévő vázszerkezet, motor vagy egyéb alkatrész használata), esetleg az adott műszaki jellemző optimális értéke valahonnan ismert.

A tervezési változók lehetnek folytonosak vagy diszkrét. A folytonos tervezési változókkal általában egyszerűbb dolgozni, mivel ezek egy adott tartományban tetszőleges értéket felvehetnek. A gyakorlatban felmerülő feladatok egy részében azonban, a változó csak bizonyos diszkrét értékeket vehet fel. Erre példa, amikor az autóra felnit vagy gumibroncsot választunk a kereskedelmi forgalomban elérhető méretekből. A két eset közötti átmenetet jelent, amikor a tervezési változó optimális értékét egy nagy elemszámú, diszkrét halmazon keressük. Ezt úgy oldjuk meg, hogy a változót folytonosnak tekintjük, így keresve meg az optimumot, majd kiválasztjuk

a hozzá legközelebb eső diszkrét értéket. Ebben az esetben pszeudodiszkrét tervezési változóról beszélünk.

Azon megkötéseket, amelyek egy tervezési változó lehetséges értékeit (pl. egy adott tartományra) korlátozzák, optimalizálási feltételeknek vagy kényszereknek nevezzük. A fenti feltételekre példák: a versenyszabályzat által előírt minimális és maximális nyomtáv, vagy tengelytáv, vagy lánchajtás esetén a minimálisan megvalósítható fogszám egy adott lánckeréken.

Általában nagyon, vagy bizonyos esetekben végtelen sok járműkonstrukció létezik, amely eleget tesz az adott optimalizálási feltételeknek. Ezeket megengedett járműkonstrukciónak nevezzük. Ahhoz, hogy ezek közül kiválasszuk az adott verseny célhoz az optimálisat, be kell vezetnünk egy mérőszámot az összehasonlításhoz. Ez a mérőszám egy olyan függvény értéke, amely a tervezési változók terén van értelmezve. Ezt a függvényt célfüggvénynek nevezzük. A célfüggvényre egy példa az álló helyzetből 100 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges menetidő a jármű tömegének és a motor teljesítményének függvényében megadva. A fenti példában a többi járműparaméter értéke rögzített (azaz tervezési paraméterek). Az optimalizálási feladatot legtöbbször a célfüggvény minimumának kereséseként fogalmazzuk meg.

Az optimalizálási eljárást felhasználhatjuk egy új jármű tervezése során, vagy egy meglévő jármű tervezési változóinak beállításához egy adott verseny célhoz. Az első esetben szinte az összes, a másodikban csak korlátozott számú jellemző változtatható, mivel a fennálló optimalizálási kényszerek száma lényegesen nagyobb.

A különböző mérnöki optimalizálási feladatok megoldására számos algoritmust és módszert alkalmaznak [81], [82], [83], [84]. Ilyenek például a fuzzy logika [85], [86], az adaptív neuro-fuzzy következtetési rendszerek [87], [88], a „Taguchi” módszer [89], [90], a szürke rendszer elmélet („Grey System Theory”) [84], [91], [92], tanítás-tanulás alapú optimalizáció („Teaching-Learning-Based Optimization”) [93], [94], a genetikus algoritmusok [95], részecske-raj alapú optimalizáció [96], „tabu” keresés [97], és a szimulált hűtés [98], [99], [100], [101].

A szakirodalomban számos közlemény foglalkozik járművek, illetve azok egyes részegységeinek optimalizációjával a fent említett algoritmusok és módszerek alkalmazásával. A [102] közlemény egy többcélú optimalizálást mutat be, alkalmazva a részecske-raj alapú optimalizációs algoritmust egy plug-in hibrid jármű hajtáslánccának és vezérlőegységének optimalizálására. A [103] közlemény szintén többcélú optimalizálást mutat be genetikus algoritmus segítségével, amelynek célja a jármű gyorsulásának növelése mellett, csökkenteni az üzemanyag-fogyasztást és a károsanyag-kibocsátást. A [104] közleményben szintén genetikus algoritmust

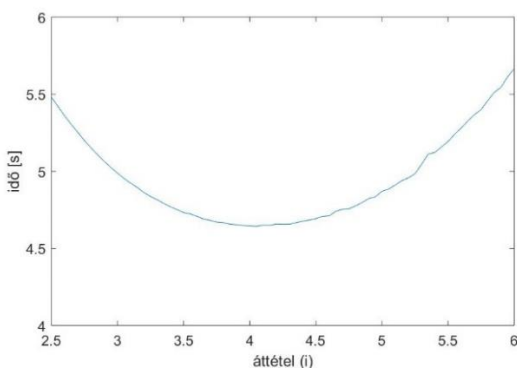
alkalmaznak elektromos járművek hajtásláncának optimalizálására. A [105] közleményben egy evolúciós algoritmust alkalmaznak többcélú optimalizálási feladat megoldására, amelynek célja egy jármű hajtásláncának optimalizálása a költségek, valamint az energiafelhasználás csökkentése érdekében. A [106] közleményben szintén egy evolúciós, többcélú genetikus algoritmust alkalmaznak egy párhuzamos hibrid elektromos busz hajtásláncának optimalizálására. A [107] közleményben, egy másik alkalmazási területként, részecskeraj-algoritmust alkalmaznak járműflották optimalizálására. A [108] közleményben MATLAB/Simulink környezetben kifejlesztett szimulációs programokat alkalmaznak különféle hajtáslánc-konfigurációk és komponensek vizsgálatára hibrid hajtásláncokhoz. A teljesítmény optimalizálása a szimulációs eredményeken alapult. Végül a [109] közlemény egy elektromos jármű hajtásláncának optimalizálását mutatja be. A cél a jármű „emelkedő” (mászó) képességének és hatótávolságának maximalizálása, amelyhez szimulált hűtést alkalmaznak.

Mint látható, az említett algoritmusok, köztük a szimulált hűtés járműipari alkalmazásának kiterjedt szakirodalma van. A 6.2 fejezetben a szimulált hűtés alkalmazását mutatom be egy prototípus versenyautó tervezési változónak optimalizálására különböző versenyfeladatokhoz. Ez egy teljesen új alkalmazási terület, amelyhez hasonlót nem találtam a szakirodalomban. Az alkalmazott eljárás hatékony segítség a verseny csapatok számára a különböző hazai és nemzetközi versenyekre való felkészülésben.

6.1 AZ OPTIMÁLIS MŰSZAKI ADATOK MEGHATÁROZÁSA (KÖZELÍTÉSE) GRAFIKUS MÓDSZERREL

A műszaki gyakorlatban számos esetben előfordul, hogy csak egy vagy két tervezési változót optimalizálunk, és a célfüggvény „sima” viselkedésű, azaz szakadásoktól, hirtelen változásoktól mentes. Az ilyen esetekben a nagy számításigényű optimalizálási algoritmusok helyett egy egyszerűbb, „grafikus módszer” is alkalmazható. Ennél a módszernél egy egységes „rácst” definiálunk a tervezési változó(k) terén, majd a szimulációs program segítségével kiszámítjuk a célfüggvény értékeit a rácspontokban. Ezt követően a célfüggvény értékeit egy- vagy kétváltozós diagramokon ábrázoljuk, majd (jó közelítéssel) leolvassuk a tervezési változók optimális értékeit, amelyek leggyakrabban a függvény minimumához tartoznak. A leolvasott érték pontossága a legtöbb műszaki feladat esetében megfelelő, ha a rácspontokat kellően sűrűn választjuk meg. Természetesen ez az eljárás nem használható kettőnél több tervezési változó vagy nagyon összetett célfüggvény esetén.

Példaként az optimalizálási feladat legyen a láncáttétel (i_{12}) azon optimális értékének megtalálása, amellyel a versenyautó a lehető legrövidebb idő alatt (t) éri el álló helyzetből a 40 [km/h] sebességet. (A 38. ábra alapján látható, hogyha a láncáttétel adott értéke kétszeresére változik, az önmagában ~6% eltérést okoz az említett sebességben.) Ebben a feladatban a tervezési változó az áttétel, a célfüggvény pedig a $t(i_{12})$ függvény. A megoldáshoz először a járműdinamikai szimulációs program alkalmazásával kiszámítottuk a jármű sebesség-idő függvényeit különböző áttételek mellett. Majd ezen függvényekből, minden áttétel esetén meghatároztuk a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges időket. Ezt követően a kapott időket ábrázoljuk a hozzájuk tartozó áttételek függvényében, majd a pontsorra egy folytonos függvényt illesztünk (90. ábra). Az elméleti optimális érték ennek a függvénynek a minimumához tartozik.



90. ábra A 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges idők a láncáttétel függvényében [23]

Mivel a szimulációs programot sok különböző áttétellel kell lefuttatnunk, ezért automatizáltuk a folyamatot egy saját fejlesztésű MATLAB programkód (91. ábra) segítségével.

```

% Áttétel változtatás hatásának elemzése:
attetelek=2.5:0.05:6;           % Vizsgált áttételek vektora
t_40=zeros(length(attetelek)); % Idővektor
v_40=zeros(length(attetelek)); % Sebességvektor
open('GENERAL.slx');           % Simulink modell megnyitása
for ind1=1:length(attetelek)
    i12=attetelek(ind1);        % Aktuális vizsgált áttétel
    sim('GENERAL.slx');
    ind2=1;
    while sebesseg(ind2,2)<40    % A 40kmph sebesség eléréséhez tartozó index keresése
        ind2=ind2+1;
    end
    t_40(ind1)=sebesseg(ind2,1); % A 40kmph sebesség elérésének időpontja
    v_40(ind1)=sebesseg(ind2,2);
end
plot(attetelek,t_40)           % Az időpontok ábrázolása az áttételek függvényében
axis([2.5 6 4 6])

```

91. ábra Az idő-áttétel függvény automatizált előállítására szolgáló MATLAB programkód [23]

A programkód először definiálja a vizsgálandó láncáttételeket, amelyeket a 2,5 és 6 közötti tartományban 0,05 lépésközzel adunk meg. Majd a kód egy „for” ciklus

segítségével minden áttétel esetén lefuttatja a szimulációs programot. Ezt követően minden egyes futtatás után feljegyzi a 40 [km/h] sebességhez tartozó időket, amelyeket végül ábrázol a hozzájuk tartozó áttételek függvényében.

Két tervezési változó esetén, a fent bemutatott eljárás szintén alkalmazható. Példaként az optimalizálási feladat legyen a láncáttétel (i_{12}) és a súlypont pozíció (l_h) azon optimális értékeinek meghatározása, amellyel a versenyautó a lehető legrövidebb idő alatt éri el álló helyzetből a 40 [km/h] sebességet. A súlypont pozíció alatt a súlypont helyének a hátsó tengelytől mért vízszintes irányú távolságát értjük.

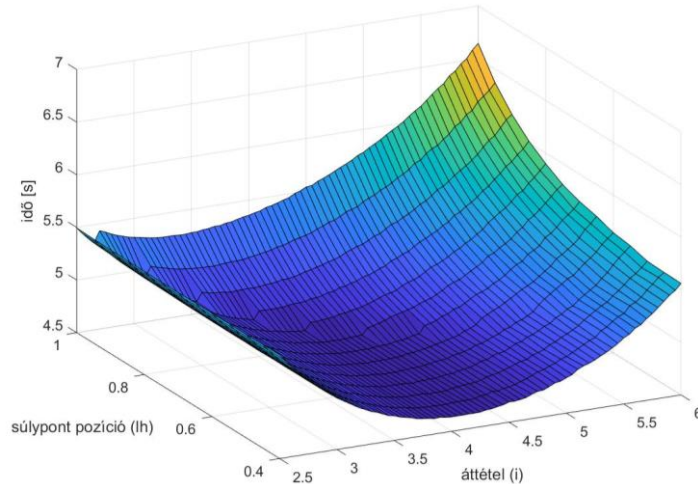
Mivel a szimulációs programot sok különböző áttétel és súlypont pozíció párral le kell futtatnunk, ezért itt is automatizáltuk a folyamatot egy saját fejlesztésű MATLAB programkód (92. ábra) alkalmazásával. A programkód először definiálja a vizsgálandó láncáttétel és súlypont pozíció értékeket, amelyeket a 2,5 és 6, valamint 0,4 és 1 értékek közötti tartományba 0,05 lépésközzel adunk meg. Ezt követően két egymásba ágyazott „for” ciklus segítségével a kód a különböző értékpárokkal lefuttatja a szimulációs programot, így megkapjuk a jármű különböző sebesség-idő függvényeit. Majd a fenti függvényekből, minden értékpár esetén meghatározzuk a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges időt. Ezt követően ezeket az időket ábrázoljuk a hozzájuk tartozó láncáttétel és súlypont pozíció függvényében (93. ábra). Végül a grafikonról a minimális időhöz tartozó optimális értékeket leolvassuk.

```

% Áttétel változtatás hatásának elemzése:
attetelek=2.5:0.05:6;           % Vizsgált áttételek vektora
sulypontok=0.4:0.05:1.0;      % Vizsgált súlypont-pozíciók vektora
t_40=zeros(length(attetelek),length(sulypontok)); % Időmátrix
v_40=zeros(length(attetelek),length(sulypontok)); % Sebességmátrix
open('GENERAL.slx');          % Simulink modell megnyitása
for ind_i=1:length(attetelek)
    i12=attetelek(ind_i);      % Aktuális vizsgált áttétel
    for ind_s=1:length(sulypontok)
        lh=sulypontok(ind_s); % Aktuális vizsgált súlypont pozíció
        sim('GENERAL.slx');
        ind_v=1;
        while sebesseg(ind_v,2)<40 % A 40kmph sebesség eléréséhez tartozó index keresése
            ind_v=ind_v+1;
        end
        t_40(ind_i,ind_s)=sebesseg(ind_v,1); % A 40kmph sebesség elérésének időpontja
        v_40(ind_i,ind_s)=sebesseg(ind_v,2);
    end
end
[X,Y]=meshgrid(2.5:0.05:6,0.4:0.05:1.0);
surf(X,Y,t_40')              % Az időpontok ábrázolása az áttételek és súlypont pozíciók függvényében

```

92. ábra A 88. ábrán látható függvény automatizált előállítására kifejlesztett MATLAB programkód [23]



93. ábra A 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges idő a láncáttétel és súlypont pozíció párok függvényében [23]

Az ábra alapján, az elméletileg optimális láncáttétel: 4, míg a hozzá tartozó optimális súlypont pozíció: 0,4 [m].

6.2 AZ OPTIMÁLIS MŰSZAKI ADATOK MEGHATÁROZÁSA „SZIMULÁLT HŰTÉS” ALKALMAZÁSÁVAL

Három vagy több változó, vagy összetett célfüggvény esetén, vagy ha egyszerűen csak nagyobb pontosságra van szükség, a „grafikus módszer” már nem alkalmazható. Esetünkben, a versenyautó paramétereinek optimalizálásánál, a célfüggvény zárt formában nem állt rendelkezésünkre, mivel a célfüggvény előállításához szükséges értékeket a szimulációs programmal számítottuk ki. Ebből adódóan, az optimalizálási feladat megoldásához csak metaheurisztikus algoritmusokat [110] alkalmazhattunk, amelyek közül a szimulált hűtést [99], [98], [100] választottam ki. Ennek oka, hogy ez egy hatékony és robusztus algoritmus, amelyet nagy konvergenciasebesség jellemez, emellett a MATLAB-ban opcionálisan elérhető. Hatékonyságát mutatja, hogy elterjedten alkalmazzák mérnöki és informatikai problémák megoldására [100], [101].

A tényleges megvalósításhoz a MATLAB Global Optimization Toolbox-ban található Simulated Annealing függvényt („simulannealbnd”) használtuk. Ez a függvény a szimulált hűtés általános eljárásán alapul, viszont annak egy továbbfejlesztett változatát használja, nevezetesen az adaptív szimulált hűtést („Adaptive Simulated Annealing”) [101]. A fenti, adaptív változatban, a hőmérséklet és a lépésköz (lásd később) változtatáshoz tartozó különböző paramétereket az algoritmus

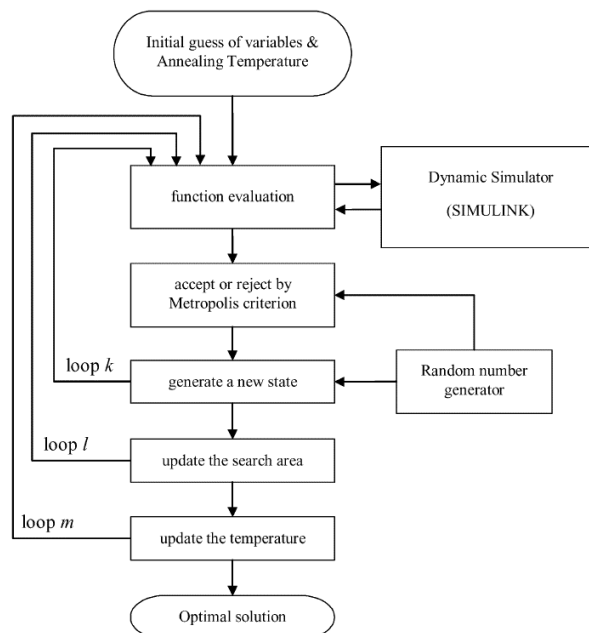
automatikusan állítja be, míg a hagyományos változatban ez a felhasználó feladata, amihez jelentős tapasztalat szükséges.

6.2.1 A SZIMULÁLT HŰTÉSI ALGORITMUS ÁLTALÁNOS LEÍRÁSA

A szimulált hűtés egy olyan optimalizációs algoritmus, amely egy célfüggvény globális minimumának meghatározására használható részben annak köszönhetően, hogy a folyamat során nem „akad el” a lokális minimumokban. Az algoritmus a kohászatban alkalmazott lágyítási eljárás alapján működik, ahol a fémeket felmelegítik, majd lassan lehűtik. Ha a rendszer lassan hűl, minden hőmérsékleten beállhat a termikus egyensúly. Ennek P valószínűségét, hogy adott T hőmérsékleten a rendszer E energiájú állapotba kerül, a (116) összefüggés szerinti Boltzmann-eloszlás szolgáltatja [100]:

$$P(E) = \frac{1}{Z(T)} \cdot e^{\left(\frac{-E}{k_B \cdot T}\right)} \quad (116)$$

ahol $Z(T)$ a normálási tényező és $k_B = 1,3806 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K}\right]$ a Boltzmann-állandó. Ha a rendszer túl gyorsan hűl, akkor metastabil állapotba kerülhet, azaz „csapdába eshet” egy magasabb energiájú állapotban. A szimulált hűtés folyamata a Monte Carlo-módszeren alapul, ahol az E energia helyett a ϕ célfüggvény értékét, a T valós hőmérséklet helyett pedig a T_A mesterséges hőkezelési hőmérsékletet vezetnek be. A 94. ábra a szimulált hűtés által alkalmazott algoritmus folyamatábráját mutatja [100].



94. ábra A szimulált hűtés által alkalmazott algoritmus folyamatábrája [81], [100]

Vegyünk példának egy egydimenziós feladatot ($\dim(x) = 1$), ahol az x folytonos tervezési változó optimális értékét kívánjuk meghatározni. Az x^k érték közelében egy új x^{k+1} értéket definiálunk sztochasztikusan a (117) egyenlet alkalmazásával [100]:

$$x^{k+1} = x^k + r \cdot \Delta s^l \quad \forall r \in [-1,1] \quad (117)$$

ahol x^k és x^{k+1} az iteráció k -adik és $k + 1$ -edik értéke, Δs^l az aktuális lépésköz és r egy véletlenszerű szám. Ha a célfüggvény értéke a lépés során csökken, akkor az új x^{k+1} értéket feltétel nélkül elfogadjuk új (és a jelenleg optimális) értéknek (118):

$$\varphi(x^{k+1}) \leq \varphi(x^k) \quad (118)$$

Más esetben a Metropolis-kritérium (119) megadja az x^{k+1} érték új értéként való elfogadásának feltételét [100]:

$$e^{\left(-\frac{\varphi(x^{k+1}) - \varphi(x^k)}{k_B \cdot T_A^m}\right)} \geq p \quad p \in [0,1] \quad (119)$$

ahol T_A^m az aktuális hőkezelési hőmérséklet és p egy véletlenszerűen generált érték a $[0,1]$ intervallumban. Az eljárás a belső hurkon addig ismétlődik, amíg adott N_k ciklus le nem fut. [100]

Az algoritmus előrehaladtával a lépésköz (vagyis a keresési terület) csökken, és a külső hurokban a lépésközt úgy kell kiválasztani, hogy az elfogadott és kiértékelt lépések aránya (120) közel 0,5 legyen. [111]

$$q = \frac{N_{elfogadott}}{N_{kiértékelt}} \approx 0,5 \quad (120)$$

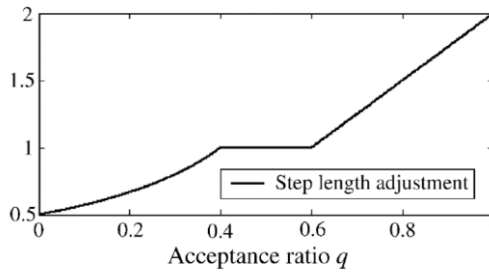
Ha az arány túl magas, akkor túl sok felesleges lépés lesz elfogadva, így a számítási idő túl hosszú lesz. Viszont ha az arány túl alacsony, akkor az egy lokális minimumba való „csapdába esést” eredményezhet.

A T_A hőkezelési hőmérséklet és a Δs^l lépésköz között közvetlen kapcsolat van. Magas hőmérsékleten a célfüggvény nagymértékű csökkenése elfogadható, és nagy lépésköz választható nagy keresési terület lefedésével. A kezdeti hőmérsékletnek elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy minden lépés el legyen fogadva. A fentiek alapján a szimulált hűtés elméletileg alkalmas a globális minimum megtalálására.

Csökkenő T_A hőmérséklet mellett a lépésközt csökkenteni kell, mivel a (120) egyenlet csak kisebb mértékben csökkenő célfüggvényt fogad el, ami kisebb q elfogadási arányt eredményez. Különböző megközelítések léteznek a lépésköz beállítására, ezek egyike a következő egyszerű, de hatékony módszer (121) [112]:

$$\Delta S^{l+1} = \begin{cases} \Delta S^l \left(1 + c \cdot \frac{q-0,6}{0,4}\right) & \text{ha } q > 0,6 \\ \Delta S^l & \text{ha } 0,4 \leq q \leq 0,6 \\ \Delta S^l \left(1 + c \cdot \frac{0,4-q}{0,4}\right)^{-1} & \text{ha } q < 0,4 \end{cases} \quad (121)$$

A lépésköz változásának mértékét a c paraméter állítja be, melynek értéke általában 1 [81]. A 95. ábra a $\frac{\Delta S^{l+1}}{\Delta S^l}$ hányadost ábrázolja a q elfogadási arány függvényében, ha $c = 1$.



95. ábra A lépésköz beállításának módja [100]

Egy homogén algoritmus esetén a T_A hőmérsékletet N_l számú lépésköz-beállítás után csökkentjük, így egy „Markov-lánc” jön létre az m külső hurokban. Mindig feltételezzük, hogy megtaláltuk az optimális értéket az aktuális T_A^m hőmérsékleten. A hőmérséklet csökkentésének legegyszerűbb módja, ha azt megszorozzuk egy adott α állandóval (122) [99], [100]:

$$T_A^{m+1} = \alpha \cdot T_A^m, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (122)$$

Az α javasolt értéke 0,5 és 0,99 között változik. Ha a hőmérséklet elég lassan változik (azaz $\alpha \rightarrow 1$), akkor nagyobb valószínűséggel találjuk meg a globális minimumot, míg a kis α értékek gyorsabban vezetnek eredményre.

A számítás ezután újraindul, és az aktuálisan optimális x^{opt} értékkel, valamint a frissített hőmérséklettel folytatódik. Ebben az esetben a megállítási (konvergencia) kritériumot a (123) egyenlőtlenség határozza meg:

$$|\varphi(x^{k-i}) - \varphi(x^{opt})| \leq \varepsilon, \quad i = 0, \dots, N_\varepsilon - 1 \quad (123)$$

ahol ε egy problémaszpecifikus tényező és N_ε a lépések száma.

A szimulált hűtési algoritmus konvergenciája a $T_A^{m=0}$, N_k , N_l , N_m , α és N_ε értékek megfelelő megválasztásával biztosítható, amelyek egyértelmű jelentéssel bírnak, és az adott feladathoz beállíthatók a felhasználó által [81]. A MATLAB által használt adaptív szimulált hűtés esetén a program automatikus állítja be ezeket az értékeket.

Az optimalizáció során a MATLAB-ban mi az alapértelmezett beállításokat (default) használtuk, amelynél a lépésköz megegyezik az aktuális hőmérséklettel, és az irány véletlenszerűen választott. Ebben az esetben az aktuális hőmérsékletet a kezdeti hőmérsékletből a program a $T = T_0 \cdot 0,95^m$ összefüggéssel számítja, ahol m a hűtési paramétert jelöli, amely megegyezik az iterációk számával.

6.2.2 AZ ALGORITMUS ALKALMAZÁSA A VERSENYAUTÓ PARAMÉTEREINEK OPTIMALIZÁLÁSÁRA

Példaként először egy tervezési változó esetén alkalmazzuk a szimulált hűtéssel történő optimalizálást. A feladat, az előzőhöz hasonlóan, az optimális láncáttétel meghatározása, amellyel a versenyautó álló helyzetből a legrövidebb idő alatt éri el a 40 [km/h] sebességet.

Az optimalizáció elvégzéséhez egy MATLAB kód (függvény) (96. ábra) létrehozására volt szükség, amely a szimulációs programot felhasználva kiszámítja a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges időket a különböző láncáttételek esetén.

```
function [ t_out ] = GENERAL_func_vel40_il2( i_g )
%[ t_out ] = GENERAL_func_vel40_il2( i_g )
%   A függvény lefuttatja a szimulációt a paraméterben kapott i_g (=il2)
%   áttétel értékkel és visszaadja a 40km/h sebességérték eléréséhez
%   szükséges időt.

assignin('base', 'il2', i_g);      % Az il2 értékének megváltoztatása a Workspace-n a
paraméterben kapott i_g értékre

sim('GENERAL.slx');                % A szimuláció futtatása

ind_v=1;
while sebesseg(ind_v,2)<40          % A 40 km/h sebesség eléréséhez tartozó index keresése
    ind_v=ind_v+1;
end

t_out=sebesseg(ind_v,1);

end
```

96. ábra A különböző áttételek esetén, a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges idők kiszámítására kifejlesztett MATLAB kód [23]

Ezt követően az optimalizáció, a fenti kódot felhasználva, a szimulált hűtés alkalmazásával történik. Az ehhez kifejlesztett MATLAB programkódot a 97. ábra szemlélteti.

```

% Adatok betöltése a szimulációkhoz:
GENERAL_model_data
% Simulink modell megnyitása
open('GENERAL.slx');

% Kezdeti áttétel-tipp:
i_init=3.5;
% Alsó határérték:
i_l=3;
% Felső határérték:
i_u=5;

% Futtatási paraméterek (részeredmények folyamatos plottolása):
options = saoptimeset('PlotFcns',{@splotbestx,@splotbestf,@splotx,@splotf});

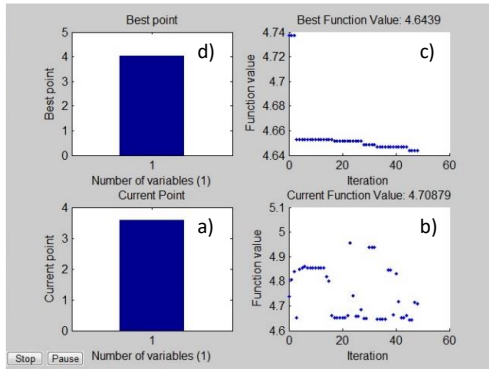
% Optimalizáció futtatása:
[i_opt,fval,exitFlag,output] = simulannealbnd(@GENERAL_func_vel40_i12,i_init,i_l,i_u,options);

% Eredmények kiírása:
fprintf('Iterációk száma : %d\n', output.iterations);
fprintf('Optimális áttétel : %d\n', i_opt);
fprintf('Legjobb függvényérték (legrövidebb idő) : %g\n', fval);

```

97. ábra A szimulált hűtéssel történő optimalizációhoz kifejlesztett MATLAB programkód [23]

Az optimalizációs program meghatározza a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges minimális időt, valamint az ehhez tartozó optimális áttétel értékét. A program futása közben az aktuális értékeket négy programablakban, valós időben követhetjük (98. ábra).



98. ábra A paraméterértékek valós idejű monitorozása az optimalizáció során [23]

Az első (a) ablak az áttétel aktuális értékét mutatja, a második (b), a korábban vizsgált áttételekkel számított időket, a harmadik (c), a legkisebb időt az iterációk számának függvényében, végül a negyedik (d) az optimális áttétel értékét, amelynél az idő minimális. A futás végén az optimális érték a MATLAB Command Window-ban is megjelenik (99. ábra).

```

Command Window
>> GENERAL_model_optimal_attetel
Stop requested.
Iterációk száma : 74
Optimális áttétel : 4.031077e+00
Legjobb függvényérték (legrövidebb idő) : 4.6439
fx >>

```

99. ábra A MATLAB Command Window-ban megjelenő eredmények [23]

A következőkben a szimulált hűtést alkalmazzuk ugyanazon versenyautó két független paraméterének optimalizálására. Ezek a paraméterek, mint a grafikus módszer esetében, a láncáttétel és az autó súlypontjának vízszintes irányú pozíciója. Azért ezekre a paraméterekre optimalizáltunk, mert a 2. fejezetben bemutatott versenyautón csak ezeket tudtuk nagyobb átalakítások nélkül változtatni. Emellett ezek jelentősen befolyásolják a jármű menetdinamikai tulajdonságait. A fenti paramétereket a következő két feladatra optimalizáltuk:

- 40 [km/h] sebesség elérése álló helyzetből, a lehető legrövidebb idő alatt
- 100 méteres táv megtétele álló helyzetből, a lehető legrövidebb idő alatt

Az első feladattal kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a jó gyorsulás a 0-40 [km/h] sebességtartományban kiemelten fontos egy sok, éles kanyart tartalmazó versenypálya esetén. Itt érdemes megemlíteni, hogy az autó végsebessége a műszaki paraméterek értékeinek megválasztásától függően 60 és 80 [km/h] között változik. Az optimalizálás megvalósításához először létre kell hozni egy MATLAB kódot (100. ábra), amely kiszámítja a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges időket különböző áttétel és súlypont pozíció párok esetén.

```
function [ t_out ] = GENERAL_func_vel40_i12_lh( params )
%[ t_out ] = GENERAL_func_vel40_i12_lh( params )
% A függvény lefuttatja a szimulációt a paraméterben kapott áttétel (i12) és
% súlypont pozíció (lh) értékekkel és visszaadja a 40km/h sebességérték eléréséhez
% szükséges időt.

assignin('base', 'i12', params(1)); % Az i12 értékének megváltoztatása a Workspace-n a paraméterben
kapott params(1) értékre
assignin('base', 'lh', params(2)); % Az lh értékének megváltoztatása a Workspace-n a paraméterben
kapott params(2) értékre

sim('GENERAL.slx'); % A szimuláció futtatása

ind_v=1;
while sebesseg(ind_v,2)<40 % A 40 km/h sebesség eléréséhez tartozó index keresése
    ind_v=ind_v+1;
end

t_out=sebesseg(ind_v,1);

end
```

100. ábra MATLAB kód a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges idők kiszámításához különböző láncáttétel és súlypont pozíció párok esetén [23]

Ezt követően az optimalizáció, a fenti kódot felhasználva, a szimulált hűtés alkalmazásával történik. Az ehhez kifejlesztett MATLAB programkódot a 101. ábra szemlélteti.

```

% Adatok betöltése a szimulációkhoz:
GENERAL_model_data
% Simulink modell megnyitása:
open('GENERAL.slx');

% Kezdeti bemenőérték-tipp:
x_init=[3.5 0.5];
% Alsó határérték:
x_l=[3 0.4];
% Felső határérték:
x_u=[5 1.0];

% Futtatási paraméterek (részeredmények folyamatos plottolása):
options = saoptimset('PlotFcns',{@saplotbestx,@saplotbestf,@saplotx,@saplotf});

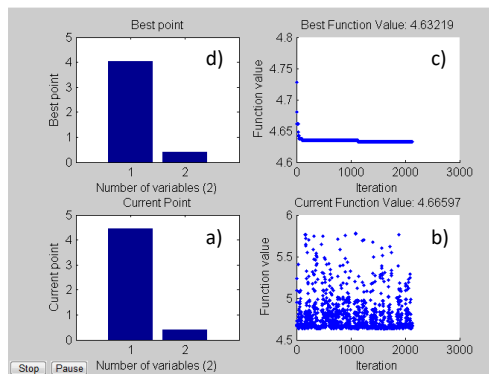
% Optimalizáció futtatása:
[x_opt,fval,exitFlag,output] = simulannealbnd(@GENERAL_func_vel140_i12_lh,x_init,x_l,x_u,options);

% Eredmények kiírása:
fprintf('Iterációk száma : %d\n', output.iterations);
fprintf('Optimális áttétel : %d\n', x_opt(1));
fprintf('Optimális súlypont-hely : %d\n', x_opt(2));
fprintf('Legjobb függvényérték (legrövidebb idő) : %g\n', fval);

```

101. ábra A szimulált hűtéssel történő optimalizációhoz kifejlesztett MATLAB programkód az első feladat esetében [23]

Az optimalizációs program meghatározza a 40 [km/h] sebesség eléréséhez szükséges idő minimális értékét, valamint a hozzá tartozó optimális áttételt és súlypont pozíciót. A program futása közben, a korábban leírtak szerint, az aktuális értékeket négy programablakban, valós időben követhetjük (102. ábra).



102. ábra A paraméterértékek valós idejű monitorozása az optimalizáció során [23]

A futtatás végén az optimális értékek a MATLAB Command Window-ban is megjelennek (103. ábra). A vizsgált versenyautó esetében az áttétel és a súlypont pozíció optimális értékei 4,036 illetve 0,407 [m].

```

Command Window
>> GENERAL_model_optimal_attetel_sulypont
Optimization terminated: change in best function value less than options.TolFun.
Iterációk száma : 2129
Optimális áttétel : 4.036770e+00
Optimális súlypont-hely : 4.070593e-01
Legjobb függvényérték (legrövidebb idő) : 4.63219
fx >>

```

103. ábra A MATLAB Command Window-ban megjelenő eredmények [23]

A második feladat esetén, az optimalizálás megvalósításához először szintén létre kell hozni egy MATLAB kódot (104. ábra), amely kiszámolja, hogy az autó mennyi idő alatt teszi meg a 100 méteres távot különböző áttétel és súlypont pozíció párok esetén.

```
function [ t_out ] = GENERAL_func_dist100_i12_lh( params )
%[ t_out ] = GENERAL_func_dist100_i12_lh( params )
% A függvény lefuttatja a szimulációt a paraméterben kapott áttétel(i12)
% és súlypont pozíció (lh) értékekkel és visszaadja a 100m út megtételéhez
% szükséges időt.

assignin('base', 'i12', params(1)); % Az i12 értékének megváltoztatása a Workspace-n a paraméterben
kapott params(1) értékre
assignin('base', 'lh', params(2)); % Az lh értékének megváltoztatása a Workspace-n a paraméterben
kapott params(2) értékre

sim('GENERAL.slx'); % A szimuláció futtatása

ind_s=1;
while elmozdulas(ind_s,2)<100 % A 100m távolsághoz tartozó index keresése
    ind_s=ind_s+1;
end

t_out=elmozdulas(ind_s,1);

end
```

104. ábra MATLAB kód a 100 méteres táv megtételéhez szükséges idő kiszámításához, különböző láncáttétel és súlypont pozíció párok esetén [23]

Ezt követően az optimalizáció, a fenti kódot felhasználva, a szimulált hűtés alkalmazásával történik. Az ehhez kifejlesztett MATLAB programkódot a 105. ábra szemlélteti.

```
% Adatok betöltése a szimulációkhoz:
GENERAL_model_data
% Simulink modell megnyitása:
open('GENERAL.slx');

% Kezdeti bemenőérték-tipp:
x_init=[3.5 0.5];
% Alsó határérték:
x_l=[3 0.4];
% Felső határérték:
x_u=[5 1.0];

% Futtatási paraméterek (részeredmények folyamatos plottolása):
options = saoptimset('PlotFcns',{@saplotbestx,@saplotbestf,@saplotx,@saplotf});

% Optimalizáció futtatása:
[x_opt,fval,exitFlag,output] = simulanrealbnd(@GENERAL_func_dist100_i12_lh,x_init,x_l,x_u,options);

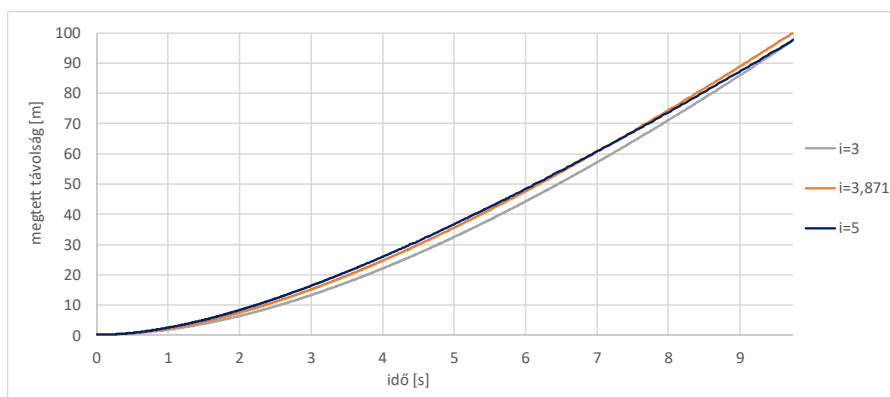
% Eredmények kiírása:
fprintf('Iterációk száma : %d\n', output.iterations);
fprintf('Optimális áttétel : %d\n', x_opt(1));
fprintf('Optimális súlypont-hely : %d\n', x_opt(2));
fprintf('Legjobb függvényérték (legrövidebb idő) : %g\n', fval);
```

105. ábra A szimulált hűtéssel történő optimalizációhoz kifejlesztett MATLAB programkód a második feladat esetében [23]

A program futása közben, az előző esethez hasonlóan, valós időben figyelhetjük meg az értékeket, majd amikor a program lefutott, az optimális értékek a MATLAB Command Window-ban is megjelennek. A végeredményként kapott minimális idő 9,74 [s], a hozzá tartozó optimális áttétel és súlypont pozíció értékei 3,871 illetve 0,423 [m].

6.3 AZ EREDMÉNYEK ELEMZÉSE

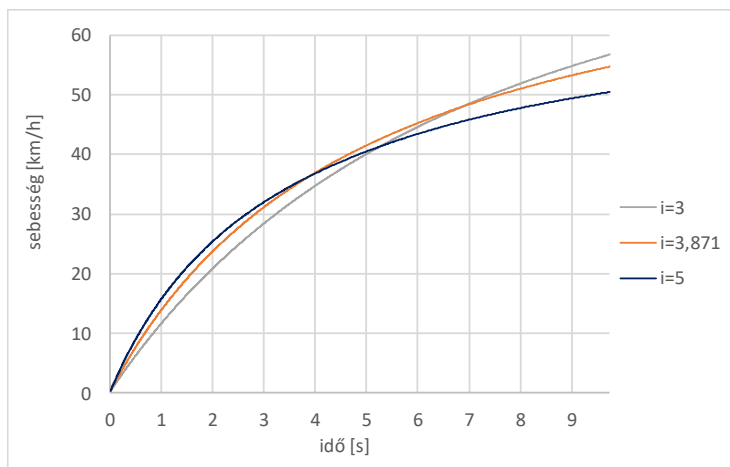
A szimulációs programot a 2. feladat esetében kapott optimális láncáttétel és súlypont pozíció párral (3,871 és 0,423 [m]) a [0;9,74] [s] időintervallumon lefuttattuk, majd ezt követően, két másik, nem optimális értékpárral (3 és 0,423 [m], 5 és 0,423 [m]) is. A 106. ábra a jármű által megtett utat mutatja az idő függvényében a három különböző értékpár esetében.



106. ábra Az optimális (3,871) és két másik láncáttétel alkalmazásával, a szimulációs programmal számított út-idő függvények (A súlypont pozíció értéke minden esetben 0,423 [m].) [23]

A fenti ábra alapján megállapítható, hogy 9,74 másodperc alatt az optimális láncáttétel alkalmazásával közelítőleg 2,5 méterrel hosszabb utat tesz meg a jármű, mint a másik két áttétel (3 és 5) alkalmazásakor. Más szempontból tekintve, ez azt jelenti, hogy a 100 méteres távolság 0,3 másodperccel rövidebb idő alatt tehető meg az optimális láncáttétellel, mint a másik két áttétel alkalmazása esetén.

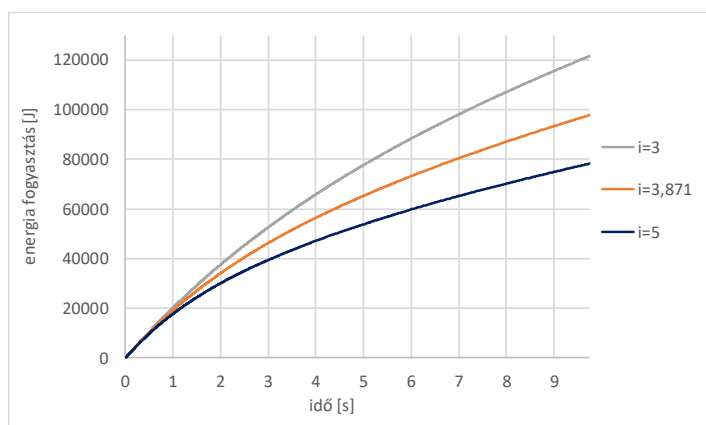
A 107. ábra a jármű sebesség-idő függvényeit mutatja, ugyanazon bemeneti értékek alkalmazásával, mint a 106. ábra esetében.



107. ábra A szimulációs programmal számított sebesség-idő függvények az optimális (3,871) és két másik láncáttétel alkalmazása esetén (A súlypont pozíció értéke minden esetben 0,423 [m].) [23]

Annak ellenére, hogy 9,74 másodperc alatt a legnagyobb sebesség a $i_{12} = 3$ láncáttétel alkalmazásával érhető el, mégsem ez lesz az optimális a 100 méteres táv legrövidebb idő alatti teljesítéséhez.

A 108. ábra a versenyautó energiafogyasztását mutatja a menetidő függvényében, ugyanazon értékpárok alkalmazásával, mint a 106. és 107. ábrák esetében.



108. ábra A szimulációs programmal számított energiafogyasztás a menetidő függvényében különböző láncáttételek alkalmazása esetén [23]

Az autó energiafogyasztását az akkumulátor kapocsfeszültségéből és a rajta átfolyó áram erősségéből képzett szorzat 0-tól t-ig vett határozott integráljaként számítottuk ki.

A 108. ábra alapján látható, hogy 9,74 másodperc alatt az $i_{12} = 5$ áttétellel érhető el a legalacsonyabb, míg az $i_{12} = 3$ áttétellel a legmagasabb energiafogyasztás.

Érdemes megjegyezni, hogy ezek az áttételek nem optimálisak a 100 méteres táv legrövidebb időn belüli teljesítéséhez.

A fenti példák jól mutatják, hogy attól függően, hogy mi a konkrét versenyfeladat, egy adott tervezési változó esetén más és más lehet az optimális érték.

Végezetül említsünk meg még két példát. Az első a világhírű Formula Student verseny "gyorsulási" versenyszáma, ahol a feladat a 75 méter hosszúságú egyenes versenypálya legrövidebb idő alatti teljesítése álló helyzetből indulva. A másik a Shell ECO-Marathon elnevezésű verseny, ahol a feladat az adott versenytáv legalacsonyabb energiafelhasználással történő teljesítése, azzal a feltétellel, hogy az átlagsebesség legalább 25 [km/h] legyen a teljes versenytávra vonatkozóan. Az általunk kifejlesztett eljárással meghatározhatjuk a tervezési változók azon optimális értékeit, amelyek alkalmazásával a fenti versenyszámok a legeredményesebben teljesíthetők. Ezzel jelentős versenyelőnyre tehetünk szert a többi csapattal szemben.

7 ÖSSZEFOGLALÁS, TUDOMÁNYOS TÉZISEK

A doktori dolgozatomban ismertetett fejlesztések elsődlegesen a DE Műszaki Karának hallgatói csapatait, és az őket irányító oktatókat segítik a tudatosabb tervezői és fejlesztői munkában, növelve ezáltal a különböző hallgatói versenyeken (MVM Energia Futam, Shell ECO-Marathon, Formula Student) való eredményes versenyzés esélyét. A későbbiekben a kidolgozott műszaki adat optimalizáló szoftver a megvalósított eljárásokkal alkalmas lehet az egyetemen kifejlesztett elektromos járművek, hajtásláncok műszaki adatainak optimalizálására, javítva ezáltal számos jellemzőjüket, csökkentve például az energiafogyasztást.

A tudományos kutatómunkám, és annak eredményei tömören az alábbi tézispontokban foglalhatók össze:

ELSŐ TÉZISPONT

A tézispont egy prototípus versenyautókhoz kidolgozott újszerű, moduláris felépítésű műszaki adat optimalizáló szoftvert ismertet. A szoftverrel meghatározhatók a járművek műszaki adatainak optimális értékei egy adott versenyfeladathoz. (Ilyen optimalizálási feladat lehet például azon áttétel meghatározása a hajtásláncban, amellyel egy gyorsulási versenyen adott pályaszakasza a legrövidebb idő alatt teljesíthető.)

A szoftver két fő modulból épül fel. Az egyik egy egyenes pályán történő mozgásra kidolgozott járműdinamikai szimulációs modul, amely a jármű műszaki adataiból kiszámítja annak menetdinamikai függvényeit (gyorsulás-, sebesség- és út-idő függvények). A másik egy optimalizáló modul, amely a szimulációs modul által generált függvényértékeket felhasználva, kiszámítja a kiválasztott műszaki adatok optimális értékeit. Az optimalizáló modul két független eljárást alkalmaz: az első egy grafikus eljárás, a második az „adaptív szimulált hűtés” módszerének alkalmazása az optimális műszaki adatok meghatározására, amely a módszer egy teljesen új alkalmazási területe. Legfeljebb két tervezési változó és „sima” (éles változásoktól mentes) célfüggvény esetén célszerű az első, míg kettőnél több változó, vagy összetett célfüggvény esetén a második módszert alkalmazni. Összetett célfüggvény, és legfeljebb két változó esetén az első módszer felhasználható a keresési tartomány, valamint az iteráció kezdőpontjának meghatározására a második módszer alkalmazása előtt.

Az eljárás része egy olyan újszerű szűrési eljárás, amellyel a vizsgálatból előre kizárhatók azok a műszaki adatok, amelyekre nem érdemes optimalizálni, hiszen számottevő változtatásuk csak elhanyagolható változást okoz az érintett célfüggvényben.

Az elvégzett részletes hibaszámítás igazolta, hogy a járműdinamikai szimulációs modul képes a jármű sebességét 5-9% relatív bizonytalansággal kiszámítani az 1-40 km/h sebességtartományon, ami megerősíti a vizsgálataink, és eredményeink hitelességét.

MÁSODIK TÉZISPONT

A tézispont módszertani fejlesztéseket ismertet egy olyan kísérleti eljáráshoz, amellyel csapágyazott forgó tömegeket (alkatrészeket) tartalmazó gépek, berendezések, azon belül elektromos motorok dinamikai jellemzői – a forgó tömeg kiszérelése nélkül – szimultán meghatározhatók. Az említett dinamikai jellemzők a forgó rendszer (motor esetén forgórész) tehetetlenségi és ellenállási (súrlódási) nyomatéka. A prototípus versenyautókban alkalmazott elektromos motorok esetén az említett jellemzők bemenő adatként szolgálnak a korábban ismertetett járműdinamikai szimulációs program motorszimulációs moduljához.

Az elvégzett fejlesztések eredményeképpen az eljárás lényegesen megbízhatóbb, pontosabb és rutinszerűen alkalmazható lett. Az eljárás kísérleti úton, és hitelesítő mérésekkel igazolt relatív hibája, a tehetetlenségi nyomaték meghatározása esetén 5,3%, míg az ellenállási (súrlódási) nyomaték meghatározása esetén 5-6% között változik a [20;120] [rad/s] szögsebesség tartományon. Meg kell jegyezni, hogy a kísérleti körülmények további optimalizálásával a fenti hiba – mindkét vizsgált dinamikai jellemző esetén – 3% körüli értékre csökkenthető. A szerzők tudomása szerint az így kidolgozott és optimalizált eljárás az ismert, rutinszerűen alkalmazható eljárások közül a legegyszerűbben alkalmazható, és az egyik legpontosabb.

HARMADIK TÉZISPONT

A tézispont egy újszerű kísérleti eljárást ismertet elektromos motorok dinamikai jellemzőinek meghatározására, valamint a motorszimulációs modulok által generált függvények hitelesítésére. Az eljárás két független kísérletből áll: az elsőben egy gördítési kísérletből meghatározzuk a forgórész tehetetlenségi nyomatékát, míg a másodikban egy kombinált gyorsítási és kifutási tesztből az ellenállási (súrlódási) nyomaték-szögsebesség karakterisztikát, valamint elvégezzük a hitelesítést. A gördítési kísérlet előnye, hogy azokban az esetekben is alacsony hibával alkalmazható, amikor a hagyományos, lengetésen alapuló módszerek (pl. a gyorsan csillapodó amplitúdó miatt) pontatlanok.

Az eljárás kísérleti úton, és hitelesítő mérésekkel igazolt relatív hibája, a tehetetlenségi nyomaték meghatározása esetén 3,3%, míg az ellenállási (súrlódási) nyomaték meghatározása esetén 4-5% között változik a [20;120] [rad/s]

szögsebesség tartományon. A módszer hátránya, hogy a tehetetlenségi nyomaték meghatározásához a forgórészt ki kell szerelni a motorból.

A fentiekén túl igazoltam, hogy a hitelesítő mérések során nyert, és a motorszimulációs modulok által generált értékek egymáshoz viszonyított százalékos pontossága a fordulatszám és áramerősség esetén 96-99% és 93-99% között változik, a 0,0001576 – 0,06785 [kg·m²] tartományba eső terhelő tehetetlenségi nyomatékok alkalmazása esetén. Összefoglalva elmondható, hogy a kifejlesztett motorszimulációs programmodul pontossága – a kísérletileg meghatározott bemenő adatok alkalmazása esetén – megfelelő, így beépíthető a járműdinamikai szimulációs programunkba.

8 JÖVŐBELI TERVEK

Terveim között szerepel a járműdinamikai szimulációs program kibővítése kanyarodási szakaszokra, ezáltal körversenyek szimulációja is lehetővé válna. Emellett a versenyautóinkat szenzorokkal szerelnék fel, így mérési adatokkal ellenőrizhetnénk a szimulációs program által generált függvényeket. Továbbá jelenleg is folyamatban van különböző típusú (BLDC, PMSM, IM) elektromos motorok kísérleti vizsgálata, valamint a hozzájuk tartozó szimulációs modulok fejlesztése. Az elkészült szimulációs modulok által generált függvényeket először a motorokon végzett tesztmérésekkel hitelesítenénk, majd a szimulációs és mérési eredmények megfelelő pontosságú egyezése esetén alkalmaznánk a modulokat járműdinamikai szimulációs programban. Emellett tervezem az elektromos motorok modellezését és szimulációját elvégezni vége-selemes szoftver alkalmazásával is.

A fenti tervek megvalósításához tervezem hallgatók bevonását is a kutatásokba, hozzájárulva ezzel az ő szakmai fejlődésükhöz, amely közös kutatómunka eredményeként remélhetőleg számos publikáció, konferencia előadás és TDK dolgozat fog születni.

9 HIVATKOZÁSOK

- [1] Sabri, M., Danapalasingam, K. A., & Rahmat, M. F. (2016). A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1433-1442.
- [2] Hannan, M. A., Azidin, F. A., & Mohamed, A. (2014). Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 135-150.
- [3] Parag Jose, C., & Meikandasivam, S. (2017). A review on the trends and developments in hybrid electric vehicles. *Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering: I-DAD*, February 22-24, 2016, 211-229.
- [4] Lulhe, A. M., & Date, T. N. (2015, December). A technology review paper for drives used in electrical vehicle (EV) & hybrid electrical vehicles (HEV). In *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)* (pp. 632-636). IEEE.
- [5] Xiao, Y., Zuo, X., Kaku, I., Zhou, S., & Pan, X. (2019). Development of energy consumption optimization model for the electric vehicle routing problem with time windows. *Journal of Cleaner Production*, 225, 647-663.
- [6] Yin, Q., Wu, Z., & Rui, X. (2014, August). Parameter design and optimization of electric vehicle. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 1-7). IEEE.
- [7] Guizani, A., Hammadi, M., Choley, J. Y., Soriano, T., Abbes, M. S., & Haddar, M. (2016). Electric vehicle design, modelling and optimization. *Mechanics & Industry*, 17(4), 405.
- [8] Du, W., Zhao, S., Jin, L., Gao, J., & Li, H. (2020). Parameter optimization of rule-based control strategy for multi-mode hybrid electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(10-11), 2706-2716.

- [9] Szántó, A., Hajdu, S., & Sziki, G. Á. (2020). Dynamic simulation of a prototype race car driven by series wound DC motor in Matlab-Simulink. *Acta Polytech. Hung*, 17(4), 103-22.
- [10] Pacejka, H. (2012). *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier.
- [11] Reimpell, J., Betzler, J.W., Bári, G., Hankovszki, Z., Kádár, L., Lévai, Z., Nagyszokolyai, I. (2012) *Gépjárműfutóművek I*.
- [12] Heiing, B., & Ersoy, M. (Eds.). (2010). *Chassis handbook: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives*. Springer Science & Business Media.
- [13] Szíki, G. Á., Szántó, A., & Mankovits, T. (2021). Dynamic modelling and simulation of a prototype race car in MATLAB/Simulink applying different types of electric motors. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 12(1), 57-63.
- [14] Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., Szántó, A., & Mankovits, T. (2020). Series wound DC motor simulation applying MATLAB Simulink and LabVIEW control design and simulation module. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 48(1), 65-69.
- [15] Szántó, A., Kiss, J., Mankovits, T., & Szíki, G. Á. (2021). Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor. *Applied Sciences*, 11(10), 4542.
- [16] Szántó, A., Ádámkó, É., Juhász, G., & Sziki, G. A. (2022). Simultaneous measurement of the moment of inertia and braking torque of electric motors applying additional inertia. *Measurement*, 204, 112135.
- [17] Sziki, G. Á., Sarvajcz, K., Kiss, J., Gál, T., Szántó, A., Gábora, A., & Husi, G. (2017). Experimental investigation of a series wound dc motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems. *Measurement*, 109, 111-118.
- [18] Deák, K., Hajdu, S., & Szántó, A. (2020). Személygépjárművek dinamikai modellezési eljárásainak áttekintése. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 5(1), 723-727.
- [19] Jazar, R. N. (2008). *Vehicle dynamics (Vol. 1)*. New York: Springer.

- [20] Rajamani, R. (2011). *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media.
- [21] Sziki, G. Á., Szántó, A., Kiss, J., Juhász, G., & Ádámkó, É. (2022). Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen. *Applied Sciences*, 12(19), 10095.
- [22] Sziki, G. Á., Szántó, A., & Ádámkó, É. (2024). Review of Methods for Determining the Moment of Inertia and Friction Torque of Electric Motors. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(4).
- [23] Szántó, A., Hajdu, S., & Sziki, G. Á. (2023). Optimizing parameters for an electrical car employing vehicle dynamics simulation program. *Applied Sciences*, 13(15), 8897.
- [24] Hadžiselimović, M., Blaznik, M., Štumberger, B., & Zagradišnik, I. (2011). Magnetically nonlinear dynamic model of a series wound DC motor. *Przegľad Elektrotechniczny*, 87(12b), 60-64.
- [25] Dr. Ilosvai L. (2013) *Járműmechanika*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárművek Tanszék. Elérhető: <https://docplayer.hu/10338294-Jarmumechanika-2013-eroatvitel-tervezese-jarmumechanika-c-targyhoz.html> (Hozzáférés dátuma: 2024.01.22.)
- [26] Tan, D., Wang, Y., & Zhang, L. (2007, October). Research on the parameter identification of LuGre tire model based on genetic algorithms. In *International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering 2007* (pp. 498-502). Atlantis Press.
- [27] Canudas-de-Wit, C., Tsiotras, P., Velenis, E., Basset, M., & Gissinger, G. (2003). Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. *Vehicle System Dynamics*, 39(3), 189-226.
- [28] Grappe, F., Candau, R., Barbier, B., Hoffman, M. D., Belli, A., & Rouillon, J. D. (1999). Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. *Ergonomics*, 42(10), 1361-1371.
- [29] Szeszák, B., Sütő, T., Nagyné Kondor, R., Sziki, G., Juhász, G. (2018). Analysis of the Rolling Resistance of Pneumobils for Vehicle Dynamics Modelling

Purpose. In: Proceedings of the 2nd Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles ACIPV 2018. Óbudai Egyetem, Budapest, 17-20,

- [30] SKF Gördülőcsapágyak (2017), Elérhető:
https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196809a65c0/pdf_preview_medium/0901d196809a65c0_pdf_preview_medium.pdf. (letöltve: 2024. 03. 17.)
- [31] Langer, I. Elektrotechnika - Egyenáramú gépek. Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar, Mechatronikai és Autótechnikai Intézet.
- [32] Salem, F. A. (2013). Dynamic modeling, simulation and control of electric machines for mechatronics applications. *International journal of control, automation and systems*, 1(2), 30-42.
- [33] Bitar, Z., Al Jabi, S., & Khamis, I. (2014). Modeling and simulation of series DC motors in electric car. *Energy Procedia*, 50, 460-470.
- [34] Zaskalicky, P. (2011). Modelling of a serial wound DC motor supplied by a semi-controlled rectifier. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 5(1), 110-113.
- [35] Liceaga-Castro, J. U., Siller-Alcalá, I. I., Jaimes-Ponce, J., & Alcántara-Ramírez, R. (2017, May). Series dc motor modeling and identification. In *2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO)* (pp. 248-253). IEEE.
- [36] Martínez, J. V., Lopez, P. G., & Juarez, J. M. (2009, August). Series wound DC motor modeling and simulation, considering magnetic, mechanical and electric power losses. In *2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems* (pp. 1073-1077). IEEE.
- [37] Santana, J., Naredo, J. L., Sandoval, F., Grout, I., & Argueta, O. J. (2002). Simulation and construction of a speed control for a DC series motor. *mechatronics*, 12(9-10), 1145-1156.
- [38] Barna, G. (2016, August). Simulation model of a series DC motor for traction rail vehicles. In *2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)* (pp. 531-536). IEEE.

- [39] Szántó, A., Szántó, A., & Sziki, G. Á. (2020). Soros gerjesztésű egyenáramú motor modellezési eljárásainak áttekintése. *Műszaki Tudományos Közlemények*, (13), 166-169.
- [40] Jiles, D. C., & Atherton, D. L. (1986). Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 61(1-2), 48-60.
- [41] Jiles, D. C. (1994). Modelling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(6), 4326-4328.
- [42] Reljić, D. D., & Jerkan, D. G. (2014). Experimental identification of the mechanical parameters of an induction motor drive. In *Proceedings of the X international symposium on industrial electronics (INDEL 2014)* (pp. 106-114).
- [43] Lenz, J. E. (1990). A review of magnetic sensors. *Proceedings of the IEEE*, 78(6), 973-989.
- [44] Tayade, M. A. B. (2014). Modeling and simulation of A BLDC motor by using Matlab/Simulation tool. *J. Electr. Electron. Eng*, 55-62.
- [45] Gencer, C., & Gedikpinar, M. (2006). Modeling and simulation of BLDCM using MATLAB/SIMULINK. *Journal of Applied sciences*, 6(3), 688-691.
- [46] Jambulingam, V. (2015). Mathematical Modelling and Simulation of Brushless DC Motor Using MATLAB. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 3.
- [47] Boroujeni, M. S., Markadeh, G. A., & Soltani, J. (2017). Torque ripple reduction of brushless DC motor based on adaptive input-output feedback linearization. *ISA transactions*, 70, 502-511.
- [48] Liu, G., & Mao, K. (2015). A novel power failure compensation control method for active magnetic bearings used in high-speed permanent magnet motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4565-4575.
- [49] Error Propagation Calculator. Elérhető: <http://julianibus.de/>. [Hozzáférés dátuma: 2023. 07. 24.].

- [50] Saldaña, G., San Martín, J. I., Zamora, I., Asensio, F. J., & Oñederra, O. (2019). Analysis of the current electric battery models for electric vehicle simulation. *Energies*, 12(14), 2750.
- [51] Tremblay, O., & Dessaint, L. A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World electric vehicle journal*, 3(2), 289-298.
- [52] Pattantyús, Á. G. (1961). *Gépész és Villamosmérnökök kézikönyve 2.*, Budapest, Műszaki Könyvkiadó.
- [53] Ádámkó, É., Szántó, A., & Sziki, G. Á. (2022, May). Software developments for an electric motor test bench developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1237, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [54] Szántó, A. (2018). Elektromos hajtású járművek kísérleti vizsgálata, dinamikai szimulációja és optimalizálása. Debreceni Egyetem Műszaki Kar, diplomamunka, 2018.
- [55] Rao, M. K. (1934). BRUSH CONTACT DROP IN DC MACHINES. *Journal of the Indian Institute of Science*, 17, 91.
- [56] Li, S., Li, Y., Choi, W., & Sarlioglu, B. (2016). High-speed electric machines: Challenges and design considerations. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(1), 2-13.
- [57] Genta, G., & Delprete, C. (1994). Some considerations on the experimental determination of moments of inertia. *Meccanica*, 29, 125-141.
- [58] Tang, L., & Shangguan, W. B. (2011). An improved pendulum method for the determination of the center of gravity and inertia tensor for irregular-shaped bodies. *Measurement*, 44(10), 1849-1859.
- [59] Dowling, J. J., Durkin, J. L., & Andrews, D. M. (2006). The uncertainty of the pendulum method for the determination of the moment of inertia. *Medical engineering & physics*, 28(8), 837-841..
- [60] Dr. Ludvig, Gy. (1983). *Gépek dinamikája*, Budapest. Műszaki könyvkiadó.
- [61] Reljić, D. D., & Jerkan, D. G. (2014). Experimental identification of the mechanical parameters of an induction motor drive. In *Proceedings of the X*

- international symposium on industrial electronics (INDEL 2014) (pp. 106-114).
- [62] Despalatović, M., Jadrić, M., & Terzić, B. (2005). Identification of induction motor parameters from free acceleration and deceleration tests. *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 46(3-4), 123-128.
- [63] Ilina, I. D. (2011, May). Experimental determination of moment to inertia and mechanical losses vs. speed, in electrical machines. In 2011 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (pp. 1-4). IEEE.
- [64] Alonge, F., D'Ippolito, F., Ferrante, G., & Raimondi, F. M. (1998). Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 145(6), 587-593.
- [65] Podzharenko, V. A., & Kucheruk, V. Y. (1997). New method of measurement of a moment of inertia of an electrical machines. In XIV IMEKO World Congress, Finland, 1-6 June 1997. Vol. III, Topics 3: 90-95.. International Measurement Confederation.
- [66] Egorov, A. V., Kozlov, K. E., & Belogusev, V. N. (2016). Experimental identification of the electric motor moment of inertia and its efficiency using the additional inertia. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(17), 10582-10588.
- [67] Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- [68] Maraaba, L. S., Al-Hamouz, Z. M., Milhem, A. S., & Twaha, S. (2019). Comprehensive parameters identification and dynamic model validation of interior-mount line-start permanent magnet synchronous motors. *Machines*, 7(1), 4.
- [69] Ayasun, S., & Nwankpa, C. O. (2005). Induction motor tests using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses. *IEEE Transactions on education*, 48(1), 37-46.
- [70] Cavagnino, A., Lazzari, M., Profumo, F., & Tenconi, A. (1999, October). Axial flux interior PM synchronous motor: parameters identification and steady-

state performance measurements. In Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370) (Vol. 4, pp. 2552-2559). IEEE.

- [71] Rehman, Z., & Seong, K. (2018). Three-D numerical thermal analysis of electric motor with cooling jacket. *Energies*, 11(1), 92.
- [72] Darai, G., Filep, G., Nagy-Kondor, R., & Szíki, G. Á. (2015). Dynamics experiments applying NI devices and Labview. In Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015) (pp. 38-43).
- [73] The Engineering ToolBox: Dynamics: Rolling Friction. [Online]. Elérhető: www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html. [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 18.]
- [74] LaClair, T. J. (2006). Rolling resistance. *The pneumatic tire*, 475.
- [75] Reimpell, J., Stoll, H., & Betzler, J. (2001). *The automotive chassis: engineering principles*. Elsevier.
- [76] Vogel, D. H. (1921). Das Temperaturabhaengigkeitsgesetz der Viskositatet von Fluessigkeiten. *Physikalische Zeitschrift*, Vol. 22, p. 645.
- [77] Garca-Coln, L. S., Del Castillo, L. F., & Goldstein, P. (1989). Theoretical basis for the Vogel-Fulcher-Tammann equation. *Physical Review B*, 40(10), 7040.
- [78] Lu, X., Khonsari, M. M., & Gelinck, E. R. M. (2006). The Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction. *Journal of tribology*, 128(4), 789-794.
- [79] Erdősné Sélley, C., Gyurecz, G., Janik, J., & Körtélyesi, G. (2012). *Mérnöki Optimalizáció*. Typotex, Budapest.
- [80] Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- [81] Li, P., Löwe, K., Arellano-Garcia, H., & Wozny, G. (2000). Integration of simulated annealing to a simulation tool for dynamic optimization of chemical processes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 39(4), 357-363.

- [82] Beltran, A., Rumbo, J., Azcaray, H., Santiago, K., Calixto, M., & Sarmiento, E. (2019). Simulation and control of the velocity and electromagnetic torque of a three-phase induction motor: an electric vehicles approach. *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 16(3), 308-320.
- [83] VO, T. M. N. (2022). Centrifugal pump design: An optimization. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 17, 136-151.
- [84] Huynh, N. T., Nguyen, T. V., Tam, N. T., & Nguyen, Q. M. (2021). Optimizing magnification ratio for the flexible hinge displacement amplifier mechanism design. In *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020)* (pp. 769-778). Springer International Publishing.
- [85] Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer*, 21(4), 83-93.
- [86] Adeli, H., & Sarma, K. C. (2006). *Cost optimization of structures: fuzzy logic, genetic algorithms, and parallel computing*. John Wiley & Sons.
- [87] Kim, J., & Kasabov, N. (1999). HyFIS: adaptive neuro-fuzzy inference systems and their application to nonlinear dynamical systems. *Neural networks*, 12(9), 1301-1319.
- [88] Elbaz, K., Shen, S. L., Zhou, A., Yuan, D. J., & Xu, Y. S. (2019). Optimization of EPB shield performance with adaptive neuro-fuzzy inference system and genetic algorithm. *Applied Sciences*, 9(4), 780.
- [89] Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1(1), 1-7.
- [90] Krishankant, J. T., Bector, M., & Kumar, R. (2012). Application of Taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2(1), 263-274.
- [91] Julong, D. (1989). Introduction to grey system theory. *The Journal of grey system*, 1(1), 1-24.
- [92] Li, Y. X., Yang, J. G., Gelvis, T., & Li, Y. Y. (2008). Optimization of measuring points for machine tool thermal error based on grey system theory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 745-750.

- [93] Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-aided design*, 43(3), 303-315.
- [94] Rao, R. V., & Rao, R. V. (2016). *Teaching-learning-based optimization algorithm* (pp. 9-39). Springer International Publishing.
- [95] Sivanandam, S. N., Deepa, S. N., Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2008). Genetic algorithm optimization problems. *Introduction to genetic algorithms*, 165-209.
- [96] Wang, D., Tan, D., & Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft computing*, 22, 387-408.
- [97] Glover, F., Kelly, J. P., & Laguna, M. (1995). Genetic algorithms and tabu search: hybrids for optimization. *Computers & Operations Research*, 22(1), 111-134.
- [98] Kirkpatrick, S. (1984). Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. *Journal of statistical physics*, 34, 975-986.
- [99] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.
- [100] Faber, R., Jockenhövel, T., & Tsatsaronis, G. (2005). Dynamic optimization with simulated annealing. *Computers & chemical engineering*, 29(2), 273-290.
- [101] Ingber, L. (1996). Adaptive simulated annealing (ASA): lessons learned. *Control and Cybernetics*, 25(1).
- [102] Miranda, M. H., Silva, F. L., Lourenço, M. A., Eckert, J. J., & Silva, L. C. (2022). Vehicle drivetrain and fuzzy controller optimization using a planar dynamics simulation based on a real-world driving cycle. *Energy*, 257, 124769.
- [103] Eckert, J. J., Santiciolli, F. M., Silva, L. C., & Dedini, F. G. (2021). Vehicle drivetrain design multi-objective optimization. *Mechanism and Machine Theory*, 156, 104123.
- [104] Eckert, J. J., Silva, L. C., Costa, E. S., Santiciolli, F. M., Dedini, F. G., & Corrêa, F. C. (2017). Electric vehicle drivetrain optimisation. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(1), 32-40.

- [105] Salvan, L., Brüll, M., Hollstein, A., Medina, R., Wilkins, S., & Avramis, N. (2022, June). Electric Drivetrain Optimization for 48V Urban Vehicles. In 35th Electric Vehicle Symposium (EVS35) (pp. 1-13).
- [106] Chirag, D. (2010). Design and Optimization of Hybrid Electric Vehicle Drivetrain and Control Strategy Parameters Using Evolutionary Algorithms. A Thesis in The Department of Electrical and Computer engineering, Concordia University, Canada.
- [107] Lu, M., Domingues-Olavarría, G., Márquez-Fernández, F. J., Fyhr, P., & Alaküla, M. (2021). Electric drivetrain optimization for a commercial fleet with different degrees of electrical machine commonality. *Energies*, 14(11), 2989.
- [108] Tran, M. K., Akinsanya, M., Panchal, S., Fraser, R., & Fowler, M. (2020). Design of a hybrid electric vehicle powertrain for performance optimization considering various powertrain components and configurations. *Vehicles*, 3(1), 20-32.
- [109] Zhang, P., Chen, Y., Lin, M., & Ma, B. (2016). Optimum matching of electric vehicle powertrain. *Energy Procedia*, 88, 894-900.
- [110] Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T., & Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106040.
- [111] Feehery, W. F. (1998). Dynamic optimization with path constraints (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [112] Corana, A., Marchesi, M., Martini, C., & Ridella, S. (1987). Minimizing multimodal functions of continuous variables with the “simulated annealing” algorithm—Corrigenda for this article is available here. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 13(3), 262-280.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Először is szeretném megköszönni a lassan 9 éve tartó közös munkát, iránymutatást, és sok segítséget Dr. Sziki Gusztáv Áron témavezetőmnek, valamint a kutatócsoportunk többi tagjainak, Csernusné Dr. Ádámkó Évának, Kiss Jánosnak, Dr. Juhász Györgynek. Továbbá köszönök minden segítséget, támogatást oktatóimnak, kollégáimnak a Debreceni Egyetem Műszaki Karáról, a Debreceni Képző Központból és a Debreceni Egyetem Informatikai Karáról. Nélkülük ez nem valósulhatott volna meg.