

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**ELEKTROMOS HAJTÁSÚ PROTÓTÍPUS VERSENYAUTÓK ÉS
HAJTÁSLÁNCOK DINAMIKAI MODELLEZÉSE, SZIMULÁCIÓJA,
OPTIMALIZÁLÁSA ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA**

SZÁNTÓ ATTILA

TÉMAVEZETŐ: DR. SZIKI GUSZTÁV ÁRON



DEBRECENI EGYETEM

INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

DEBRECEN, 2024

TARTALOMJEGYZÉK

1	Kutatási előzmények, célkitűzések	3
2	Tudományos tézisek	4
	2.1 Első tézispont	4
	2.2 Második tézispont	13
	2.3 Harmadik tézispont	18
3	Jövőbeli tervek	23
1	Previous research, objectives	1
2	Scientific theses	2
	2.1 First thesis point	2
	2.2 Second thesis point	12
	2.3 Third thesis point	16
3	Future plans	21

1 KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

A doktori dolgozatom a korábbi kutatómunkámra épül, amelyet még 2015-ben, mint BSc hallgató kezdtem el, a jelenlegi doktori témavezetőm irányításával. Ebben az időben rendszeres résztvevője voltam olyan hallgatói csapatoknak, amelyek elektromos hajtású prototípus versenyautók fejlesztésével és kivitelezésével foglalkoztak. Ilyen csapat volt az is, amely a Debreceni Egyetem Műszaki Karának Gépészmérnöki Tanszékén azt a versenyautót tervezte és építette, amely a Magyar Villamos Művek (MVM) által rendezett MVM Energia Futamokon szerepelt. Ennek a versenyautónak a járműdinamikai modellezésével és szimulációjával a doktori dolgozatomban részletesen foglalkozom. A BSc és MSc képzésem alatt, a fenti témában négy TDK dolgozat szerzője voltam, amelyek közül egy első, két második és egy harmadik helyezést ért el a DE Műszaki Karán, és közülük kettő továbbjutott a 2017 és 2019 évi országos fordulókra (OTDK). Az említett kutatómunkánk eredményeként már a doktori képzésem előtt is számos tudományos közlemény született hazai és nemzetközi folyóiratokban, amelyeknek társszerzője voltam. Az említett közlemények közül 10 lektorált, és egy referált (Q1 besorolású) [1] folyóiratban jelent meg. Az elmondottakból adódóan a doktori témám a korábbi kutatómunkám természetes folytatásának tekinthető.

A doktori képzésem kezdetén célunk egy olyan műszaki adat optimalizáló szoftver kidolgozása volt, amellyel meghatározhatjuk a DE Műszaki Karán tervezett és kivitelezett, elektromos hajtású prototípus versenyautók műszaki paramétereinek azon optimális értékeit, amellyel egy adott versenyfeladat (járműdinamikai cél) a legjobb eredménnyel teljesíthető. A fenti általános cél megvalósítását témavezetőmmel az alábbi lépésekben terveztük:

Első lépésben a prototípus versenyautókhoz egy általános járműdinamikai modell kidolgozása, majd egy arra épülő szimulációs program kifejlesztése, kezdetben egyenes pályán történő mozgáshoz, majd a későbbiekben egy általános körverseny szimulációjához.

Második lépésben a szimulációs program feltöltése valós bemenő adatokkal, részben irodalmi források felhasználásával, részben kísérleti úton, saját

mérési eljárások alkalmazásával. Ez magában foglalja a szükséges mérőelrendezések (mérőrendszer), és eljárások kifejlesztését.

Harmadik lépésben a szimulációs program és annak részegységei (moduljai) által generált kimenő függvények kísérleti hitelesítése (validálása), és az ehhez szükséges mérőelrendezések és eljárások kidolgozása.

Negyedik lépésben olyan optimalizációs eljárások kidolgozása, amelyekkel a járműdinamikai szimulációs program által generált kimenő függvényeket felhasználva, a prototípus versenyautók műszaki paramétereinek optimális értékei különböző versenyfeladatokhoz (járműdinamikai célokhoz) meghatározhatók.

Ötödik lépésben a kidolgozott eljárások rutinszerű alkalmazása prototípus versenyautók tervezéséhez, vagy létező versenyautók paraméterértékeinek beállításához különböző versenyfeladatokhoz.

Doktori dolgozatom a fenti célkitűzésekre épül, azok megvalósítását tárgyalja. Ehhez illeszkedve az egyes fejezetek tartalma röviden összefoglalva a következő:

1. fejezet: témafelvetés, irodalmi áttekintés és a célkitűzések ismertetése
2. fejezet: a vizsgálatok tárgyát képező prototípus versenyautó részletes leírása
3. fejezet: a versenyautóhoz kidolgozott járműdinamikai modell bemutatása
4. fejezet: a modell alapján létrehozott szimulációs program bemutatása
5. fejezet: a szimulációhoz szükséges motorjellemzők kísérleti meghatározása, ezen belül az alkalmazott mérőelrendezések, mérési és kiértékelési eljárások ismertetése
6. fejezet: a kifejlesztett és alkalmazott optimalizációs eljárások bemutatása
7. fejezet: összefoglalás

2 TUDOMÁNYOS TÉZISEK

2.1 ELSŐ TÉZISPONT

A tézispont egy prototípus versenyautóhoz 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 pályaszakasz 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.

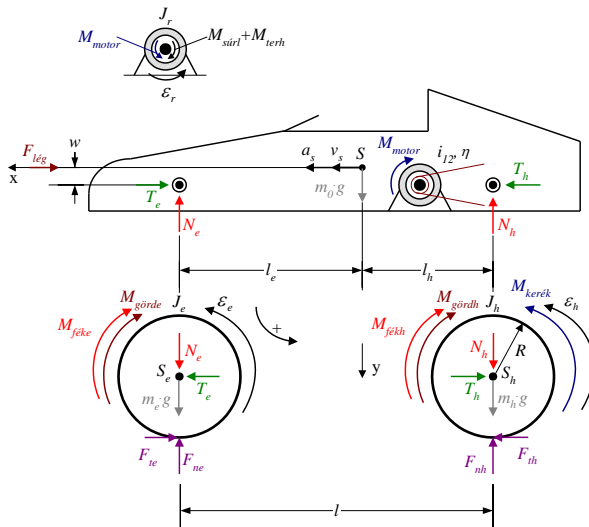
A fejlesztések elsődlegesen a DE Műszaki Karának hallgatói csapatait, és az őket irányító oktatókat segítik a tudatosabb tervezői és fejlesztői munkában, növelve ezáltal a különböző hallgatói versenyeken (MVM Energia Futam, Shell ECO-Marathon, Formula Student) való eredményes versenyzés esélyét.

A járműdinamikai modell kidolgozása, ezen belül a különböző erőhatások és nyomatékok kapcsolatát leíró egyenletek, valamint az egyes szerkezeti elemekre érvényes mozgásegyenletek felírása, majd azok alapján a

járműdinamikai szimulációs program MATLAB/Simulink környezetben történő kifejlesztése [2] saját munkám, amelyet a témavezetőm irányításával végeztem. A soros gerjesztésű, és kefe nélküli egyenáramú motorok modellezése [3, 4] nem része a téziseimnek, ezeknél csak a szimulációs modulok elkészítésében vettem részt. Ennek ellenére a motormodelleket – a kapcsolódó elektromágneses és dinamikai egyenletekkel együtt – a téma teljeskörű átláthatósága, ezáltal érthetősége érdekében a doktori dolgozatomban szintén részletesen ismertetem. Emellett részletesen bemutatom a két eljárást, amelyekkel a versenyautó optimális műszaki adatai, egy adott versenyfeladatokhoz meghatározhatók [5].

A tézispont részletezve:

A járműdinamikai modell felépítését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra A járműdinamikai modell a különböző szerkezeti egységekre ható erőkkel és nyomatékokkal [2]

A jármű a modellalkotás szempontjából öt szerkezeti egységre bomlik, ezek:

- 1) Az elektromos motor forgórésze.
- 2) Az erőátviteli rendszer.

- 3) A hajtott hátsó kerekek a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészekkel.
 - 4) A szabadon futó első kerekek a hozzájuk kapcsolódó forgó alkatrészekkel.
 - 5) A járműfelépítmény, beleértve az elektromos motor házát és állórészét.
1. táblázat Az 1. ábrán látható jelölések magyarázata.

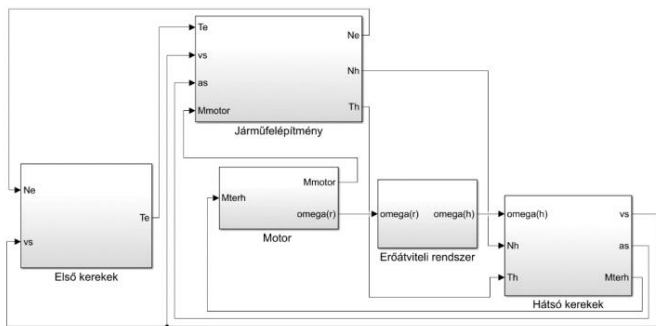
Jelölés	Magyarázat
$M_{kerék}$ [Nm]	a lánchajtáson keresztül a motor által a hátsó tengelyre kifejtett forgatónyomaték nagysága
M_{motor} [Nm]	a motor állórésze által a motor forgórészére kifejtett forgatónyomaték nagysága
$M_{görd_e}$ $M_{görd_h}$ [Nm]	az első és hátsó kerekekre ható gördülési ellenállási nyomaték nagysága
$F_{lég}$ [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 irányú terhelés az első és hátsó tengelyen
S_e S_h S	az első és hátsó kerekek, valamint az egész jármű súlypontja
$M_{f_ék_e}$ $M_{f_ék_h}$ [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 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	a motor forgórészének tehetetlenségi nyomatéka
R [m]	a kerék effektív sugara
ξ	kerékcúszás (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

A modell kidolgozásánál az alábbi feltételezésekkel, megkötésekkel éltünk:

- A jármű tömegeloszlása az xy síkra (1. 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 a járműre ható, és az egyes részegységek között fellépő összes erőhatást és nyomatékokat figyelembe veszi. A különböző erőhatások és nyomatékok kapcsolatát leíró egyenletek, valamint az egyes szerkezeti elemekre felírt mozgás- és a motorra vonatkozó elektromágneses egyenletek alapján MATLAB/Simulink környezetben kifejlesztett szimulációs program blokkdiagramját a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A MATLAB/Simulink környezetben kifejlesztett járműdinamikai szimulációs program blokkdiagramja

A járműmodellhez igazodva a szimulációs program szintén öt modulból épül fel, így egy más típusú szerkezeti egység (pl. motor) alkalmazása esetén a kérdéses modul egyszerűen cserélhető. Az egyes modulok részletes leírását a doktori dolgozatomban ismertetem.

A program bemenő adatai a vizsgált prototípus versenyautó, azon belül az alkalmazott elektromos motor műszaki és fizikai jellemzői. Ezeket a jellemzőket a doktori dolgozatomban részletesen ismertetem. A fenti jellemzőkből a program a következő mennyiségeket számítja ki a menetidő függvényében:

- A jármű tömegközéppontjának gyorsulása, sebessége és a jármű által megtett távolság.
- Az első és hátsó kerekek szögsebessége és szöggyorsulása.
- A talaj által az első és hátsó kerekre tangenciális és normálirányban kifejtett erők.
- Az első és hátsó tengelyekre ható menetirányú és arra merőleges terhelések.
- Gördülési ellenállási nyomatékok.
- Légellenállási erő.
- Kerékcúszás (slip).
- A motoron átfolyó áram erőssége.
- A motor forgatónyomatéka és szögsebessége.
- A hajtásrendszer által a kerékre kifejtett forgatónyomaték.

A program által generált kimenő függvényekre a doktori dolgozatomban mutatok be példákat. A 2. táblázatban a szimulációs program egyes bemenő adatainak becült bizonytalanságait tüntettem fel.

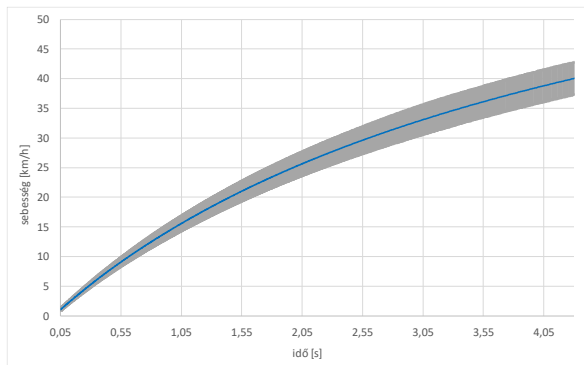
2. táblázat Az egyes bemenő adatok becült bizonytalanságai

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]	$M_{súrl}$ [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_{lev} [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. Az 1. táblázatban nem szereplő jelölések magyarázata: C és A a jármű alaki tényezője és homlokl felülete, $\mu_{görd_e}$, $\mu_{görd_h}$ és μ_{csap} az első és hátsó kerekek gördülési ellenállási, valamint a kerékcsapágyak csapsúrlódási tényezője, d a kerékcsapágyak belső furatának átmérője, U és U_{kefe} az SWDC motor táp- és kefefeszültsége, R_r , R_s , L_{sr} , L_s , L_r , és $M_{súrl}$ rendre a motor álló- és forgórészének elektromos ellenállása, kölcsönös és öninduktivitása, valamint a forgórész csapágy súrlódási nyomatéka, $R_{vezeték}$ az akkumulátort a motorral összekötő vezetékek elektromos ellenállása, μ_s és μ_c a kerék és útburkolat között fellépő tapadási és csúszási súrlódási tényező, ρ_{lev} a levegő sűrűsége.

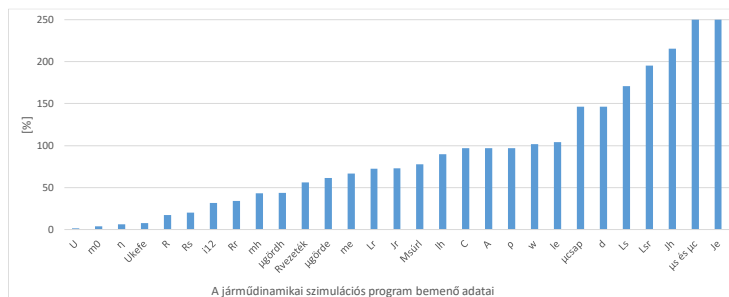
A szimulált sebességeket és azok bizonytalanságait a 3. ábra szemlélteti a 2. táblázatban szereplő bemenő adatok és bizonytalanságok esetén.



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



4. 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 $\sim 10\%$ 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 4. 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. A vizsgált példa esetében elmondható, hogy célszerű a bemenő adatokat a 4. ábrán megadott, vagy az alatti bizonytalanságokkal megadni.

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 4. 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 4. 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 érdemes rá elvégezni az optimalizációt.

Az optimális műszaki adatok meghatározása (közelítése) grafikus módszerrel:

A műszaki gyakorlatban gyakran előfordul, hogy csak egy, vagy két tervezési változó optimális értékét keressük, és a célfüggvény "sima", azaz hirtelen változásoktól mentes. Ebben az esetben a számításigényes optimalizálási algoritmusok helyett lehetőség van egy egyszerűbb „grafikus módszer” alkalmazására.

Ennél a módszernél egy egységes "rácstól" értelmezünk 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 alkalmazás esetében megfelelő, ha a rácspontokat kellően sűrűn választjuk meg. Természetesen ez a grafikus eljárás nem használható kettőnél több tervezési változó vagy erősen összetett célfüggvény esetén.

Az optimalizációhoz MATLAB környezetben kifejlesztett programkódokat, valamint a módszer alkalmazását a prototípus versenyautó optimális műszaki adatainak meghatározására két példán keresztül mutatom be. Az egyik példa esetében a tervezési változó a láncáttétel, a másiknál a láncáttétel, és a jármű súlypontjának hátsó tengelytől mért vízszintes irányú távolsága. A cél mindkét esetben a tervezési változó(k) azon optimális értékeinek meghatározása, amellyel a versenyautó a lehető legrövidebb idő alatt éri el az álló helyzetből a 40 [km/h] sebességet.

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. Mivel a versenyautó paramétereinek optimalizálásánál a célfüggvény nem áll rendelkezésre zárt formában, a tervezési változók optimális értékeinek megtalálására csak metaheurisztikus algoritmusok alkalmazhatók. Ezek közül választottam ki a „szimulált hűtést”, amely egy hatékony és robusztus sztochasztikus algoritmus, amelyet nagy konvergenciasebesség jellemez, és amelyet számos esetben alkalmaznak különböző mérnöki és informatikai területeken.

Bár a „szimulált hűtés” járműipari alkalmazásának kiterjedt szakirodalma van, a módszer doktori dolgozatomban bemutatott alkalmazása egy teljesen új alkalmazási terület, amelyhez hasonlót nem találtam a szakirodalomban. A kidolgozott és alkalmazott eljárás hatékony segítség a versenycsapatoknak a különböző hazai és nemzetközi versenyekre való felkészülésben.

Az optimalizálás megvalósításához a MATLAB programot használtam, amely az általános szimulált hűtés egy továbbfejlesztett változatát, az adaptív szimulált hűtést alkalmazza. Ennél a változatnál az algoritmust jellemző paramétereket a program automatikusan állítja be.

Az MATLAB környezetben kifejlesztett programkódokat, valamint a módszer alkalmazását a prototípus versenyautónk optimális műszaki adatainak meghatározására két példán keresztül mutatom be. A tervezési változók mindkét esetben a láncáttétel, és a jármű súlypontjának hátsó tengelytől mért vízszintes irányú távolsága. Az első esetben azon optimális értékek meghatározása a cél, amelyek alkalmazása esetén a versenyautó álló helyzetből a lehető legrövidebb idő alatt éri el a 40 [km/h] sebességet, míg a másodikban a lehető legrövidebb idő alatt teljesíti a 100 méteres távot.

2.2 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 kiszerezése 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.

A valóságot hitelesen leíró szimulációhoz nélkülözhetetlen azon jármű- és motorjellemzők pontos ismerete, amelyek a járműdinamikai szimulációs program, azon belül a motorszimulációs modul bemenő adataiként szolgálnak. A doktori dolgozatomban ismertetett prototípus versenyautó esetében számos járműjellemző (pl. geometriai adatok, tömegek, súlypont helye) értékét mérési úton meghatároztuk, egyes adatokat (pl. gördülési és légellenállási tényező, lánchajtás határfoka) a szakirodalomban fellelhető értékek alapján becsültük. A versenyautóban alkalmazott soros gerjesztésű egyenáramú motor elektromágneses jellemzőit (az álló és forgórész tekercseinek elektromos ellenállása, dinamikus öninduktivitása, a két tekercs kölcsönös statikus induktivitása, a kefefeszültség értéke) korábban kísérleti úton meghatároztuk [1].

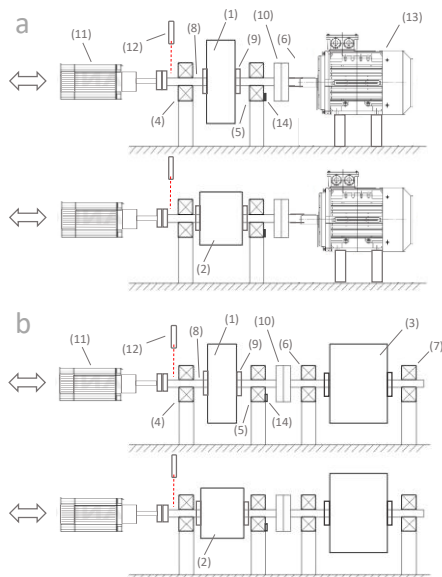
Jelen tézispontban módszertani fejlesztéseket ismertetek egy olyan kísérleti eljáráshoz, amellyel elektromos motorok dinamikai jellemzői – a motor szétszerelése nélkül – szimultán meghatározhatók [6].

Itt meg kell jegyezni, hogy az elektromágneses motorjellemzők kísérleti meghatározásában részt vettem, de szerepem nem volt meghatározó, így az nem része a téziseimnek. Mindazonáltal a téma teljeskörű átláthatósága, ezáltal érthetősége érdekében a doktori dolgozatomban ezeket a vizsgálatokat is részletesen ismertetem.

A dinamikai jellemzők meghatározásával a saját munkám, amelyet a témavezetőm irányításával végeztem.

A tézispont részletezve:

A módszertani fejlesztéseket egy ismert kísérleti eljárásan [6] végeztem el. Az eljárás esetében alkalmazott mérőelrendezést az 5. ábra (a) része szemlélteti.



5. ábra Ismeretlen motor vizsgálatához (a) és a hitelesítő mérésekhez (b) alkalmazott mérőelrendezések [6]

Az eljárás négy független kísérletből áll, és két azonos tömegű, de eltérő tehetetlenségi nyomatékú terhelő hengert alkalmaz. Az azonos tömegek a tartócsapágycs azonos ellenállási nyomatékát biztosítják a két különböző terhelő henger alkalmazása esetén. Mindegyik kísérlet esetén a rendszert egy külső meghajtó motorral, annak névleges fordulatszámáig felpörgetjük, majd a meghajtó motort lecsatlakoztatva, hagyjuk a rendszert szabadon kifutni. Az első és második esetben csak az első és a második hengert pörgetjük fel, míg a harmadik és negyedik esetben az első és második hengert a hozzájuk kapcsolt motorral, amelynek a dinamikai jellemzőit meg kívánjuk határozni. A kifutási szakaszokon mérjük a rendszer szögsebességét

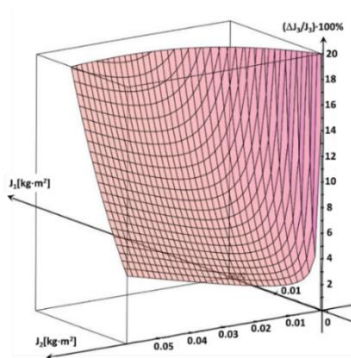
az idő függvényében. A fenti négy mérésből a vizsgált motor tehetetlenségi és ellenállási nyomatéka a szögsebesség függvényében meghatározható.

A vizsgálataink kezdetén a kísérleti eljárás kidolgozatlan volt, ami megakadályozta a módszer megbízható, alacsony hibával történő alkalmazását. Hiányoztak az alábbiak:

- Az eljárás azon optimális terhelő tehetetlenségi nyomatékok meghatározására, amelyek alkalmazása esetén a módszer hibája minimális (5% alatti).
- Annak vizsgálata, hogy a tartócsapágyak melegezése hogyan befolyásolja a módszer pontosságát.
- A részletes hibaszámítás.
- Az ellenállási nyomaték-szögsebesség karakterisztikára vonatkozó mérési adatok.

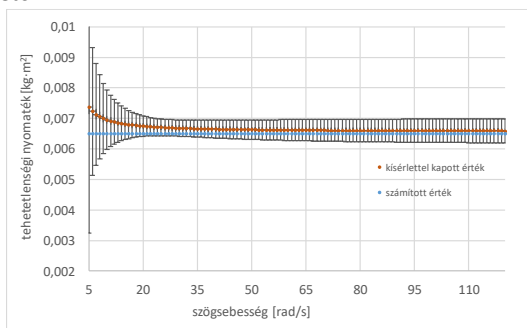
A fenti hiányosságok pótlására az alábbi fejlesztéseket végeztük el:

- Meghatároztuk az eljárás hibáját a Gauss-féle hibaterjedési törvény alkalmazásával.
- A relatív százalékos hibát ábráztuk az alkalmazott két terhelő tehetetlenségi nyomaték függvényében (6. ábra).
- A függvény minimumához tartozó tehetetlenségi nyomatékokat leolvastva meghatároztuk a terhelő tehetetlenségi nyomatékok optimális értékeit.
- Megvizsgáltuk a csapágyak melegezésének hatását az eljárás pontosságára.
- Megállapítottuk, hogy a csapágyak melegezése jelentősen növeli az eljárás hibáját.
- Javaslatokat tettünk a fenti hiba csökkentésére.
- Hitelesítő méréseket végeztünk az eljárás pontosságának kísérleti ellenőrzésére. A hitelesítő mérések során a vizsgált elektromos motort egy ismert tehetetlenségi nyomatékú referencia hengerrel helyettesítettük (5. ábra (b) része).
- Javaslatokat tettünk a módszer rutinszerű alkalmazására.

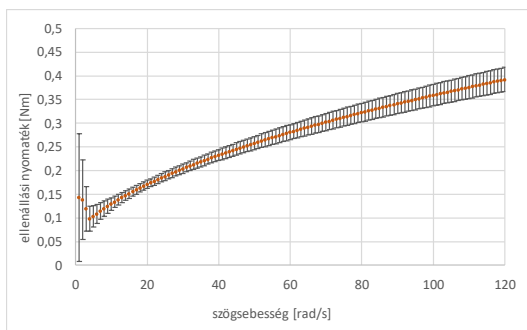


6. ábra A hitelesítő henger kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomatékának relatív százalékos hibája a két terhelő tehetetlenségi nyomaték függvényében

A hitelesítő mérések esetében a kísérletileg meghatározott tehetetlenségi nyomaték relatív százalékos hibája 5,3% (6. ábra), míg az ellenállási nyomaték esetében ez az érték 5-6% között változik a [20;120] [rad/s] szögsebesség tartományon (6. ábra). Meg kell jegyezni, hogy a referencia hengerre a tömegből és geometria méretekből számított tehetetlenségi nyomaték a megadott 5,3% hibahatáron belül esett (5. ábra). Szintén meg kell jegyezni, hogy a mérőrendszerünkben [7] nem tudtuk alkalmazni az optimális terhelő tehetetlenségi nyomatékokat, csak ahhoz közeli értékeket. Az optimális értékek alkalmazása esetén a hiba 3% körüli értékre csökkenthető.



7. ábra A hitelesítő henger kísérletileg meghatározott, és számított tehetetlenségi nyomatéka



8. ábra A hitelesítő henger tartócsapágyainak kísérletileg meghatározott együttes ellenállási nyomatéka a szögsebesség függvényében

2.3 HARMADIK TÉZISPONT

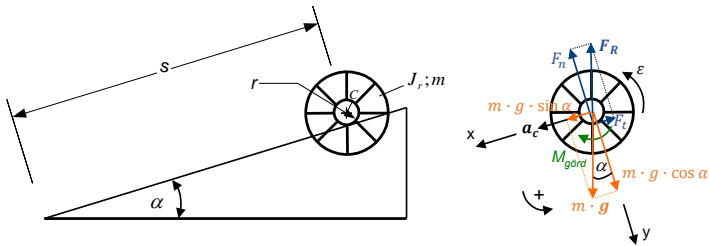
A tézispont egy újszerű kísérleti eljárást ismertet elektromos motorok dinamikai jellemzőinek meghatározására, valamint a motorszimulációs modulok által generált függvények hitelesítésére. Az eljárás két független kísérletből áll: az elsőben egy gördítési kísérletből meghatározzuk a forgórész tehetetlenségi 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, lengetésén 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.

Az említettek szerint, az első kísérletből a forgórész tehetetlenségi nyomatékát határozzuk meg [8], amihez a forgórészt kisereltük a motorból. Az alkalmazott kísérleti elrendezést a 9. ábra szemlélteti.



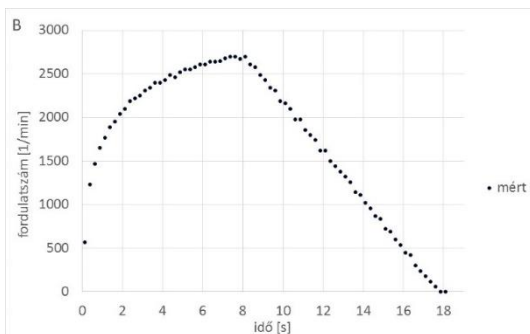
9. ábra A legördítési kísérlethez alkalmazott elrendezés és paraméterei

Az eljárás lényege, hogy a motor kiserelt forgórészét egy alumínium idomokból felépülő merev lejtőn legördítjük, és mérjük a tömegközéppontja általa megtett utat az idő függvényében, majd abból kiszámítjuk a tömegközéppont gyorsulását (a_c). Mivel az eljárás figyelembe veszi a forgórész gördülési ellenállását, ezért két független kísérletet kell elvégezni, két eltérő lejtőszög ($\alpha_1, \alpha_2 < 2^\circ$) alkalmazásával. Az út-idő függvényekből ($s(t)$), a lejtőszögekből (α), a forgórész tömegéből (m) és gördülési sugarából (r) a forgórész tehetetlenségi nyomatéka (J_r) az alábbi összefüggéssel számítható:

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

Az eljárás Gauss-féle hibaterjedési törvénnyel számolt elméleti hibája: 3,28%. Egy ismert geometriájú és tömegű acélhengerrel az eljárást hitelesítettük. A henger geometriai adataiból és tömegéből számított tehetetlenségi nyomatéka (referencia érték) a kísérleti eljárással meghatározott értéket a fenti, 3,28% hibahatáron belül közelítette.

Ezt követően egy kombinált gyorsítási és kifizési teszt kifizési szakaszából meghatározzuk a forgórész ellenállási nyomaték-szögsebesség karakterisztikáját [8]. A kísérlet elvégzéséhez a motorra feszültséget kapcsoltunk, és hagytuk, hogy a forgórész elérje a maximális fordulatszámát. Ezt követően a feszültséget lekapcsoltuk, így a forgórész fokozatosan lassult, majd megállt. A kísérlet során mértük a forgórész fordulatszámát (8. ábra).



10. ábra A forgórész fordulatszáma az idő függvényében az kísérlet során

A leállási (kifizési) szakaszból meghatároztuk a forgórész ellenállási nyomatékát. Mivel a vizsgált SWDC motor esetében a kifizési szakaszon a fordulatszám az idővel jó közelítéssel lineárisan csökkent, így a forgórész szöggyorsulása időben állandónak adódott. A mért szögsebesség-idő függvény meredekségéből meghatároztuk a szöggyorsulás (ε) nagyságát, amely esetünkben $30,331$ [rad/s²]. Ezt követően az ellenállási nyomaték az alábbi összefüggéssel számolható:

$$M_{súr1} = (J_r + J_{bh}) \cdot \varepsilon \quad (2)$$

A fenti összefüggésben J_r a motor forgórészének tehetetlenségi nyomatéka, J_{bh} pedig a tengely végére rögzített bordás hüvely tehetetlenségi nyomatéka, amelyre a fordulatszáméréshez alkalmazott fényvisszaverő csíkokat rögzítettük. A (2) összefüggéssel számolt ellenállási nyomaték ($M_{súr1}$) a fordulatszámától független állandó érték ($M_{súr1} = 0,6075$ [Nm]).

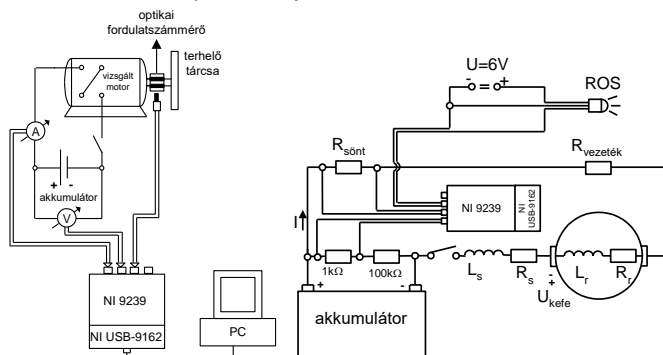
A motorszimulációs modulok által generált függvények hitelesítéséhez a prototípus versenyautónkban alkalmazott soros gerjesztésű egyenáramú (SWDC) motoron statikus és dinamikus tesztméréseket [1, 8] végeztünk,

majd azok eredményeit összehasonlítottuk az ugyanazon bemenő adatokkal elvégzett szimulációk eredményeivel.

A statikus tesztmérésekkel [1] kapcsolatos vizsgálatokban részt vettem, de szerepem nem volt meghatározó, így azok nem részei a téziseimnek. Mindazonáltal a téma teljeskörű átláthatósága, ezáltal érthetősége érdekében a doktori dolgozatomban a fenti vizsgálatokat is részletesen ismertetem.

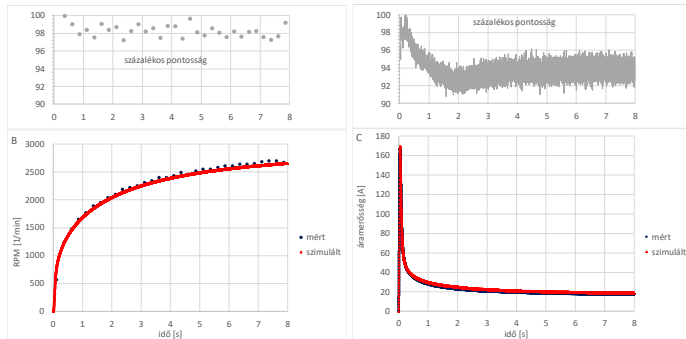
A dinamikus tesztmérések [8], tulajdonképpen a korábban már említett kombinált gyorsítási és kifutási tesztek, amelyek gyorsítási szakaszával a motorszimulációs modulok által generált függvények hitelesíthetők.

A dinamikus tesztmérések esetében alkalmazott mérőelrendezést, a hozzá tartozó elektromos kapcsolási rajzzal az 11. ábra szemlélteti.



11. ábra A dinamikus tesztmérések során alkalmazott mérőelrendezés és a hozzá tartozó elektromos kapcsolási rajz

A kísérlet elvégzéséhez a motorra feszültséget kapcsoltunk, és hagytuk a forgórészt felgyorsulni, miközben mértük a fordulatszámát, a motoron átfolyó áram erősségét és az akkumulátor kapocsfeszültségét az idő függvényében. A kísérletet a motor tengelyére rögzített különböző tehetetlenségi nyomatékú terhelő tárcsákkal végeztük el. A szimulált és mért értékeket, valamint azok egymáshoz viszonyított százalékos pontosságát a 12. ábra szemlélteti 0,0001576 [kg·m²] tehetetlenségi nyomatékú terhelő tárcsa alkalmazása esetén.



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

A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a szimulált és mért értékek egymáshoz viszonyított százalékos pontossága a fordulatszám és áramerősség esetén 96-99% és 93-99% között változik, a $0,0001576 - 0,06785 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$ 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.

3 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 hitelesítenék, 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 végeeselemes 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.



Nyilvántartási szám: DEENK/121/2024.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Szántó Attila

Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10060878

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

1. **Szántó, A.**, Szántó, A., Szíki, G. Á.: Soros gerjesztésű egyenáramú motor modellezési eljárásainak áttekintése.
Műsz. Tud. Közl. 13, 166-169, 2020. ISSN: 2393-1280.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2020.13.31>

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

2. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Csernusné Ádámkó, É.: Review of Methods for Determining the Moment of Inertia and Friction Torque of Electric Motors.
Acta Polytech. Hung. 21 (4), 203-218, 2024. ISSN: 1785-8860.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.21.4.2024.4.11>
IF: 1.7 (2022)
3. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Mankovits, T.: Dynamic modelling and simulation of a prototype race car in MATLAB/Simulink applying different types of electric motors.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 12 (1), 57-63, 2021. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2020.00145>
4. **Szántó, A.**, Hajdu, S., Szíki, G. Á.: Dynamic simulation of a prototype race car driven by series wound DC motor in Matlab- Simulink.
Acta Polytech. Hung. 17 (4), 103-122, 2020. ISSN: 1785-8860.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.17.4.2020.4.6>
IF: 1.806

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

5. **Szántó, A.**, Hajdu, S., Szíki, G. Á.: Optimizing Parameters for an Electrical Car Employing Vehicle Dynamics Simulation Program.
Appl. Sci.-Basel. 13 (15), 1-20, 2023. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app13158897>
IF: 2.7 (2022)





6. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Kiss, J., Juhász, G., Csernusné Ádámkó, É.: Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen.
Appl. Sci.-Basel. 12 (19), 1-18, 2022. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app121910095>
IF: 2.7
7. **Szántó, A.**, Csernusné Ádámkó, É., Juhász, G., Szíki, G. Á.: Simultaneous measurement of the moment of inertia and braking torque of electric motors applying additional inertia.
Measurement. 204, 1-11, 2022. ISSN: 0263-2241.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>
IF: 5.6
8. **Szántó, A.**, Kiss, J., Mankovits, T., Szíki, G. Á.: Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor.
Appl. Sci.-Basel. 11 (10), 1-18, 2021. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app11104542>
IF: 2.838

További közlemények

Magyar nyelvű könyvek (4)

9. **Szántó, A.**: Mérnöki fizika feladatgyűjtemény. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 85 p., 2021.
ISBN: 9789633189504
10. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**: Mechanika menedzsereknek. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 180 p., 2019. ISBN: 9789633188132
11. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**: Mérnöki fizika. Debreceni Egyetem Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 108 p., 2019. ISBN: 9789633188361
12. Szíki, G. Á., szerk. **Szántó, A.**: Műszaki mechanika: statika. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 161 p., 2018. ISBN: 9789633187807

Idegen nyelvű, hazai könyvek (1)

13. Szíki, G. Á., szerk. **Szántó, A.**: Technical Mechanics I.: Statics. DUPress, Debrecen, 160 p., 2019. ISBN: 9789633187463

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (4)

14. **Szántó, A.**, Garai, H. A., Csernusné Ádámkó, É., Szíki, G. Á.: Elektromos motorok vizsgálatára fejlesztett mérőrendszer hitelesítése, kalibrálásra.
Műsz. Tud. Közl. 19, 51-54, 2023. ISSN: 2393-1280.





15. **Szántó, A.**, Mankovits, T., Szíki, G. Á.: A modern járművekben alkalmazott hajtásrendszerek áttekintése.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 5 (1), 728-732, 2020. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.1.61>
16. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Sarvajcz, K.: Dinamikus tesztek soros gerjesztésű DC motoron: a motorral hajtott jármű fékezésének szimulációja = Dynamic tests on a series wound DC motor : simulation of the braking of the vehicle driven by the motor.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 4 (3), 15-20, 2019. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2019.3.3>.
17. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S.: Elektromos hajtású tanszéki versenyautó járműdinamikai modellezése = Vehicle dynamics modelling of an electric driven race car.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 1 (2), 106-114, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.14>.

Magyar nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

18. Elek, P., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Változtatható frekvenciájú és erősségű szinuszos váltóáram előállítására villamosmotorok elektromágneses jellemzőinek méréséhez.
Műsz. Tud. Közl. 17, 16-19, 2022. EISSN: 2393-1280.
DOI: <https://doi.org/10.33895/mtk-2022.17.04>
19. **Szántó, A.**, Décsei, R., Kujbus, M., Fejes, L., Papcsák, N., Szíki, G. Á.: Elektromos motorok elektromágneses és dinamikai jellemzőinek mérésére alkalmas mérőrendszer tervezése.
Műsz. Tud. Közl. 15, 99-102, 2021. ISSN: 2393-1280.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2021.15.19>

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (5)

20. **Szántó, A.**, Szántó, A., Szíki, G. Á., Csernusné Ádámkó, É., Juhász, G.: Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor.
Gép. 71 (3-4), 45-49, 2020. ISSN: 0016-8572.
21. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Review of Modern Vehicle Powertrains and Their Modelling and Simulation in MATLAB/Simulink.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 5 (2), 232-250, 2020. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.2.29>.
22. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., **Szántó, A.**, Mankovits, T.: Series Wound DC Motor Simulation Applying MATLAB SIMULINK and LabVIEW Control Design and Simulation Module.
Per. Polytech. Transport. Eng. 48 (1), 65-69, 2020. ISSN: 0303-7800.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPtr.12908>

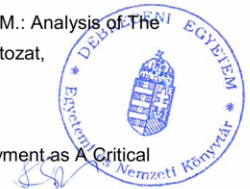




23. Füleki, Z., Erdei, T. I., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Husi, G.: Development of an IoT based Smart meteorological station & horticultural irrigation system's controller using a Raspberry Pi Linux server.
Recent Innov. Mechatron. 6 (1), 1-6, 2019. EISSN: 2064-9622.
24. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Sarvajcz, K.: Measuring the Dynamic Characteristics of Electric Motors.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 4 (1), 359-364, 2019. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.44>.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (8)

25. Elek, P., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Generation of Sinusoidal Alternating Current of Variable Frequency and Intensity for Measuring the Electromagnetic Characteristics of Electric Motors.
Műsz. Tud. Közl. 17 (1), 16-19, 2022. EISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2022.17.04>
26. Csernusné Ádámkó, É., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Software developments for an electric motor test bench developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen.
IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1237, 1-9, 2022. ISSN: 1757-8981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1237/1/012012>
27. **Szántó, A.**, Veszelszki, K. J., Szántó, A., Juhász, G., Szíki, G. Á.: Design of a measuring system for the testing of pneumatic powertrains.
J. Phys. Conf. Ser. 1935 (1), 1-8, 2021. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012013>
28. **Szántó, A.**, Décsei, R., Kujbus, M., Fejes, L., Papcsák, N., Szíki, G. Á.: Design of a Measuring System Suitable for Measuring the Electromagnetic and Dynamic Characteristics of Electric Motors.
Műsz. Tud. Közl. 15 (1), 99-102, 2021. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2021.15.19>
29. **Szántó, A.**, Szántó, A., Szíki, G. Á.: Review of the Modelling Methods of Series Wound DC Motors. Utánközlés nyelvi változat,
Műsz. Tud. Közl. 13 (1), 166-169, 2020. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2020.13.31>
30. Gábora, A., Sipos, K. B., Lovadi, G. D., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Borzan, M.: Analysis of The Losses of Pneumatic Driven Concept Vehicles. Utánközlés nyelvi változat,
Műszaki Tud. Közl. 9 (1), 91-94, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.18>
31. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S., Gábora, A., Sipos, K. B.: Pension Payment as A Critical Infrastructure. Utánközlés nyelvi változat,
Műsz. Tud. Közl. 9 (1), 219-222, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.50>





32. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., Kiss, J., Gál, T., **Szántó, A.**, Gábora, A., Husi, G.: Experimental investigation of a series wound DC motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems.

Measurement. 109, 111-118, 2017. ISSN: 0263-2241.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.055>

IF: 2.218

Magyar nyelvű konferencia közlemények (12)

33. Csernusné Ádámkó, É., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Szoftveres fejlesztések villamos motorok tesztelésére kifejlesztett mérőrendszerhez.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education.
Ed.: Kocsis Imre, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, 4-17, 2022. ISBN: 9789634904540

34. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Mérőrendszer fejlesztése villanymotorok elektromágneses és dinamikai jellemzőinek méréséhez és teszteléséhez.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education : 1th April 2021 / edited by Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 61-71, 2021. ISBN: 9789634903130

35. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., Szántó, A.: Dinamikus tesztmérések és szimuláció soros gerjesztésű egyenáramú motoron.
In: Tavaszí Szél 2019 = Spring Wind 2019 : Tanulmánykötet : III. kötet. Szerk.: Bihari Erika, Molnár Dániel, Szikszai-Németh Ketrin, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Budapest, 146-154, 2020. ISBN: 9786155586521

36. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S., Gábora, A., Sipos, K. B.: Járműdinamikai szimuláció és optimalizáció.
In: A XXIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 219-222, 2018. ISBN: 9789634490777

37. Gábora, A., Sipos, K. B., Lovadi, G. D., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Borzan, M.: Pneumatikus meghajtású tanulmányautó veszteségeinek elemzése.
In: A XXIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 91-94, 2018. ISBN: 9789634490777

38. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Sarvajcz, K.: Villanymotorok dinamikai jellemzőinek mérése.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education.
Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 78-83, 2018.
ISBN: 9789634900559





39. Gábora, A., Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Varga, T. A., Magyarai, A., Balázs, D.: Prototípus elektromos tanulmányautó fejlesztése a Shell Eco-Marathon versenyre = prototype battery electric car development for Shell Eco-Marathon competition.
In: A XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai = Proceedings of the XXII-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 167-170, 2017. ISBN: 9789634490180
40. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S., Gábora, A.: Soros gerjesztésű egyenáramú motor szimulációja MATLAB környezetben = Simulation of a Series Wound DC Motor in MATLAB Environment.
In: A XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai = Proceedings of the XXII-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 367-370, 2017. ISBN: 9789634490180
41. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., **Szántó, A.**: Soros gerjesztésű egyenáramú motor szimulációja NI LabVIEW Control Design and Simulation Modul alkalmazásával.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 83-87, 2017. ISBN: 9789634739814
42. Szíki, G. Á., Kiss, J., **Szántó, A.**, Gál, T.: Soros gerjesztésű egyenáramú motor elektromágneses és dinamikai jellemzőinek mérése.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 53-57, 2016. ISBN: 9789634739456
43. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S.: Soros gerjesztésű egyenáramú motorral hajtott versenyautó dinamikai modellezése.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 587-591, 2016. ISBN: 9789637064333
44. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S.: Elektromos hajtású versenyautó járműdinamikai modellezése.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education 29th October 2015. Ed.: by Kocsis Imre, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 42-52, 2015. ISBN: 9789634739166

Idegen nyelvű konferencia közlemények (3)

45. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., **Szántó, A.**: Dynamic Simulation of a Series Wound DC Motor Applying the Control Design and Simulation Module of Labview.
In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017). Eds.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 540-543, 2017. ISBN: 9789634733041





46. Szíki, G. Á., Kiss, J., **Szántó, A.**, Gál, T.: Measurement of the electromagnetic and dynamic characteristics of a series wound DC motor.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 541-544, 2016. ISBN: 9789634739449
47. Szíki, G. Á., Hajdu, S., **Szántó, A.**: Vehicle dynamics modelling of an electric driven race car.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 208-217, 2015. ISBN: 9789634739173

Magyar nyelvű absztrakt kiadványok (4)

48. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Juhász, G., Csernusné Ádámkó, É.: Villamos motorok tehetetlenségi és ellenállási nyomatékának szimultán meghatározása kifutási kísérletekből.
In: Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Dezső Gergely, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Nyíregyháza, 30, 2022. ISBN: 9786156032508
49. **Szántó, A.**, Juhász, G., Csernusné Ádámkó, É., Kiss, J., Szíki, G. Á.: Villamos motorok vizsgálatára kifejlesztett mérőrendszer a DE Műszaki Karán.
In: Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Dezső Gergely, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Nyíregyháza, 29, 2022. ISBN: 9786156032508
50. **Szántó, A.**, Hajdu, S., Szíki, G. Á.: Korszerű járműhajtásokban alkalmazott villanymotorok kísérleti és elméleti vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Szodrai Ferenc, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, 33, 2021. ISBN: 9789634903208
51. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Sarvajcz, K.: Dinamikus tesztmérések és szimuláció soros gerjesztésű egyenáramú motoron.
In: Tavaszi Szél Konferencia 2019 : Nemzetközi Multidiszciplináris Konferencia : Absztraktkötet. Szerk.: Németh Katalin, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Debrecen, 471, 2019. ISBN: 9786155586422





Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

52. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Sarvajcz, K.: Determination of the dynamic parameters of electric motors.

In: Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 179-180, 2018. ISBN: 9789634900511

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 19,562

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 17,344

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2024.04.02.



**SHORT THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PHD)**

**DYNAMIC MODELING, SIMULATION,
OPTIMIZATION AND EXPERIMENTAL
INVESTIGATION OF ELECTRICALLY DRIVEN
PROTOTYPE RACE CARS AND DRIVETRAINS**

BY ATTILA SZÁNTÓ

SUPERVISOR: GUSZTÁV ÁRON SZIKI PHD



UNIVERSITY OF DEBRECEN

DOCTORAL SCHOOL OF INFORMATICS

DEBRECEN, 2024

1 PREVIOUS RESEARCH, OBJECTIVES

My doctoral dissertation is based on my previous research work, which I started in 2015 as a BSc student under the guidance of my current doctoral supervisor. During this time, I was a regular participant in student teams that developed electric prototype race cars. Such a team was also the one which designed and built the racing car at the Department of Mechanical Engineering of the Faculty of Engineering of the University of Debrecen, that participated in the MVM Energy Race organized by the Hungarian Electric Works (MVM). I deal with the vehicle dynamics modelling and simulation of this prototype race car in my doctoral dissertation in detail. During my BSc and MSc courses, I was the author of four TDK theses at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen on the above topic, one of which won first, two second and one third places at the Faculty, and two of them advanced to the national rounds (OTDK 2017, 2019). As a result of our aforementioned research work, several scientific publications were published in domestic and international journals, of which I was a co-author, even before my doctoral course. Of the mentioned publications, 10 were peer-reviewed and one was published in a refereed (Q1 classification) [1] journal. Based on what has been said, my doctoral topic can be considered as the natural continuation of my previous research work.

At the beginning of my doctoral studies, our goal was to develop a technical data optimization software, which can determine the optimal values of the technical data of the electric drive prototype racing cars designed and built by the Faculty of Engineering. By using the optimal values mentioned above, the given competition task can be completed with the best results. My supervisor and I planned the implementation of the above general goal in the following steps:

The first step is to develop a general vehicle dynamics model for the prototype race cars, and after that, a simulation program based on it. As a first step, for the motion on a straight track, and after that, for the simulation of a general circuit race.

As a second step, the simulation program is loaded with real input data, partly using scientific literature sources, partly experimental data. This

includes the development of the necessary experimental set-ups (measurement system) and procedures.

The third step is, the experimental validation of the output functions generated by the simulation program and its modules, as well as the development of the necessary measurement set-ups and procedures to it.

The fourth step is the development of optimization procedures with which - using the output functions generated by the vehicle dynamics simulation program - the optimal values of the technical parameters of the prototype race cars can be determined for various racing tasks.

As a fifth step, the developed procedures are routinely applied to the design of prototype race cars, or to the setting of the parameter values of existing race cars for various racing tasks.

My doctoral dissertation is based on the above objectives and discusses their implementation. Accordingly, the content of each section can be briefly summarized as follows:

Section 1: presentation of the research topic and our objectives

Section 2: detailed description of the prototype race car, that is the subject of my investigations

Section 3: presentation of the general vehicle dynamics model developed for prototype race cars

Section 4: presentation of the simulation program that was created based on the model

Section 5: experimental determination of the electric motor characteristics required for the simulation, including the description of the applied measurement arrangements, measurement and evaluation procedures

Section 6: presentation of the applied optimization procedures

Section 7: conclusions

2 SCIENTIFIC THESES

2.1 FIRST THESIS POINT

The thesis point describes a novel, modular structure technical data optimization software developed for prototype race cars. With the

application of the software, the optimal values of the technical data of the vehicles can be determined for any given competition task. (Such an optimization task can be, for example, the determination of the gear ratio in the powertrain with which a given track section in a drag race can be completed in the shortest time.)

The software consists of two main modules. One is a vehicle dynamics simulation module developed for movement on a straight track, which calculates the vehicle's driving dynamics functions (acceleration-, speed- and travelled distance-time functions) from the vehicle's technical data. The other is an optimization module, which uses the function values generated by the simulation module to calculate the optimal values of the selected technical data. The optimization module uses two independent procedures: the first is a graphical procedure, the second is the application of the "adaptive simulated annealing" method to determine the optimal technical data, which is a completely new application area of the method. In the case of up to two design variables and a "smooth" (without sharp changes) objective function, it is advisable to use the first method, while in the case of more than two variables or a complex objective function, the second method should be used. In the case of a complex objective function and up to two variables, the first method can be used to determine the search domain and the starting point of the iteration before applying the second method.

Part of the procedure is a novel filtering procedure, which can be used to exclude from the investigation in advance the technical data for which it is unnecessary to optimize, since their significant change causes only a negligible change in the relevant objective function.

The detailed error calculation carried out proved that the vehicle dynamics simulation module is able to calculate the speed of the vehicle with a relative uncertainty of 5-9% in the speed range of 1-40 km/h, which confirms the validity of our tests and results.

The developments primarily help the student teams of the Faculty of Engineering of the University of Debrecen and the instructors who manage them in more conscious design and development work, this way increasing the chances of successfully competing in various student competitions (MVM Energy Race, Shell ECO Marathon, Formula Student).

Under the guidance of my PhD supervisor I developed the vehicle dynamics model for the prototype race cars, which is based on the equations of motion for the individual structural elements, as well as, the equations describing the relationship of the various forces and torques. After that, I have developed the vehicle dynamics simulation program, based on the model, in the MATLAB/Simulink environment [2]. The modelling of series-wound and brushless DC motors [3, 4] is not part of my thesis points, since my contribution here was not decisive, since I participated only in the realisation of the simulation modules. Despite this, the motor models - together with the related electromagnetic and dynamic equations - are also described in my doctoral dissertation in detail in order to make the topic fully transparent and therefore comprehensible. In addition, I present the two procedures, which can be used to determine the optimal technical data of the race car for given racing tasks in detail [5].

The first thesis point in detail:

The structure of the vehicle dynamics model is illustrated in Figure 1.

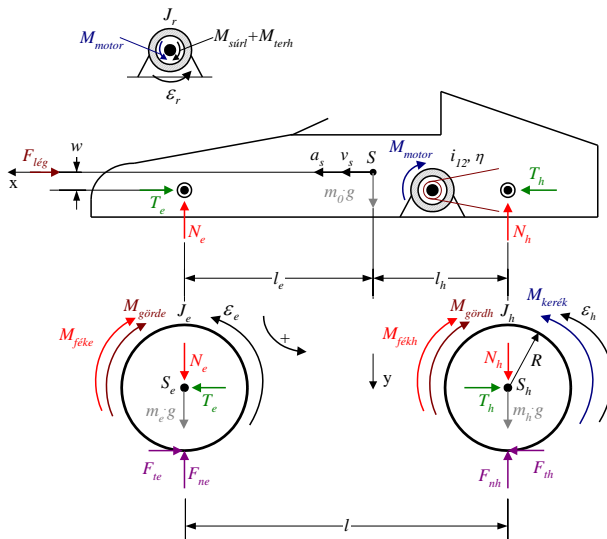


Figure 1. The vehicle dynamics model with the forces and torques acting on the various structural units [2]

The modelled vehicle is divided into five structural units, these are:

- 1) The rotor of the electric motor.
- 2) The transmission system.
- 3) The driven rear wheels with the connected rotating machine parts.
- 4) The free-running front wheels with the connected rotating machine parts.
- 5) The vehicle body, including the housing and stator of the electric motor.

Table 1. Explanation of the notations shown in Figure 1.

Notation	Explanation
$M_{kerék} [Nm]$	magnitude of torque exerted by the motor on the rear shaft through the chain drive
$M_{motor} [Nm]$	magnitude of the torque exerted by the motor's stator on its rotor
$M_{görd_e},$ $M_{görd_h} [Nm]$	magnitude of the rolling resistance torque on the front and rear (back) wheels
$F_{lég} [N]$	resultant of air resistance force
$F_{te}, F_{th} [N]$	magnitude of the force exerted by the road on the front and rear (back) wheels in tangential direction
$F_{ne}, F_{nh} [N]$	magnitude of the force exerted by the road on the front and rear (back) wheels in normal direction
$T_e, T_h [N]$	load on the front and rear (back) shaft in tangential direction
$N_e, N_h [N]$	load on the front and rear (back) shaft in normal direction
S_e, S_h, S	centre or gravity of the front and rear (back) wheels and the whole vehicle
$M_{fék_e},$ $M_{fék_h} [Nm]$	braking torques on the front and rear (back) wheels
η	efficiency of the chain drive
i_{12}	gear ratio in the chain drive
$M_{súrl} [Nm]$	sum of the air, bearing and brush friction torques on the rotor of the motor
$M_{terh} [Nm]$	loading torque on the rotor of the motor
$l [m]$	distance between the front and back shafts in tangential direction
$l_e, l_h [m]$	distance of the centre of mass of the vehicle from the front and back shaft respectively in tangential direction
$w [m]$	distance of the centre of mass of the vehicle from the front and back shafts in normal direction
$m_0 [kg]$	mass of the vehicle body including the driver
$m_e, m_h [kg]$	mass of the front and rear (back) wheels with the rotating machine parts connected to them

$J_e, J_h [kg \cdot m^2]$	moment of inertia of the front and rear (back) wheels with the rotating machine parts connected to them
$J_r [kg \cdot m^2]$	moment of inertia of the rotor of the motor
$R [m]$	effective wheel radius
ξ	kerékcúszás (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

During the development of the model, we applied the following assumptions and restrictions:

- The mass distribution of the vehicle is symmetrical to the x-y plane (Figure 1). (We checked this by measurement.)
- We model the vehicle as a rigid system. (This assumption is correct, since the front and rear suspensions are extremely hard.)
- The resultant of the air resistance force goes through the vehicle's centre of mass and is parallel to the vehicle's direction of motion.

The model takes into account all the forces and torques acting on the vehicle and between the different vehicle components. Figure 2 shows the block diagram of the simulation program developed in MATLAB/Simulink environment. The model is based on the equations of motion for the different structural units, and on the ones, describing the relationship between the various forces and torques, additionally the voltage equation for the motor.

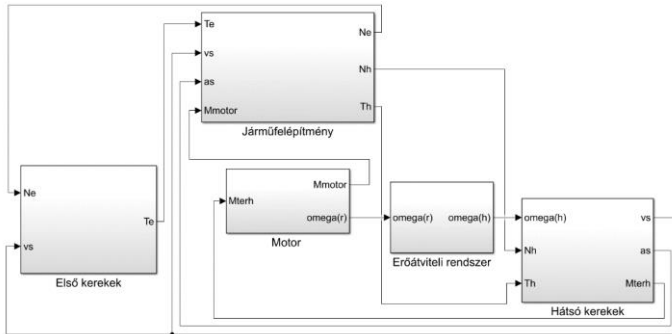


Figure 2. Block diagram of the vehicle dynamics simulation program developed in MATLAB/Simulink environment

Adapted to the vehicle model, the simulation program is also made up of five modules, so if a different type of structural unit (e.g. motor) is used, the module in question can be easily replaced. The detailed description of the individual modules is presented in my doctoral dissertation.

The input data of the program are the technical and physical characteristics of the investigated prototype race car, including the ones of the applied electric motor. I describe these characteristics in detail in my doctoral dissertation. From the above characteristics, the program calculates the following quantities as a function of time:

- The acceleration and velocity of the vehicle's centre of mass and the covered distance by the vehicle.
- The angular velocity and acceleration of the front and rear wheel.
- The forces the road exerts on the tyres in tangential and normal direction.
- Front and rear shafts' loadings in tangential and normal direction.
- Rolling resistance torques.
- Air resistance force.
- Tyre slip.
- The intensity of the current flowing through the motor.
- The torque and angular speed of the motor.
- Torque exerted by the drive system on the rear wheel.

For the output functions generated by the program I show several examples in my doctoral dissertation.

In Table 2, I have listed the estimated uncertainties of some of the input data of the simulation program.

Table 2. Estimated uncertainties of each input data

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]	$M_{súrl}$ [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_{lev} [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 $\pm 0,074$	

I made the estimate based on the uncertainty with which we can provide (e.g. measure) the individual data in practice.

Explanation of symbols not included in Table 1: C and A are the shape factor and surface area of the vehicle, $\mu_{görd_e}$, $\mu_{görd_h}$ and μ_{csap} are the rolling resistance coefficients of the front and rear wheels and the bearing friction coefficient of the wheel bearings, d is the diameter of the inner bore of the wheel bearings, U and U_{kefe} are the supply and brush voltages of the SWDC motor, R_r , R_s , L_{sr} , L_s , L_r , and $M_{súrl}$ are the electric resistances, mutual and self-inductances of the stator and rotor of the motor respectively, and the friction torque of the rotor, $R_{vezeték}$ the electrical resistance of the wires connecting the battery to the motor, μ_s and μ_c are the coefficient of static and kinetic friction occurring between the wheel and the road surface, ρ_{lev} is the density of air.

Figure 3 illustrates the simulated speeds and their uncertainties for the input data and uncertainties in Table 2.

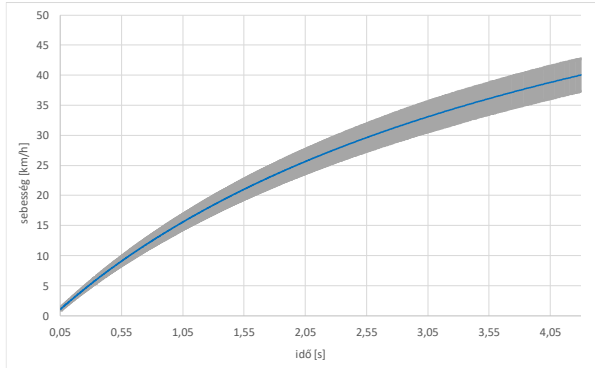


Figure 3. Simulated speeds and their uncertainties

Based on the results of the calculations, it can be established that the relative uncertainties of the simulated speeds vary between 5-9% in the investigated speed range of 1-40 [km/h].

In Figure 4, I have given the relative percentage uncertainties of the individual input data, which cause a relative uncertainty of 2% in the maximum vehicle speed of 40 [km/h].

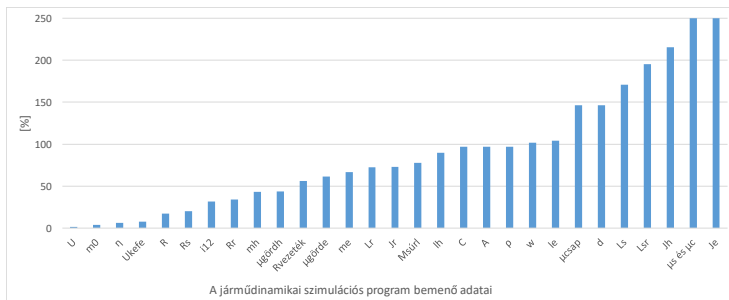


Figure 4. Relative percentage uncertainties for the 2% uncertainty caused in the maximum (40 [km/h]) vehicle speed for each input data

It is easy to see that if we want to simulate the speed of the vehicle with an uncertainty below ~10%, then the uncertainties caused by each input data must be smaller than 2%, provided that the uncertainties caused are equal to each other. Based on Figure 4, it can be seen that, for example, the uncertainty of 1.6% and 4% of the battery terminal voltage (U) and the

vehicle mass (m_0) causes an uncertainty of 2% in the simulated vehicle speed, as well as 34% of the electric resistance of the rotor (R_r) uncertainty. From the point of view of practice, this means that the value of U and m_0 must be known significantly more precisely than the value of R_r . In the case of the examined example, it can be said that it is advisable to enter the input data with the uncertainties given in Figure 4 or below.

In general, depending on the competition task, there may be different parameters that need to be known precisely. So, in the case of a different competition task, completely different percentage values may appear in Figure 4 for the same input data.

It is important to emphasize that before selecting the input data for which we want to optimize for a specific competition task, it is also recommended to create and analyse the diagrams in Figure 4. The reason for this is that during the analysis it may turn out that changing the examined data changes the value of the simulated function to such a small extent that it is not worth performing the optimization on it.

Determination (approximation) of the optimal technical data applying a graphical procedure:

In engineering practice, it often happens that we are looking for the optimal value of only one or two design variables, and the objective function is "smooth", thus free of and sharp changes. In this case, instead of computationally demanding optimization algorithms, it is possible to use a simpler "graphical method".

At this method, we define a uniform "grid" in the field of the design variable(s), and then calculate the values of the objective function at the grid points with the help of the simulation program. After that, the values of the objective function are plotted on one- or two-variable diagrams, and then - with a good approximation - the optimal values of the design variables, which most often belong to the minimum of the function, are read. The accuracy of the read value is adequate for most technical applications if the grid points are chosen densely enough. Of course, this procedure cannot be applied for more than two design variables or very complex objective functions.

In my doctoral dissertation I present the program codes developed in MATLAB environment for the optimization, as well as the application of the

method to determine the optimal technical data of the prototype race car through two examples. In one example, the design variable is the chain ratio, in the other, the chain ratio and the horizontal distance of the vehicle's centre of gravity from the rear axle. In both cases, the aim is to determine the optimal values of the design variable(s) with which the race car reaches a speed of 40 [km/h] from a standstill in the shortest possible time.

Determination of the optimal technical data applying "simulated annealing":

In the case of three or more variables or a complex objective function, or if simply a greater accuracy is required, the "graphical method" can no longer be used. Since the objective function is not available in a closed form when optimizing the parameters of the race car, only metaheuristic algorithms can be used to find the optimal values of the design variables. Among them, I chose "simulated annealing", which is an efficient and robust stochastic algorithm characterized by a high convergence speed and which is widely used in various engineering and IT fields.

Although the application of "simulated annealing" in the automotive industry has extensive literature, the application of the method presented in my doctoral dissertation is a completely new field of application, the like of which I have not found in the literature. The developed and applied procedure is an effective help to the competition teams in preparing for various domestic and international competitions.

To realize the optimization, I used the MATLAB software, which applies an improved version of the general simulated annealing, the adaptive simulated annealing. In this version, the parameters of the algorithm are automatically set by the program.

In my doctoral dissertation, I present the program codes developed in the MATLAB environment and the application of the method to determine the optimal technical data of our prototype race car through two examples. In both cases, the design variables are the gear ratio in the chain drive and the horizontal distance of the vehicle's centre of gravity from the rear shaft. In the first case, the aim is to determine that optimal values, at which the race car reaches a speed of 40 [km/h] from a standstill in the shortest possible time, while in the second case, it covered a distance of 100m in the shortest possible time.

2.2 SECOND THESIS POINT

The thesis point describes methodological developments for an experimental procedure with which the dynamic characteristics of machines and equipment containing rotating masses (components) with bearings, including electric motors, can be determined simultaneously without removing the rotating mass. The mentioned dynamic characteristics are the moment of inertia and resistance (friction) torque of the rotating system (in the case of a motor, the rotor). In the case of the electric motors used in prototype race cars, the mentioned characteristics serve as input data for the motor simulation module of the previously described vehicle dynamics simulation program.

As a result of the developments made, the procedure became significantly more reliable, accurate and routinely applicable. The relative error of the procedure in the case of determining the moment of inertia, is 5.3%, while when the resistance (friction) torque is determined, it varies between 5-6% in the angular velocity range [20;120] [rad/s]. It should be noted that with further optimization of the experimental conditions, the above error can be reduced to a value of about 3% in the case of both examined dynamic characteristics. According to the authors' knowledge, the procedure developed and optimized in this way is the simplest and one of the most accurate one of the known, routinely applicable procedures.

Accurate knowledge of the vehicle and motor characteristics that serve as input data for the vehicle dynamics simulation program is essential for an accurate, thus realistic simulation. In the case of the prototype race car described in my doctoral dissertation, the values of several vehicle characteristics (e.g. geometric data, masses, position of the centre of gravity) we determined by simple measurements, while the values of other data (e.g. coefficient of rolling and air resistance, chain drive efficiency) we estimated from the data found in the scientific literature. The electromagnetic characteristics of the series-wound DC motor applied in the race car (electrical resistance and dynamic self-inductance of the stator and rotor windings, the mutual static inductance between the two windings, the value of brush voltage) were previously determined experimentally [1].

In this thesis point, I describe methodological developments for an existing experimental procedure with which the dynamic characteristics of electric

motors can be determined simultaneously without disassembling the motor [6].

I participated in all the investigations related to the experimental determination of the mentioned electromagnetic motor characteristics, but my contribution was not decisive, so this topic is not part of my thesis point. Nevertheless, to give a complete transparency, thus comprehensibility of the topic, I also describe this experimental work in detail in my doctoral dissertation.

I determined the mentioned dynamic characteristics, that form the basis of the second thesis point, under the guidance of my PhD supervisor.

The thesis point described in detail:

I carried out the methodological developments on an existing experimental procedure [6]. The measuring arrangement used for the procedure is illustrated in part (a) of Figure 5.

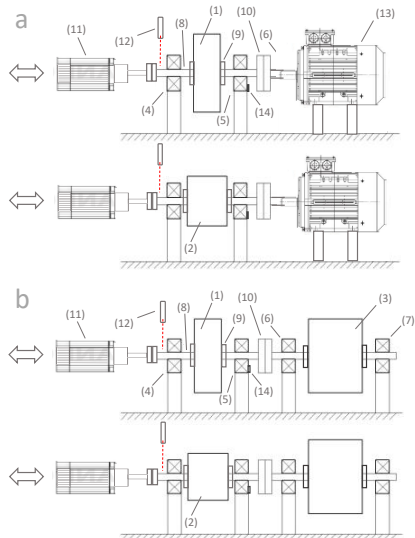


Figure 5. Measurement arrangements applied for measurements on an electric motor (a) and for validation measurements (b) [6]

The procedure consists of four independent experiments and uses two load discs of the same mass but different moments of inertia. The same masses ensure the same friction torque in the support bearings applying the two different load discs. In each experiment, the system is accelerated to its nominal speed using a drive motor, then the drive motor is disconnected and the system is allowed to slow down freely. In the first and second experiments, only the first and second discs are accelerated, while in the third and fourth ones, the first and second discs together with the tested electric motor connected to them. During the retardation, the angular velocity of the system is measured as a function of time. From the above four measurements, the moment of inertia and friction torque of the tested motor can be determined as a function of angular speed.

At the beginning of our investigations, the experimental procedure was not elaborated sufficiently, which prevented the reliable application of the method with low error. The following were missing:

- A procedure for determining the optimal moments of inertias of the loading cylinders, by applying which, the error of the method is minimal (below 5%).
- Analysing how the heating of the support bearings affects the accuracy of the method.
- The detailed error calculation.
- Measurement data for the resistance torque-angular speed characteristic.

To make up for the above shortcomings, we performed the following improvements:

- We determined the error of the procedure by applying the Gauss's Law of Error Propagation.
- The relative percentage error was plotted as a function of the two applied loading moments of inertia (Figure 6).
- By reading the moments of inertia belonging to the minimum of the function, we determined their optimal values.
- We analysed the effect of the heating of the bearings on the accuracy of the method.
- We found that the heating of the bearings during a series of measurements significantly increases the error of the method.

- We have made recommendations to reduce the above error.
- Validation measurements were performed to check the accuracy of the method. During the validation measurements, the tested electric motor was replaced by a reference disc with an accurately known moment of inertia (part (b) of Figure 5).
- We made recommendations for the routine application of the method.

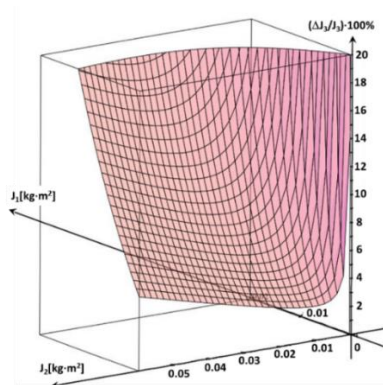


Figure 6. The relative percentage error of the experimentally determined moment of inertia of the reference disk as a function of the two loading moments of inertia

In the case of the validation measurements, the relative percentage error of the experimentally determined moment of inertia is 5.3% (Figure 7), while in the case of the resistance torque, this value varies between 5-6% in the [20;120] [rad/s] angular speed range (Figure 8). It should be noted that the moment of inertia calculated from the mass and geometrical data of the reference cylinder fell within the given error limit of 5.3% (Figure 7). It should also be noted that we could not apply the optimal loading moments of inertia at our measurement set-up [7], only values close to it. If the optimal values are applied, the error can be reduced to around 3%.

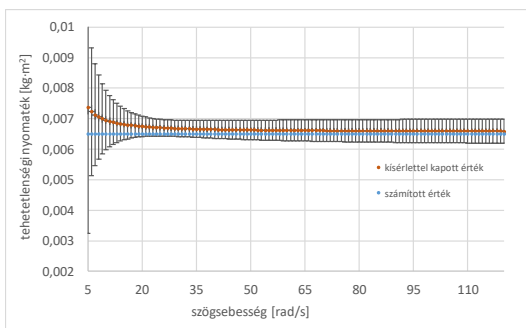


Figure 7. Experimentally determined and calculated moment of inertia of the reference disc

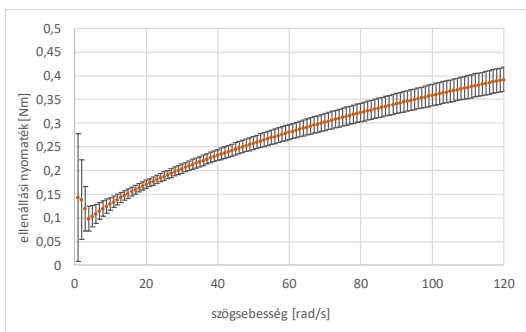


Figure 8. The experimentally determined friction torque of the bearings supporting the reference disc as a function of angular velocity

2.3 THIRD THESIS POINT

The thesis point describes a novel experimental procedure for determining the dynamic characteristics of electric motors, as well as for validating the functions generated by the motor simulation modules. The procedure consists of two independent experiments: in the first, the moment of inertia of the rotor is determined from a roll-down experiment, while in the second, the friction torque-angular speed characteristic is determined from a combined acceleration and retardation test, and the validation is also carried out. The advantage of the rolling experiment is that it can also be

applied with low error in cases where traditional methods based on swinging are inaccurate (e.g. due to the rapidly decreasing amplitude).

The relative error of the procedure, in the case of determining the moment of inertia, is 3.3%, while when determining the resistance (friction) torque, it varies between 4-5% in the [20;120] [rad/s] angular speed range. The disadvantage of this method is that the rotor must be removed from the motor to determine its moment of inertia.

In addition to the above, I verified that the relative accuracy of the values obtained during the validation measurements and those generated by the motor simulation modules varies between 96-99% and 93-99% in the case of angular speed and electric current intensity, applying a loading moment of inertia in the range of 0.0001576 – 0.06785 [kg·m²]. In summary, it can be stated that the accuracy of the developed motor simulation program module - when using the experimentally determined input data - is adequate, so it can be built into our vehicle dynamics simulation program.

As I mentioned, the moment of inertia of the rotor is determined from the first experiment [8], for which the rotor was removed from the motor. The applied experimental arrangement is illustrated in Figure 9.

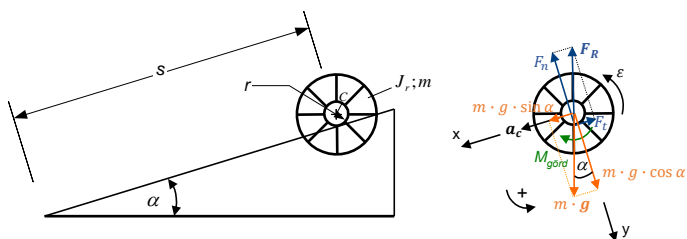


Figure 9. The experimental arrangement and parameters of the roll-down experiment

The essence of the procedure is that the rotor of the motor is rolled down a rigid slope, made of aluminium, and the distance travelled by it is measured as a function of time. After that, the acceleration of its centre of mass (a_c) is calculated from the travelled distance-time function. Since the procedure takes into account the rolling resistance of the rotor, two independent experiments must be performed applying two different incline angles

($\alpha_1, \alpha_2 < 2^\circ$). From the acceleration of the centre of mass, and from the slope angles, the mass (m) and rolling radius (r) of the rotor, the moment of inertia of the rotor (J_r) can be calculated with the following equation:

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

In order to gain information about the accuracy of the method experimentally, we performed validation measurements using a steel cylinder with an accurately known moment of inertia. The relative percentage error of the experimentally determined moment of inertia -, which was calculated using the Gauss' Law of Error Propagation - is 3.28%. The (theoretical) value calculated from the cylinder's geometric data and mass falls within the above margin of error, which validates our measurement procedure.

After that, the friction torque-angular speed characteristic of the rotor is determined from the run-out phase of a combined acceleration and run-out test [8]. To perform the test, we applied voltage to the motor and allowed the rotor to reach its maximum speed. After that, we switched off the voltage, so the rotor gradually slowed down and then stopped. During the test, we measured the RPM of the rotor vs time (Figure 8).

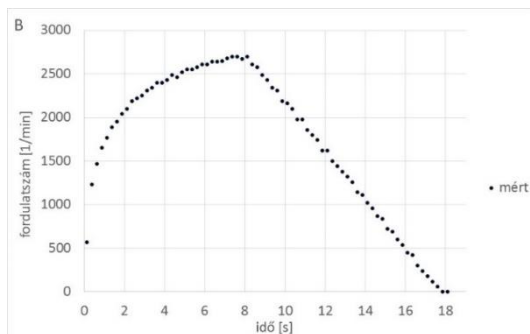


Figure 10. The RPM of the rotor vs time during the test

The friction torque of the rotor was determined from the retardation part of the test. Since the RPM of the rotor during the retardation is decreasing linearly with time, its angular acceleration is constant over time. From the slope of the measured angular speed-time function, we determined the

magnitude of the angular acceleration (ε), which in our case is 30.331 [rad/s²]. After that, the friction torque can be calculated using the following equation:

$$M_{s\acute{u}rl} = (J_r + J_{bh}) \cdot \varepsilon \quad (2)$$

In the above equation, J_r is the moment of inertia of the motor's rotor, and J_{bh} is the moment of inertia of the ribbed sleeve attached to the end of the shaft, on which the reflective strips used for RPM measurement were attached. The resistance torque ($M_{s\acute{u}rl}$) calculated with equation (2) is a constant value independent of the RPM ($M_{s\acute{u}rl} = 0.6075$ [Nm]).

The accuracy of the output functions generated by the motor simulation modules must be checked experimentally. For this purpose, we performed static and dynamic test measurements [1, 8] on the series-wound DC motor applied in our prototype race car, and then compared their results with the results of simulations performed with the same input data.

I took part in all the investigations related to static test measurements [1], but my contribution was not decisive here, so these studies are not part of my thesis point. Nevertheless, in order to make the topic fully transparent, thus comprehensible, I also describe the above mentioned static test measurements in detail in my doctoral dissertation.

The dynamic test measurements [8] are, in fact, the previously mentioned combined acceleration and run-out tests, with the acceleration phase of which the functions generated by the motor simulation modules can be validated.

Figure 11 illustrates the measurement set-up applied for the dynamic test measurements, together with its wiring diagram.

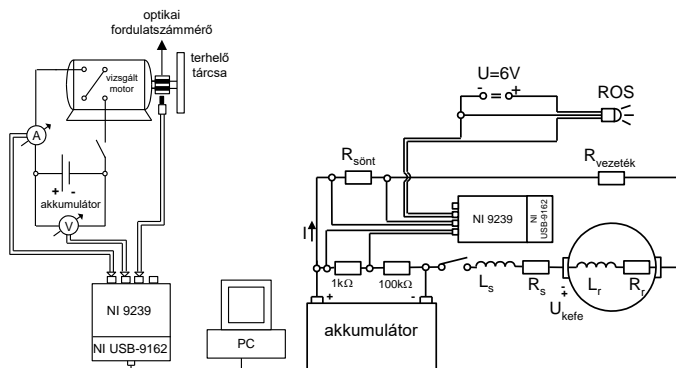


Figure 11. The measurement arrangement applied for the dynamic test measurements, together with its wiring diagram

To perform the experiment, we applied voltage to the motor and allowed the rotor to accelerate while measuring its RPM, the intensity of the current flowing through the motor, and the battery terminal voltage as a function of time. The experiment was carried out applying load cylinders with different moments of inertia attached to the motor shaft. Figure 12 illustrates the simulated and measured values, as well as their relative percentage accuracy, in the case of using a load disk with a moment of inertia of $0.0001576 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$.

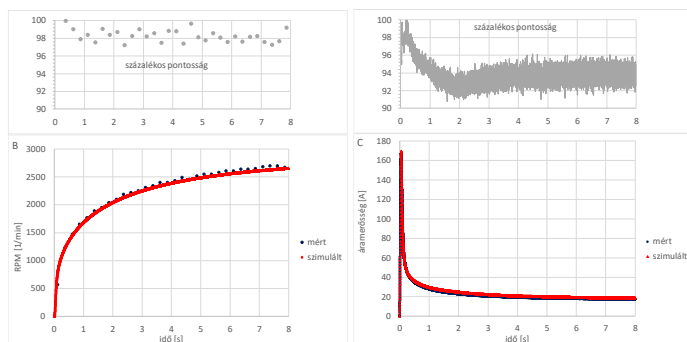


Figure 12. Comparison of dynamic test measurement and simulation results ($J_{terh} = 0.0001576 \text{ [kg}\cdot\text{m}^2]$)

Based on the results of the tests, it can be established that the relative accuracy of the simulated and measured values varies between 96-99% and 93-99% in the case of RPM and current intensity respectively. (The loading moments of inertia is in the range of $0.0001576 - 0.06785$ [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] during the experiments.) In summary, it can be concluded that the accuracy of the developed motor simulation module is high enough to be built into our vehicle dynamics simulation program.

3 FUTURE PLANS

Among my plans is the further development of the vehicle dynamics simulation program to be able to handle cornering sections, thus simulating circuit races would also be possible. In addition, we would equip our race cars with sensors, so that we could use measurement data to check the accuracy of the functions generated by the simulation program. Furthermore, the experimental testing of different types of electric motors (BLDC, PMSM, IM) and the development of the corresponding simulation modules are ongoing. The functions generated by the completed simulation modules would first be validated with test measurements on the motors, and then, if the simulation and measurement results match with sufficient accuracy, the modules would be used in the vehicle dynamics simulation program. In addition, I plan to model and simulate the above electric motors using a finite element software.

In order to realize the above plans, I also plan to involve students in research, thus contributing to their professional development, and as a result of this joint research work, hopefully, many publications, conference presentations and TDK theses will be created.



Registry number: DEENK/121/2024.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Attila Szántó
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10060878

List of publications related to the dissertation

Hungarian scientific articles in international journals (1)

1. **Szántó, A.**, Szántó, A., Szíki, G. Á.: Soros gerjesztésű egyenáramú motor modellezési eljárásainak áttekintése.
Műsz. Tud. Közl. 13, 166-169, 2020. ISSN: 2393-1280.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2020.13.31>

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (3)

2. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Csernusné Ádámkó, É.: Review of Methods for Determining the Moment of Inertia and Friction Torque of Electric Motors.
Acta Polytech. Hung. 21 (4), 203-218, 2024. ISSN: 1785-8860.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.21.4.2024.4.11>
IF: 1.7 (2022)
3. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Mankovits, T.: Dynamic modelling and simulation of a prototype race car in MATLAB/Simulink applying different types of electric motors.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 12 (1), 57-63, 2021. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2020.00145>
4. **Szántó, A.**, Hajdu, S., Szíki, G. Á.: Dynamic simulation of a prototype race car driven by series wound DC motor in Matlab- Simulink.
Acta Polytech. Hung. 17 (4), 103-122, 2020. ISSN: 1785-8860.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12700/APH.17.4.2020.4.6>
IF: 1.806

Foreign language scientific articles in international journals (4)

5. **Szántó, A.**, Hajdu, S., Szíki, G. Á.: Optimizing Parameters for an Electrical Car Employing Vehicle Dynamics Simulation Program.
Appl. Sci.-Basel. 13 (15), 1-20, 2023. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app13158897>
IF: 2.7 (2022)





6. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Kiss, J., Juhász, G., Csernusné Ádámkó, É.: Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen.
Appl. Sci.-Basel. 12 (19), 1-18, 2022. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app121910095>
IF: 2.7
7. **Szántó, A.**, Csernusné Ádámkó, É., Juhász, G., Szíki, G. Á.: Simultaneous measurement of the moment of inertia and braking torque of electric motors applying additional inertia.
Measurement. 204, 1-11, 2022. ISSN: 0263-2241.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>
IF: 5.6
8. **Szántó, A.**, Kiss, J., Mankovits, T., Szíki, G. Á.: Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor.
Appl. Sci.-Basel. 11 (10), 1-18, 2021. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app11104542>
IF: 2.838

List of other publications

Hungarian books (4)

9. **Szántó, A.**: Mérnöki fizika feladatgyűjtemény. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 85 p., 2021.
ISBN: 9789633189504
10. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**: Mechanika menedzsereknek. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 180 p., 2019. ISBN: 9789633188132
11. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**: Mérnöki fizika. Debreceni Egyetem Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 108 p., 2019. ISBN: 9789633188361
12. Szíki, G. Á., szerk. **Szántó, A.**: Műszaki mechanika: statika. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 161 p., 2018. ISBN: 9789633187807

Foreign language Hungarian books (1)

13. Szíki, G. Á., szerk. **Szántó, A.**: Technical Mechanics I.: Statics. DUPress, Debrecen, 160 p., 2019. ISBN: 9789633187463

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (4)

14. **Szántó, A.**, Garai, H. A., Csernusné Ádámkó, É., Szíki, G. Á.: Elektromos motorok vizsgálatára fejlesztett mérőrendszer hitelesítése, kalibrálásra.
Műsz. Tud. Közl. 19, 51-54, 2023. ISSN: 2393-1280.





15. **Szántó, A.**, Mankovits, T., Szíki, G. Á.: A modern járművekben alkalmazott hajtásrendszerek áttekintése.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 5 (1), 728-732, 2020. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.1.61>
16. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Sarvajcz, K.: Dinamikus tesztek soros gerjesztésű DC motoron: a motorral hajtott jármű fékezésének szimulációja = Dynamic tests on a series wound DC motor : simulation of the braking of the vehicle driven by the motor.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 4 (3), 15-20, 2019. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2019.3.3>.
17. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S.: Elektromos hajtású tanszéki versenyautó járműdinamikai modellezése = Vehicle dynamics modelling of an electric driven race car.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 1 (2), 106-114, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.14>.

Hungarian scientific articles in international journals (2)

18. Elek, P., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Változtatható frekvenciájú és erősségű szinuszos váltóáram előállításra villamosmotorok elektromágneses jellemzőinek méréséhez.
Műsz. Tud. Közl. 17, 16-19, 2022. EISSN: 2393-1280.
DOI: <https://doi.org/10.33895/mtk-2022.17.04>
19. **Szántó, A.**, Décei, R., Kujbus, M., Fejes, L., Papcsák, N., Szíki, G. Á.: Elektromos motorok elektromágneses és dinamikai jellemzőinek mérésére alkalmas mérőrendszer tervezése.
Műsz. Tud. Közl. 15, 99-102, 2021. ISSN: 2393-1280.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33895/mtk-2021.15.19>

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (5)

20. **Szántó, A.**, Szántó, A., Szíki, G. Á., Csernusné Ádámkó, É., Juhász, G.: Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor.
Gép. 71 (3-4), 45-49, 2020. ISSN: 0016-8572.
21. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Review of Modern Vehicle Powertrains and Their Modelling and Simulation in MATLAB/Simulink.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 5 (2), 232-250, 2020. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2020.2.29>.
22. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., **Szántó, A.**, Mankovits, T.: Series Wound DC Motor Simulation Applying MATLAB SIMULINK and LabVIEW Control Design and Simulation Module.
Per. Polytech. Transport. Eng. 48 (1), 65-69, 2020. ISSN: 0303-7800.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3311/PPtr.12908>

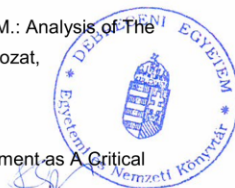




23. Füleki, Z., Erdei, T. I., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Husi, G.: Development of an IoT based Smart meteorological station & horticultural irrigation system's controller using a Raspberry Pi Linux server.
Recent Innov. Mechatron. 6 (1), 1-6, 2019. EISSN: 2064-9622.
24. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Sarvajcz, K.: Measuring the Dynamic Characteristics of Electric Motors.
Int. J. Eng. Manag. Sci. 4 (1), 359-364, 2019. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.44>.

Foreign language scientific articles in international journals (8)

25. Elek, P., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Generation of Sinusoidal Alternating Current of Variable Frequency and Intensity for Measuring the Electromagnetic Characteristics of Electric Motors.
Műsz. Tud. Közl. 17 (1), 16-19, 2022. EISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2022.17.04>
26. Csernusné Ádámkó, É., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Software developments for an electric motor test bench developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen.
IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1237, 1-9, 2022. ISSN: 1757-8981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1237/1/012012>
27. **Szántó, A.**, Veszelszki, K. J., Szántó, A., Juhász, G., Szíki, G. Á.: Design of a measuring system for the testing of pneumatic powertrains.
J. Phys. Conf. Ser. 1935 (1), 1-8, 2021. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012013>
28. **Szántó, A.**, Décei, R., Kujbus, M., Fejes, L., Papcsák, N., Szíki, G. Á.: Design of a Measuring System Suitable for Measuring the Electromagnetic and Dynamic Characteristics of Electric Motors.
Műsz. Tud. Közl. 15 (1), 99-102, 2021. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2021.15.19>
29. **Szántó, A.**, Szántó, A., Szíki, G. Á.: Review of the Modelling Methods of Series Wound DC Motors. Utánközlés nyelvi változat,
Műsz. Tud. Közl. 13 (1), 166-169, 2020. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2020.13.31>
30. Gábor, A., Sipos, K. B., Lovadi, G. D., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Borzan, M.: Analysis of The Losses of Pneumatic Driven Concept Vehicles. Utánközlés nyelvi változat,
Műszaki Tud. Közl. 9 (1), 91-94, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.18>
31. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S., Gábor, A., Sipos, K. B.: Pension Payment as A Critical Infrastructure. Utánközlés nyelvi változat,
Műsz. Tud. Közl. 9 (1), 219-222, 2018. ISSN: 2601-5773.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33894/mtk-2018.09.50>





32. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., Kiss, J., Gál, T., **Szántó, A.**, Gábora, A., Husi, G.: Experimental investigation of a series wound DC motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems.

Measurement. 109, 111-118, 2017. ISSN: 0263-2241.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.055>

IF: 2.218

Hungarian conference proceedings (12)

33. Csernusné Ádámkó, É., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Szoftveres fejlesztések villamos motorok tesztelésére kifejlesztett mérőrendszerhez.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Kocsis Imre, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, 4-17, 2022. ISBN: 9789634904540
34. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á.: Mérőrendszer fejlesztése villanymotorok elektromágneses és dinamikai jellemzőinek méréséhez és teszteléséhez.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education : 1th April 2021 / edited by Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 61-71, 2021. ISBN: 9789634903130
35. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., Szántó, A.: Dinamikus tesztmérések és szimuláció soros gerjesztésű egyenáramú motoron.
In: Tavaszí Szél 2019 = Spring Wind 2019 : Tanulmánykötet : III. kötet. Szerk.: Bihari Erika, Molnár Dániel, Szikszai-Németh Ketrin, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Budapest, 146-154, 2020. ISBN: 9786155586521
36. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S., Gábora, A., Sipos, K. B.: Járműdinamikai szimuláció és optimalizáció.
In: A XXIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 219-222, 2018. ISBN: 9789634490777
37. Gábora, A., Sipos, K. B., Lovadi, G. D., **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Borzan, M.: Pneumatikus meghajtású tanulmányautó veszteségeinek elemzése.
In: A XXIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 91-94, 2018. ISBN: 9789634490777
38. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Sarvajcz, K.: Villanymotorok dinamikai jellemzőinek mérése.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 78-83, 2018. ISBN: 9789634900559





39. Gábora, A., Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Varga, T. A., Magyari, A., Balázs, D.: Prototípus elektromos tanulmányautó fejlesztése a Shell Eco-Marathon versenyre = prototype battery electric car development for Shell Eco-Marathon competition.
In: A XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai = Proceedings of the XXII-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 167-170, 2017. ISBN: 9789634490180
40. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S., Gábora, A.: Soros gerjesztésű egyenáramú motor szimulációja MATLAB környezetben = Simulation of a Series Wound DC Motor in MATLAB Environment.
In: A XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszak előadásai = Proceedings of the XXII-th International Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum Egyesület (EME), Kolozsvár, 367-370, 2017. ISBN: 9789634490180
41. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., **Szántó, A.**: Soros gerjesztésű egyenáramú motor szimulációja NI LabVIEW Control Design and Simulation Modul alkalmazásával.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 83-87, 2017. ISBN: 9789634739814
42. Szíki, G. Á., Kiss, J., **Szántó, A.**, Gál, T.: Soros gerjesztésű egyenáramú motor elektromágneses és dinamikai jellemzőinek mérése.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education. Ed.: Imre Kocsis, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 53-57, 2016. ISBN: 9789634739456
43. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S.: Soros gerjesztésű egyenáramú motorral hajtott versenyautó dinamikai modellezése.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 587-591, 2016. ISBN: 9789637064333
44. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Hajdu, S.: Elektromos hajtású versenyautó járműdinamikai modellezése.
In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education 29th October 2015. Ed.: by Kocsis Imre, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 42-52, 2015. ISBN: 9789634739166

Foreign language conference proceedings (3)

45. Szíki, G. Á., Sarvajcz, K., **Szántó, A.**: Dynamic Simulation of a Series Wound DC Motor Applying the Control Design and Simulation Module of Labview.
In: Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2017). Eds.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 540-543, 2017. ISBN: 9789634733041





46. Szíki, G. Á., Kiss, J., **Szántó, A.**, Gál, T.: Measurement of the electromagnetic and dynamic characteristics of a series wound DC motor.
In: Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 541-544, 2016. ISBN: 9789634739449
47. Szíki, G. Á., Hajdu, S., **Szántó, A.**: Vehicle dynamics modelling of an electric driven race car.
In: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2015). Ed.: Sándor Bodzás, Tamás Mankovits, University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, 208-217, 2015. ISBN: 9789634739173

Hungarian abstracts (4)

48. Szíki, G. Á., **Szántó, A.**, Juhász, G., Csernuszé Ádámkó, É.: Villamos motorok tehetetlenségi és ellenállási nyomatékának szimultán meghatározása kifutási kísérletekből.
In: Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Dezső Gergely, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Nyíregyháza, 30, 2022. ISBN: 9786156032508
49. **Szántó, A.**, Juhász, G., Csernuszé Ádámkó, É., Kiss, J., Szíki, G. Á.: Villamos motorok vizsgálatára kifejlesztett mérőrendszer a DE Műszaki Karán.
In: Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Dezső Gergely, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Nyíregyháza, 29, 2022. ISBN: 9786156032508
50. **Szántó, A.**, Hajdu, S., Szíki, G. Á.: Korszerű járműhajtásokban alkalmazott villanymotorok kísérleti és elméleti vizsgálata.
In: Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 : konferencia előadások kivonatai. Szerk.: Kocsis Imre, Szodrai Ferenc, MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, Debrecen, 33, 2021. ISBN: 9789634903208
51. **Szántó, A.**, Szíki, G. Á., Sarvajcz, K.: Dinamikus tesztmérések és szimuláció soros gerjesztésű egyenáramú motoron.
In: Tavaszai Sél Konferencia 2019 : Nemzetközi Multidiszciplináris Konferencia : Absztraktkötet. Szerk.: Németh Katalin, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Debrecen, 471, 2019. ISBN: 9786155586422





Foreign language abstracts (1)

52. Sziki, G. Á., **Szántó, A.**, Sarvajcz, K.: Determination of the dynamic parameters of electric motors.

In: Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018) : Book of extended abstracts. Ed.: Tamás Mankovits, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, Debrecen, 179-180, 2018. ISBN: 9789634900511

Total IF of journals (all publications): 19,562

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 17,344

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

02 April, 2024

