

Miskolci Egyetem



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

SZEMÉLYGÉPJÁRMŰ INDÍTÓMOTOROK FEJLESZTÉSE

Ph.D. értekezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

Nagy Lajos

okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET
MECHATRONIKAI RENDSZEREK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

Dr. Tisza Miklós

egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ

Dr. Jakab Endre

c. egyetemi tanár

TÁRS TÉMAVEZETŐ

Dr. Szabó Tamás

egyetemi docens

Miskolc, 2014.

*A kutató munka a **TÁMOP-4.2.1B-10/2/KONV-2010-0001** jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.*

Nagy Lajos

SZEMÉLYGÉPJÁRMŰ INDÍTÓMOTOROK FEJLESZTÉSE

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Miskolc, 2014.

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

Elnök:

Dr. Patkó Gyula **CSc, egyetemi tanár, ME Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet**

Titkár:

Dr. Kamondi László **PhD, c. egyetemi tanár, ME Gép- és Terméktervezési Intézet**

Tagok:

Dr. Bercsey Tibor **CSc, egyetemi tanár, GAME, Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék**

Dr. Csáki Tibor **CSc, ny. egyetemi docens, ME Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet**

Dr. Husi Géza **PhD, főiskolai docens, DE Műszaki Kar Villamosmérnöki és Mechatronikai Tanszék**

HIVATALOS BÍRÁLÓK

Dr. Horváth Péter **PhD, egyetemi docens, SZE Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék**

Dr. Szilágyi Attila **PhD, egyetemi docens, ME Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet**

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a nemzetközi piaci verseny, a gyorsuló műszaki technológiai fejlődés és a növekvő vásárlói követelmények hatására a vállalatok számára döntő tényezővé vált az új versenyképes termékek fejlesztése. A piacok elnyerésére rendkívüli szellemi és anyagi erőforrásokat koncentrálnak, új módszereket és technikákat alkalmaznak a termékfejlesztésekben, amelyeknek ciklusideje nagymértékben csökkent.

A globális gazdasági verseny fenntarthatósága érdekében az Európai Unió lisszaboni tanácskozásán (2000. március) azt a célt fogalmazták meg, hogy az Európai Uniót „a világ legdinamikusabb és legversenyképesebb tudásalapú gazdaságává” tegyék (Európa 2020). Ennek érdekében célozták meg többek között a belső piac kiteljesítését, valamint a kutatás-fejlesztésbe és az oktatásba való befektetések jelentős növelését, ugyanis az innovatív vállalkozások és az egyetemek közötti együttműködés intenzitása meghatározza egy-egy ország és régió versenyképességének alakulását [1], és jól szolgálja a vállalatok érdekeit is.

A leírtaknak kiváló példáját szolgáltatta a BOSCH cégcsoport, amikor a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán 2005-ben megalapította a Robert Bosch Mechatronikai Tanszékét, amely a II. világháború óta az első, vállalatok által finanszírozott tanszék volt Magyarországon. A példa azóta számos követőre talált. Az új tanszék egyik alapvető feladata volt a Mechatronikai mérnökképzés létrehozása. Ez a „Mechatronikai mérnöki alapszak (BSc)” és a „Mechatronikai mérnök mesterszak (MSc)” sikeres akkreditációjában és elindításában valósult meg. Másik fontos feladat volt a régióbeli BOSCH gyárak részére kutatási-fejlesztési feladatok (K+F) végzése.

A mechatronikai területen való kutatás-fejlesztés sajátosságainak és követelményeinek egy része már irányelvekben is rögzítésre került. Ezek közül néhány a teljesség igénye nélkül: a különböző tervezési módszerek (VDI 2206, DPD) és fejlesztési eszközök (QFD, FMEA, stb.), a virtuális tervezés, modellezési, szimulációs eszközök alkalmazása; a párhuzamos tervezés (Concurrent Engineering); az információs és elektronikai technológia eszközeinek széleskörű használata; az innováció folyamatának gyorsítása, az intelligencia növelése, rendszerszemléletű gondolkodás.

A miskolci Robert Bosch Energy and Body Systems Kft. által megfogalmazott feladatok a személygépjármű indítómotorok fejlesztéséhez kapcsolódtak, ami a dolgozat megírását is indukálta. A cél egy új, a technika mai állásának megfelelő személygépjármű indítómotor fejlesztése és kivitelezése volt.

A kitűzött feladatot értelmezve definiálhatók az „új” és a „technika állása” fogalmak. A magyar szabadalmi hivatal e fogalmakat a következőképpen határozza meg. „Új”: a szakember számára nem nyilvánvaló, *iparilag alkalmazható* gondolat, amely egy adott műszaki probléma gyakorlati megoldását jelenti. „A technika állása” fogalomhoz tartoznak mindazok a megoldások, amelyek a szabadalmi bejelentés napját megelőzően bárki számára hozzáférhetők. Új feladatoknál olyan innovatív megoldás kidolgozása a cél, amelynek tudományos módszertani kutatások képezik az alapját.

1.1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A belsőégésű motorok a XIX. század végén jelentek meg, amelyeket járművek hajtására alkalmaztak. Ezek a járművek még petróleummal működtek és külső, mechanikus energiaforrással indultak (kézi indítókar használatával, betolással, lejtőn való felgyorsulással). A kézi indítás majd egy évszázadig, de egyre csökkenő mértékben az 1980-as évekig megtalálható volt a járműveknél. A villamos energiaellátó berendezések használatával egyre inkább előtérbe kerültek az elektromos indítóegységek, amelyeket indítómotornak neveznek.

Napjaink személygépjárműveinek belsőégésű motorjait indítómotorok segítségével hozzák működésbe. Az újabb Start-Stop (pl. Smart Idle Stop System, i-stop) és az úgynevezett mild (pl. power assist, ISAD) hibrid rendszerű gépjárművekben is megtalálhatók ezek az indítómotorok.

Az indítómotor feladata az, hogy a belsőégésű motor főtengelyét álló állapotából a gyújtási fordulatszámra gyorsítsa fel. Indításkor a belsőégésű motor és kapcsolt részeinek (pl. forgattyúkarok, dugattyúk) tehetetlenségét, a súrlódási és sűrítési ellenállását kell leküzdeni, amely nagy indítónyomatékot igényel a főtengelyen illetve az indítómotornál.

Az irodalom-, és szabadalomkutatók alapján az indítómotorok hajtó fogaskerekének mozgatását, valamennyi konstrukciónál egyenáramú elektromágnessel működtetett kapcsolómechanizmus biztosítja. Az elektromágnes feladata a szükséges erő kifejtése a hajtó-fogaskerek előre, kapcsoló pozícióba való mozgatásánál. Az elektromágnes két koncentrikusan egymásba helyezett tekercsből és egy mozgatható vasmagból épül fel. Az elektromágnes vasmagja a gerjesztés hatására elmozdul és behúzott (zárt) állapotban marad, amellyel közvetlenül vagy közvetve a hajtó-fogaskereket működteti, a vasmag az áramkör bontásával rugóerő hatására alaphelyzetbe visszaáll. Ezek az elektromágnesek párhuzamos (mellékáramú) kapcsolásúak, ezért közvetlenül a személygépjármű energiaforrására (akkumulátorára) kapcsolhatók.

A kapcsolómechanizmus kinematikai és dinamika viszonyainak megismeréséhez, elengedhetetlen annak modellezése és szimulációja. Az elektromechanikus rendszerek mechanikai és villamos elemeinek kölcsönhatása meghatározza a rendszer üzemi viszonyait. A jelenségeket egy csatolt differenciál-egyenletrendszer írja le, amely mechanikai és villamos egyenletekből áll.

Az egyik legfontosabb villamos paraméter elektromágneses aktuátorok, ill. villamos gépek működésének leírására az induktivitás. Az induktivitás mérésére és elméleti számítására többféle módszer ismert. Tisztán elektromos mérési eljárásokat mutatnak be [41], [42], [47] művek. Ezeket a méréseket impedancia méréseknek is nevezik, és általában légmagos tekercsek induktivitásának meghatározását szolgálják. Vasmag nélküli (légmagos) tekercs induktivitása elegendő pontossággal mérésel, vagy számítással egyaránt meghatározható. A tekercs geometriájából, a menetszámból és a levegő permeabilitásából az L önindukciós együttható számítható. A [47] irodalom három fő csoportra bontja az induktivitás méréseket: „három áram-feszültség” módszer, váltakozó áramú hídmérő eljárások (Maxwell-Wien híd, Hay híd, Carey-Foster híd, AC híd Wagner ággal, stb.), rezonancia módszer. Valamennyi módszer váltakozó áramú (AC) gerjesztésen alapul. A gyakorlatban többnyire a váltakozó áramú hídmérő eljárásokat alkalmazzák. Viszonylag kevés módszer létezik egyenáramú (DC) gerjesztésen alapuló induktivitás meghatározására. Egy 3 fázisú, állandó mágnes (PM) gerjesztésű motor induktivitásának mérésére fázisonként DC gerjesztést alkalmaznak diszkrét pozíciókban a [22], [34] publikációkban. Indukciós motor induktivitásának mérése DC gerjesztésű a [44] irodalomban. Valamennyi mérést kis áramerősségeknél végezték.

Különösen nehéz egy tekercs induktivitásának meghatározása mozgatható vasmag esetén. A vasmag általában nemlineáris mágneses tulajdonságú, azaz a mágneses térre és a mágneses indukcióra vonatkozó anyagegyenlet nemlineáris, továbbá telítődés és hiszterézis is felléphet.

Az ilyen típusú tekercseknél a hiszterézis és telítődés elhanyagolásával, az induktivitás az áramerősség és a vasmag pozíciójának függvénye. A [6], [16], [17], [20], [22], [23], [26], [27], [34], [46] publikációkban lineáris és forgó mozgású aktuátorok induktivitását numerikusan, többek között végeselem (FE) módszerrel határozzák meg. A villamos egyenleteket a Kirchoff-, ill. Faraday törvényekből származtatják.

A [10], [15], [16], [22], [23], [27] művekben elektromágneses aktuátorok modellezésére energiabázisú leírást alkalmaznak, amelyet a kiegészítő mágneses energiával fogalmazzak meg. A energia-bázisú leírás egyik előnye, hogy ekkor a mechanikai és villamos paraméterek,

mint például erő, nyomaték, illetve induktivitás, indukált feszültség egyaránt meghatározhatók. A másik előnye, hogy alkalmas FE modellezésre (pl. ANSYS, FLUX, MAXWELL, stb). Az FE analízis alapjául a növekményes energia módszert (IEM), alkalmazzák az ún. energia/áram (E/C) perturbációval például a [10], [16], [22], [23], [34], [43] publikációkban. Kis áramerősségeknél a nemlineáris feladatok az IEM módszerrel visszavezethetők lineárisra [22], [34]. A [24], [27] művekben a kiegészítő mágneses energia felírásánál a nemlineáris mágneses anyagegyenletet veszik figyelembe. Nemlineáris induktivitásnál a [10], [16], [22], [23], [26], [34], [37], [39], [43] publikációkban értelmezik az L_s szekáns (statikus, látszólagos) és az L_d differenciális (dinamikus, inkrementális) induktivitás fogalmát.

A jelenlegi indítómotorok kapcsolómechanizmusának kinematikai láncja egy haladó-haladó (H-H) mozgás-átalakítónak tekinthető. A módszertani vizsgálatok alapján belátható, hogy a kapcsolási feladat megoldható forgó-haladó (F-H) mozgás-átalakítóval. Az F-H mozgásátalakítók előnye, hogy forgó mozgással magas mozgásparáméterek biztosíthatók. Az F-H mozgásátalakítást megvalósíthatja pl. egy vezérpályás (bütykös) mechanizmus is.

A bütykös mechanizmusok elméleti és gyakorlati vizsgálatainak eredményei számos szakirodalomban (könyv, publikáció, értekezés) fellelhetők. Ezek elsősorban a mozgástörvények megválasztásával, kinematikai és dinamikai tulajdonságaival foglalkoznak. Az elmúlt évtizedekben a mechanizmusok átviteli függvényének optimalizálására fektették a hangsúlyt [57],[58]. Az értekezésben a mechanizmusok kinematikai és dinamikai vizsgálatára a [12], [36], [40], [53], [54], [55] művek szolgálnak alapul. Ezek a művek rendszerezik és részletesen tárgyalják a bütykös mechanizmusok mozgásfüggvényeit, szerkezeti kialakításukat, geometriai, kinematikai és dinamikai viszonyait. Az értekezésben vizsgált mechanizmus mozgásfüggvényére polinom függvényt célszerű alkalmazni, továbbá a trigonometrikus függvények is vizsgálatra kerülnek.

1.2. CÉLKITŰZÉSEK

Értekezésem célja az, hogy a kor követelményeinek megfelelő, a már jól bevált alapelveket is figyelembe vevő, indítómotor kerüljön kifejlesztésre tervezésmódszertani eszközök felhasználásával. Ennek első fontos lépése az átfogó irodalom- és szabadalomkutató, a fejlődési, fejlesztési trendek megállapítására. Az egyes gépjármű villamossági szakirodalmak [11], [49] részletesen bemutatják és elemzik az úgynevezett csúszó fogaskerekes, csúszó armatúras indítómotorok szerkezeteit és működésüket. A csúszó fogaskerekes kétfokozatú és a csúszó armatúras változatokat nehézgépjárművekben alkalmazzák, ezért ezeket a típusokat az értekezésben nem tárgyaltam.

A magyar, amerikai, német és az európai szabadalmi hivatalokban több száz szabadalmi oltalom található ebben a csúszó fogaskerekes indítómotorok témakörben. Tudományos alapokon nyugvó új indítómotor konstrukció fejlesztéséről publikációval, esettanulmánnyal a kutatás során nem találkoztam. Számos hazai [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [21], [45] és nemzetközi publikáció [14], [18], [29], [38] tanulmány [56] jelent meg indítómotorok, illetve azok valamely komponensének mérésével, modellezésével és szimulációjával kapcsolatban.

A szabadalomkutató során feltárt szerkezeteket megoldás katalógusba foglaltam és meghatároztam az összfeladatot teljesítő részfeladatokat. A módszeres géptervezés szabályai szerint az egyes részfeladatokra meghatároztam az elvi megoldásmezőt. A kapott megoldásmezőt különböző döntés előkészítési és kiválasztási módszerekkel az elvileg lehetséges megoldásokra korlátoztam. Az így kapott megoldások funkcióstruktúrájára megoldásváltozatokat dolgoztam ki. A változatokból egy kiválasztott megoldást részletesen elemeztem és elvégeztem a szerkezet értékvizsgálatát. Modellvizsgálattal, prototípus

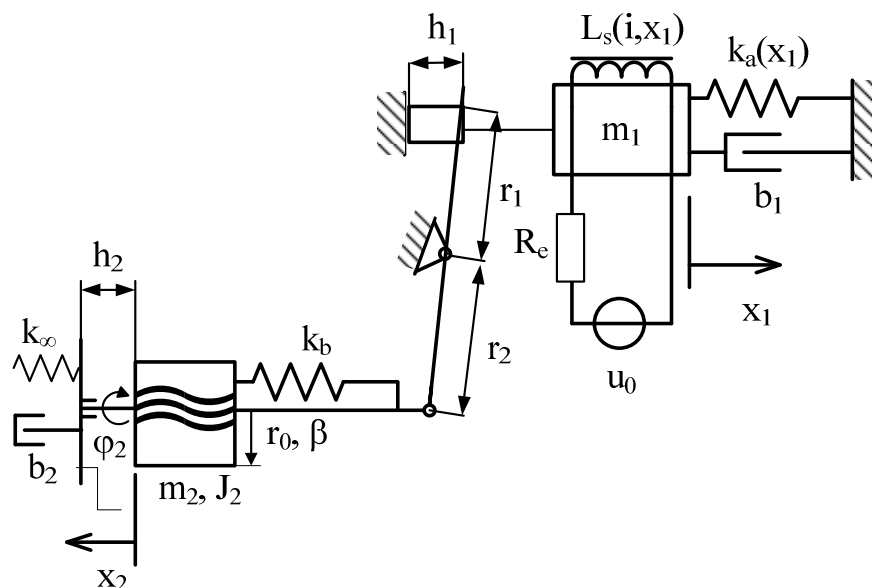
kidolgozásával, megépítésével és kísérleti vizsgálatokkal támasztottam alá az új megoldás célszerűségét és alkalmazhatóságát. További vizsgálatokkal a megoldás kinematikai, geometriai optimalizálását is elvégeztem. A megépített kísérleti berendezés újszerűségét igazolva, szabadalmi oltalom benyújtását kérvényeztem, melyet a német szabadalmi hivatal DE 10 2010 064 352 A1 lajstromszámmal iparilag alkalmazható megoldásként elfogadta és szabadalmi oltalomként közzétette.

2. A FELADAT MEGOLDÁSÁNAK MÓDSZERE

Értekezésemben a célkitűzésben megfogalmazott feladatot a klasszikus tervezésemélet eljárásával és annak alkalmazott módszereivel oldottam meg [19], [25],[30],[31],[32],[33],[51],[52] figyelembe véve az új tervezéseméleteket [28],[35],[48],[50] is.

Klasszikus tervezésmódszertani eszközökkel, elvi hatás szinten feltártam az elméletileg lehetséges megoldásokat. Megállapítottam, hogy a kapott megoldásmező három nagy csoportra bontható úgy, mint villamos, hidraulikus, pneumatikus energiaforrásról vezérelt indító berendezések. Különböző döntés előkészítési módszerekkel kiválasztottam az életképes megoldásokat. A fejlesztési irány meghatározása – a döntés – minden esetben a megbízó gyár mérnökeivel közösen történt. Az elvi megoldások részfunkcióihoz mindig tervezői katalógusok készültek, amelyek alapján megállapítható volt, hogy a tervezés és fejlesztés nem mindig jelenti új szerkezet létrehozását, sokkal logikusabb a korábbi hasonló termékek közül a legmegfelelőbbet kiválasztani, annak gyenge pontjait a követelményeknek és műszaki lehetőségeknek megfelelően átdolgozni, korszerűsíteni.

A következőkben vizsgáltam egy már jól bevált és alkalmazott kapcsolómechanizmus kinematikai és dinamikai viszonyait, amely az új kapcsolómechanizmus kialakításához szolgált alapul. Az értekezésemben valamennyi matematikai modell felírására a másodfajú Lagrange egyenletet vettem alapul [39]. A Lagrange függvényben a kiegészítő kinetikus és kiegészítő mágneses energia szerepel. A kiegészítő mágneses energia mind a mechanikai - a vasmag pozíciójának parciális deriváltja-, mind pedig a villamos – az áramerősség szerinti parciális deriváltja - egyenletben megjelenik.



1. ábra: Egy már jól bevált kapcsolómechanizmus elektromechanikai modellje

Az 1. ábra alapján az alábbi differenciál-egyenletrendszert írtam fel:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + k_a(x_1)x_1 - \frac{\partial W_m^*}{\partial x_1} &= -F_1, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_m^*}{\partial \dot{i}} \right) + R_e i &= u_0, \end{aligned} \right\}, \text{ ha } 0 < x_1 < h_1,$$

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \left(\dot{x}_2 - \frac{r_2}{r_1} \dot{x}_1 \right) \frac{r_2}{r_1} + k_a(x_1)x_1 + k_b \left(x_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - x_2 \frac{r_2}{r_1} \right) - \frac{\partial W_m^*}{\partial x_1} &= -F_1, \\ \left(m_2 + \frac{J_2}{(r_0 \operatorname{tg}(90^\circ - \beta))^2} \right) \ddot{x}_2 + b_2 \left(\dot{x}_2 - \frac{r_2}{r_1} \dot{x}_1 \right) + k_b \left(x_2 - x_1 \frac{r_2}{r_1} \right) &= 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_m^*}{\partial \dot{i}} \right) + R_e i &= u_0, \end{aligned} \right\}, \text{ ha } \quad (1a)$$

$h_1 \leq x_1 < l_3$ és $x_2 < h_2$, ahol

$$F_1 = \begin{cases} F_1, & \text{ha } h_1 \leq x_1 < l_1, \\ F_1 + F_3, & \text{ha } l_1 \leq x_1 < l_2, \\ F_1 + F_3 + F_2, & \text{ha } l_2 \leq x_1 < l_3. \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \left(\dot{x}_2 - \frac{r_2}{r_1} \dot{x}_1 \right) \frac{r_2}{r_1} + k_a(x_1)x_1 + k_b \left(x_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - x_2 \frac{r_2}{r_1} \right) - \frac{\partial W_m^*}{\partial x_1} &= -F_1, \\ \left(m_2 + \frac{J_2}{(r_0 \operatorname{tg}(90^\circ - \beta))^2} \right) \ddot{x}_2 + b_2 \left(\dot{x}_2 - \frac{r_2}{r_1} \dot{x}_1 \right) + k_b \left(x_2 - x_1 \frac{r_2}{r_1} \right) + k_\infty (x_2 - h_2) &= 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_m^*}{\partial \dot{i}} \right) + R_e i &= u_0, \end{aligned} \right\}, \text{ ha}$$

$h_1 \leq x_1 < l_3$ és $x_2 \geq h_2$,

(1b)

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \left(\dot{x}_2 - \frac{r_2}{r_1} \dot{x}_1 \right) \frac{r_2}{r_1} + k_a(x_1)x_1 + k_b \left(x_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - x_2 \frac{r_2}{r_1} \right) + k_\infty (x_1 - l_3) - \frac{\partial W_m^*}{\partial x_1} &= -F_1, \\ \left(m_2 + \frac{J_2}{(r_0 \operatorname{tg}(90^\circ - \beta))^2} \right) \ddot{x}_2 + b_2 \left(\dot{x}_2 - \frac{r_2}{r_1} \dot{x}_1 \right) + k_b \left(x_2 - x_1 \frac{r_2}{r_1} \right) + k_\infty (x_2 - h_2) &= 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_m^*}{\partial \dot{i}} \right) + R_e i &= u_0, \end{aligned} \right\}, \text{ ha}$$

$x_1 \geq l_3$ és $x_2 \geq h_2$.

Az (1) egyenletrendszerben a kiegészítő mágneses energiára vonatkozó összefüggések a következő alakban fejezhetők ki:

$$\frac{\partial W_m^*}{\partial x_1} = \int_0^i \frac{\partial L_s(i, x_1)}{\partial x_1} i di = \frac{1}{2} \frac{\partial L_s(i, x_1)}{\partial x_1} i^2 \Big|_0^i - \int_0^i \frac{\partial L_s(i, x_1)}{\partial x_1} \frac{i^2}{2} di,$$

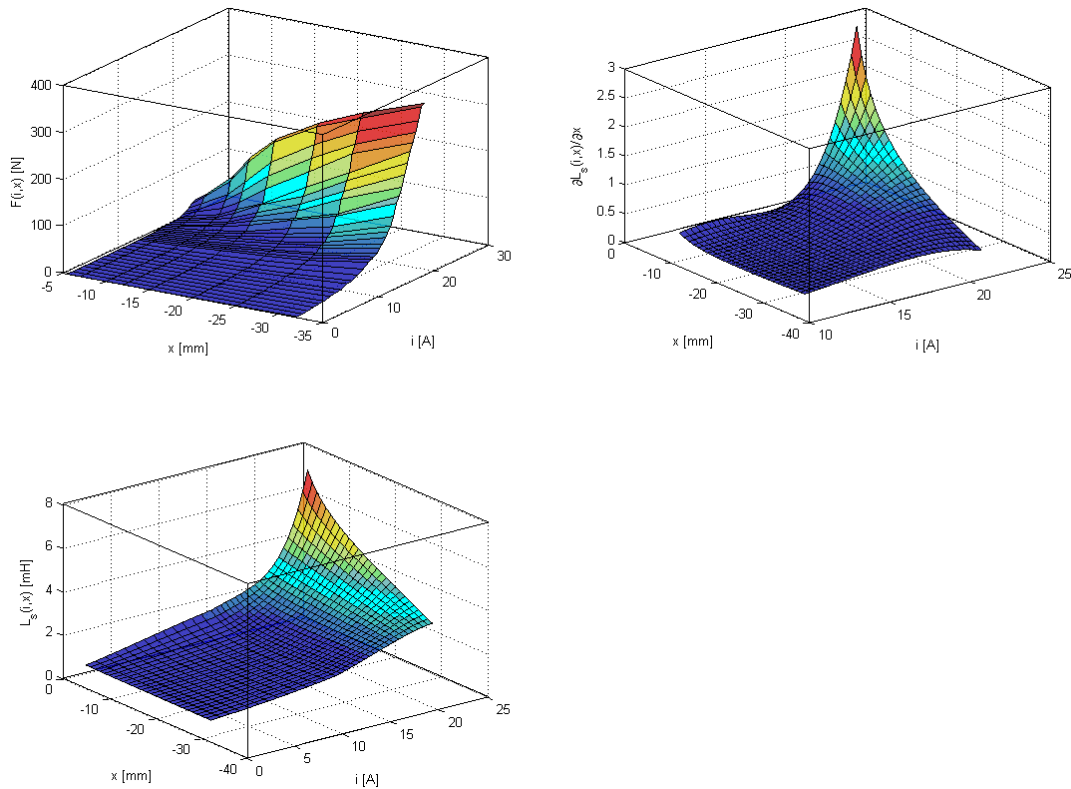
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_m^*}{\partial i} \right) = L_s(i, x_1) \frac{di}{dt} + \frac{\partial L_s(i, x_1)}{\partial i} i \frac{di}{dt} + \frac{\partial L_s(i, x_1)}{\partial x_1} i \frac{dx_1}{dt}, \quad \text{ahol} \quad (2)$$

$$L_s(i, x_1) = \begin{cases} L_{s12}(i, x_1), & \text{ha } 0 < x_1 < l_3, \\ L_{s2}(i, x_1), & \text{ha } x_1 \geq l_3. \end{cases}$$

A (2) kifejezéseket visszahelyettesítve az (1a)-(1b)-be előáll a modell végső differenciál-egyenletrendszere. Az egyenletrendszer könnyebb kezelhetőségének érdekében a (2)-ben szereplő vegyes parciális derivált és az áram (i) szerinti parciális deriváltat elhanyagoltam. Az induktivitás meghatározásához az elektromágneses erő mérése szolgált alapul, amelynek elméleti alapja az energia bázisú leírás mód [10],[16],[39]. A kísérlet közvetett módon határozza meg az induktivitást, a vasmag pozíciójának és az áramerősség függvényében. Az $L_{s12}(i, x_1)$ indukciófüggvény deriváltja az (3) összefüggéssel határozható meg:

$$\frac{\partial L_{s12}(i, x)}{\partial x} = \frac{\partial F(i, x)}{\partial i} \frac{1}{i}. \quad (3)$$

A mért áramerősség és elektromágneses erő ismeretében a (3) egyenlet bal oldala előállítható. A 2. ábra mutatja a mért és számított eredményeket.



2. ábra: Az elektromágneses induktivitására vonatkozó mért és számított eredményei

A kapcsolómechanizmus elektrodinamikai viselkedését leíró nemlineáris differenciálegyenlet-rendszert programozható alakra hozva, Matlab környezetben, meghatároztam az egyes pl. az áramfelvétel, elmozdulás, sebesség jellemzőket az idő függvényében. A modellek jó közelítéssel alkalmasak valamennyi elektromágneses működtetésű indítómotor kapcsolómechanizmusának modellezésére és szimulációjára a megfelelő beviteli adatok mellett.

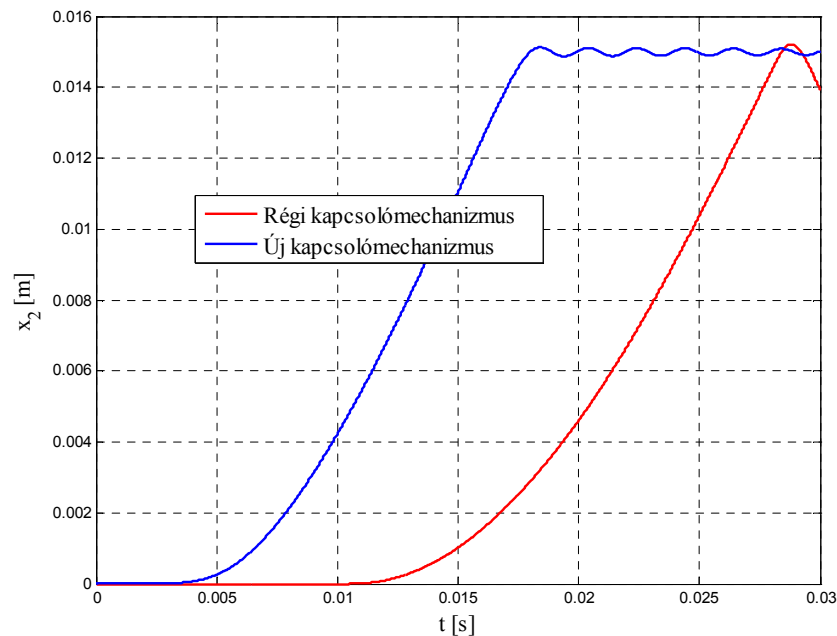
Az 5. fejezetben ismertetem az új kapcsolómechanizmus tervezésének lépéseit, szerkezeti kialakítását és vizsgálatát. A megoldás variációk kidolgozásához szerszámgépek mechatronikai részegységeinek tervezésére érvényes általános folyamattev lépéseit követtem [13],[35],[50]. Megállapítottam, hogy forgó-haladó típusú (F-H) mozgásátalakító alkalmazásával a kitűzött cél és az tervezési követelmények teljesíthetők.

A megoldás változatokból kiválasztott mechanizmus mozgásfüggvényét ötödfokú Hermite típusú polinom írja le:

$$f(\Theta) = \left[10 \left(\frac{\Theta}{\gamma} \right)^3 - 15 \left(\frac{\Theta}{\gamma} \right)^4 + 6 \left(\frac{\Theta}{\gamma} \right)^5 \right]. \quad (4)$$

A fentiek alapján kidolgoztam az új kapcsolómechanizmus kísérleti berendezésének gyártási dokumentációját. A legyártott berendezés több mint 300 000 kapcsolás után is üzembiztosan működött, a vezérpályán elváltozásnak nyomai nem voltak.

A mechanizmus elektrodinamikai modelljének megalkotásához és a szimulációs eredmények alapján megállapítottam, hogy az új kapcsolómechanizmus teljesíti a kapcsolási időre vonatkozó kitűzött célt is (3. ábra). További vizsgálatok szolgáltak a vezérpálya-görbe átviteli függvényének meghatározására, a szükséges minimális teljesítményű villamos motor kiválasztására. Megállapítottam, hogy az új kapcsolómechanizmus geometriai méretei, a kinematikai tervezés során tovább optimalizálhatók.



3. ábra: A régi és az új kapcsolómechanizmus hajtó-fogaskerekének elmozdulás-idő függvénye

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az értekezés új tudományos eredményeit az alábbi tézisek foglalják össze:

- T.1. A klasszikus tervezélmélet általános folyamattervét alkalmazva meghatároztam a személygépjárművek belsőégésű motorjainak indítására alkalmas berendezések általános funkcióstruktúráját. Megállapítottam, hogy az energiahordozók fajtája alapján négy különböző funkcióstruktúra állítható fel a mechanikus, hidraulikus, pneumatikus, villamos elven működő indító berendezések. Megalkottam az indítómotorok tervezői katalógusát. A megfelelő indítómotor változat kiválasztásához morfológiai összeférhetőségi mátrixokat hoztam létre, amelyek alapján, a célkitűzéseknek megfelelően különböző értékelési módszerek felhasználásával új elvi megoldást választottam ki megvalósításra. {6}, {9}, {11}, {12}, {19}, {21}
- T.2. Kidolgoztam a személygépjármű indítómotorokban jelenleg alkalmazott kapcsolómechanizmus elektromechanikai modelljét és annak kapcsolt nemlineáris differenciál-egyenletrendszerét. A nemlinearitás egyrészt az induktivitás áramtól való függésétől, másrészt a rugórendszer lépcsős függvényéből és a mozgó alkatrészek felütközéséből származik. Méréssel és számítással meghatároztam a kapcsolómechanizmus rugóerő karakterisztikáját, Matlab környezetben programot írtam a kapott differenciál-egyenletrendszer numerikus megoldására. {2}, {4}, {10}, {14}, {20}
- T.3. Egy elektromechanikai elvű mérési módszert dolgoztam ki a kapcsolómechanizmus vasmagos tekercsének statikus (szekáns) induktivitásának mérésére. A mérések lefolytatásához kísérleti berendezést hoztam létre a vasmagra ható behúzó erő mérésére. Méréssel közvetlenül meghatároztam az induktivitás hely szerinti deriváltját az áramerősség függvényében, amelyet azután a hely függvényében ötödfokú polinommal, az áramerősség függvényében harmadfokú polinommal közelíttem. A közelítő függvényeket integrálva előállítottam a tekercs induktivitás függvényét a működési tartományban. {2}, {4}, {5}, {8}, {13}, {15}, {17}, {18}
- T.4. Megalkottam egy új innovatív indítómotor kapcsolómechanizmust a hajtó fogaskerék axiális mozgatásához. Az új kapcsolómechanizmus egy forgó-haladó – továbbiakban F-H – mozgásátalakítót tartalmaz. Az F-H mozgásátalakító egy követőgörgős, hengeres vezérpályás mechanizmus, amelynek síkba terített profilja ötödfokú Hermite polinom. Kísérleti berendezést állítottam össze az új kapcsolómechanizmus vizsgálatára és megalkottam annak működését leíró dinamikai modelljét. Számításokkal és mérésekkel igazoltam, hogy az új kapcsolómechanizmus kapcsolási ideje a jelenlegi kapcsolási időnél kisebb. {1}, {7}, {16}

4. TOVÁBBFEJLESZTÉSI IRÁNYOK ÉS LEHETŐSÉGEK

Továbbfejlesztési lehetőségként az alábbi területeket lehet megemlíteni:

- Axiómatis tervezésmélet alapján genetikus algoritmusok alkalmazásával felül lehet vizsgálni az elméleti megoldásmezőt. Az iparban alkalmazott módszerekkel pl. QFD további kedvező megoldás keresése.
- A kidolgozott mérési módszerhez új mérőberendezés létrehozása. A mérésekhez NC pozícionáló szán felhasználása.
- A bemutatott új kapcsolómechanizmus geometriai és szilárdságtani méretezése.
- A kapcsolómechanizmust vezérlő áramkör elektronikai tervezése, illetve annak vizsgálata. Különböző vezérlési, szabályozási módok változatainak elemzése és dinamikai analízise.

5. SUMMARY

The purpose of the dissertation was to develop a new state-of-the-art starter motor. Classical design methodology were used to explore the theoretically possible solutions at principle impact level. It was found that the solution field obtained could be divided into four large groups, such as starters controlled by mechanic, hydraulic, pneumatic, and electric energy sources. Various decision preparation methods were used to select and determine the viable solutions. Determination of the development direction – the decision – was always prepared in cooperation with the engineers of the project partner. Design catalogues are prepared and used for each sub-function of the theoretical solutions. These were used to establish that design and development did not in every case mean the conception of something new, but it is much more logical to select the most suitable one of the already existing similar products, and to improve its weak points to fit the modified requirements and boundary conditions.

It follows from the analyses that the most sensitive point of the device is the mechanism ensuring the axial connection. The basis of developing variants is how the pinion-engaging mechanism (PEM) can be replaced by other solutions, since the magnetic switch is one of the most sensitive parts of the starter.

The dissertation presents a non-linear dynamic model of the solenoid switch using energy-based modelling applying the Euler-Lagrange formalism. The electro-dynamic modelling of the PEM requires inductance of the solenoid switch and its derivative depending on the position of the solenoid armature.

In chapter 4. proposes an electromechanical method for determining the inductance function of an electromagnetic actuator. The inductance depends on the position of the iron core and on the current. The time dependency and hysteresis are neglected. The method is based on the direct measurement of the inductance derivative with respect to the iron core position. One advantage of the method proposed is that it produces the inductance derivatives directly and following that, inductance can be determined by integration. The inductance is obtained by numerical integration. It is assumed that the inductance of the air core coil is given. The current dependency is significant when the whole geometry of the iron core is situated within the coils. Another advantage is that the measurements can be performed also when the current is the same as in the operating condition, with consideration of the nonlinear material property. An experiment is designed to measure the inductance of the solenoid switch. A series of measurements are performed in order to determine the equivalent inductance of the electromagnetic actuator on the basis of the electromechanical theory detailed in Section 4. The electromagnetic force is measured by a compact load cell in discrete positions of the iron core. Positioning is registered by a laser interferometer. The controller of the measurement

circuit uses an AC power supply unit for the relay and a DC power supply unit for the time delay. The operating time is 0.1 (s).

The given inductance function built in electro-dynamical model. The measurement and the simulation results show a rather good agreement.

In chapter 5. presents of a Mechatronic design process. In general, it follows VDI Guidelines 2206 and applying a model-based design tool, focusing conceptual design stage. This section describes a new pinion-engaging mechanism for starter motors which is fulfilling the requirements of the modern starting system. The aim was set that the new switch mechanism should be coaxially placed with the axle of the electric motor so that the axial increase in dimension should be as small as possible. The operation of the switch mechanism is performed by an electric motor and a rotary-linear motion transformer drive. The design and production documentation of the test bench is written. We tested the axial movement of the pinion, the heat of the motor and the time of 1cycle. The test was successfully, and the mechanism had not significant abrasion and not signs of fatigue. We built up the electromechanical model of the new PEM. The model is described by a nonlinear system of differential equations. The simulation of the PEM was performed by Matlab.

The last section some aspects of the kinematic relationships of the motion control and optimization were considered.

6. NEW SCIENTIFIC RESULTS

- Thesis 1. I have defined the general function structure of starter motors for internal combustion engine for passenger cars, applied by classical design methodology. I have defined the formulation of the task and determined the basic functions. I looked for solution variants and used to explore the theoretically possible solution at principle impact level. I found that the solution field obtained could be divided into four large groups such as starters controlled by mechanic, hydraulic, pneumatic, electric energy sources. I have created design catalogue for starter motors. I have used to various decisions preparation methods to select and determine the viable solutions. {6},{9},{11},{12},{19},{21}
- Thesis 2. I have worked out an electro-dynamical model of the pinion-engaging mechanism (PEM) for starter motors for passenger cars. The model is described by a system of nonlinear differential equation.. The electro-dynamic modelling of the PEM requires inductance of the electromagnet and its derivative depending on the position of the iron core. The nonlinearity are derived on the one hand that the inductance depends on the position of the solenoid armature and on the current, on the other hand the resultant spring rigidity which is changes step by step and the butt-on of the solenoid switch and the drive pinion. I measured and calculated the resultant spring characteristics of the PEM. I solved the given system of nonlinear differential equation in Matlab environment by Runge-Kutta method. The simulation and measured results shows a rather good agreement. {3},{4},{10},{14},{20}
- Thesis 3. I worked out an electromechanical measurement method for determining the inductance function of the PEM. The inductance depends on the position of the iron core and on the current. The method is based on the direct measurement of the inductance derivative with respect to the solenoid armature position at different currents. I designed a test bench to measure the electromagnetic force. The electromagnetic force depends on the derivative of the inductance with respect to the position of the armature. The derivative of the inductance function is provided by the measurements, and then the inductance function is obtained by numerical integration. I have approximated the partial derivative of the inductance by the cubic polynomial in terms of the current, and by the fifth-degree polynomial in terms of the position. {3},{4},{5},{8},{13},{15},{17},{18}
- Thesis 4. I designed a new mechanism for the axial movement of the drive pinion. The new PEM is a cam follower mechanism which contains a rotational to translational transducer. The rotational to translational transducer can be realized by designing a cylindrical roller follower mechanism. The selected displacement function of the cam mechanism was fifth degree Hermite polynomials. I designed a test bench for the new PEM. I tested the axial movement of the pinion, the heat of the motor and the time of 1 cycle. I built up the electromechanical model of the new PEM. I have been proved by measurement and calculation that the new PEM switching time is less than the currently applied PEM. {1},{2}{7},{16}

7. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN

Szabadalom

- {1} JAKAB, E.- NAGY, L.- LÉNÁRT, J.- FISCHER, T.: Starter für eine brennkraftmaschine, DE 102010064352 A1, 2012. 07.05. p 9.

Idegen nyelvű folyóiratban megjelent cikk (lektorált)

- {2} NAGY, L. – SZABÓ, T. – JAKAB, E.: Functional Analysis and Mechatronic Design of a Cam Controlled Mechanism, *Procedia Engineering* 2014. p 8.. ISSN 1877-7058 Elsevier (megjelenés alatt)
- {3} NAGY, L. – SZABÓ, T. – JAKAB, E.: Electromechanical modelling of a pinion engaging mechanism for starter motors, *Pollack Periodica, An International Journal for Engineering and Information Sciences*, Vol. 8, No. 1, pp. 97–108 (2013) ISSN 1788-1994, doi: 10.1556/Pollack.8.2013.1.9
- {4} NAGY, L. - SZABÓ, T.- JAKAB, E.: Electro-dynamical Modelling of a Solenoid Switch of Starter Motors, *Procedia Engineering* (48) 2012. pp. 445-452. ISSN 1877-7058 Elsevier <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.538>.

Független hivatkozások:

1. CHENG, Q., ZHANG, Z., GUO, H., XIE, N. Improved processing and performance of GDI injector based on metal injection molding technology (2014) *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 44 (1), pp. 99-114.
 2. CHENG Q., ZHANG Z., GUO H., XIE N. Application of MIM technology in GDI injector production *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, Volume 45, Issue 7, July 2014, pp 41-47.
- {5} NAGY, L. - LÉNÁRT, J. - JAKAB, E.: Determination of the inductance of starter relays, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Veszprém*, vol. 39 (2). pp. 233-235 (2011) ISSN 0133-0276
- {6} NAGY, L.- JAKAB, E.: Developement of new technical solution for starter motors for passenger cars, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Veszprém*, vol. 38(2). pp. 127-132 (2010). ISSN 0133-0276

Magyar nyelvű folyóiratban megjelent cikk (lektorált)

- {7} NAGY, L.: Követőgörgős vezérpályás mechanizmus vizsgálata, *GÉP LXIII* 2012/12. ISSN 0016-8572 pp. 81-84.
- {8} NAGY, L.: Lineáris elektromágneses aktuátor induktivitásának vizsgálata, *GÉP LXIII*. 2012/3. ISSN 0016-8572 pp.3-6.
- {9} NAGY, L. - JAKAB, E.: Indítómotorok lehetséges megoldásváltozatainak meghatározása hagyományos tervezésmódszertani eszközökkel, *GÉP LXI*. 3.szám ISSN 0016-8572 pp.35-42.

- {10} NAGY, L.-JAKAB, E, Elektromágneses kapcsolókaros mechanizmusok modellezésének kérdései, GÉP LVIII. 10-11. szám, ISSN 0016-8572 pp. 103-106.
- {11} NAGY, L.-JAKAB, E.-TAKÁCS, GY., Értékelemzési módszerek indítómotorok fejlesztésénél, GÉP 58. 10-11. szám ISSN 0016-8572 pp. 97-100.
- {12} NAGY, L.-JAKAB, E., Módszeres géptervezés alkalmazása indítómotorok fejlesztésénél, GÉP LVII. 2006/8-9. ISSN 0016-8572 pp. 128-130.

Idegen nyelvű konferencia cikk (lektorált)

- {13} NAGY, L. - SZABÓ, T.- JAKAB, E.: A novel method for measuring inductance of an electromagnetic actuator, Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), High Tatras, Podbanské Slovak Republic, May 28-31, 2012., ISBN 978-1-4577-1866-3, pp. 511-514. IEEE Catalog Number: CFP1242L-CDR, doi:[10.1109/CarpathianCC.2012.6228697](https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2012.6228697)
- {14} NAGY, L.-JAKAB, E.: Modelling and Simulation of the Pinion-Engaging Mechanism of Starter Motors, Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering, GÉPÉSZET 2008, G-2008-I-01. ISBN 978-963-420-947-8 CD-ROM, Budapest p 8.

Idegen nyelvű konferencia cikk (nem lektorált)

- {15} NAGY, L. - LÉNÁRT, J. - SZABÓ, T.: Analysis of starter relay, MMaMS 2011 Proceedings of the 4th International conference, Her'ľany, Slovakia 20-22 Sept. 2011. ISBN 978-80-553-0731-2 CD-ROM pp. 317-322.

Független hivatkozások:

1. VACKOVÁ, M. - TREBUŇA, F. - VIRGALA, I. - KELEMEN, M. - KELEMENOVÁ, T. - PRADA, E. - SUROVEC, R. - MIKOVÁ, L.: Intelligent in-pipe machine adjustable to inner pipe diameter, (2012) IEEE 10th Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, SAMI 2012 - Proceedings, art. no. 6209020, pp. 507-513.
2. SUROVEC, R. - GMITERKO, A. - KELEMEN, M. - ŠIMČÁK, F. - FODOR, M. - VIRGALA, I. - PRADA, E. - VACKOVÁ, M.: Kinematic analysis of snake-like robot using obstacle aided locomotion (2012) IEEE 10th Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, SAMI 2012 - Proceedings, art. no. 6209009, pp. 451-455.
3. PAVAN KUMAR, K. V. - LATHA, S.: Intelligently Investigating Robot, International Journal of Review in Electronics & Communication Engineering (IJRECE) (ISSN: 2321-3159) 1: (5) pp. 135-137. (2013)

Magyar nyelvű konferencia cikk (nem lektorált)

- {16} NAGY, L. – SZABÓ, T. – JAKAB, E.: Személygépjármű indítómotorok fejlesztése, OGÉT 2013. XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Arad, 2013. április 25-28. ISSN 2068-1267 pp. 293-296.
- {17} NAGY, L. - SZABÓ, T.- JAKAB, E.: Induktivitás meghatározása elektromechanikai módszerrel OGÉT 2012. XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Csíksomlyó, 2012. április 19-22. ISSN 2068-1267 pp. 314-317.
- {18} NAGY, L. - JAKAB, E.: Indítómotor relé dinamikai vizsgálata OGÉT 2011. XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Csíksomlyó, 2011. április 28-május 1. ISSN 2068-1267. pp 264-267.

- {19} NAGY, L.-JAKAB, E, Indítómotorok megoldásváltozatainak kidolgozása tervezésmódszertani eszközökkel, Doktoranduszok Fóruma, 2009. november 5. pp. 110-116.
- {20} NAGY, L.-JAKAB, E.: Személygépjármű indítómotorok modellezésének kérdései, Gépész, Mechatronikai és Biztonságtechnikai Szimpózium, ISBN 978-963-7154-85-0 CD-ROM, Budapest, 2008. november 14.
- {21} NAGY, L.-JAKAB, E.-TAKÁCS, GY.: Mechatronikai szerkezetek funkcióanalízise, microCAD 2007. Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2007. március 22-23.

Ipari kutatások

Indítómotorok irodalom- és szabadalomkutatása (Megbízó: Robert Bosch Energy and Body systems Gépjárműelektromossági Alkatrész Gyártó és Forgalmazó Kft., Miskolc) 2006.

Indítómotorok megoldásváltozatainak kidolgozása (Megbízó: Robert Bosch Energy and Body systems Gépjárműelektromossági Alkatrész Gyártó és Forgalmazó Kft., Miskolc), 2007.

Indítómotor javaslatok és kísérleti példák felépítésének kidolgozása és részletezése (Megbízó: Robert Bosch Energy and Body systems Gépjárműelektromossági Alkatrész Gyártó és Forgalmazó Kft., Miskolc), 2007.

Működőképes kísérleti berendezés tervezése, megépítése, működtetése (Megbízó: Robert Bosch Energy and Body systems Gépjárműelektromossági Alkatrész Gyártó és Forgalmazó Kft., Miskolc), 2009.

8. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] BAKÁCS, A.: Ipar-Egyetem kapcsolatok, Technológia fejlődés és új tudományos eredmények NKTH MECENATÚRA pályázat, ismeretterjesztő cikksorozat, 2006. október
- [2] BIHARI Z.-SZENTE, J: Az állandó zárószög feltétele görgős szabadonfutóknál: Roller freewheels with constant pressure angle GÉP 61:(9-10) pp. 11-13. (2010)
- [3] BIHARI, Z.- SZENTE J.:Szabadonfutó tengelykapcsolók vizsgálata, GÉP LVI:(11-12) pp. 161-166. (2005)
- [4] BLÁGA, CS.- KOVÁCS, E.: Modeling and Measurement of a Starter, ISPE Ee 2011, The 16th International Symposium of Power Electronics. Novi Sad, Szerbia, pp. 1-5.(ISBN:978-86-7892-355-5)
- [5] BLÁGA, CS.:Indítómotor laboratóriumi tesztmérése AUTÓTECHNIKA, JAVÍTÁS ÉS KERESKEDELEM 9: pp. 28-31. (2010)
- [6] BLÁGA, CS.:Lineáris elektromágnesek működésének számítógépes szimulációja, ELEKTROTECHNIKA 3: pp. 73-76. (2005)
- [7] BLÁGA, CS.-KOVÁCS, E.: Performance Curves of Starter based on Mathematical Model, MACRo2010 Proceedings of the 2nd Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics, Marosvásárhely, Románia, pp. 121-128.(ISBN:978-973-1970-39-4)
- [8] BLÁGA, CS.-KOVÁCS, E.: Személygépkocsi indítómotorjának szimulációja, *A JÖVŐ JÁRMŰVE* 5:(1-2) pp. 95-98. (2010)
- [9] BLÁGA, CS.:_Simulation of Performance Curves for Starters,International CONgress on Automotive and Transport Engineering (CONAT2010). Brasov, Románia, 2010.10.27-2010.10.29. Brasov: Transilvania University Press, pp. 93-100.
- [10] BODE C.: Methoden zur Induktivitätsberechnung, Jahresbreicht 2009. p 14.
- [11] BOHNER – GSCHIEDLE – LEYER – PICHLER – SAIER – SCHMIDT - SIEGMAYER - ZWICKEL: Gépjárműszerkezetek Budapest Műszaki Könyvkiadó, 2003.
- [12] CHEN, F. Y.: Mechanics and Design of Cam Mechanism, Pergamon Press, New York, 1982.
- [13] CHIOU, S-J. – KOTA, S.: Automated conceptual design of mechanisms, Mechanism and Machine Theory 34 (1999) pp. 467-495.
- [14] CIURYS, M., DUDZIKOWSKI, I., GIERAK, D.: Modelling of a car starter with permanent magnet commutator motor, The Internatioan Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 28. No.3 2009. pp. 722-729.
- [15] CRANDALL S. H., KARNOPP C. D., KURTZ JR. E. F., PRIDEMORE-BROWN D. C.:Dynamics of Mechanical and Electromechanical Systems, McGraw-Hill, 1968.
- [16] DEMERDASH N. A., NEHL T. W.: Electric Machinery Parameters and Torques by Current and Energy Perurbations from Field Computations – Part I: Theory and Formulation, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14. December 1999. S. 1507-1513.
- [17] DEMERDASH N. A., NEHL T. W.: Electric Machinery Parameters and Torques by Current and Energy Perurbations from Field Computations – Part II: Application and Results, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14. December 1999. S. 1514-1522.
- [18] DUDZIKOWSKI, I., CIURYS, M.: Analysis of operation of a car starter with BLDC motor, Prezglad Elektrotechnizny, ISSN 0033-2097, R.86 Nr. 4, 2010. pp 166-169.
- [19] EHRLENSPIEL, K: Integrierte Produktentwicklung, Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig, 1. Auflage, 1995.

- [20] EYABI P., - WASHINGTON G: Modeling and sensorless control of an electromagnetic valve actuator, *Mechatronics* 2006;16:159–175.
- [21] FÜVESI, V.- KOVÁCS, E.-BLÁGA Cs.: Measurement and Identification of a Starter Motor System MACRo2010 Proceedings of the 2nd Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics. Marosvásárhely, Románia,. pp. 129-134.(ISBN:978-973-1970-39-4)
- [22] GUO Y., ZHU J., LU H., JIN J.: Computation of Incremental Inductances for Nonlinear Dynamic Analysis of a Claw Pole SMC Motor, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, (15)., No 3. 2007.
- [23] GYIMESI M., OSTERGAARD D.: Inductance Computation by Incremental Finite Element Analysis, *IEEE Trans. Magn.*, (35), 1999. pp 1119-1122.
- [24] GOLLEE R., ROSCHKE TH., GERLACH G.: A finite element method based dynamic analysis of a long stroke linear actuator, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (196-197), 1999. pp. 943-945.
- [25] H.-J. FRANKE, - M. DEIMEL: Selecting and combining methods for complex problem solving within the design process. International design conference – design 2004 Dubrovnik, May 18 - 21, 2004.
- [26] HADZISELIMOVIC M., BLAZNIK M., STUMBERGER B., ZAGRADISNIK I.: Magnetically Nonlinear Dynamic Model of a Series Wound DC Motor, *Przeglad Elektrotechniczny*, (87), No. 12b., 2011. pp 60-64.
- [27] HADZISELIMOVIC M., VIRTIC P., STUMBERGER G., MARCIC T., STUMBERGER B.: Determining force characteristics of an electromagnetic brake using co-energy, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (320), 2008. e556-561
- [28] ISERMANN, R.: Mechatronic systems—Innovative products with embedded control, *Control Engineering Practice* 16 (2008) pp. 14–29.
- [29] J. POSTA, - R. PAVLICEK, T.: HLADIK. Starter solenoid and power diagnostics. *RES.AGR.ENG.*, 48 2002 (4): 149-152.
- [30] KARLHEINZ ROTH: Tervezés katalógussal. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989.
- [31] KOLLER, R.: Konstruktionsmethode für den Maschienen-, Geräte- und Apparatebau, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- [32] LINDE, H. - HILL, B.: Erfolgreich erfinden –Widerspruchorientierte Innovationstrategie für Entwickler und Konstrukteure, Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, Darmstadt, 1993.
- [33] LINDEMANN, U: Morphologie und Gesamtkonzept, Übung 04. Technische Universität München, 2006.
- [34] LU H., ZHU J., GUO Y.: Calculation of Differential Inductances of a Tubular Linear PM Actuator, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, (15), Supplement 2007.
- [35] NEUGEBAUER, R. – DENKENA, B. – WEGENER, K.: Mechatronic Systems for machine tools, *Annals of the CIRP* Vol. 56/2/2007. pp. 657-686. doi:10.1016/j.cirp.2007.10.007.
- [36] NORTON, R.L: Cam Design and Manufacturing Handbook, New York, Industrial Press, 2002.
- [37] O. GOMIS BELLMUNT ET AL. Linear electromagnetic actuator modeling for optimization of mechatronic and adaptronic systems. *Mechatronics* 17 Elsevier. 2007. 153-163.
- [38] PARK, J.K.: Simulation of starting process of diesel engine under cold conditions, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 8, No. 3, pp 289-298. 2007.
- [39] PREUMONT, A.: Mechatronics, Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems, Springer, 2006.
- [40] ROTHBART, H. A.: Cam Design Handbook, New York, McGraw-Hill, 2004.

- [41] SE-YUEN MAK: Six ways to measure inductance, Phys.Educ. September 2002. pp. 439-445.
- [42] SE-YUEN MAK: The RLC circuit and the determination of inductance, Phys. Educ., (29) 1994. pp 94-97.
- [43] STUMBERGER G., PLANTIC Z., STUMBERGER B., MARCIC T.: Impact of static and dynamic inductance on calculated time response, Przegląd Elektrotechniczny, (87). No. 3., 2011. pp 190-193.
- [44] STANKOVIC, A.- BENEDICT, E.R. - JOHN, V. -LIPO, T.A.: A novel method for measuring induction machine magnetizing inductance, Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE
- [45] SZALONTAI, L.- KOVÁCS, E.- BLÁGA, Cs: Investigation of the Solenoid Switch of an Electric Starter Motor Using FEM MACRo2010 Proceedings of the 2nd Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics. Marosvásárhely, Románia, 2010.05.14-2010.05.15. pp. 183-188.(ISBN:978-973-1970-39-4)
- [46] SZILÁGYI, A.: Szuperfiniselő berendezés dinamikai vizsgálata, PhD értekezés, Miskolc, 2010.
- [47] SZYPER M.: Inductance Measurement, CRC Press LLC, 1999.
- [48] TOMIYAMA, T. -P. GU, P. - JIN Y.- LUTTERS, D. - KIND, CH.- KIMURA, F.: Design methodologies: Industrial and educational applications, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) pp. 543–565.
- [49] TÖMÖSI, M. J. - FRANK, GY.: Autóvillamosság. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1978. 262-286. old.
- [50] VDI 2206: Design methodology for mechatronic systems, Düsseldorf, 2004.
- [51] VDI 2221 RICHTLINIE: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1993 (VDI-Verlag: Düsseldorf).
- [52] VDI RICHTLINIE 2222 BL. 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf, 1997.
- [53] VELEZDI, GY.: Nagysebességű váltópályás mechanizmusok vizsgálóberendezése, Egyetemi doktori értekezés, Miskolc, 1987.
- [54] VOLMER, J.-STADT, K.M.: Getriebetechnik, Berlin, Veb Verlag Technik, 1969.
- [55] VOLMER, J: Bütökös mechanizmusok, Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1980.
- [56] WALTEROS, C., ET AL: Startersimulation, Kooperationsprojekt, 2003.
- [57] Yao, Y.- Zhang, C. - Yan, H-S.: Motion control of cam mechanism, Mechanism and Machine Theory 35 (2000) 593-607.
- [58] Xiao, H.- Zu, J-W.: Cam profile optimization for a new cam drive, Journal of Mechanical Science and Technology 23 (2009) 2592~2602