



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

**Elektromágneses Beavatkozók
Paramétereinek Meghatározása a Többrétegű
Struktúrák és Modellalapú Becslés
Módszerével**

PhD értekezés tézisei

Dülk Ivor
okleveles villamosmérnök

Témavezető: dr. Kovácsházy Tamás, PhD

Budapest, 2014

1. A KUTATÁS ELŐZMÉNYE ÉS RÖVID ÁTTEKINTÉSE

Az „érzékelő nélküli” (sensorless) irányelv elektromágneses beavatkozók esetében egy egyre elterjedtebb megközelítés a beavatkozót működtető rendszer költséghatékonyságának és megbízhatóságának növelésére. Lényege, hogy normál működési üzem mellett az eszköz bizonyos fizikai paraméterei az eszközről alkotott modell segítségével és alternatív be/kimeneti mennyiségek mérésével kerülnek meghatározásra, amely paramétereket egyébként nem, vagy csak dedikált külső érzékelővel lehetne mérni.

Kutatásom kezdeti célkitűzése az érzékelő nélküli irányelv vizsgálata volt lineáris elektromágneses beavatkozók esetére, azaz új módszerek kidolgozása a mozgórész (dugattyú) pozíciójának és sebességének, a külső terhelésnek és az eszköz termikus állapotának a meghatározására, becslésére. Ezeket az eszközöket általában kapcsolási (relé) és térfogatáram szabályozási (szelep) célokra alkalmazzák, túlnyomó részt korlátozott erőforrású beágyazott rendszerekben. Ezért a megbízhatóság és pontosság mellett a létrejövő modellek és eljárások alacsony komplexitása és számítási igénye kulcsfontosságú szempontok voltak.

Kutatásom első részében a beágyazott rendszerek speciális erőforrás igényeinek megfelelő, alacsony komplexitású és számítási igényű módszerek kidolgozásával foglalkoztam a dugattyú pozíciójának, a beavatkozót terhelő külső erőhatásnak és a tekercselés elektromos ellenállásának a meghatározására. A termikus modellel szemben az ellenállás villamos modellen alapuló becslése számítástechnikailag gazdaságosabb, mindemellett képes információt szolgáltatni a beavatkozó belső termikus állapotáról, a tekercs átlagos hőmérsékletéről. Viszont a részletes hőmérsékleti eloszlás leírására és annak mélyreható vizsgálatára nem alkalmas. Ami a dugattyú pozíciójának érzékelő nélküli meghatározását illeti, a szakirodalomban számos módszer létezik, viszont a pozíció és a külső terhelés egyidejű becslése még egy nyitott terület. Tipikusan folyadékáramlási vagy nyomásszabályozási alkalmazásoknál a beavatkozót időben változó külső erőhatás érheti, ami befolyásolja a szükséges meghajtó tekercsáramot. Amennyiben a külső terhelésre egy becslés adható, lehetőség nyílik a külső erő- illetve nyomásérzékelők elhagyására a rendszerből és a beavatkozó meghajtásához szükséges áram minimalizálására. Ezáltal a rendszer

költséghatékonysága és hatásfoka növekedhet. Fontos megjegyezni, hogy az érzékelő nélküli módszereknek az elektromágneses beavatkozók meghajtásához legelterjedtebben használt PWM (impulzus szélesség modulációs) technikával kompatibilisnek kell lennie, és az eszköznek az eredeti beavatkozó funkcióját maradéktalanul teljesítenie kell. Az ehhez a területhez kapcsolódó új, tudományos eredményeim [di1], [di4-5] és az I. tézis alatt található.

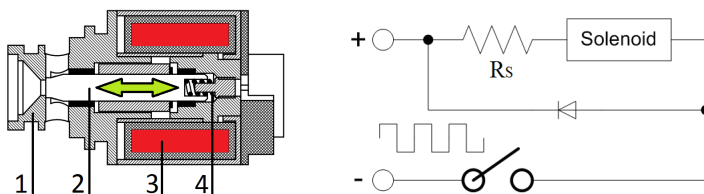
Normál működés közben az elektromágneses beavatkozók paraméterei megváltozhatnak. Mivel az érzékelő nélküli eljárás a vizsgált eszközről alkotott modellen alapszik, a modell folyamatos frissítése és a paraméterek nyomon követése fontos a pontos és megbízható működés (becslés) érdekében. Ez szükségessé teheti a vizsgált eszköz termikus állapotának részletes ismeretét, mivel a beavatkozóról alkotott modell paraméterei, kiváltképp a tekercs elektromos ellenállása, a hőmérséklettől nagymértékben függhetnek. Emellett egy átfogó hőmérsékleti modell segítséget nyújt mind tervezési, méretezési (optimalizálási) és diagnosztikai (forró-pontok meghatározása) feladatoknál. Az előbb említett okok miatt kutatásom második részében egy, a lineáris elektromágneses beavatkozók vizsgálatára alkalmas, átfogó termikus modell létrehozásával foglalkoztam. A hőmérsékleti modell megalkotásában fontos szempont volt a széleskörű alkalmazhatóság és a hőmérsékleti tér minél általánosabb leírása; ezért a hőmérsékleti eloszlásnak (diffúziós egyenlet) az analitikus kifejezését kerestem. Az analitikus megoldások széleskörű betekintést nyújtanak a végbemenő fizikai folyamatokba és a paraméterek közötti összefüggésekbe, ami tervezési és optimalizálási feladatoknál előnyös tulajdonság. Emellett többnyire kompakt, zárt alakú megoldások, így alkalmazásuk az erőforrásban hiányos beágyazott rendszerekben kedvező. A hőmérsékleti modell létrehozása során a szakirodalomban a többrétegű struktúraként nevezett koncepciót (multilayered medium) alkalmaztam. A modellválasztást az indokolja, hogy a lineáris elektromágneses beavatkozó, kiváltképp a belső tekercselése, jó közelítéssel felfogható egy sugárirányban rétegelt szerkezetként. Az előbb ismertetett kutatási probléma röviden úgy foglalható össze és a szakirodalomban úgy szerepel, hogy a diffúziós egyenlet analitikus megoldása többrétegű struktúrákban. Kiemelném, hogy az így vizsgált problémakör általános jellegű, emiatt az elért eredmények minden olyan területen

érvényesek, amelyek a diffúziós egyenlettel leírhatók, így az elektrosztatikára és hővezetésre egyaránt. Emellett a lineáris elektromágneses beavatkozók modellezésén túl egy szélesebb kutatási és alkalmazási körben is hasznosíthatók, ahol a többrétegű struktúra megközelítés helyálló, például kompozit anyagok vizsgálatára. Az ehhez a területhez kapcsolódó új, tudományos eredményeim [di2-3] és II.-III. tézisek alatt találhatók.

2. KUTATÁSI PROBLÉMÁK, A VIZSGÁLAT MÓDSZEREI

2.1 Lineáris elektromágneses beavatkozók működése

A lineáris elektromágneses beavatkozó egy egyfázisú vagy kétfázisú lineáris motor, melynek mozgó része (dugattyúja) korlátozott egyenes vonalú mozgást végez. Alkalmazási területeit tekintve leggyakrabban kapcsolóként (relé) [1-2], és térfogatáram szabályozásra (szelep) [3-4] használják. Egy egyfázisú elektromágneses szelep keresztmetszeti rajza a 1. ábra bal oldalán látható, működése pedig röviden a következő.



1. ábra: Elektromágneses szelep felépítése (balra) és PWM meghajtása (jobbra):
1-szeleptest, 2-dugattyú, 3-elektromos tekercs, 4-visszatérítő rugó.

A tekercsre kapcsolt villamos feszültség hatására a tekercs árama mágneses teret hoz létre, amely a ferromágneses dugattyúra vonzó mágneses erőt fejt ki. A dugattyú elmozdulásával a vele mereven összekötött szelep kinyit és a szabályozott közeg (folyadék, gáz) azon keresztül tud áramlani. Az átáramlási keresztmetszet nagyságát, így az áramlási ellenállást, a dugattyú pozíciójával lehet meghatározni. A behúzó mágneses erővel és a szabályozott közeg nyomásából származó erővel a visszatérítő rugó tart ellent, ami a

dugattyút a házból kifelé tolja és az eszközt kikapcsolt állapotban zárva tartja. A fenti elgondolást követve alapvetően 3 alrendszer különböztethető meg: villamos, mágneses illetve mechanikai alrendszer. Elektromágneses beavatkozók meghajtását tekintve a legelterjedtebb módszer a PWM (impulzus szélesség moduláció), amelynek a legegyszerűbb változatát a 1. ábra jobb oldala mutatja.

2.1.1 Az érzékelő nélküli irányelv

Az érzékelő nélküli eljárás lényege, hogy a rendszer egy adott kimeneti mennyiségének a meghatározása nem direkt külső érzékelővel történik, hanem alternatív be és kimeneti mennyiségek mérésével és azok alapján a rendszerről létrehozott modell kiértékelésével (ha lehetséges). Elektromágneses szelepek esetén a dugattyú pozícióját az elektromágneses alrendszerről alkotott modell és villamos jeleinek (feszültség és áram) mérése alapján határozzák meg. Az eljárás fő előnye, hogy a költséges külső érzékelő, például elmozdulás érzékelő és a hozzá tartozó járulékos mechanikai és hardware kialakítás elhagyható.

Mivel lineáris elektromágneses beavatkozókat túlnyomórészt beágyazott környezetben használnak, az eszköz meghajtásához és az érzékelő nélküli irányelv alkalmazásához szükséges hardware és software erőforrás igényének kicsinek kell lennie a költséghatékonyság érdekében. Emellett szükséges a PWM meghajtással való kompatibilitás, és a beavatkozó szerepkört is maradéktalanul teljesíteni kell. A mechanikai paraméterek (pozíció, sebesség, erő) érzékelő nélküli meghatározása az elektromágneses alrendszernek (villamos impedanciának) a dugattyú pozíciójától való függését használja ki, például az induktivitás (villamos impedancia) [2-3], [5] illetve fluxus [4], [6] változását. Ehhez szükséges az elektromágneses rendszer identifikációja és a szükséges mennyiségek mérése, kiszámítása. Mivel az induktivitás egy dinamikus és a mágnesezési görbe adott pontjához tartozó mennyiség, az induktivitást valamilyen speciális gerjesztő jelre adott válaszból számítják. Ilyen gerjesztő jel lehet maga a PWM [5] vagy egy szinuszos feszültségkomponens [7]. A fluxus ezzel szemben egy integrális mennyiség, így a mérése folyamatos integrálást és segédtekercesek használatát [4] teheti szükségessé, ami költséghatékonysági szempontból nem előnyös. Emellett lehetőség

van komplex elektromágneses modellek és vezérlési stratégiák alkalmazására is [6], amik viszont kevésbé kompatibilisek a szűkös erőforrások miatt támasztott követelményekkel.

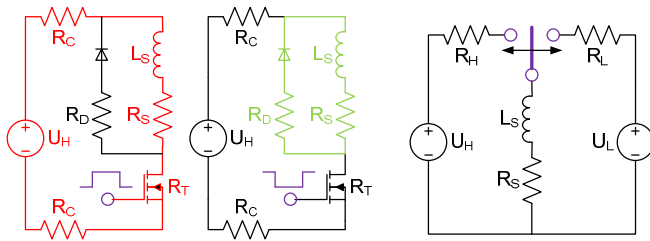
Tipikusan térfogatáramlás szabályozási alkalmazásoknál a szabályozott közeg áramlásából a beavatkozót egy időben változó külső erőhatás érheti. A szakirodalomban lineáris elektromágneses beavatkozókra ennek a külső erőhatásnak, a pozícióval egyidejűleg történő, érzékelő nélküli meghatározása egy jelenleg is nyitott probléma. A kutatásom eredményeként létrejövő érzékelő nélküli módszerekkel szemben kiemelt szempont volt az erőforrás igények minimalizálása (beágyazott alkalmazásokra történő optimalizálás), így például az 1. ábrán látható legegyszerűbb PWM meghajtó HW elrendezésen történő megvalósíthatóság.

2.1.2 A modell paramétereinek megváltozása

Az érzékelő nélküli irányelv lényegében villamos jelek mérésén és az eszközről alkotott elektromágneses (villamos) modell kiértékelésén alapul. Ennek következtében a mechanikai mennyiségek becslése során a tekercs elektromos ellenállása (továbbiakban csak ellenállás) mint szükséges és befolyásoló paraméter megjelenik. Mivel az ellenállás normál üzem közben a belső hőfejlődés és környezeti hőmérséklet hatására jelentősen megváltozhat (40%-ot 100 °C változásra), a mechanikai paraméterek becslésében hibát okoz; amennyiben értéke nincs folyamatosan mérve. Emellett az ellenállás értéke a tekercsben uralkodó termikus állapotról, például a tekercs átlagos belső hőmérsékletéről is információt nyújt, ami diagnosztikai szempontból is fontos. Az előbb említett érzékelő nélküli módszerekhez hasonlóan célszerű az ellenállást is villamos mennyiségek mérésére és egy villamos modellre visszavezetni az üzemszerű PWM meghajtás mellett.

Az ellenállás meghatározásának egy gyakorlati problémáját szemlélteti a 2. ábra (itt a beavatkozót L_s és R_s reprezentálja), amit kutatásom során vizsgáltam. A PWM ciklus be (bal oldali ábra) és kikapcsolási (középső ábra) szakaszai alatt a tekercs árama más áramkörü szakaszokon folyik keresztül, amiknek az eredő ellenállása az őket alkotó nemideális áramkörü elemek, például hozzávetések, kapcsolódások miatt jelentősen eltérhet. Ezek az áramkörü eredő ellenállások a tekercs ellenállásához hozzáadódva egy, a PWM

kitöltési tényezőjétől függő hibát okoznak a tekercs ellenállásának meghatározásakor. A probléma általánosítása a 2. ábra jobb oldalán van szemléltetve, ahol a vizsgált rendszer a PWM ciklusok alatt időállandót (L/R) vált. A PWM szakaszok ellenállásbeli különbségét figyelembe véve a tekercs ellenállása pontosabban meghatározható. Vizsgálatom statikus és tranziens esetekre is kiterjedt, ugyanis előfordulhat, hogy a rendszer sokáig tranziens állapotban marad a kitöltési tényező váltakozása miatt, noha az ellenállás frissített értékére szükség van.



2. ábra: Nemideális PWM meghajtás és általánosítása.

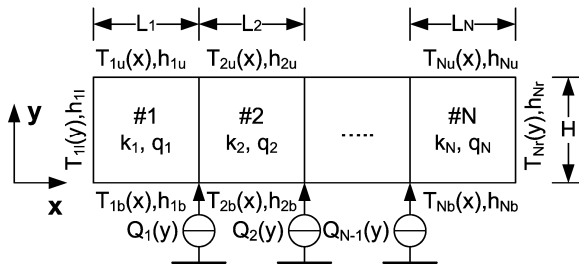
2.2 Többrétegű struktúra modellje és a diffúziós egyenlet analitikus megoldása

A vizsgált többrétegű struktúra modelljét (multilayered-medium) az 3. ábra szemlélteti hasábokra, kétirányú (x,y) állandósult diffúzió esetére. A többrétegű struktúrát $\#N$ darab lineáris, azonos H magasságú, de eltérő L hosszúságú hasáb egymás utáni soros kapcsolata alkotja, ahol a hasábok (rétegek) a kapcsolódási felületek mentén csatlakoznak egymáshoz. A rétegek egyenként homogének, izotrópok és a k vezetési anyagállandóval jellemezhetők. Diffúzió csak az x transzverzális (rétegek irányával megegyező) és y longitudinális (rétegek irányára merőleges) koordináták mentén történik. Szükséges még definiálni a határoló felületeken fellépő peremfeltételeket, amelyek lehetnek homogének (gerjesztés zérus) és inhomogének (gerjesztés nem zérus), továbbá a vizsgálat szempontjából három típusát különböztetjük meg:

- Elsőfajú: a felületen a potenciál (T , U) értéke adott,
- Másodfajú: a felületen az átáramló fluxus értéke adott,

- Harmadfajú: a felületi fluxus arányos a h konvekciós tényezővel a felület és környezeti potenciál különbségével.

A 3. ábra értelmében a rétegek szabad felületein általános harmadfajú peremfeltételt definiálunk az egyes felületrészekhez tartozó környezeti hőmérséklettel és állandó h konvekciós tényezővel, de ugyanúgy lehetne első illetve másodfajú peremfeltételeket is definiálni a h tényező végtelennek vagy nullával történő választásával. Az u, b, l, r indexek a fenti, alsó, jobb oldali és bal oldali felületekre vonatkoznak. Transzverzális peremfeltételnek nevezzük azt a peremfeltételt, amely az x irányú normálvektorú felületeken hat, például $T_{lu}(y)$. Longitudinális peremfeltételnek nevezzük azt a peremfeltételt, amely az y irányú normálvektorú felületeken hat, például $T_{lu}(x)$. Emellett két réteg között definiáljuk a transzverzális $Q(y)$ fluxus inhomogenitást, illetve minden rétegben a $q(x, y)$ belső energiafejlődést (disszipáció). Az elért kívánt eredmény az előírt homogén és inhomogén peremfeltételekkel, valamint belső disszipációval a rétegekben létrejövő potenciáltér (diffúziós egyenlet) analitikus meghatározása állandósult állapotban.



3. ábra: A vizsgált többrétegű struktúra általános modellje.

2.2.1 Diffúziós egyenlet analitikus megoldása, az inhomogén longitudinális peremfeltételek problémája

A diffúziót belső energiafejlődéssel leíró egyenlet a Poisson egyenlet, amely állandósult állapotban derékszögű koordináta rendszerben homogén, izotróp közegben az alábbi egyszerűsített alakot ölti (1), ahol $T(x, y)$ a kétdimenziós potenciáltérrel jelöli.

Amennyiben a vizsgált közegben a belső $q(x,y)$ energiafejlődés zérus, a Poisson egyenlet a Laplace egyenletté változik [8], [10],

$$\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} = -\frac{q(x,y)}{k}. \quad (1)$$

A Laplace egyenlet analitikus megoldására egy kedvelt módszer a változók szeparációja, melynek lényege, hogy a megoldást egy végtelen tagú, úgynevezett sajátfüggvények szorzatából képzett függvények összegeként képezzük. Szemléltetésképp téglalap tartományra (egy-réteg probléma) homogén longitudinális és inhomogén transzverzális peremfeltételekre (1) megoldása a változók szeparációjával (2) [8]. Megjegyzendő, hogy a változók szeparációja nem feltétlenül alkalmazható a Poisson egyenlet megoldására, mivel a $q(x,y)$ disszipációs tag miatt a differenciálegyenlet nem lesz szeparálható,

$$\begin{aligned} T(x,y) &= \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x, \lambda_n) Y_n(y, \lambda_n) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} (a_n e^{\lambda_n x} + b_n e^{-\lambda_n x}) (c_n \sin(\lambda_n y) + d_n \cos(\lambda_n y)). \end{aligned} \quad (2)$$

Az $X(x)$ az x transzverzális, az $Y(y)$ az y longitudinális koordináta-hoz tartozó sajátfüggvény, λ_n pedig az n -edik sajátfüggvényhez tartozó sajátérték, a_n , b_n , c_n és d_n pedig a sajátfüggvényekhez tartozó konstansok. A sajátfüggvények száma elméletileg végtelen, de a gyakorlatban elég n értékét akkorára választani, hogy a megoldás kellő pontossággal rendelkezzen. Az λ_n sajátértékeket (2) esetében a homogenizált (itt longitudinális) peremfeltételekből alkotott transzcendentális egyenlet megoldásai alkotják. A transzcendentális egyenlet alakja, és így a sajátértékek kiszámításához szükséges erőforrás a homogén peremfeltételektől függ. Ezt a lépést a szakirodalomban szokás sajátérték problémának is nevezni. A c_n és d_n együtthatókat a longitudinális, az a_n és b_n együtthatókat az inhomogén transzverzális peremfeltételekből lehet meghatározni az $Y(y)$ sajátfüggvényekre érvényes ortogonalitási tulajdonság (3) kihasználásával,

$$\int_H Y_n(y, \lambda_n) Y_m(y, \lambda_m) dy = \begin{cases} 0 & \text{ha } n \neq m, \\ N_n^2 & \text{ha } n = m. \end{cases} \quad (3)$$

Lineáris diffúzió estén gyakori módszer a szuperpozíció alkalmazása a diffúziós probléma egyszerűsítésére, ugyanis így a tartomány gerjesztései egyenként is vizsgálhatók és a megoldásban kifejezhetők [8], [10]. Mivel többrétegű struktúrák esetében a vezetési tényező és a peremfeltételek nem folytonosak, azaz rétegről rétegre változhatnak, célszerű a diffúziós problémát a rétegekre külön lebontani és (1)-(2) definiálni. A rétegekben így létrejövő „rész” megoldások között a rétegek érintkezési felületein értelmezett kapcsolódási feltételek, például a fluxus és potenciál folytonossága, teremtenek kapcsolatot.

Homogén longitudinális peremfeltételek esetén a többrétegű struktúrában az analitikus megoldáshoz tartozó sajátérték probléma egyszerű. Ez nem mondható el abban az esetben, ha a többrétegű struktúrának inhomogén longitudinális peremfeltétele van [8], ilyenkor ugyanis a sajátérték probléma nagyban bonyolódik. Ennek oka, hogy a transzcendentális egyenlethez szükséges homogén peremfeltételeket a rétegek közötti kapcsolódási feltételekből kell származtatni, amik inhomogének és a rétegekben definiált külön megoldásokat kapcsolják össze. Irodalomkutatásom során megfigyeltem, hogy a releváns publikációk döntő többsége az inhomogén longitudinális peremfeltételeket nem veszi figyelembe az analitikus megoldásban, vagy csak speciális körülmények mellett. Emellett a belső energiafejlődés kifejezése és egyszerűsítése az analitikus megoldásban is egy további nyitott probléma.

2.2.2 Numerikus problémák a diffúziós egyenlet analitikus megoldásának kiszámításakor többrétegű struktúrákban

A homogén longitudinális peremfeltételekből (2.2.1 fejezetben bemutatott példa) minden rétegben definiálható egy sajátfüggvények alkotta bázisrendszer, ahol az adott rétegben a sajátfüggvények teljesítik a (3) szerinti ortogonalitási feltételt. Mivel a rétegek anyagjellemzői és longitudinális peremfeltételei különbözőek lehetnek, nem biztos, hogy a sajátértékek és sajátfüggvények

azonosak minden rétegben. Ennek következtében két eltérő indexű (n és m), külön rétegben (j és k) vett sajátfüggvény skaláris szorzata nem feltétlenül lesz nulla, hanem (4) szerint fejezhető ki,

$$\int_H Y_{j,n}(y, \lambda_{j,n}) Y_{k,m}(y, \lambda_{k,m}) dy = N_{(j,n),(k,m)}^2 \neq 0 \quad (4)$$

A (3) szerint definiált, például $\#j$ -edik rétegben értelmezett analitikus megoldás $a_{j,n}$ és $b_{j,n}$ transzverzális sajátfüggvényhez tartozó együtthatói a $\#j$ -edik réteg transzverzális illetve kapcsolódási peremfeltételeiből számíthatók (4) alkalmazásával. Amennyiben a $\#j$ réteg és vele szomszédos rétegeinek bázisa eltérő, az $a_{j,n}$ és $b_{j,n}$ kiszámításakor figyelembe kell venni a szomszédos rétegek minden egyes transzverzális sajátfüggvényét a kapcsolódási feltételek miatt.

A kapcsolódási peremfeltételek és rétegenként eltérő bázisok eredményeként egy adott réteg transzverzális együtthatóinak a kiszámításához meg kell oldani egy lineáris egyenletrendszert, amely az összes réteg összes transzverzális sajátfüggvényét (a és b paraméterek) érinti. Mivel a lineáris egyenletrendszer együttható mátrixának egyik eleme sem lesz zérus; és a transzverzális sajátfüggvények exponenciális alakja miatt nagyon kicsi és nagyon nagy értékeket tartalmaz, az egyenletrendszer megoldása egy rosszul kondicionált problémához vezet. A rosszul kondicionáltság miatt az együttható mátrix kis változása vagy a számítás során fellépő kicsiny numerikus hibák és azok halmozódása jelentős eltérést okozhatnak a végeredményben [9]. Gyakorlati alkalmazásokban a számbázis véges pontosságú, ezért az egyenletrendszerhez, a rétegek között definiálható átviteli mátrixok létrehozásához és az azokon végzett műveletekhez szükséges aritmetikai műveletek (főleg extrém számokkal) hibával terhelték. Emiatt az analitikus megoldás „direkt módú” kiszámítása könnyen numerikusan instabillá válik sok réteg, nagy transzverzális kiterjedés és sok sajátfüggvény esetén. Ez a jelenség az analitikus megoldások gyakorlati alkalmazhatóságát korlátozza. A szakirodalomban rendelkezésre álló megoldások zömmel azzal az esettel foglalkoznak, amikor a rétegek bázisai megegyezők.

3. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

- I. Beágyazott alkalmazásokra optimalizált, PWM meghajtás mellett használható módszereket dolgoztam ki a lineáris elektromágneses beavatkozók paramétereinek meghatározására. [di1], [di4-5]
 - I.1 Kidolgoztam egy eljárást, amellyel a lineáris elektromágneses beavatkozók mozgó részének a pozíciója és az eszközt terhelő külső erőhatás egyidejűleg meghatározható. Az eljárás alapjául a különböző külső erőhatások alatt felvett pozíció-induktivitás és pozíció-átlagos áram görbesereg szolgál. Az inductivitást speciális gerjesztő jelekkel mérem (PWM hullámosság illetve szinuszos kitöltési tényező), amiket a legegyszerűbb hardveres elrendezéssel valósítok meg. [di4-5]
 - I.2 Kidolgoztam egy alacsony komplexitású módszerek csoportját a lineáris beavatkozók tekercselésének elektromos ellenállásának meghatározására. Figyelembe veszem, hogy a PWM ki-és bekapcsolási periódusai alatt az eszköz árama különböző eredő ellenállású körökön folyhat keresztül, ezáltal az ellenállás meghatározásánál a hibát csökkentem. [di1]
 - I.3 Bebizonyítottam, hogy PWM meghajtás, állandó tápfeszültségek és kitöltési tényező mellett a lineáris L/R körnek a PWM periódusra vett átlagos áramának alakulása a PWM periódusok során kifejezhető az exponenciális lecsengéssel abban az esetben is, ha a rendszer elektromos időállandója a PWM be-és kikapcsolási szakaszai alatt különböző. [di1]
- II. Megmutattam, hogy többrétegű struktúrák esetén a diffúziós egyenlet állandósult állapotbeli megoldásakor a rétegek irányára merőleges (longitudinális), inhomogén peremfeltétel hatása kifejezhető egy, a hozzátartozó rétegben megoldott egy-réteg probléma megoldásának és homogén longitudinális

peremfeltételű többrétegű problémák megoldásainak kombinációjaként. [di3]

II.1 Többrétegű struktúrában inhomogén longitudinális peremfeltétel esetén az analitikus megoldáshoz tartozó sajátérték probléma egyszerűsíthető a sajátértékek kiszámításához szükséges transzcendentális egyenlet redukálásával. Így a sajátértékek kiszámítása kevesebb számítási erőforrást igényel. [di3]

II.2 Megmutattam, hogy többrétegű struktúrában állandósult állapotban a diffúziós egyenlet megoldásának szempontjából a csak a transzverzális koordinátától függő disszipációs hatás kifejezhető egy egydimenziós diffúziós probléma és inhomogén longitudinális peremfeltételek hatásaként. [di3]

III. Kidolgoztam egy iteratív, háló nélküli számítási módszert, amellyel a többrétegű struktúrák esetében a diffúziós egyenlet állandósult állapotbeli analitikus megoldásának kiszámítása során fellépő, a rétegek bázisfüggvényeinek eltéréséből adódó numerikus problémák kiküszöbölhetők. [di2]

III.1 Bebizonyítottam, hogy az iteratív megoldás konvergenciája gyorsul, ha az iterációk során különböző súlyozó tényezőket használunk. [di2]

III.2 Megmutattam, hogy az iterációkhoz szükséges, optimális súlyozó tényezők megbecsülhetők a rétegekről alkotott koncentrált paraméterű impedancia-hálózat reprezentációból. [di2]

III.3 Megmutattam, hogy a többrétegű struktúra felfogható kétrétegű struktúrák hierarchiájaként, ezáltal a kétrétegű struktúrára kidolgozott módszer általánosítható tetszőleges rétegszámra. [di2]

III.4 A szükséges iterációk száma csökken, ha a többrétegű struktúra kétrétegű struktúrákra való lebontása (hierarchia kialakítása) a felező-módszerrel történik. [di2]

4. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSULÁSA

Kutatásom első részében új, érzékelő nélküli módszereket dolgoztam ki a lineáris elektromágneses beavatkozók paramétereinek, pl. dugattyú pozíció, külső terhelés és tekerccselés elektromos ellenállásának meghatározására. Ilyen eszközt túlnyomó részt beágyazott rendszerekben, például az autóiparban használnak; ipari alkalmazásuk jelentős. A kutatás eredményeként létrejött módszerek újszerűségét az alacsony komplexitásuk és erőforrás (HW&SW) igényük jelenti, emellett a pozíció és külső terhelés egyidejű becslése is megvalósult. Ez további külső érzékelők elhagyását eredményezheti, aminek következtében a vizsgált eszközöket alkalmazó rendszerek költséghatékonyasága és robusztussága tovább növekedhet.

Kutatásom második részében a diffúziós (hővezetési) egyenlet analitikus megoldásával foglalkoztam többrétegű struktúrákban. Eredeti motivációként a lineáris elektromágneses beavatkozók részletes hőmérsékleti modellezése szolgált, azonban a többrétegű struktúráknak (kompozitok) mellett számtalan ipari és mérnöki felhasználása létezik, jelentőségük egyre növekszik. Kutatásom során kidolgoztam egy módszert, amellyel a diffúziós egyenlet állandósult állapotbeli analitikus megoldásában az inhomogén longitudinális peremfeltételek kifejezhetők és a sajátérték probléma egyszerűsíthető. Emellett egy, az analitikus megoldások kiszámításakor fellépő numerikus problémák kiküszöbölésére alkalmas számítási eljárást is létrehoztam. Eredményeim következtében a diffúziós egyenlet analitikus megoldásai kiterjeszhetők egy szélesebb alkalmazási területre, és a megoldások számítási hatékonysága is növekedhet.

5. PUBLIKÁCIÓK

Lektorált folyóirat cikkek

[di1] Ivor Dülk, Tamás Kovácsházy
Resistance Estimation in Solenoid Actuators by Considering Different Resistances in the PWM Paths.
PERIODICA POLYTECHNICA: ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE 58: (3) pp. 109-120. (2014)
DOI: 10.3311/PPee.7353

[di2] Ivor Dülk, Tamás Kovácsházy
A Method for Computing the Analytical Solution of the Steady-State Heat Equation in Multi-Layered Media.
JOURNAL OF HEAT TRANSFER-TRANSACTIONS OF THE ASME 136, (2014)
DOI: 10.1115/1.4027838

[di3] Ivor Dülk, Tamás Kovácsházy
Steady-state heat conduction in multilayer bodies: An analytical solution and simplification of the eigenvalue problem.
INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 67: pp. 784-797. (2013)
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.070

[di4] I. Dülk, T. Kovácsházy
A Sensorless Method for Detecting Spool Position in Solenoid Actuators.
CARPATHIAN JOURNAL OF ELECTRONIC AND COMPUTER ENGINEERING 6:(1) pp. 36-43. (2013)

Konferencia cikkek

[di5] Dülk Ivor, Kovácsházy Tamás
Sensorless position estimation in solenoid actuators with load compensation.
In: IEEE (szerk.) 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012) Proceedings.

Graz, Ausztria, 2012.05.13-2012.05.16. (IEEE IMS) New York: IEEE, pp. 268-273. ISBN: 978-1-4577-1772-7

[di6] I. Dülk, T. Kovácsházy

A Novel Experimental Setup for Solenoid Actuators.

In: IEEE (szerk.) Proceedings of the IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Bécs, Ausztria, 2013.11.10-2013.11.13. New York: IEEE Press, pp. 3862-3867. ISBN: 978-1-4799-0223-1

[di7] Dülk Ivor, Kovácsházy Tamás

Thermal Analysis of Solenoid Actuators.

In: Petras I, Podlubny I, Kacur J, Nawrocka A, Sapinski B (szerk.)

Proceedings of the 14th IEEE International Carpathian Control

Conference (ICCC 2013). Rytro, Lengyelország, 2013.05.26-

2013.05.29. New York: IEEE, pp. 53-56. ISBN: 978-1-4673-4489-0

[di8] Dülk Ivor, Kovácsházy Tamás

Modelling of a linear proportional electromagnetic actuator and possibilities of sensorless plunger position estimation.

In: IEEE (szerk.) ICC 2011 (International Carpathian Control

Conference). Velke Karlovice, Csehország, 2011.05.25-2011.05.28.

New York: IEEE Press, pp. 89-93. ISBN: 978-1-61284-360-5

DOI: 10.1109/CarpathianCC.2011.5945822

[di9] Dülk Ivor, Kovácsházy Tamás

A Computationally Effective Method for Calculating the Exponential Fit

In: IEEE ICC 2014 (International Carpathian Control Conference).

Velke Karlovice, Czech republic, 2014.05.28-2014.05.30., pp. 101-

104. ISBN: 978-1-4799-3527-7

DOI: 10.1109/CarpathianCC.2014.6843577

HIVATKOZÁSOK

- [1] Heyun Lin, Xianbing Wang, Shuhua Fang, Ping Jin, and S. L. Ho, "Design, Optimization, and Intelligent Control of Permanent-Magnet Contactor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 11, pp. 5148-5158, Nov. 2013.
- [2] Antonio Garcia Espinosa, Jordi-Roger Riba Ruiz, Xavier Alabern Morera, "A Sensorless Method for Controlling the Closure of a Contactor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 10, pp. 3896-3903, Oct 2007.
- [3] Paolo Mercorelli, "A Two-Stage Augmented Extended Kalman Filter as an Observer for Sensorless Valve Control in Camless Internal Combustion Engines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 11, pp. 4236-4247, Nov. 2012.
- [4] Ryan R. Chladny, Charles R. Koch, "Flatness-Based Tracking of an Electromechanical VVT Actuator with Magnetic Flux Sensor," in *Proc. IEEE Int. Conference on Control Applications*, 2006, pp. 1663-1668.
- [5] Jyh-Chyang RENN, Yen-Sheng CHOU, "Sensorless Plunger Position Control for a Switching Solenoid", *JSME International Journal, Series C*, Vol. 47, No. 2, pp. 637-645, 2004.
- [6] Peter Eyabi, Gregory Washington, "Modeling and sensorless control of an electromagnetic valve actuator", *Mechatronics* 16, pp. 159-175, 2006.
- [7] Shang-The Wu, Wei-Nian Chen, "Self-sensing of a solenoid valve via phase detection," in *Proc. IEEE/ASME Intl. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, 2009, pp. 1165-1170.
- [8] A. Haji-Sheikh, J.V. Beck, D. Agonafer; "Steady-state heat conduction in multi-layer bodies"; *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), pp. 2363-2379.
- [9] M.F. Abdul Azeez, A.F. Vakakis; "Axisymmetric transient solutions of the heat diffusion problem in layered composite media"; *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000), pp. 3883-3895.
- [10] Prashant K. Jain, Suneet Singh, Rizwan-uddin; "An exact analytical solution for two dimensional, unsteady, multilayer heat conduction in spherical coordinates"; *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010), pp. 2133-2142.