Tézisfüzet

Új metaheurisztikus optimalizációs eljárások és sugárzott emisszió szimulációs technikák fejlesztése

Írta:

FRIEDL GERGELY
Okleveles Villamosmérnök

Témavezető:
PROF. DR. KUCZMANN MIKLÓS, D.SC.
Egyetemi tanár
Széchenyi István Egyetem, Teljesítményelektronika és Villamos Hajtások Tanszék

SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
INFRASTRUKTÚRÁLIS RENDSZEREK MODELLEZÉSE ÉS FEJLESZTÉSE
MULTIDISZCIPLINÁRIS MŰSZAKI TUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA
Győr
2022

Tartalomjegyzék

1. A kutatási téma, és annak időszerűsége 3
2. Metaheurisztikus optimalizáció 4
2.1. Tézis 1.1: Súlyozott Vonzás Módszere 4
2.2. Tézis 1.2: Súlyozott Vonzás Módszerének alkalmazása a *Jiles-Atherton*-modell paramétereinek meghatározására 7
2.3. Tézis 2: Emberi látás ihlette metaheurisztikus optimalizáció 8
3. DC-DC *buck* konverter EMC szimuláció 11
3.1. Tézis 2.1: Két lépéses kombinált kisjelű szimulációs eljárás 12
3.2. Tézis 2.2: DC-DC konverterek emissziójának kvalitatív szimulációja 13
3.3. Tésiz 2.3: DC-DC konverterek emissziójának kvantitatív szimulációja 15
4. Összefoglaló 16
5. Tézisek összegzése 18
6. Irodalomjegyzék 20

1. A kutatási téma, és annak időszerűsége

A metaheurisztikus algoritmusokkal kapcsolatos kutatások már a 70-es években megkezdődtek J.H. Holland [1] által bemutatott genetikus algoritmus bevezetésével, s azóta számos további módszer látott napvilágot, melyeket nagy mértékben természeti jelenségek ihlettek. Segítségükkel úgynevezett kvázi-optimális megoldást találni olyan célfüggvények esetén is, melyekre nem létezik zárt alakban felírható összefüggés az optimum pont meghatározására. A metaheurisztikákkal a műszaki gyakorlatban különböző tervező szoftverek használata során lehet találkozni, azok kész funkcióként alkalmazhatók, hogy adott struktúra tetszőleges szempontú karakterisztikáján fejlesztést lehessen végrehajtani.

Disszertációmban bemutatok egy olyan metaheurisztikus algoritmust, mely kifejezetten mérnöki problémák optimalizálására alkalmazható. A bemutatásra kerülő módszert a gravitációs mozgás ihlette, melyet olyan – a szakirodalomban gyakran alkalmazott – célfüggvényeken teszteltem, melyek karakterisztikája hasonló a villamosmérnöki gyakorlatban előforduló optimalizálási feladatokhoz, s összevetettem más széleskörben alkalmazott metaheurisztikus. A módszer hatékonyságát bemutatom a *Jiles-Atherton* hiszterézismodell paramétereinek meghatározása segítségével is, mely optimalizációs szempontból egy egzakt optimum nélküli feladat. A bemutatásra kerülő módszer egy továbbfejlesztett és átdolgozott változatát is ismertetem első tézisem zárásaként, mely egy – az emberi látás által ihletett – könnyedén implementálható és testreszabható módszer.

Bár az elektromágneses kompatibilitás fogalma szinte azóta foglalkoztatja a tudósokat és mérnököket, amióta az elektromosság is, igazán nagy figyelmet azonban csak a 80-as évektől kapott ez a tudományág, amikor rohamtempóban kezdtek el elterjedni a különböző mobilkommunikációs eszközök. A termékfejlesztésnek lépést kellett tartani a változások következményeivel, így a technológia fejlődésével például az elektromágneses kompatibilitás problémák megoldására alkalmazható eszközöket is fejlesztették. Napjainkban ez a tendencia már odáig jutott, hogy egyszerűbb eszközök esetében már virtuális tesztelésről is beszélhetünk.

Második tézisem az elektromágneses kompatibilitás szimulációjának témájában kíván egy olyan megoldást nyújtani, mely a jelenleg elérhető technikákkal szemben talán kompromisszumosnak tűnhet, ugyanakkor gyakorlati szempontból az alkalmazhatósága sokkal széleskörűbb, elektromágneses kompatibilitás fejlesztés szempontjából jóval könnyebben alkalmazható. A pontosság, a szimulációs idő, valamint a szimuláció paraméterezhetősége egyaránt szempont egy EMC szimulációs technika alkalmazhatósága szempontból. A

konvencionális technikákkal szemben a második tézisem olyan módszert mutat be, mely egyszerre képes gyors megoldást nyújtani egy paraméterezhető környezetben, míg a pontossága a vizsgált frekvenciatartomány függvényeként hol kvalitatív, hol pedig kvantitatív. Bemutatom a módszer alkalmazhatóságát DC-DC konverterek 30 MHz feletti sugárzott emissziójának kvalitatív, majd 30 MHz alatti kvantitatív analízisre. A 30 MHz alatti sugárzott emisszió szimulációval kapcsolatosan a részfeladatok és azok megoldása is részletes bemutatásra kerül.

2. Metaheurisztikus optimalizáció

A metaheurisztikus optimalizáció területéhez kötődő tézisem leírása disszertációmban a tématerület részletes bemutatásával kezdődik. Itt kitérek a metaheurisztika történeti áttekintésére, ismertetem a terület tárgyalásához szükséges terminológiákat jelentésükkel, majd bemutatom a gyakorlati szempontból leggyakrabban alkalmazott metaheurisztikus optimalizációs algoritmusokat.

Az újabb-és-újabb metaheurisztikus optimalizációs módszerek fejlesztői nem tesznek különbséget a megoldandó célfüggvények között, azokat egyfajta általánosan alkalmazható módszerként mutatják be. Bár ez igaz is, azonban – a „*There is no free lunch*” [5][6] elmélet értelmében – amelyik módszer egy fajta célfüggvényre tökéletesen alkalmazható, úgy egy másikon már meglehet, hogy ez kevésbé érvényes.

Mérnöki feladatok jelentős részéről az alábbi kijelentéseket lehet tenni:

- Az optimalizációt leíró célfüggvény folytonos
- A célfüggvény nem sztochasztikus jellegű
- Nem szükséges megtalálni a globális minimumot

A disszertációmban bemutatott módszer kidolgozása során kiemelt figyelmet kapott, hogy a villamosmérnöki gyakorlati szempontból érdekes problémákra nyújtson kiemelkedő teljesítményt, figyelmen kívül hagyva az egyéb optimalizációt igénylő problématípusokat.

2.1. Tézis 1.1: Súlyozott Vonzás Módszere

A javasolt eljárás a Súlyozott Vonzás Módszere (*Weighted Attraction Method* – rövidítve WAM) nevet viseli [12]. Ahogy az a nevéből is következik, a módszert ihlető jelenség a gravitációs vonzás elmélete. A részecskék (egyedek) az általuk reprezentált jósági érték függvényében vonzzák a többi részecskét. Ez az erőhatás egy, a célfüggvény egészét bejáró

részecskemozgást generál, és ez a mozgási dinamika használható úgy, mint hatékony kereső technika. A módszer fő lépései a következők:

1. **Inicializálás**: Kezdeti, véletlenszerű kereső részecske eloszlás létrehozása a teljes keresési tartományon.
2. **Vonzási érték számítás**: A részecskék pozíciójában jósági érték számítás, majd annak függvényében egy vonzási faktor hozzárendelése az adott részecskéhez.
3. **Részecskemozgás**: Keresési irány, és lépés méret számítás a korábbi mozgási dinamika és az új erőhatások alapján.
4. **Robbantás**: Térben egymáshoz közeli, jósági értékben kvázi azonos részecskék szétszórása.

Az első lépés csupán az algoritmus futásának legelső ciklusában kerül végrehajtásra. A következő lépések ezután iterálva következnek egymás után addig, míg egy részecske olyan jósági értéket nem mutat, amelyek a keresési kritériumoknak megfelel.

Minden részecske jósági értéke valamilyen függvény, algoritmus vagy szimuláció eredményeképpen előállítható. Ezen jósági értékek függvényében a részecskékhez egy vonzási faktort lehet rendelni, amely faktort egy vonzási függvény határoz meg.

A részecskék mozgása három paraméter függvénye:

1. A részecske aktuális pozíciója,
2. A részecske korábbi mozgási dinamikája,
3. A részecskék összességének tömegközéppontja.

Az eddig bemutatott lépések segítségével az optimalizálás korai szakaszában gyors konvergencia érhető el. Az optimalizáció későbbi szakaszában ez a konvergencia lassulhat, ha a kereső részecskék egy szűkebb tartományra csoportosulnak, például egy lokális minimumhely közvetlen környezetébe.

Az algoritmus beszorulását szükséges kezelni. Amennyiben megállapítható az algoritmus progressziójának megakadása, úgy szükségessé válik részecskék részének vagy egészének szétszórása a célfüggvényen valamilyen logika szerint, például a *Box-Muller-Marsaliga* polár módszer alkalmazásával [29].

A Súlyozott Vonzás Módszere egy olyan metaheurisztikus algoritmus, mely populáció alapú, természet által ihletett, implicit, memóriával rendelkező, nem evolúciós algoritmus.

A bemutatott módszer egy teljesen új és egyedi technika, ugyanakkor más módszerek által ihletett. A felvázolt keresési dinamika hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, mint a Részecskesereg Optimalizáció algoritmus, azonban több ponton attól jelentősen eltér. A részecskék mozgása itt nem lokális és globális legjobb értékek által irányított, hanem azt

ténylegesen az aktuális kereső sereg állapota és a múltbéli keresési trajektória határozza meg. A vonzási függvény pedig egy teljesen új megközelítés a metaheurisztikus algoritmusok világában a keresési dinamika meghatározásához.

A Súlyozott Vonzás Módszere a három talán leginkább elterjedt technikával:

- Genetikus algoritmus,
- Bakteriális evolúciós algoritmus [2][3],
- Részecskesereg optimalizáció [4].

került összehasonlításra a két leggyakrabban alkalmazott tesztfüggvényen:

- 2D *Ackley*-függvény [7],
- 2D *Rosenbrock*-függvény [8].

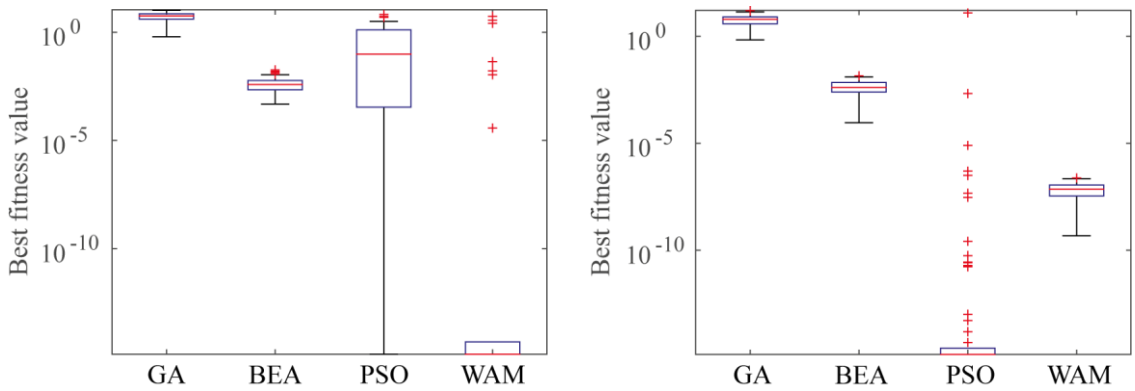
Az optimalizáció mindhárom módszerrel 100-szor került végrehajtásra, mindegyik esetben a számítások az 1000. populációig tartottak. A fenti paraméterekkel két külön teszt is bemutatásra kerül:

a) Optimalizáció végrehajtása 10 részecske- / egyedszámú populációt alkalmazva a $-10 \leq x_1, x_2 \leq 10$ tartományon

b) Optimalizáció végrehajtása 100 részecske- / egyedszámú populációt alkalmazva a $-100 \leq x_1, x_2 \leq 100$ tartományon.

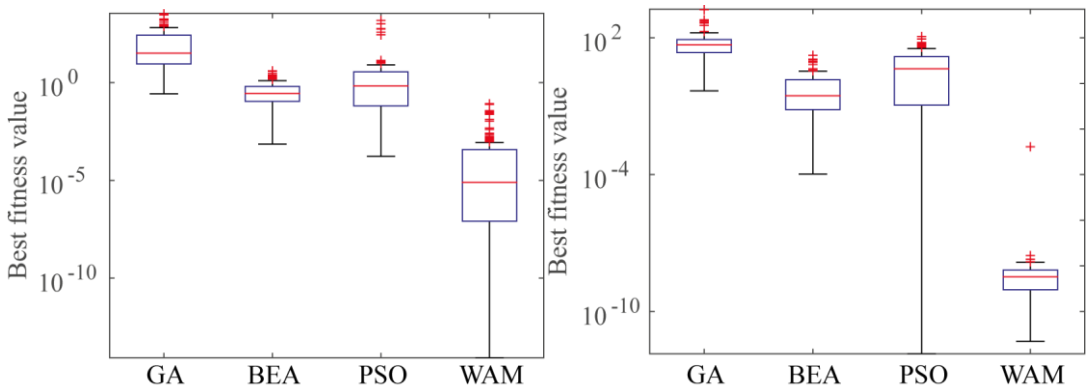
Az algoritmusok így mindegyik esetben 100 különböző eredményt értek el, az elért eredmények jósági értéke box-bajusz diagramon való ábrázolásával az algoritmusok hatékonysága könnyedén összevethető.

Az *Ackley*-függvényen elvégzett összehasonlítás az a) és b) esetben a 1. ábra látható.



1. ábra Optimalizáció *Ackley*-függvényen, a) eset (balra), b) eset (jobbra).

Az algoritmus tesztelésének eredménye *Rosenbrock*-függvény esetén a 1. ábra és a 2. ábra látható.



2. ábra Optimalizáció *Rosenbrock*-függvényen, a) eset (balra), b) eset (jobbra).

A Súlyozott Vonzás Módszere mindkét fenti esetben jobb eredményeket mutatott, kiváltképp a b) esetben, amikor több részecske végez keresést nagyobb tartományon. Nem pusztán a többi algoritmushoz képest mutatott jobb teljesítményt, hanem az a) esethez képest is. Természetesen – a „*There is no free lunch*" elv következményeként – ez nem azt jelenti, hogy a Súlyozott Vonzás Módszere jobb volna a klasszikusnak tekinthető eljárásoknál, csupán azt, hogy az ismertetett, valamint a lefutásukban hasonlóságot mutató célfüggvényeken jobb eredmény várható a bemutatott módszer segítségével a többi eljárással összevetve.

2.2. Tézis 1.2: Súlyozott Vonzás Módszerének alkalmazása a *Jiles-Atherton*-modell paramétereinek meghatározására

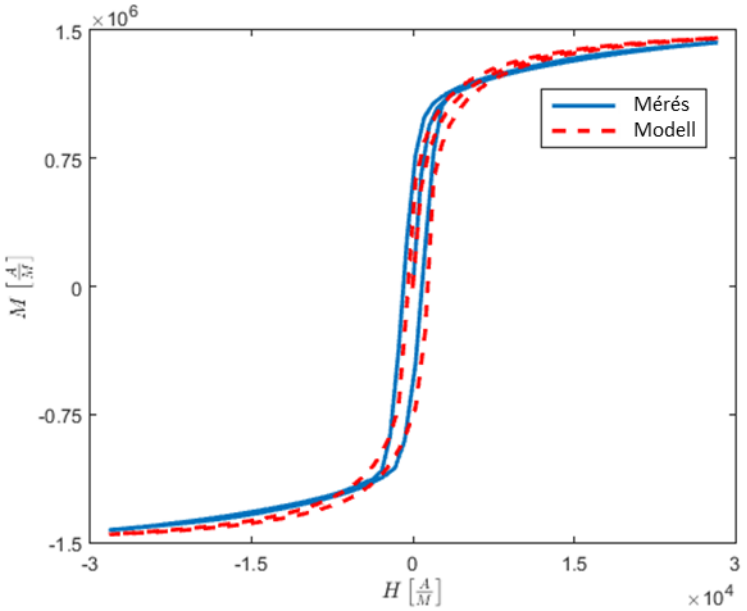
A bemutatott eljárás villamosmérnöki alkalmazását egy speciális feladat megoldásán keresztül ismertetem, mely melynek analitikus megoldására nem létezik formula az irodalomban.

A *Jiles-Atherton*-modell David Jiles és David Atherton írták le az 1984-ben megjelent cikkükben, mely a ferromágneses hiszterézis modellezését a mágneses domének mozgására és az energia egyensúlyra alapozza [9]. A *Jiles-Atherton*-modell egy olyan differenciálegyenlet, mely a hiszterézises, és a hiszterézismentes viselkedés közötti különbséget írja le.

A *Jiles-Atherton*-hiszterézismodell paramétereinek meghatározására számos kísérlet található a szakirodalomban [10][11][17]. Mivel a *Jiles-Atherton*-hiszterézismodellt négy egyenlet és öt paraméter írja le, ezért nem lehet azokat paraméterenként zárt alakban meghatározni, emiatt pedig a paraméterek kizárólag iterációs úton identifikálhatók.

A Súlyozott Vonzás Módszere könnyedén alkalmazható az kvázi-optimális modellparaméterek meghatározására. A *Jiles-Atherton* hiszterézismodell segítségével nem lehetséges tökéletesen lekövetni mért hiszterézis karakterisztikát. Ennek következménye

optimalizációs szempontból az, hogy nem lehet egyértelműen meghatározni azt a jósági küszöbértéket, mely elérhető az optimalizáció során. Emiatt az optimalizáció kilépési feltétele 100 iterációs ciklus elérésében lett meghatározva. A 100 iterációs ciklus után elért legjobb közelítés a 3. ábra látható.



3. ábra A legjobb paraméterkészlet által meghatározott hiszterézisgörbe illeszkedése a mért karakterisztikához.

A legjobb egyezést adó hiszterézisgörbe a mért karakterisztikának kielégítő közelítése, azonban az is nyilvánvaló az ábra alapján, hogy ez az eredmény korántsem tekinthető a mért karakterisztika pontos leképezésének.

A legjobb közelítést biztosító paraméterkészlet értékek az alábbiak:

- $M_s = 1.57 \cdot 10^6 A/m$
- $\alpha = 4.3 \cdot 10^{-3}$
- $a = 3575\ A/m$
- $k = 2466\ A/m$
- $c = 0.823$

2.3. Tézis 2: Emberi látás ihlette metaheurisztikus optimalizáció

A Súlyozott Vonzás Módszere a korábbiakban bemutatottak alapján bizonyítottan megállja a helyét a metaheurisztikus optimalizációs algoritmusok világában. A tapasztalatom az algoritmus működésével ugyanakkor az, hogy – a PSO-hoz hasonlóan – képes beszorulni egy lokális minimum völgyébe. Ennek kiküszöbölésére szolgál a módszer által alkalmazott „robbantás” lépése. Bár ez idővel képes az algoritmus futását kijuttatni a lokális minimum

környezetéből ennek dinamikája hordozott magával fejlesztési potenciált. Az algoritmusok beszorulása ellen egy általánosan alkalmazható megoldáson dolgoztam, melyet szintén ebben a fejezetben mutatok be. A módszer az egyszerűség kedvéért az EYE nevet viseli, mely az „Explore with Your Eyesight" kifejezés rövidítése.

Ha az ember a tekintetével keres egy jól meghatározott paraméterekkel leírható területet (pl. legsötétebb, legvilágosabb stb.), a feladatot az emberi látás két különböző technika együttes használatával hajtja végre:

- Binokuláris látómezőben a két szem fókuszál egy adott térrészre, így az ezen térrészben található környezet a legélesebb az emberi látás szempontjából. Ez optimalizációs szempontból tekinthető lokális keresésnek.
- Perifériás látás a fókuszált látómezőn kívülről bár kevés részletet képes már feldolgozni, folyamatosan szolgáltatja az információt az emberi agy számára a fókuszált látómezőn kívüli térrészről. Ez optimalizációs szempontból tekinthető globális keresésnek.

A fentiek alapján egy egyszerűen implementálható optimalizációs eljárás került kidolgozásra [18]. A módszer lényege, hogy a kereső részecskéket két különálló, de egymással interakcióban levő csoportra osztja. Az első csoport felelős a fókuszálásért, ezáltal a lokális keresésért, míg a másik a perifériás látásért, tehát a célfüggvény globális feltérképezéséért felel.

A részecskék elosztása a célfüggvényen a Súlyozott Vonzás Módszeréhez hasonló abban az értelemben, hogy a részecskék új pozíciójának meghatározása a *Box-Muller-Marsaglia*-módszer szerint történik. A különbség a módszer $\boldsymbol{\mu}$ (várható érték vektora) és $\boldsymbol{\sigma}$ (szórás) paramétereinek megválasztásában rejlik.

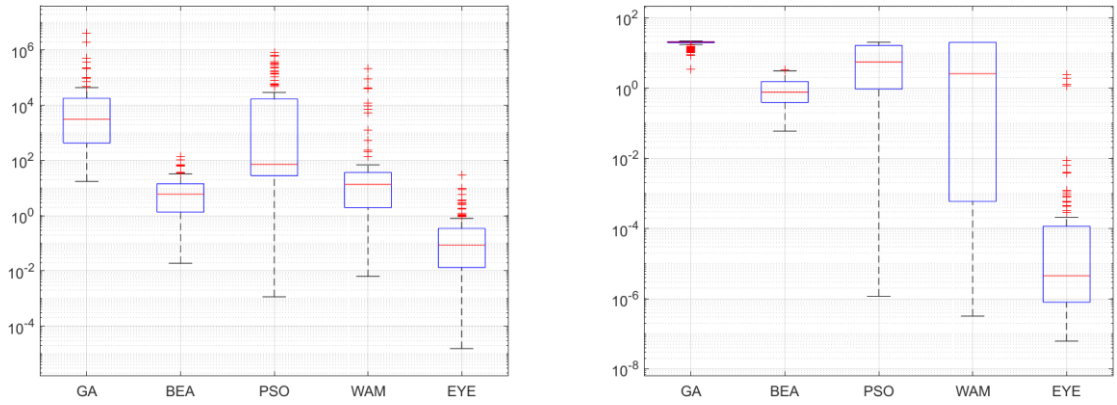
A $\boldsymbol{\sigma}$ értékét az algoritmus a futása során adaptívan változtatja a konvergencia sebességének növelése érdekében. Túl nagy $\boldsymbol{\sigma}$ esetén a kereső részecskék elosztása túl nagy tartományon értelmezett, túlságosan kis $\boldsymbol{\sigma}$ érték pedig csak egy szűk tartomány vizsgálatára ad lehetőséget. A fókuszált és a perifériás látásért felelős részecskékre értelemszerűen külön $\boldsymbol{\sigma}$ érték alkalmazása szükséges. A fókuszált látásért kis, míg a perifériás látáshoz nagy $\boldsymbol{\sigma}$ értéket szükséges választani. Az algoritmus iterációi során $\boldsymbol{\mu}$ és $\boldsymbol{\sigma}$ értéke adaptívan módosul.

A látás ihlette metaheurisztikus optimalizációs eljárás hatékonysága a korábban bemutatott *Ackley*- és *Rosenbrock*-függvényeken keresztül kerül bemutatásra. Összevetéshez az optimalizációk GA, BEA, PSO, és Súlyozott Vonzás Módszerével is végre lettek hajtva, a következők szerinti tesztparaméterekkel:

a) Optimalizáció 10 kereső egyeddel a $-10 \leq x_1, x_2 \leq 10$ tartományon
b) Optimalizáció 20 kereső egyeddel a $-100 \leq x_1, x_2 \leq 100$ tartományon

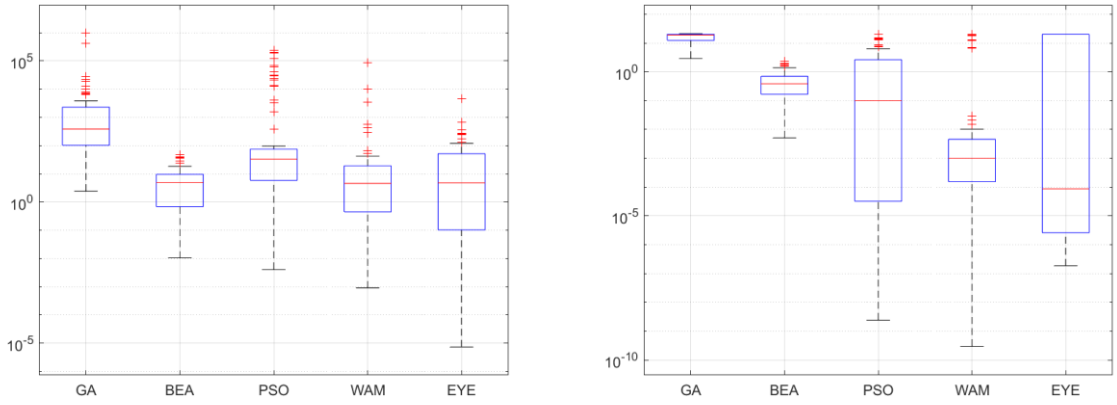
Az optimalizáció kilépési feltétele 50 optimalizációs iteráció elérése. Az eredmények box-bajusz diagramon kerülnek összehasonlításra. A lenti ábrákon a módszer eredményeit az EYE nevű oszlop mutatja, míg a függőleges tengely az optimalizáció során elért jósági értéket mutatja logaritmikus skálán.

Az optimalizáció eredményét az a) esetben a 4. ábra és 5. ábra mutatja.



(a) (b)

4. ábra Optimalizációs eredmények összevetése a) esetben. (a): *Rosenbrock*-függvény; (b): *Ackley*-függvény



(a) (b)

5. ábra Optimalizációs eredmények összevetése b) esetben. (a): *Rosenbrock*-függvény; (b): *Ackley*-függvény

A fenti eredmények alapján kijelenthető, hogy az emberi látás ihlette, a Súlyozott Vonzás Módszerére építkező metaheurisztikus módszer képes sima, és hullámzó karakterisztikájú célfüggvények esetén is kielégítő hatékonyságot mutatni, és versenyképes alternatíva tud lenni a referencia algoritmusokkal szemben.

3. DC-DC *buck* konverter EMC szimuláció

Második tézisem az autóiparban előszeretettel alkalmazott DC-DC *buck* konverterek elektromágneses kisugárzásának szimulációs technikáinak fejlesztéséről szól, mely egy könnyen és hatékonyak alkalmazható alternatívát kíván nyújtani az elektromágneses kompatibilitás (EMC) fejlesztésével foglalkozó mérnökök számára.

Mivel a fejlesztés korai szakaszában gyakran még prototípus sem áll rendelkezésre, melyeken EMC vizsgálatokat lehetne végezni, ezért szükségszerű virtuális tesztelési technikákat alkalmazni az EMC fejlesztés során. EMC analízis önálló végzése szimulációs technikákkal magas szintű felkészültséget igényel térszimulációs módszerek és elektromágneses térelméletet tekintve egyaránt.

Bár az autóipari elektrifikáció a következő állításomat épp napjainkban írja felül, az autóakkumulátor alapesetben egy ~13 V feszültséget biztosító tápegység. Az egyes modulok számára azonban ez a feszültségszint nem megfelelő a működésükhöz, emiatt az akkumulátor feszültségének átalakítása szükséges. A *buck* konverterek segítségével a feszültségátalakítás nagy hatásfok mellett elvégezhető, ennek azonban az az ára, hogy a *buck* konverterek által létrehozott elektromágneses zavarok a leggyakoribb előidézői a sugárzott emissziós bukásnak. Egyes frekvenciatartományokon különböző módokon jön létre a határértékeket meghaladó elektromágneses sugárzás [19][20][23]:

- A kapcsolt csomópont (beleértve a kimeneti induktivitás tekercsét) és a mérőantenna közötti kapacitív csatolás, tipikusan 30 MHz alatti frekvenciatartományon,
- A kapcsolási hurok rezonanciája, alkalmazástól függően tipikusan 50 – 250 MHz között.

Elektronikai eszközök EMC szimulációjához szinte kizárólagosan koszimulációt alkalmaznak, s különösen igaz ez a vizsgálati és szimulációs frekvenciatartomány emelésével. A szimulációs módszertan azonban jelentősen eltérhet annak függvényében, hogy mely esetben milyen minőségű szimulációra van szükség. EMC koszimulációra alapvetően két technikát alkalmaznak az EMC szimulációs fejlesztőmérnökök:

- Tranziens koszimuláció [25][28]
- Mérés alapú AC szimuláció [26][27]

3.1. Tézis 2.1: Két lépéses kombinált kisjelű szimulációs eljárás

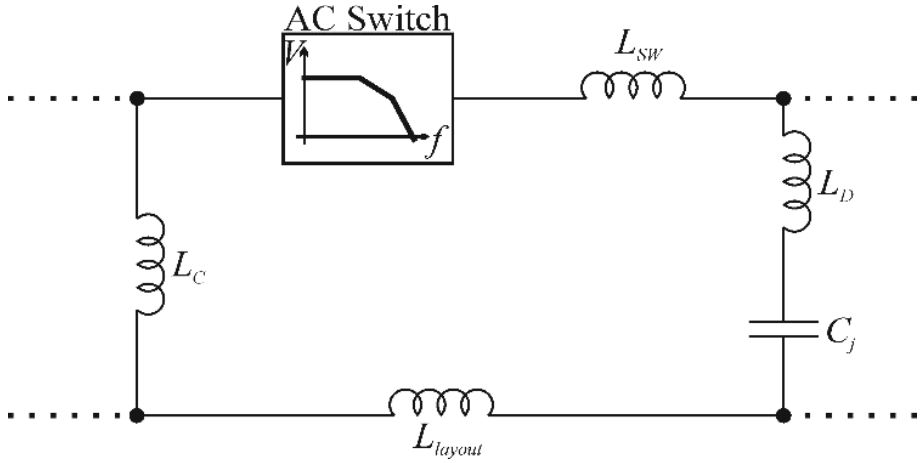
A tézis célja egy olyan módszer bemutatása, amely a tranziens és a mérés alapú kisjelű koszimulációs módszerek hátrányait kiküszöbölve elfogadható, adott esetben akár kvantitatívan helyes megoldást szolgáltat. EMC fejlesztés szempontjából egy módszer minél jobban megfelel a következő feltételeknek, annál kényelmesebben és hatékonyabban alkalmazható:

- Eredmények lehető leggyorsabb előállítása,
- Parametrikus analízis lehetősége,
- Megfelelően pontos eredmény szolgáltatása.

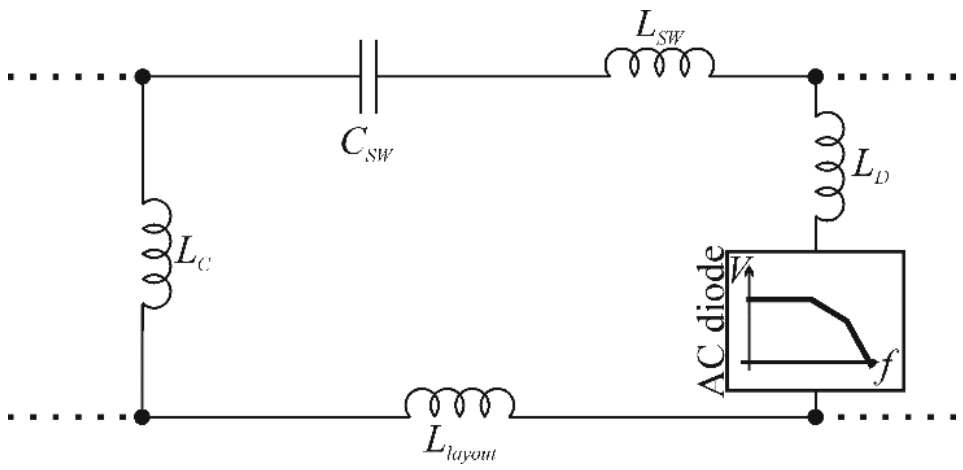
A kapcsolási hurok rezonanciájának hatása nélkül egy trapézjel alakú közelítés adható meg, hiszen a kapcsolási jel kitöltési tényezője, a felfutási idő, valamint a lefutási idő a funkcionalitás, valamint a kapcsolójel vezérlő áramkör függvénye [19][23].

A kapcsolási hurok rezonanciák mesterséges figyelembevételéhez két külön kisjelű szimuláció futtatása szükséges:

- AC gerjesztés a *high-side* kapcsoló pozíciójában a hozzá tartozó kapcsolójel spektrummal, míg a *freewheeling* dióda C_j parazita kapacitással van figyelembe véve (lásd a 6. ábra),
- AC gerjesztés a *freewheeling* dióda pozíciójában a hozzá tartozó kapcsolójel spektrummal, míg a *high-side* kapcsolóelem C_{SW} parazita kapacitással van figyelembe véve (lásd a 7. ábra).



6. ábra Gerjesztés a *high-side* kapcsoló pozíciójában.

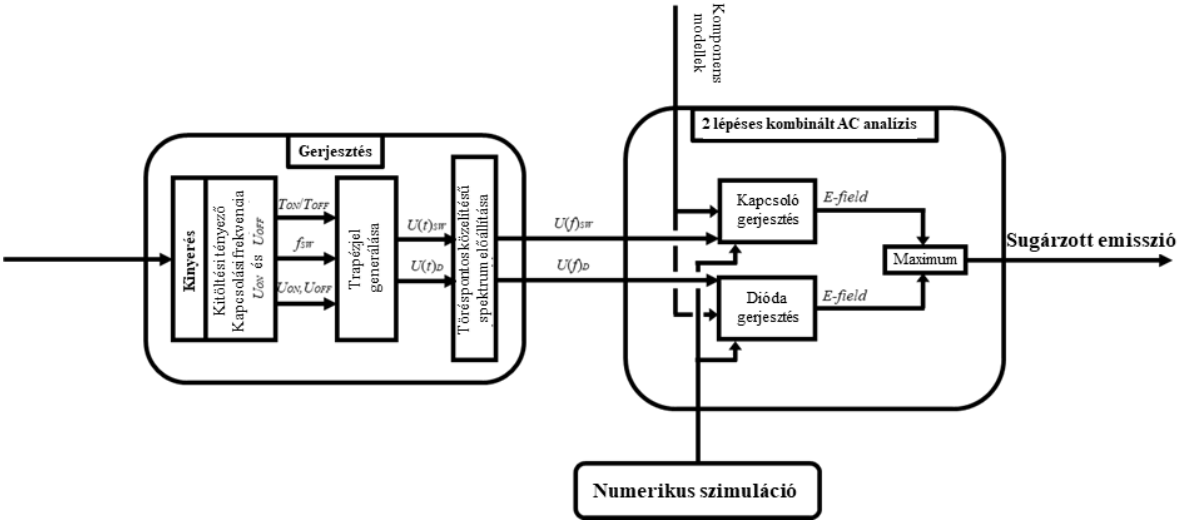


7. ábra Gerjesztés a *freewheeling* dióda pozíciójában.

A módszer paraméterezhetősége a mesterségesen előállított rezonancia trapézjellel történő gerjesztéséből adódik. A mérés alapú AC analízis esetében a gerjesztő jel már tartalmazza az adott áramköri környezet hatását, s így annak módosítása a modellben nem végrehajtható, hiszen így a rezonanciát tartalmazó jel egy másik rezonáns környezetet gerjesztene. Mérési elv értelmében, valamint a kapcsolási tranziensek elhagyása révén a javasolt módszer a két külön gerjesztés hatására létrejövő elektromos tér maximumát tekinti a szimulált sugárzott emissziónak.

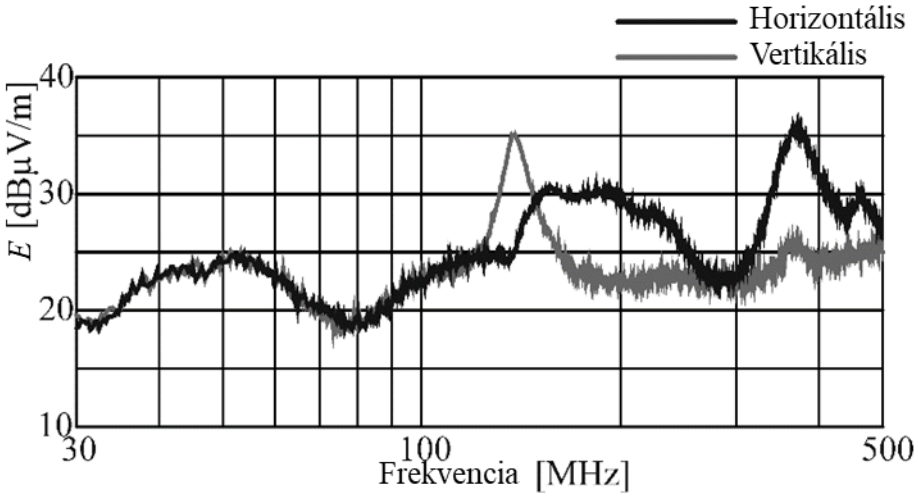
3.2. Tézis 2.2: DC-DC konverterek emissziójának kvalitatív szimulációja

A nagyfrekvenciás emisszió szimulációja esetén a kétlépéses kombinált kisjelű analízis folyamatát a 8. ábra lehet követni. Mivel a kapcsolási tranziens munkapontfüggő, ezért a jelenség viselkedésének kvantitatív szimulációja nem lehetséges kisjelű analízissel [21].



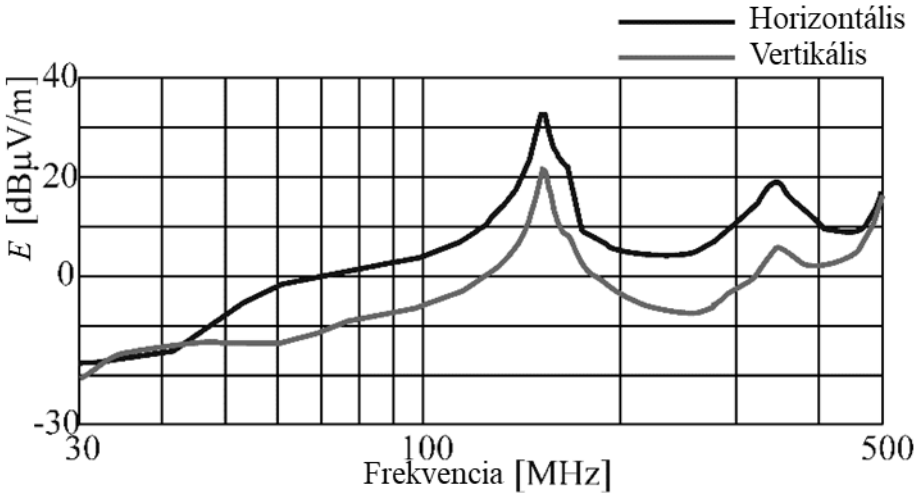
8. ábra A bemutatott módszer alkalmazásának folyamata nagyfrekvenciás analízis esetén.

A nyers emissziós méréseket a referencia PCB-től 1 méterre elhelyezett bikónikus – logaritmikusan periodikus antennával végeztem el, horizontális és vertikális antenna polarizációban egyaránt. Az emissziómérés eredményét a 9. ábra mutatja, feketével a horizontális, szürkével a vertikális antenna polarizációval mért emissziós karakterisztika látható.



9. ábra A vizsgált *buck* konverter nyers emissziója két antennapolarizációval mérve.

A sugárzott nyers emisszió szimuláció eredménye – a méréssel azonosan – két antenna polarizációban a 10. ábra látható. Tisztán kivehető a 100 – 200 MHz frekvenciatartományon a kapcsolási hurok rezonanciája által okozott szélessávú emissziós csúcs.



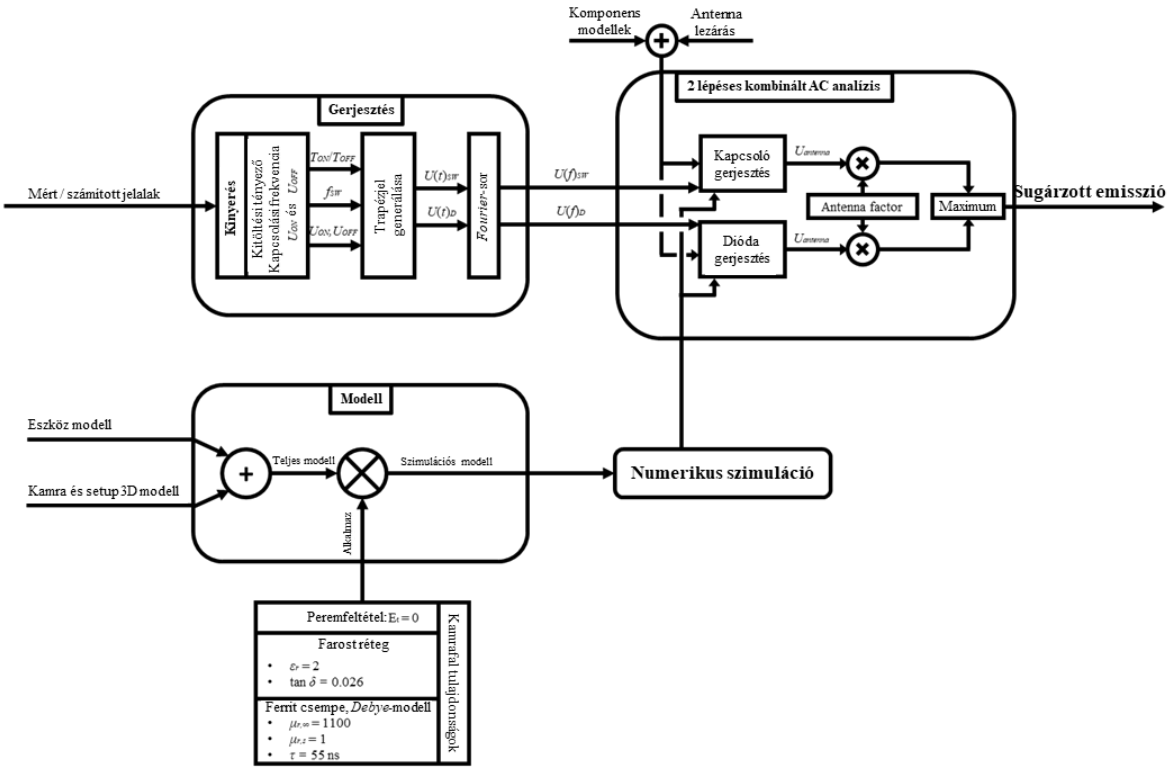
10. ábra Szimulált nyers emisszió két polarizációban vizsgálva.

A mért és szimulált eredményeket összevetve az tapasztalható, hogy a szimulált karakterisztika a mértet nem értékhelyesen, de jellegre jól követi a mérés során tapasztaltakat, a szimulációs modell tehát validáltnak tekinthető. Az áramköri és PCB szinten végrehajtott

módosítások hatására a validált szimulációs modell a valóságossal jellegre megegyező karakterisztikájú változást mutat az emissziós viselkedésben. A mérésben látszódó emissziós csúcsok a módszer alkalmazásával detektálhatók, s mivel a paraméterezett analízis megengedhető a bemutatott szimulációs technika használatával, az EMC fejlesztői munka így jelentősen könnyíthető és gyorsítható.

3.3. Tésiz 2.3: DC-DC konverterek emissziójának kvantitatív szimulációja

Az alacsony frekvenciás emisszió esetében szükséges a tesztelrendezés hatásainak modellezése (melyet a CISPR 25 autóipari alapszabvány definiál [24]), mivel az jelentősen befolyásolja a szimuláció eredményét, ugyanakkor a vezetékezés rezonanciája még nem játszik szerepet az emissziós karakterisztika kialakításában. Így a korábban bemutatott folyamatábra az alábbira módosul 30 MHz alatt.

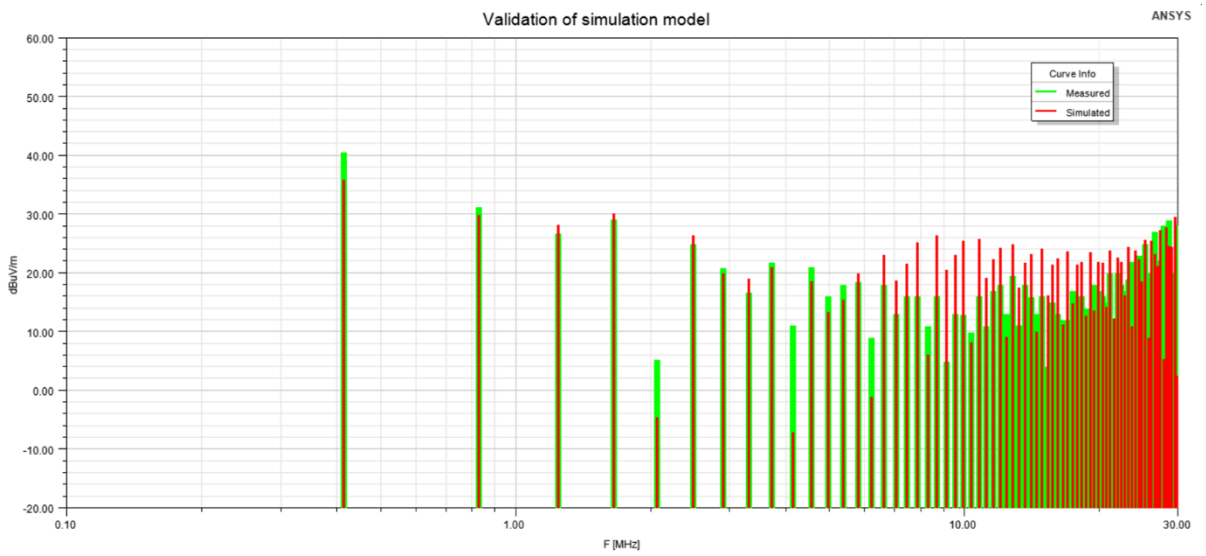


11. ábra A bemutatott módszer alkalmazásának folyamata kisfrekvenciás analízis esetén.

30 MHz alatti frekvenciatartmányon a domináns csatolási mechanizmus a kapacitív csatolás [22][23], ami nem függ a munkaponttól, ezért kvantitatív szimulációra is lehetőség nyílik.

A mért és szimulált 30 MHz alatti sugárzott emisszió összevetése a 12. ábra látható. A szimulált sugárzott emissziós karakterisztika kiválóan illeszkedik a mért eredményhez, a

különbség a legtöbb frekvenciaponton a tipikus 3 dB körüli mérési bizonytalanságon belül található.



12. ábra A mért és szimulált sugárzott emisszió összevetése.

4. Összefoglaló

A disszertációm első felében a metaheurisztikus optimalizáció területén végzett kutatási eredményeimet mutattam be. Először bemutattam a metaheurisztikus módszerek elméleti hátterét, és a tématerületen alkalmazott terminológiákat. Ezután bemutattam az első tézis alapjául szolgáló Súlyozott Vonzás Módszerét, mely alapját a vonzási függvény alapú újszerű technika jelenti. A módszer hatékonyságát összevetettem a legnépszerűbb eljárásokkal a szakirodalomból jól ismert tesztfüggvényeken. Az eredmények tükrében a bemutatott módszer egy versenyképes eljárás folytonos optimalizációs problémák megoldására. A módszer segítségével eredményesen határoztam meg a *Jiles-Atherton*-hiszterézismodell paramétereit, mely alátámasztja a mérnöki gyakorlatban való alkalmazhatóságot. Az első tézis zárásaként bemutattam az eljárás egy továbbfejlesztési lehetőségét, mely ötvözi a Súlyozott Vonzás Módszerét a sztochasztikus lokális és globális keresés alapú fókusz logikával. Az összevetés eredménye alapján az új technikával a vizsgált tesztfüggvényeken további javulás értem el.

A disszertációm második felében az elektromágneses kompatibilitás szimulációs vizsgálatának területén végzett kutatási eredményeimet ismertettem. Az elektromágnesesség és az elektromágneses kompatibilitás elméleti áttekintése után bemutattam a state-of-the-art technikákat *buck* konverterek emissziójának virtuális tesztelésére. Ezek után ismertettem a kidolgozott szimulációs eljárást, mely az elérhető technikák hátrányait (szimulációs sebesség,

paraméterezhetőség, pontosság, mérnöki alkalmazhatóság) hivatott kiküszöbölni. A bemutatott módszer egy könnyedén alkalmazható kisjelű analízist használó technika, mely a nagyfrekvenciás viselkedés csupán kvalitatív pontosságáért cserébe paraméterezhető technikát nyújt az EMC fejlesztés számára. A második tézis gerincét jelentő technikát és szimulációs munkafolyamatot egy tetszőleges kapcsoló IC próbapaneljének kvalitatív nagyfrekvenciás és kvantitatív kisfrekvenciás szimuláció mentén mutattam be. A bemutatott eredmények szerint a módszer segítségével a *buck* konverter emissziós karakterisztikája jól követhető és tervezhető, sőt, alacsony frekvenciás emissziós karakterisztika esetén pedig akár pontos eredmény is kinyerhető a technika alkalmazásával. Az általam kidolgozott eljárás gyors, könnyen alkalmazható és paraméterezhető, ezáltal pedig hatékonyan integrálható EMC fejlesztési folyamatba.

A jövőben tervezem az első tézis tekintetében a technikák további alkalmazását a villamosmérnöki gyakorlatban, pl. passzív mikrohullámú eszközök és tetszőleges antennastruktúrák többcélú optimalizálására. A cél a bemutatott optimalizációs módszerek paramétereinek optimalizálása, s ezáltal nagyfrekvenciás tervezéshez történő illesztése. Különösen izgalmas kérdés, hogy memetikus algoritmussá alakítás esetén a bemutatott módszer milyen hatékonyan tud együttműködni egy lokális kereső eljárással, illetve szükséges-e módosítás a gyorsabb konvergencia elérése és a minimális számú célfüggvény kiértékelés érdekében.

A második tézisben bemutatott szimulációs technika további alkalmazása szükséges. Ennek célja, hogy annak alkalmazhatóságának feltételeit meghatározzam, tehát milyen típusú gerjesztések és áramköri környezetek esetén biztosít megfelelő eredményt, és mely esetekben jár a módszer alkalmazása olyan szintű elhanyagolással, hogy már az emissziós karakterisztika jellegét sem követi le a szimulált spektrum. Villamos motorok H-híd hajtásához és digitális kommunikációs csatornák által létrehozott zavarok meghatározásához alapvetően alkalmazhatónak tartom a bemutatott kisjelű modellezést, viszont további kutatást igényel ezek részletes vizsgálata.

Az optimalizációs eljárás és a szimulációs módszertan olyan ötvözetet alkothat, mely EMC problémák megoldására egyszerre nyújt rövid szimulációs időt és kis lépésszámú optimalizációt, mely a hosszadalmas EMC fejlesztési folyamatot képes volna csökkenteni, ezáltal számítási kapacitást és erőforrást megtakarítva. Ennek implementálása is része a jövőbeli terveknek.

5. Tézisek összegzése

1. Tézis

Kutatásom során olyan metaheurisztikus algoritmust dolgoztam ki, melynek alkalmazási területe a villamosmérnöki tervezési feladatok által leírt célfüggvényekhez illeszkedik elsősorban. A módszer alkalmazását végrehajtottam és bemutattam olyan villamosmérnöki problémára, melyre az irodalomban nem létezik egzakt megoldás. A bemutatott módszert továbbfejlesztettem, s tesztfüggvényeken bemutattam a módszer teljesítőképességét.

(a) Bemutattam a Súlyozott Vonzás Módszerét, melyet a gravitációs mozgás elmélete ihletett. A módszer magját az újonnan bevezetett vonzási függvény adja, mely egy újszerű megközelítés a metaheurisztikák területén. A módszer hatékonyságát választott célfüggvényeken bemutattam, s összevetettem széleskörben alkalmazott metaheurisztikus optimalizációs módszerekkel. A módszer hatékonysága a választott célfüggvényeken kiemelkedő a referenciaként használt módszerekéhez képest.

(b) A Súlyozott Vonzás Módszerét hatékonyan alkalmaztam a *Jiles-Atherton*-hiszterézismodell paramétereinek meghatározásához, melynek pontos értékeinek meghatározására analitikus módszer nem létezik az irodalomban. A módszer alkalmazása segítségével olyan paraméterkészletet kaptam, mely mért karakterisztikát jellegre és értékre helyesen követi le.

A tézishez tartozó publikációk: [12][15][16].

2. Tézis

Kidolgoztam egy új, emberi látás tulajdonságait alapul vevő metaheurisztikus optimalizációs módszert. A bemutatott fókusz-logika segítségével egy olyan könnyedén implementálható algoritmust fejlesztettem, mely globális és lokális keresés során egyaránt hatékony, adaptív paramétermegválasztással pedig személyre szabható. A módszer a sztochasztikus optimalizációs eljárások családjába hoz újszerű megközelítést, mely segítségével a bemutatott célfüggvényeken versenyképes optimalizációs teljesítőképességet mutatott.

A tézishez tartozó publikációk:[18].

3. *Tézis*

Az elektromágneses kompatibilitás fejlesztési céllal végzett numerikus térszimulációk a mai napig rendkívül erőforrásigényesek, és általában egy adott termék fejlesztése során nem is csupán egy problémát szükséges megoldani. A fejlesztési folyamatok időbeli feszítettsége miatt szükséges olyan technikák kidolgozása, melyek fókuszában a szimulációs erőforrások hatékony felhasználása mellett a paraméterezhetőség és a pontos szimulációs eredmények találhatók. Az EMC problémák leggyakoribb okozója, a kapcsolóüzemű tápegységek hatékony és gyors szimulációjára dolgoztam ki módszert, mely a szakirodalomban található tranziens-, illetve mérés alapú kisjelű analízist alkalmazó módszerekhez képest egyszerre képes gyorsan, megbízható és pontos eredményt szolgáltatni a paraméterezhetőség biztosítása és a könnyű implementálhatóság mellett.

(a) Kidolgoztam a kombinált kétlépéses kisjelű analízist kapcsolóüzemű tápegységek emissziójának szimulációjához, mely kisjelű analízist alkalmazva egy gyorsan paraméterezhető módszert jelent, ami könnyedén és hatékonyan alkalmazható termékfejlesztés során.

(b) Kidolgoztam a módszer alkalmazhatóságát nagyfrekvenciás sugárzott emissziós probléma megoldására. A referencia áramkör szimulált sugárzott emissziója kvalitatív közelítése a mért karakterisztikának, minden emissziós szempontból fontos tulajdonságot hordoz a szimulációs eredmény. Meghatároztam a nagyfrekvenciás alkalmazhatóság korlátait, illetve lokalizáltam annak okait. Kidolgoztam a módszer alkalmazásához szükséges részletes munkafolyamatot.

(c) Kidolgoztam a módszer alkalmazhatóságát kisfrekvenciás automotív sugárzott emissziós probléma megoldására. A referencia áramkör virtuális tesztelése kvantitatív közelítése a mérési eredményeknek, azokat széles frekvenciatartmányon mérési hibán belül közelíti. Meghatároztam és lokalizáltam az alacsony frekvenciás alkalmazhatóság korlátait. Részletesen kidolgoztam a 30 MHz alatti virtuális sugárzott emisszió tesztelés lépéseit.

A tézishez tartozó publikációk: [13][14].

6. Irodalomjegyzék

[1] J. H. Holland, „Adaption in Natural and Artificial Systems”, University of Michigan Press, Massachusetts, 1975.

[2] N. E. Nawa, T. Hashiyama, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, „Fuzzy Logic Controllers Generated by Pseudo-Bacterial Genetic Algorithm”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 2408—2413, Houston, 1997. DOI: 10.1109/ICNN.1997.614446

[3] N. E. Nawa, T. Furuhashi, „Fuzzy system parameters discovery by bacterial evolutionary algorithm”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 7, no. 5, pp. 608-–616, 1999. DOI: 10.1109/91.797983

[4] J. Kennedy, R. Eberhart, „Particle swarm optimization”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-–1948, Perth, 1995. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968

[5] D. H. Wolpert, W. G. Macready, „No Free Lunch Theorems for Optimization”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 1, no. 1, pp. 67–82, 1997. DOI: 10.1109/4235.585893

[6] J. McDermott, „When and Why Metaheuristics Researchers can Ignore “No Free Lunch” Theorems”, SN Computer Science. vol. 1, no. 60, 2020.

[7] D. H. Ackley, „A connectionist machine for genetic hillclimbing”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1987.

[8] H. H. Rosenbrock, „An automatic method for finding the greatest or least value of a function”, The Computer Journal, vol. 3, pp. 175–184, 1960. DOI: 10.1093/comjnl/3.3.175

[9] D. C. Jiles, D. L. Atherton, „Ferromagnetic hysteresis”, IEEE Trans. Magn., vol. 19, pp. 2183–2185, 1983.

[10] D. C. Jiles, J. B. Thoelke, „Theory of ferromagnetic hysteresis: Determination of model parameters from experimental hysteresis loops”, IEEE Trans. Magn., vol. 25, no. 5, pp. 3928–3930, 1989.

[11] P. Kis, „Jiles-Atherton Model Implementation to Edge Finite Element Method”, PhD dissertation, Budapest University of Technology and Economics, 2007.

[12] G. Friedl, „A New Metaheuristic Optimization Algorithm, the Weighted Attraction Method”, Acta Technica Jaurinensis, Győr, Hungary, vol. 8, no. 2, pp. 257-266, 2015.

[13] G. Friedl, P. Prukner, M. Kuczmann, “Qualitative small-signal analysis of DC-DC buck converter’s radiated emission”, 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, pp. 103-108, 2021.

[14] G. Friedl, M. Kuczmann, „Quasi-quantitative combined small signal analysis to predict radiated emission of DC-DC buck converters”, *megjelenés alatt*.

[15] G. Friedl, M. Kuczmann, „Population and gradient based optimization techniques, a theoretical overview”, Acta Technica Jaurinensis, Győr, Hungary, vol. 7, no. 4, pp. 378-387, 2014.

[16] G. Friedl, M. Kuczmann, „Identification of scalar Jiles-Atherton hysteresis model parameters with a new particle behaviour based metaheuristic algorithm”, Przeglad Elektrotechniczny, vol. 12, pp. 87-90, 2015.

[17] G. Friedl, M. Kuczmann, „Identification of Jiles-Atherton hysteresismodel parameters from measured datas”, 4th Symposium on Applied Electromagnetics, pp. 75-76, 2012.

[18] G. Friedl, M. Kuczmann, „A novel focus logic infused metaheuristic optimization approach based on swarm movement and human eye behavior”, IEEE 1st International Conference on Internet of Digital Reality, *megjelenés alatt*.

[19] M. K. Kazimierczuk, “Pulse-width modulated DC-DC power converters”, Wiley, Dayton, Ohio, 2008.

[20] T.-F. Wu, “The origin of converters”, in 2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Tainan, 2013, pp. 611-617.

[21] Richtek, Application Note 045, “Reducing EMI in buck converters”, 2016.

[22] Murata, “EMI solution for DC/DC converter”, 2016.

[23] E. Darie, E. Darie, "EMI Problems associated with DC-DC Converters", Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems, pp. 232-235, 2007.

[24] CISPR 25: Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics for Protection of Receivers Used on Board Vehicles ,3rd ed.”, Geneva, Switzerland IEC, 2008.

[25] S. Niedzwiedz, S. Frei, “Transient emission analysis of EV- and HEV-powertrains using simulation”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 247-252, 2013.

[26] S. W. Ng, S. C.Wong and Y. S. Lee, “Small signal simulation of switching converters”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 46, No. 6, pp 731-739, Jun. 1999.

[27] P. Hillenbrand, M. Böttcher, S. Tenbohlen, J. Hansen, “Frequency-domain EMI-simulation and resonance analysis of a DCDC-converter”, EMC Europe, Wroclaw, Poland, 2016, pp. 176-181.

[28] P. Hillenbrand, M. Beltle, S. Tenbohlen, J. Hansen, “Transient co-simulation of electromagnetic emission caused by a SiC traction inverter”, 2017 International Symposium on Ele tromagnetic Compatibility – EMC EUROPE, pp. 1-6, 2017.

[29] G. Marsaglia, T. A. Bray, „A Convenient Method for Generating Normal Variables”, SIAM Review, vol. 6, no. 3, pp. 260–264, 1964.