



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék

ÖSSZETETT SZIGETELÉSI RENDSZEREK
OPTIMALIZÁLÁSA

NAGYTRANSZFORMÁTOROK TERVEZÉSE ESETÉN

Tézisfüzet

Orosz Tamás

Témavezető: Dr. Tamus Zoltán Ádám

Budapest

2017

1. Bevezetés

1.1. A kutatás előzményei

Nagytranszformátorok tervezése összetett, multidiszciplináris feladat. A kiélezett piaci verseny miatt nagy nyomás nehezedik a villamosberendezéseket és -gépeket tervező mérnökökre. A nagytranszformátorok szigetelési rendszerének méretezésével foglalkozó irodalmakban a minimális szigetelési távolság meghatározásán van a hangsúly [1–3]. Azonban a tervezési folyamat során számos villamos, mechanikai és termikus jellemzőt kell az előírásoknak, illetve a különböző igénybevételeknek megfelelően kialakítani. Mindemellett, a versenyképesség szempontjából, fontos a gazdasági szempontok figyelembevétele a tervezőmunka során [4]. Az adott gazdasági környezethez jól illeszkedő, költség-optimális nagytranszformátor konstrukció paramétereinek a meghatározása bonyolult feladat, a legáltalánosabb matematikai optimalizálási problémák családjába tartozik. Ezért a mérnöki gyakorlatban a tervezés folyamatát több optimalizálási rész-problémára és szakaszra bontják. A klasszikus villamosgép-tervezői megközelítés a következő három szakaszt különbözteti meg [5]:

- Előzetes vagy ajánlati tervezési szakasz, amely során egy egyszerűsített modellen keresztül határozzák meg az előírásoknak és az igénybevételeknek megfelelő költség-optimális konstrukció fő tervezési paramétereit, azaz kulcsparamétereit.
- Végleges tervezési szakasz, amely az előzetes tervezésben kapott, fő tervezési paraméterek által meghatározott terv teljes részletességgel való kidolgozása.
- Ellenőrzési szakasz, mely során egy másik tervező ellenőrzi a végleges tervet.

A kutatás során kizárólag az előzetes tervezési szakaszhoz tartozó optimalizálási problémákkal foglalkoztam. Az ajánlati tervezés során a legnagyobb nehézséget az okozza, hogy az éles piaci verseny miatt nagyon rövid idő alatt kell egy nemcsak technikai, hanem gazdaságossági szempontoknak is megfelelő, transzformátor kulcs-paramétereit megtalálni, mely alapján a megrendelő számára versenyképes ajánlat adható. Ennek a feladatnak a nyers erővel való megoldása rendkívül számításigényes, és sok iterációt igénylő munkafolyamat, a lehetséges megoldások rendkívül nagy száma miatt. Példaként vegyünk egy egyszerű, 10 paramétert tartalmazó villamosgép-modellt, ahol minden paraméter 10 diszkrét értéket vehet fel. Ekkor 10^{10} esetből kell kiválasztani az optimális főméreteket.

A téma fontosságát jelzi, hogy az első egyszerű, analitikus módszert már a huszadik század elején publikálták [6]. Ezek a módszerek jellemzően rengeteg egyszerűsítést, technológia-függő konstanst tartalmaztak, így felhasználhatóságuk meglehetősen korlátozott [7]. Az 50-es évektől kezdődően, a számítógépek megjelenésével rengeteg algoritmust fejlesztettek a fő-tervezési paraméterek meghatározására. Ezek a programok az egyszerű iterációtól kezdve a legkülönbélebb numerikus és matematikai programozási módszereket alkalmazzák az optimalizálási folyamat gyors és pontos megoldására [8].

Az előzetes tervezéshez kapcsolódó módszereket többféle célfüggvényvel lehet definiálni: gyártási költség minimalizálása, össztömeg minimalizálása, befoglaló méretek minimalizálása, hatások maximalizálása, stb. Munkám során a teljes életútköltségre való optimalizálással foglalkoztam, amely, úgynevezett kapitalizációs tényezőkön keresztül figyelembe veszi a gép gyártási költsége mellett az élettartama során keletkező egyéb költségeket is [9]. Az élettartamköltségekre való optimalizálás ötlete nem újkeletű. Már a XX. század elején, az erőátviteli transzformátor gyártás úttörőjének számító Ganz gyárban, különböző réz- és vasveszteség-aránnyal készítették transzformátorokat víz- és gőzturbinákhoz, figyelembe véve az azokat élettartamuk során érő eltérő terhelési jellemzőket. Azonban napjainkban már sokkal kifinomultabb módszerek léteznek a különböző költségek figyelembevételére [10, 11].

1.2. Motiváció és célkitűzések

A kutatásom kiindulópontja egy, a geometriai programozáson¹ [12] alapuló transzformátor optimalizáló program volt [2, 13], amely folyamatosan kicsit hibás eredményeket szolgáltatott: magasabb tekercseket, illetve ablakmagasságot számolt, mint ami a tervezőmérnök tapasztalata és intuíciója alapján megtalált számításból számításból következett volna. Sokáig úgy gondoltam, ahogy az iparban elfogadott volt, hogy a transzformátor szabályozó tekercseinek vagy egyéb, a szigetelési, illetve hűtőrendszerhez tartozó elhanyagolások okozzák ezt a számítási hibát. Sikerült belátni (C1),(J1) hogy az eltérést az okozza, hogy mag-típusú nagytranszformátorok esetén, a drop nem írható fel a geometriai programozás által megkövetelt pozionomiális alakban. Ennek a problémának a kiküszöbölésére létrehozott, itt bemutatott algoritmusok már nemcsak ezt a hibát korrigálják, hanem lehetővé teszik, hogy a transz-

¹A geometriai programozás a matematikai optimalizálási problémák egy részterülete, amit speciális (monomiális és pozionomiális) alakban felírt egyenletek és egyenlőtlenségek határoznak meg. Mind elméleti érdekességénél, mind gyakorlati felhasználás szempontjából nézve a matematikai programozási feladatok gyorsan fejlődő ága. Az újonnan kifejlesztett megoldó módszereknek köszönhetően már nagyon nagy méretű geometriai programozási feladat is megoldható pontosan, rövid idő alatt, egy átlagos számítógépen.

formátor összetett szigetelési rendszerével kapcsolatos tervezési kérdéseket is vizsgálni tudjuk, már az első tervezési lépés során is. A transzformátorok szigetelési rendszereinek méretezésével foglalkozó irodalmak, a minimális szigetelési távolságok figyelembe vételével kialakított szigetelés megszerkesztését javasolják a végleges tervezési szakaszában [2, 3]. Azonban a nagytranszformátorok költség-optimális főméreteinek a meghatározása általános, nem-lineáris optimalizálási feladat, így a nem feltétlenül a legkisebb szigetelési távolságok alkalmazásával jutunk a költség-optimumhoz. A dolgozatban bemutatott esettanulmányokon keresztül megvizsgálom, hogy a szigetelési rendszer egyes elemeinek (olaj, főszigetelés, stb.), illetve azok elhanyagolásának milyen hatása van az előzetes tervezés kulcs-paramétereire.

Tézisek

I. Tézis

A geometriai programozás és a Branch and Bound algoritmus összekapcsolásával egy olyan új metaheurisztikus transzformátor optimalizálási modellt dolgoztam ki, amely alkalmas különböző típusú vasmagok és szabályozó-tekercs pozíciók esetén meghatározni egy mag-típusú nagytranszformátor aktív részének leggazdaságosabb méreteit. A módszert az irodalomban fellelhető más módszerekkel összevettem, alkalmazhatóságát igazoltam. A kapott eredményeket az iparban használt végeselem szoftver segítségével validáltam.

Kapcsolódó publikációk: (J1) , (J4), (J8), (C1), (C2), (C3), (C4).

A metaheurisztikus optimalizáló módszer a geometriai programozás és a Branch and Bound algoritmus összekapcsolásán alapul.

Az általam kifejlesztett módszer már képes helyesen figyelembe venni a rövidzárási impedancia Rogowski-faktorral korrigált értékét, különböző típusú vasmagok és autotranszformátorok esetére is.

A nagy méretű autotranszformátor beépített teljesítménye kisebb a látzólagos teljesítményénél, ezért a leggazdaságosabb konstrukciót jellemzően nem akkor kapjuk, amikor a szabályozó tekercs a két főtekercs után helyezkedik el, minimális hatást gyakorolva a rövidzárási impedancia értékére, hanem amikor a két főtekercs között vagy a kis feszültségű tekercs és a vasmag között helyezkedik el a szabályozó tekercs, hiszen így a tekercselrendezés geometriájánál fogva megnő a drop. A geometriai programozás és a branch and bound módszer ötvözésével kidolgoztam egy olyan eljárást, amely ezekben a különféle elrendezésekben garantáltan megtalálja a feladat globális optimumát.

Gyakorlati példán keresztül igazoltam, hogy az algoritmus ezt a globális optimumot hatékonyan találja meg, ennek igazolására összevettem más, az irodalomban fellelhető heurisztikus és evolúciós stratégiákat alkalmazó módszerekkel.

A kapott eredményeket a munkám során fejlesztett végeselem-módszeren alapuló szimulációs programmal validáltam.

II. Tézis

Megvizsgáltam, hogy az irodalomban a nagytranszformátorok élet-tartamköltségre való optimalizálása során gyakran alkalmazott –

azaz a nagytranszformátor költségeit annak a vasmagból és tekercsrendszerből álló, aktív részével modellező, a hűtő- és a szigetelőrendszert elhanyagoló – közelítés milyen hatással van az optimalizált paramétereire. Ehhez az új metaheurisztikus módszerem alapuló optimalizálási modellt továbbfejlesztettem. Olyan új paraméterekkel és hőtechnikai modellel egészítettem ki, amelyeknek a segítségével a szigetelőolaj és a külső hűtőrendszer költségeinek a hatása is figyelembe vehető. Egy esettanulmányon keresztül megmutattam, hogy kis kapitalizációs tényezők esetén a hűtőrendszer és a szigetelőolaj költsége hatással van a költségoptimalis transzformátor menetfeszültségére, így a réz-vas arányra.

Kapcsolódó publikációk: (J2) , (J5).

A nagytranszformátorok költségoptimalis paramétereinek a meghatározása a legáltalánosabb nemlineáris matematikai optimalizálási feladatok köréhez tartozik. A feladat bonyolultsága és fontossága miatt számos, különböző egyszerűsítéseket tartalmazó modellt publikáltak a szakirodalomban. A transzformátorok kulcsparamétereinek meghatározása, a vasmag és a tekercselés méret- és súlyarányainak, valamint igénybevételeinek helyes megválasztásával lehetséges. Ezért ezek az egyszerűsített modellek általában csak a transzformátor tekercsrendszerét és vasmagját tartalmazó (úgynevezett aktív részével) foglalkoznak. Az általánosan elterjedt gyakorlat szerint elhanyagolják a szigetelő- és hűtőrendszer hatását az élettartamköltségre.

Ebben a tézisemben a szigetelő- és hűtőrendszer tömegének, költségének a visszahatását vizsgáltam meg természetes olajáramlással hűtött (ONAN/ONAF) transzformátor esetén. Ehhez a vizsgálathoz az előzőekben kifejlesztett metaheurisztikus optimalizáló módszert továbbfejlesztettem, és új paraméterekkel és a transzformátor külső hűtését leíró hőtani modellel egészítettem ki.

Az így továbbfejlesztett optimalizáló módszer segítségével megvizsgáltam, hogy milyen hatása van a nagytranszformátor modell vizsgált paramétereire, hogyha a kapitalizált árra való optimalizálás során nem hanyagoljuk el az olaj és a külső hűtőrendszer költségét.

Azt találtam, hogy a piaci árakhoz képest nagy kapitalizációs tényezők esetén a hűtőrendszer költsége – a tapasztalatoknak megfelelően – nem jelentős. Ennek ellenére, kis kapitalizációs tényezők esetén, mikor az optimalis transzformátor konstrukció viszonylag nagy veszteségű lesz, a hűtőrendszer költsége jelentősen befolyásolja a tekercsek menetfeszültségét, ezen keresztül a réz-vas arányt.

III. Tézis

Megvizsgáltam, hogy a nagytranszformátorok szabályozó tekercsének megválasztása milyen hatással van a transzformátor költségoptimalis paramétereire. A kidolgozott új metaheurisztikus optimalizálási modellt kiegészítettem alkalmassá tettem arra, hogy más, durva-finom szabályozással ellátott tekercs-elrendezéseket is figyelembe tudjon venni. Ezzel a megközelítéssel – adott gazdasági szkenárió és adott tekercs-sorrend esetén – található olyan impedanciaérték, amely felett a durva-finom szabályozás gazdaságosabb az irányváltós szabályzásnál, annak ellenére, hogy ebben az esetben eggyel több tekerccset kell beépíteni.

Kapcsolódó publikációk: (J3), (J5), (C2).

Az irodalomban található, előzetes tervezéshez használt modellek jelentős része két fő-tekerccset tartalmazó aktív-rész modellt használ a költségoptimalis paraméterek meghatározására [8]. Az így kapott *aktív-részt* már a tervező egészíti ki a követelményeknek megfelelő szabályozó tekerccsel. Ilyenkor a drop megváltozhat, amit a paraméterek korrigálásával állít be a tervező [14]. Az így kapott eredmények a gyakorlat által megkövetelt pontosságnak megfelelnek, azonban nem garantálják azt, hogy az alkalmazott korrekciós lépés után az optimalis megoldást találjuk meg. Az általam kifejlesztett optimalizáló módszer már lehetővé teszi különböző típusú - lineáris, irányváltós, durva-finom - szabályozás figyelembevételét az első optimalizáció során.

Az első tézisemben bemutatott metaheurisztikus optimalizáló algoritmus már képes egy irányváltós szabályozótekerccsel ellátott transzformátor geometriát figyelembe venni. Azonban névleges állás esetén ez a tekercs nem aktív, a rövidzárási impedanciára csak a hely -és anyagszükségleten keresztül van hatással. Az új módszer már képes olyan szabályozási típusokat is figyelembe venni, ahol a szabályozó tekercs aktív állapotban van.

Az irányváltós szabályozás nagy előnyének tartják a durva-finom szabályozással szemben, hogy képes nagy szabályozási tartományt átfogni, további szabályozó tekercs és szigetelés beépítése nélkül. A számítások során eltekintek a durva-finom szabályozáshoz kapcsolt előnyöktől: a szabályozási tartományban egyenletesebb drop változásától és az olcsóbb hűtőrendszerrel [14]. A rövidzárási impedanciára gyakorolt eltérő hatást vizsgálva kimutattam, hogy adott gazdasági szkenárió esetén létezik olyan rövidzárási impedancia érték, amely felett a durva-finom szabályozással készített transzformátor – az előbb említett előnyöktől eltekintve – a gazdaságosabb.

IV. Tézis

Az előzetes tervezés egyszerűsített optimalizálásának eredményéül adódó tekercs-főméretek ismeretében a következő lépés a pontos tekercskiosztás meghatározása. Erre a tervezési lépésre dolgoztam ki azt az általánosított geometriai programozáson alapuló optimalizálási módszert, amely tárcsás tekercs-elrendezést feltételezve képes meghatározni az alkalmazandó optimális vezetőkeresztmetszeteket és tekercskiosztást. Az általam javasolt optimalizálási eljárás figyelembe veszi a tekercs melegezésére vonatkozó kritériumokat is.

Kapcsolódó publikációk: (J6), (J7).

A transzformátortekercsek rézkitöltési-tényezőjével való modellezése széles körben elterjedt közelítés, amely a gyakorlati számításoknak megfelelő eredményeket szolgáltat. Az előző téziseimben bemutatott metaheurisztikus optimalizáló módszerem is felhasználja ezt a feltételezést. Ez az egyszerűsítés nemcsak az előzetes, illetve tájékozódó jellegű, hanem még a végeselem-módszerrel végzett számítások esetén is képes a gyakorlati tervezőmunkánál megkövetelt pontosságnak megfelelni [2, 7, 15]. Azonban számos tekercsjellemző mennyiséget – amelyekhez szükséges a tekercs, illetve a vezetőméretek részletes ismerete – nem lehet ezzel a módszerrel meghatározni.

A tézisben alkalmazott méretezési koncepció felhasználja azt az irodalomban alkalmazott feltételezést [7], hogy a tekercselés pontosabb kialakítása már nincs szignifikáns hatással a vasmag főméreteire, illetve a költségoptimumot meghatározó réz-vas arányra.

Az irodalomban megtalálható hasonló módszerekhez képest, amelyek csak a rövidzárási veszteséget minimalizálva oldották meg ezt a feladatot, az általam kidolgozott módszer már figyelembe veszi a tekercs melegezését is. Így a tekercsekben alkalmazott szigetelő anyagok öregedése is figyelembe vehetővé válik az optimalizálás során.

2. Az eredmények hasznosulása

A bemutatott algoritmusok ipari környezetben történő hasznosítása azok fejlesztésétől kezdődően folyamatos. Az első tézisemben bemutatott optimalizáló kódot a High Voltage Solutions kft.-nél, illetve ipari partnereinél alkalmazzák. A szoftvert döntéselőkészítéshez használják az ajánlati tervezési szakaszban. Ilyenkor a lehető legrövidebb idő alatt kell megtalálni az költségoptimális tervezési paramétereket. Ezt a folyamatot gyorsítja és javítja az optimalizáló kód, így növelve a projekt megnyerésének esélyét.

A tézisekhez kapcsolódó, egyéb transzformátor jellemzőket számító módszerekkel foglalkozó cikkeimben tárgyalt eljárások alapjául szolgáltak további programoknak:

- a (J6) cikkemben összehasonlított vasmag-melegedést számító módszereket használják egy transzformátor vasmag méretező kódban,
- a (J7)-ban szereplő eljárást egy melegedést számító kódban használják,
- a (L1)-ben bemutatott probléma megoldását alkalmaztam a Robert Bosch kft.-nél fejlesztett BEM-FEM megoldó kiterjesztéséhez.

Publikációk listája

Tézispontokat érintő közlemények

Lektorált, idegen nyelvű folyóiratcikkek

- (J1) T. Orosz, Á. Sleisz, Z. Á., Tamus. "Metaheuristic optimization preliminary design process of core-form autotransformers", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 52 no. 4, April, 2016. (IF: 1.243)
- (J2) T. Orosz, Z. Á. Tamus. "Impact of the Cooling Equipment on the Key Design Parameters of a Core-Form Power Transformer." *Journal of Electrical Engineering*, vol. 67 no. 6, pp. 399–406, 2016. (IF: 0.483)
- (J3) T. Orosz, Z. Á. Tamus, "Impact of the short circuit impedance and the tap-changing method selection on the key-design parameters of core-form power transformers", *Electrical Engineering*, Springer, 2017. (<https://doi.org/10.1007/s00202-017-0642-z>) (IF: 0.569)
- (J4) T. Orosz, B. Borbély, Z. Á. Tamus, "Performance Comparison of Multi Design Method and Meta-Heuristic Methods for Optimal Preliminary Design of Core-Form Power Transformers", *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 61, no. 1, 2017.
- (J5) T. Orosz, P. M. Sőrés, D. Raisz, Z. Á. Tamus, "Analysis of the Green Power Transition on Optimal Power Transformer Design," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 59 no. 3, pp. 125-131, 2015.
- (J6) T. Orosz, G. Kleizer, T. Iváncsy, Z. Á. Tamus., "Comparison of Methods for Calculation of Core-Form Power Transformer's Core Temperature Rise," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 60, no. 2, pp. 88-95., 2016.
- (J7) T. Orosz, T. Nagy, Z. Á. Tamus, "A Generalized Geometric Programming Sub-problem of Transformer Design Optimization", *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, Springer.
- (J8) T. Orosz, I. Vajda, "Design Optimization with Geometric Programming for Core Type Large Power Transformers", *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 6, pp. 13-18, 2014.

Konferenciaközlmények

- (C1) T. Orosz, Á. Sleisz, I. Vajda, "Core-Form Transformer Design Optimization with Branch and Bound Search and Geometric Programming", in *2014 55th*

International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Lettország, 2014.

- (C2) P. Sőrés, T. Orosz, I. Vajda, "Lifetime Cost Sensitivity Assessment in Optimal Core-form Power Transformer Design", in: *9th International Conference on Deregulated Electrical Market Issues in South Eastern Europe*, Nicosia, Cyprus, 2014.
- (C3) T. Orosz, I. Vajda, "Power Transformer Design Optimization with Geometric Programming," in *Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering: Doctoral School of Energy and Geotechnology II.*, Parnu, Észtország, 2014.
- (C4) T. Orosz, I. Vajda, "Költségoptimális nagytranszformátor tervezés Geometriai Programozás segítségével", in *29. Kandó Konferencia*, Budapest, Magyarország, 2013.

Tézispontokhoz közvetlenül nem kapcsolódó közlemények

Lektorált, idegen nyelvű folyóiratcikkek

- (J9) Z. Á. Tamus, T. Orosz, G. M. Kiss, "Modelling material dependent parameters of layer type straight coils for fast transient pulses", *Journal of Physics - Conference Series* vol. 646, 2015.

Magyar nyelvű lektorált folyóiratcikkek

- (L1) T. Orosz, Z. Á. Tamus, "Egyszerű módszer vasmagos transzformátortekercsek induktancia-mátrixának a nagyfrekvenciás meghatározására," *Elektrotechnika*, vol. 108, no. 6, pp. 13-16. 2015.

Koferenciaközlemények

- (C5) T. Orosz, I. Vajda, Z. Á. Tamus, "Modeling the High Nemkonvencionális anyagból készített transzformátor optimalizálása geometriai programozás segítségével," in: *30. Kandó Konferencia [30th Kandó Conference]*, Budapest, Magyarország, 2014.
- (C6) T. Orosz, Z. Á. Tamus, I. Vajda, "Modeling the High Frequency Behavior of the Rogowski-coil passive L/r Integrator Current Transducer with Analytical and Finite Element Method", in *Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities*, Cluj-Napoca, Románia, 2014.

- (C7) T. Orosz, A. Szakállas, I. Vajda, "Transzformátor tekercselések helyettesítő kapacitásainak meghatározása koncentrált paraméterű modell számára analitikus és végeselem módszerrel", in *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XIX. Nemzetközi Tudományos Konferencia*, Kolozsvár, Románia, 2014.
- (C8) A. Szakállas, T. Orosz, I. Vajda, "Investigation of Applicability of Direct and Indirect Measurement Methods in the Engineering Education", in *Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering: Doctoral School of Energy and Geotechnology II.*, Parnu, Észtország, 2014.
- (C9) W. R. Fernandes, T. Orosz, Z. Á. Tamus, "Characterization of Peltier Cell for the Use of Waste Heat of Spas", in *2014 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Lettország, 2014.

Egyéb folyóiratcikk

- (O1) T. Orosz, Z. Á. Tamus, W. R. Fernandes, "Peltier-elem vizsgálata gyógyfürdők hulladékhőjének a hasznosítására", *Megtérülő Épületenergetika*, vol. 1, no. 5, pp. 23-27 2014.

Hivatkozások

- [1] K. Karsai, D. Kerényi, and L. Kiss, *Large power transformers*. Elsevier Science Pub. Co. Inc., New York, NY, 1987.
- [2] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, and R. Ahuja, *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. CRC press, 2001.
- [3] H. M. Ryan, *High voltage engineering and testing 3rd Edition*. No. 32, IET, 2013.
- [4] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, and P. S. Georgilakis, „The state of the art in engineering methods for transformer design and optimization: a survey,” *Journal of optoelectronics and advanced materials*, vol. 10, no. 5, p. 1149, 2008.
- [5] P. Abetti, W. Cuthbertson, and S. Williams, „Philosophy of applying digital computers to the design of electric apparatus,” *American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, Transactions of the*, vol. 77, no. 3, pp. 367–379, 1958.
- [6] G. Kapp, *Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom [Transformers for Single and Multiphase Currents: A Treatise on Their Theory, Construction, and Use]*. Charleston SC, United States: Nabu Press, 2012 [1900]. Originally published in: 1900.
- [7] G. Ujházy, *Erőátviteli transzformátorok gépi számításának kérdései [Application of Computers for Power Transformer Design]*. PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, 1969. [In Hungarian].
- [8] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, and A. G. Kladas, „Transformer design and optimization: a literature survey,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 4, pp. 1999–2024, 2009.
- [9] P. S. Georgilakis, *Spotlight on modern transformer design*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [10] S. Corhodzic and A. Kalam, „Assessment of distribution transformers using loss capitalization formulae,” *Journal of Electrical and Electronics Engineering Australia*, vol. 20, no. 1, pp. 43–48, 2000.
- [11] „IEEE loss evaluation guide for power transformers and reactors,” 1992.
- [12] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [13] R. A. Jabr, „Application of geometric programming to transformer design,” *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 11, pp. 4261–4269, 2005.

- [14] A. White, „Tapchanging-the transformer designer’s perspective,” in *Developments On-Load Tapchangers: Current Experience and Future, IEE European Seminar on*, pp. 4–1, IET, 1995.
- [15] O. W. Andersen, „Transformer leakage flux program based on the finite element method,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, pp. 682–689, March 1973.