

Metaheurisztikus módszerek nagytranszformátorok előzetes tervezésének az optimalizálására

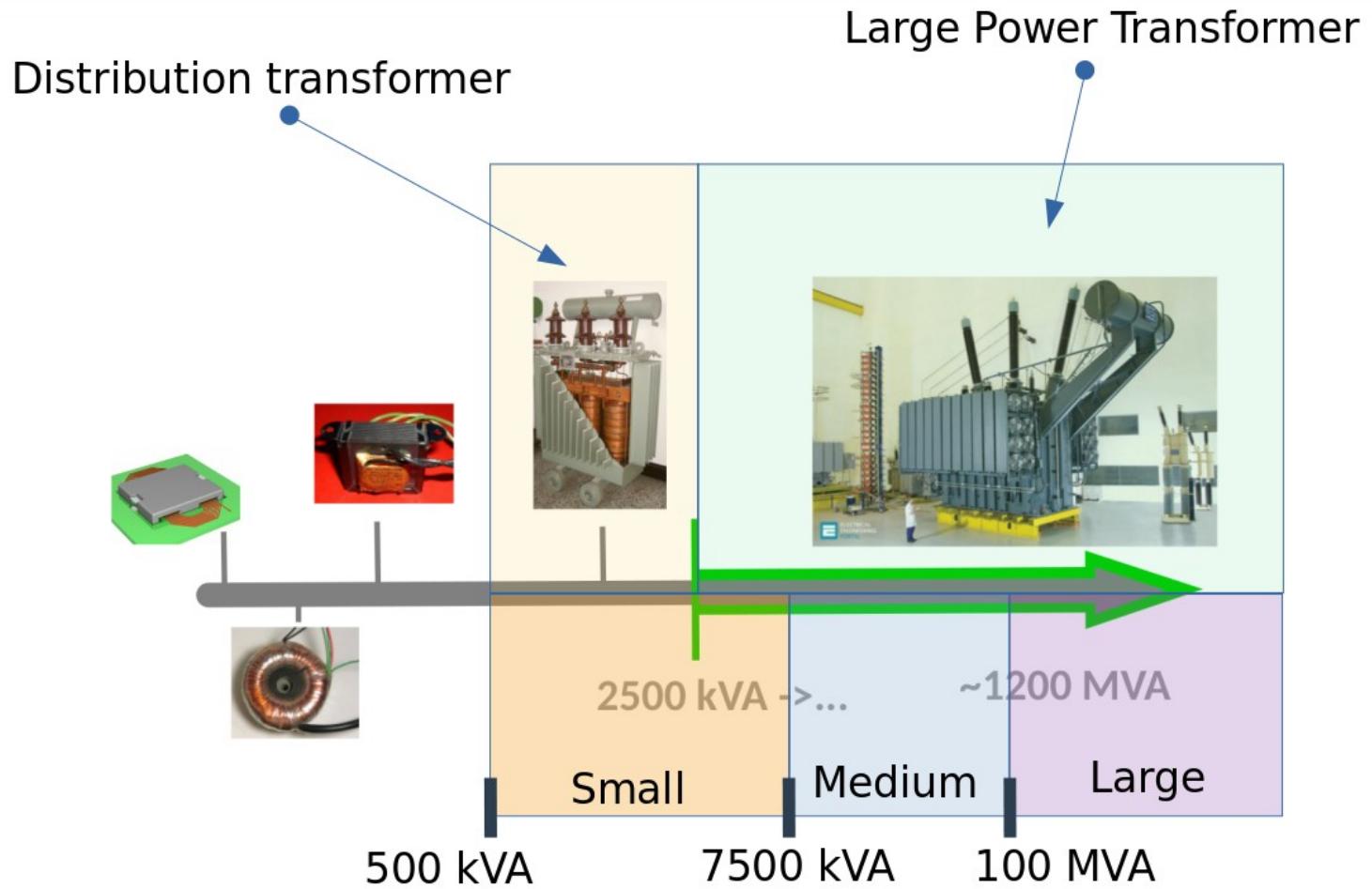
Orosz Tamás

MONTANA Knowledge Management kft
2021.10.05

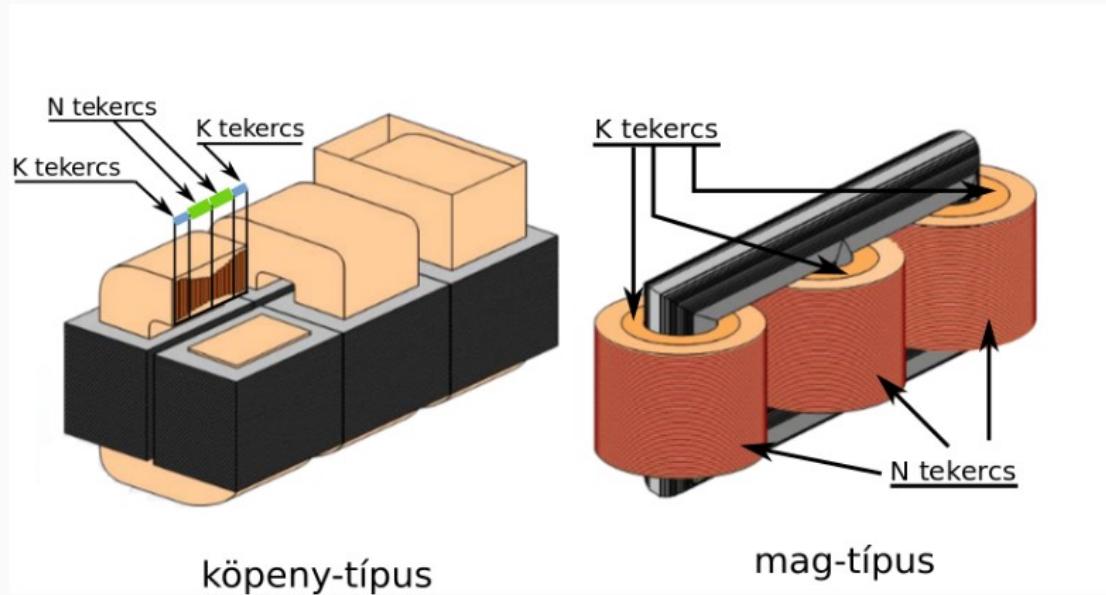
Transformer Classification by their rating

Large Power Transformers

- Not connected to the LV grid
- Their design depends on the type of the application
- custom designs,
- not mass produced items



Nagytranszformátor tekercsek szigetelési rendszerei



- **Köpeny típus**²: előnyei : szimmetrikus felépítés, (homokóra alakú tekercsek), egyszerű szigetelési rendszer, adott impedancia esetén a zárlati erők feleződnek, ha megduplázzuk a tekercspárok számát
- **Mag típus**³: koncentrikus tekercsrendszerek a vasmag körül, a napjainkban gyártott nagytranszformátorok jelentős része ebbe a csoportba tartozik.

²Ryan, H. M. (2013). High voltage engineering and testing, 3rd Edition. IET.

³Karsai, Kerényi Kiss (1973). Nagytranszformátorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.

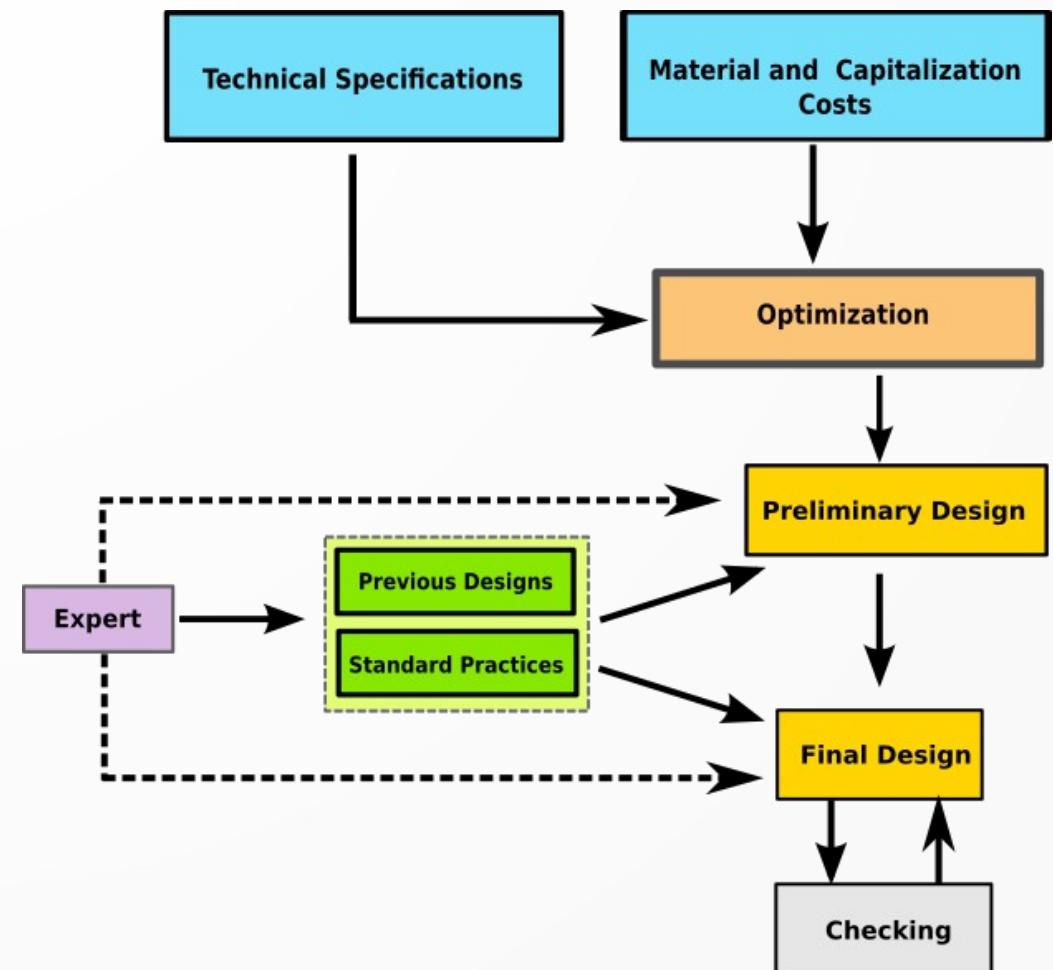
Transformer Design Optimization

Goal

- to find the **cost-optimal mechanical and electrical parameters**
- which minimize the machines' total **cost of the ownership**
- by reducing the different **power losses** and the manufacturing costs

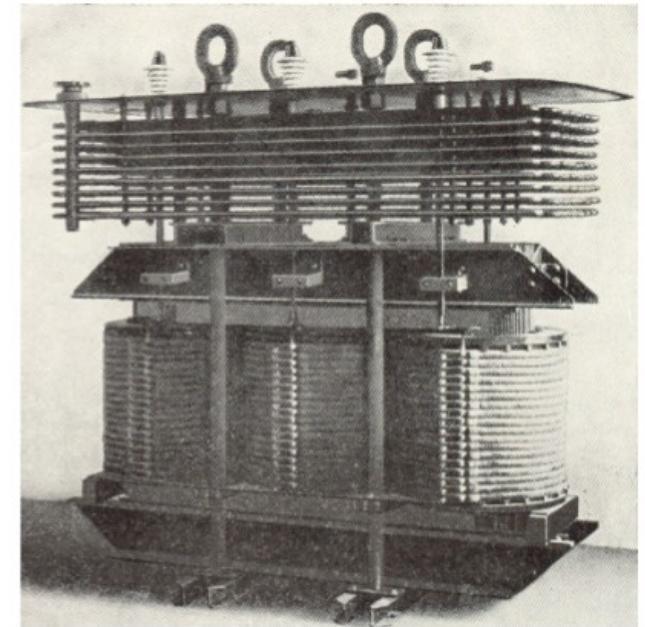
Optimization model

- **Non-linear** – thermal, electromagnetic, mechanical domains interplays
- Uses a simplified model – filling factors
- ~20 design variables



Total Cost of Ownership

- Lifetime cost of transformer losses
- 1900 G. Kapp -- different constructions for water and coal power plants
- Comparable to the upfront investment cost (manufacturing, transportation)
- Design optimization should consider **total life-time cost**
- Balance between **the present and future expenses**
- Capitalization factors (K_1, K_2)
- Calculated as the discounted cost of energy losses throughout the lifetime of the equipment
- Future cost of power losses are expressed in present prices
- Optimal transformer designs generally differ significantly
- Varying operating cost structure can be addressed by two separate factors:
no-load and load loss factors



2000 kW
44. ábra. Vízhűtésű olajtranszformátor. – Wassergekühlter Öltransformator. – Water-cooled oil transformer. – Transformateur à huile refroidi à l'eau. (1905).

Total Cost of Ownership Objective of the Optimization

TCO can be expressed as

$$C = TOC = PP + A \cdot P_{nll} + B \cdot P_{ll}$$

PP: purchase price of the equipment [€]

P_{nll}: no-load loss [kW]

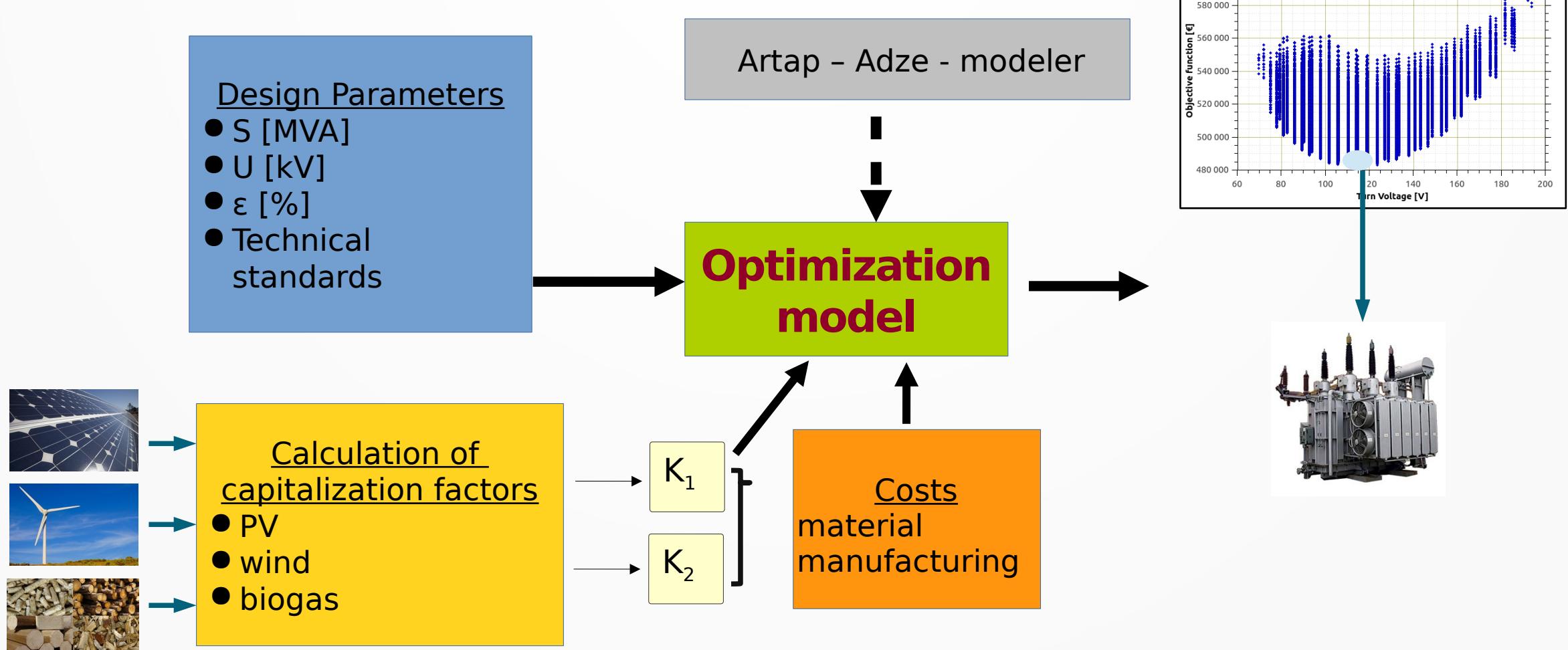
P_{ll}: load loss [kW]

A, B: capitalization factors [€/kW]

Capitalization parameters are derived from:

Discount rate, book-life of the equipment Cost of energy losses, cost of delivering power losses, **Load-loss factor**, rms of the utilization factor

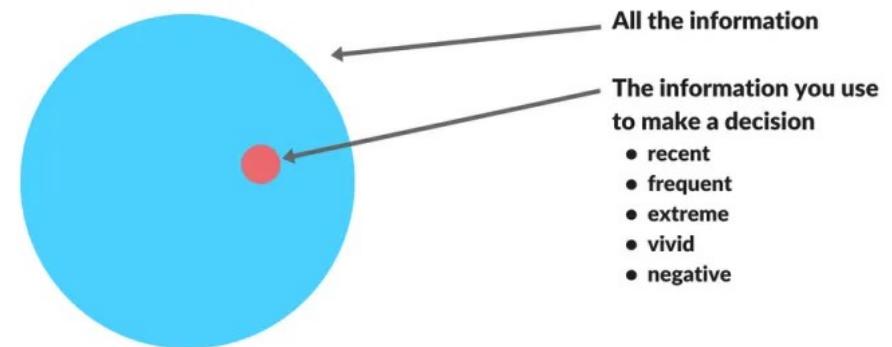
Transformer Design Optimization



Heuristics

- Heuristic (or approximate) algorithms aim to find a good solution to a problem in a reasonable amount of computation time – but with no guarantee of “goodness” or “efficiency” (cf. exact or complete algorithms).
- Heuristic is used to solve NP-Complete Problem , a class of decision problem.
- A heuristic is, simply put, a shortcut. Heuristics are strategies often used to find a solution that is not perfect, but is within an acceptable degree of accuracy for the needs of the process. In computing, heuristics are especially useful when finding an optimal solution to a problem is impractical because of slow speed or processing power limitations.

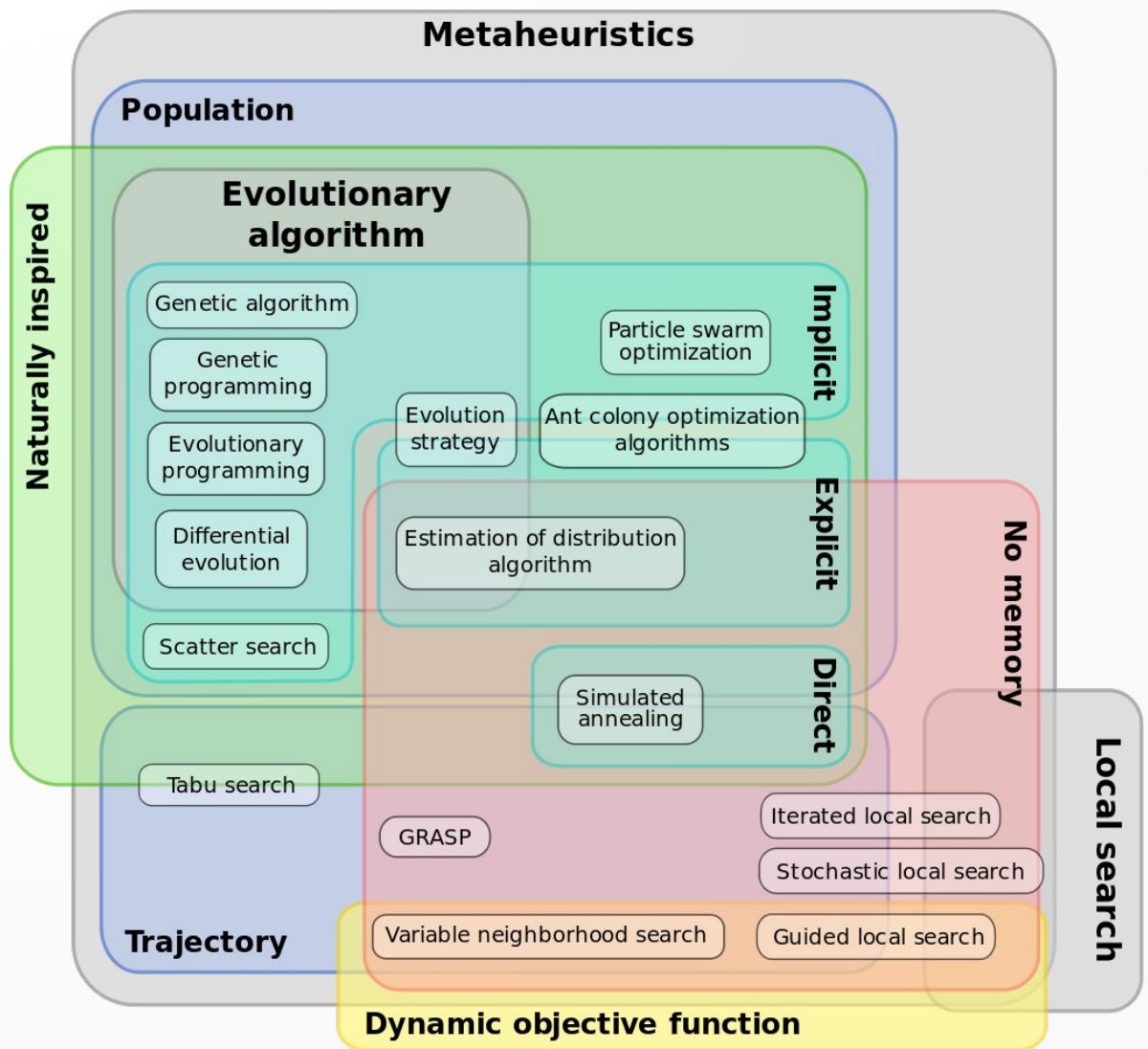
The availability heuristic



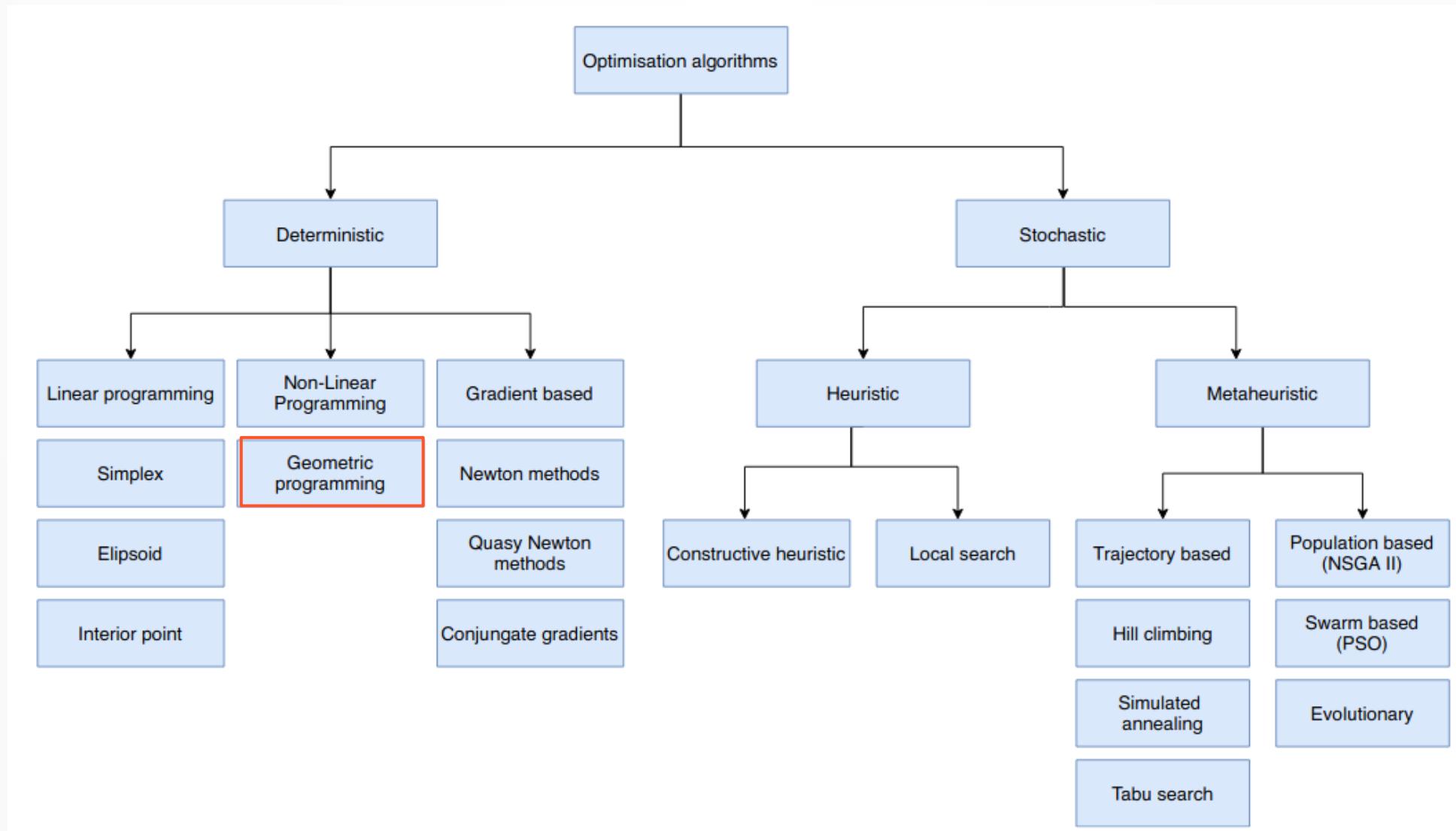
Metaheuristics

High-level strategies that combining lower-level techniques for exploration and exploitation of the search space.

- Metaheuristics are strategies that “guide” the search process.
- The goal is to efficiently explore the search space in order to find (near-)optimal solutions.
- Metaheuristic algorithms are approximate and usually non-deterministic.
- Metaheuristics are not problem-specific.

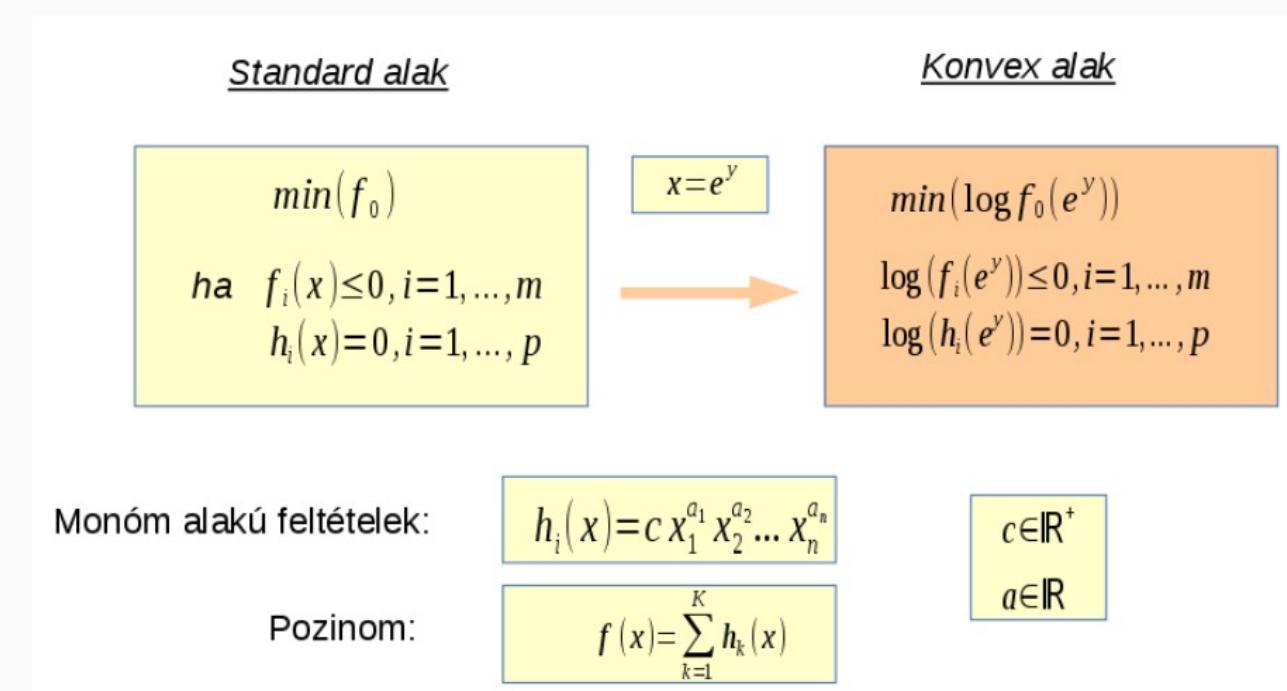


Optimalizáló algoritmusok csoportosítása



Geometriai Programozás

- A formalizmus alkalmazása garantálja, hogy a megtalált optimális megoldás a feladat **globális optimuma** lesz.
- Másik fő előnye, hogy a korszerű belső-pontos algoritmusokon alapuló megoldóprogramoknak köszönhetően rendkívül nagy méretű geometriai programozási feladatok (**GP**), rendkívül rövid idő alatt megoldhatóak, akár egy személyi számítógépen ¹⁰.



¹⁰Boyd, Stephen, et al. "A tutorial on geometric programming." Optimization and engineering 8.1 (2007): 67.

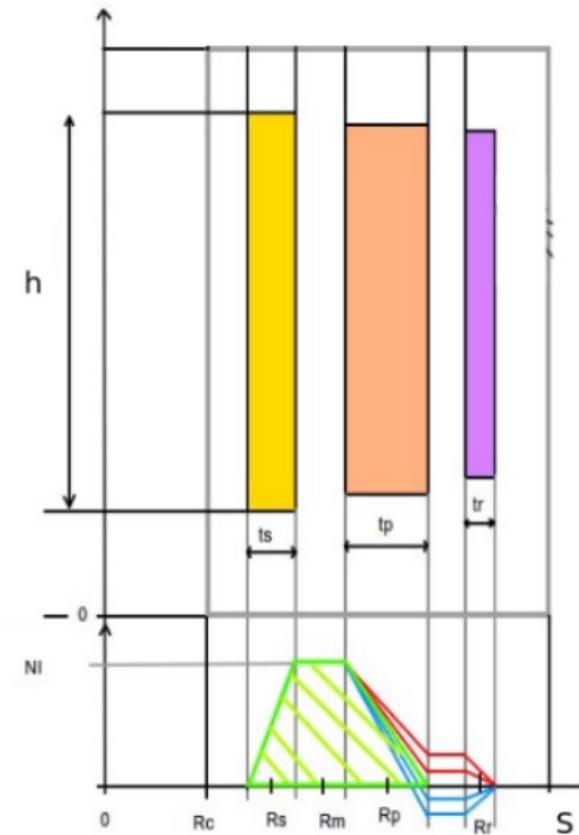
Geometriai Programozás

Rövidzárási Impedancia

- Mag típusú transzformátorok esetére nem írható fel a drop értéke a megkívánt monomiális alakban, ahogy azt meg lehetett tenni köpeny-típusú transzformátorok esetén.

Drop értéke a szabályozó tekercs kikapcsolt állapotában:

$$Z = \frac{(2\pi^2) \mu_0 f P_{ph}}{U_T^2 (h+s)} \left(\frac{R_s t_s}{3} + \frac{R_p t_p}{3} + R_m t_m \right)$$



Geometriai Programozás

Rövidzárási impedancia

- Pozinom alakú egyenlőtlenségből pedig csak felső korlát adható meg, azonban a gyakorlati költségoptimálás megoldás számítása során 5,6% - os érték adódna az előző példában említett 50 MVA-es transzformátorra, szemben az IEC szabvány, vagy a gyakorlati zárlatállósági szempontok által megkövetelt 10.5-13 % közötti drop értékkel.

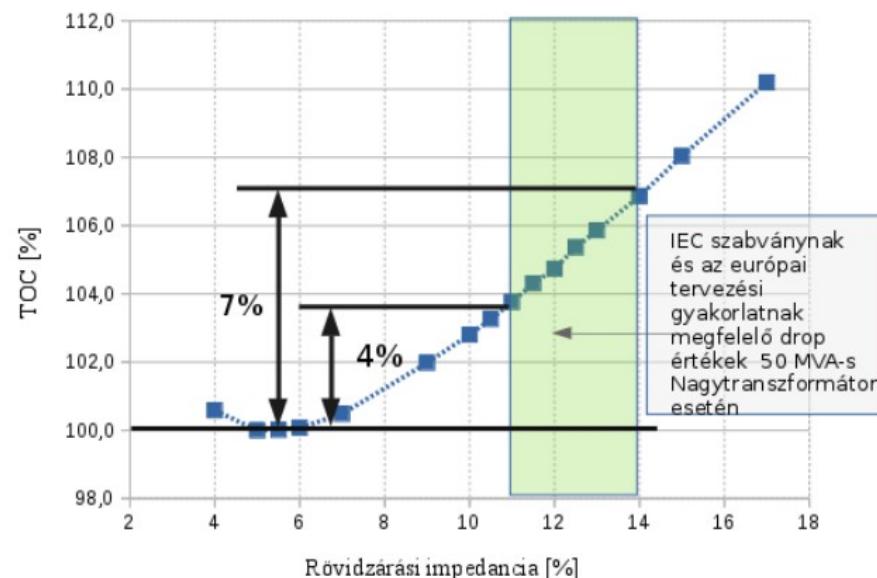
Drop értéke a szabályozó tekercs kikapcsolt állapotában:

$$Z = \frac{(2\pi^2)\mu_0 f P_{ph}}{U_T^2(h+s)} \left(\frac{R_s t_s}{3} + \frac{R_p t_p}{3} + R_m t_m \right)$$

$$\frac{c_1 \cdot Z}{A+B+C+D} \leq 1.$$



$$\frac{c_1 \cdot (A+B+C+D)}{Z} \leq 1.$$

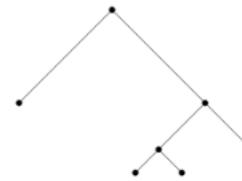
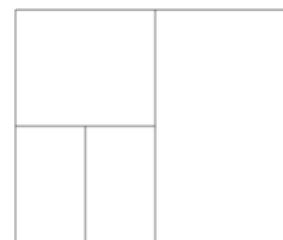
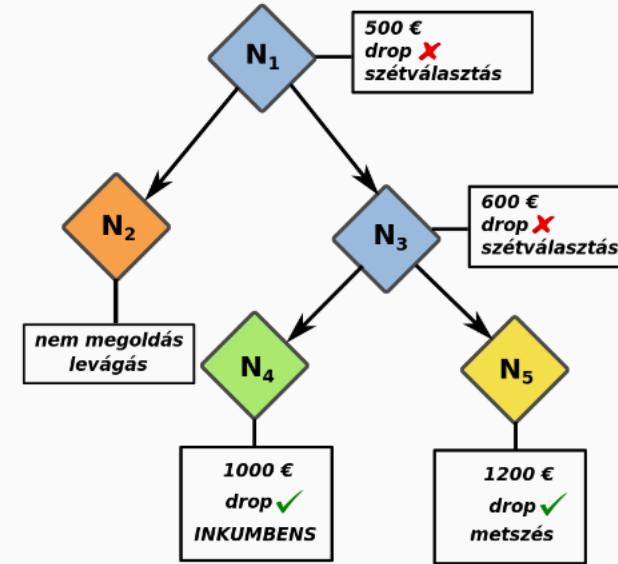


Kapitalizált ár a példa alapján 300-900 ezer €
A drop hatása akár 90 ezer € egy transzformátor aktív rész költségére

Geometriai Programozás

Rövidzárási impedancia

- Elképzelhető az optimalizálási feladat egy olyan relaxációja, ahol a GP pozinomiális formalizmusának nem megfelelő egyenlőtlenségeket, fizikai jelentéssel nem bíró, absztrakt változókkal helyettesítjük.
- Ezeket az új változókat egy alsó és egy felső korlát közé szorítjuk, melyeknek az értékét kívülről állítjuk, a BB gap módszert alkamazva.
- A BB lényege, hogy a feladatot (a megengedett megoldások halmazát) felbontják kisebb feladatokra (részekre). Az így kapott feladatok megoldására pontos alsó vagy felső korlátot tudunk mondani ¹¹.
- A minimális TOC-jú transzformátor költsége a dropot nem tartalmazó geometriai programozási feladat megoldásaként adódik.



¹¹Dr. Házy Attila. Nemlineáris optimalizálás. TAMOP 4.2.5 Pályázat könyvei. (2011).

Geometriai Programozás

Rövidzárási impedancia

$$Z = c_1 \cdot \left(\frac{R_s \cdot t_s}{3} + \frac{R_p \cdot t_p}{3} + R_s \cdot g + \frac{t_p \cdot g}{2} + \frac{g^2}{2} \right)$$

I II III IV V

$$\begin{aligned} A &= I \\ B &= A + II \\ C &= B + III \\ D &= C + IV \\ E &= D + V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &\geq A + II \\ B &\geq A \cdot (1 + kd_A) \end{aligned}$$

$$kd_A \leq \frac{II}{A}$$

$$B \leq A \cdot (1 + ku_A)$$

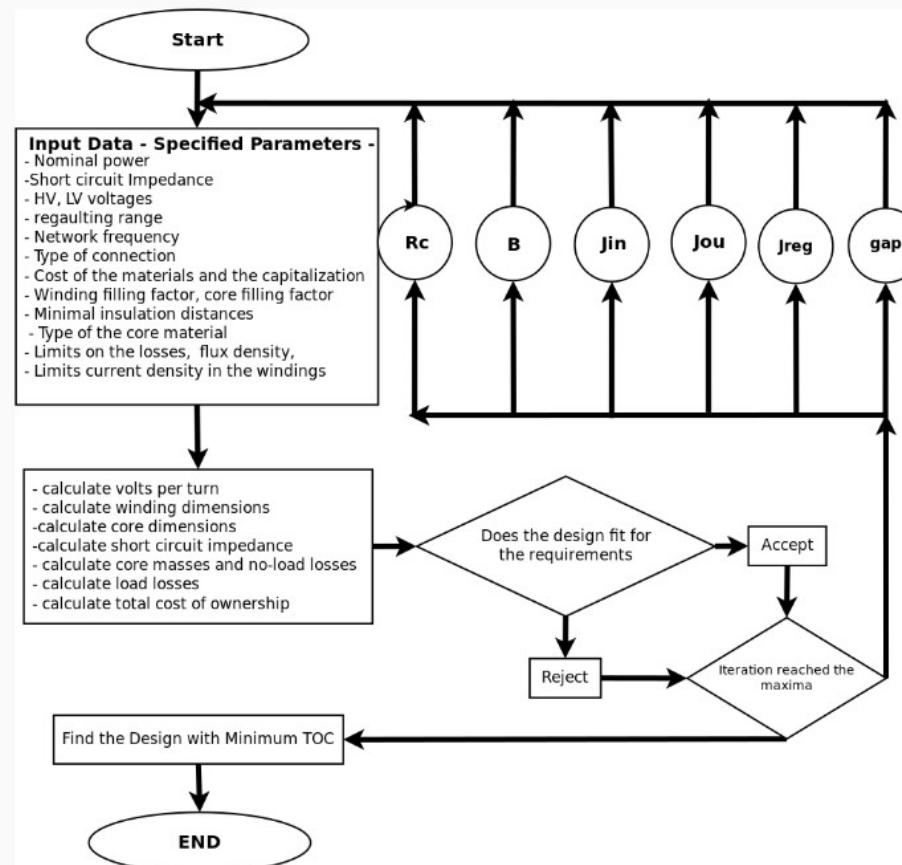
$$ku_A \geq \frac{II}{A}$$

Transzformátor aktív részének az optimalizálása egyszerű iterációval, pso, gwo-rel

A módszer gyorsaságát, teljesítőképességét egy elterjedten használt iterációs módszer¹², illetve az erre épülő genetikus/evolúciós módszerekhez képest vizsgáltam (PSO, GWO).

A vizsgált nagytranszformátor:

- $S = 80 \text{ MVA}$
- $U_K = 33 \text{ kV}$
- $U_N = 225 \text{ kV}$
- $\text{BIL} = 1050 \text{ kV}$
- $\text{AC} = 460 \text{ kV}$
- Drop = 16.5 %

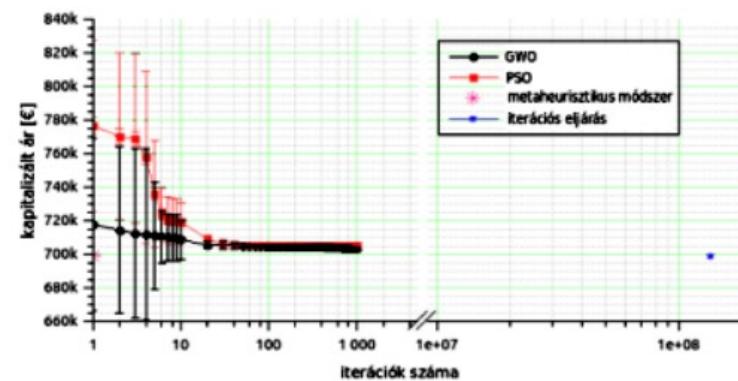


¹²Pavlos Georgialakis. Spotlight on Modern Transformer Design. Springer. (2009).

Transzformátor aktív részének az optimalizálása egyszerű iterációval, pso, gwo-rel

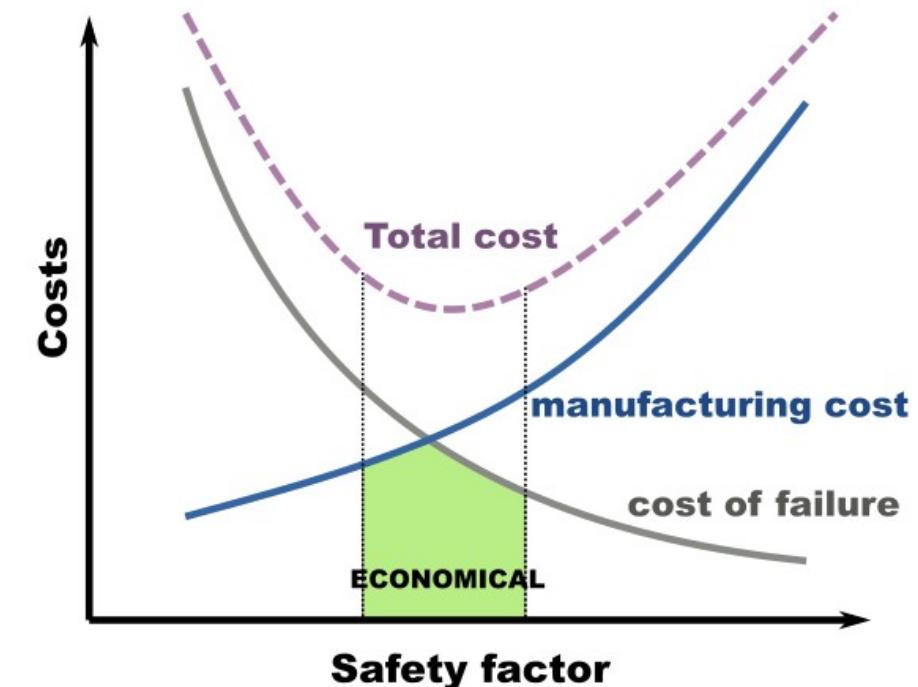
- A táblázat a négy különböző módszerrel kapott optimális megoldás kulcs paramétereinek és a célfüggvény értékét tartalmazza. A metaheurisztikus megoldás találta meg a legolcsóbb célfüggvényhez tartozó, szignifikáns eltérés nincs, a veszteségértékek körülbelül egyformák, a tekercsek magasságában van a fő eltérés.
- Az alsó ábrán a 4 módszer konvergenciájának a sebességét hasonlítja össze, feltételezve, hogy 1 iteráció számítási költsége megegyezik a négy esetben. Itt is az új metaheurisztikus keresés volt a leggyorsabb, míg a leglassabb és legköltségigényesebb megoldás az egyszerű iteráció volt.

		MDM	PSO	GWO	metaheurisztikus
Vasmag					
oszlopátmérő	mm	750	747.45	753	746
oszlopindukció	T	1.42	1.42	1.41	1.4
vasmag tömege	t	43.4	43.50	43.61	42.9
üresjárási veszteség	kW	27.3	27.97	27.25	27
menetfeszültség	V	124.8	126.77	125.58	123.6
K tekercs magassága	mm	1760	1712.55	1737.31	1766
Áramsűrűség					
K tekercs	$\frac{A}{mm^2}$	2.37	2.74	2.40	2.0
N tekercs	$\frac{A}{mm^2}$	1.98	1.80	2.0	2.0
Szabolyozó tekercs	$\frac{A}{mm^2}$	3.25	2.80	3.24	3.0
Összegzés					
rövidzárási veszteség	kW	244.5	245.17	246.43	244.1
főszigetelési távolság	mm	71	71	71	71
réz tömege	t	18.73	18.73	18.41	18.1
célfüggvény	€	703437	708056	703328	698846



Insulation System Design

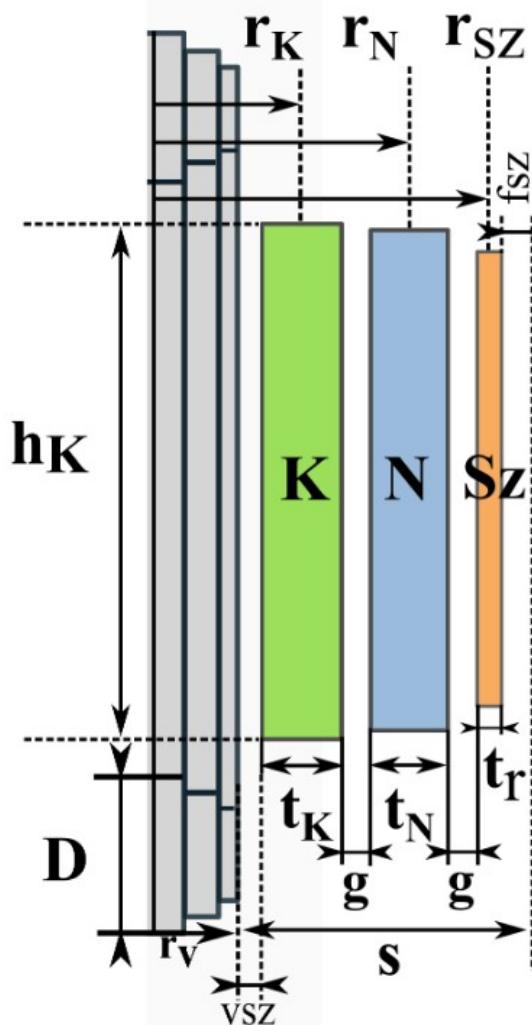
- Élettartam szempontjából akkormegfelelő egy villamos gép szigetelése, ha a tervezett időtartamalatt, zavartalan üzemeltetést biztosít.
- A nem megfelelően méretezett szigetelés miatt bekövetkező üzemzavar miatti költségek rendkívülmegnövelik a gép üzembentartásának költségét.
- Gazdaságosság szempontjából akkor van megfelelően méretezve egyszigetelés ha biztonsági tényezője az eredő görbe minimumának megfelelő érték környezetébe esik. ($E_{uz}=Emeg$)



Szigetelések gazdaságossága mag típusú transzformátor esetén

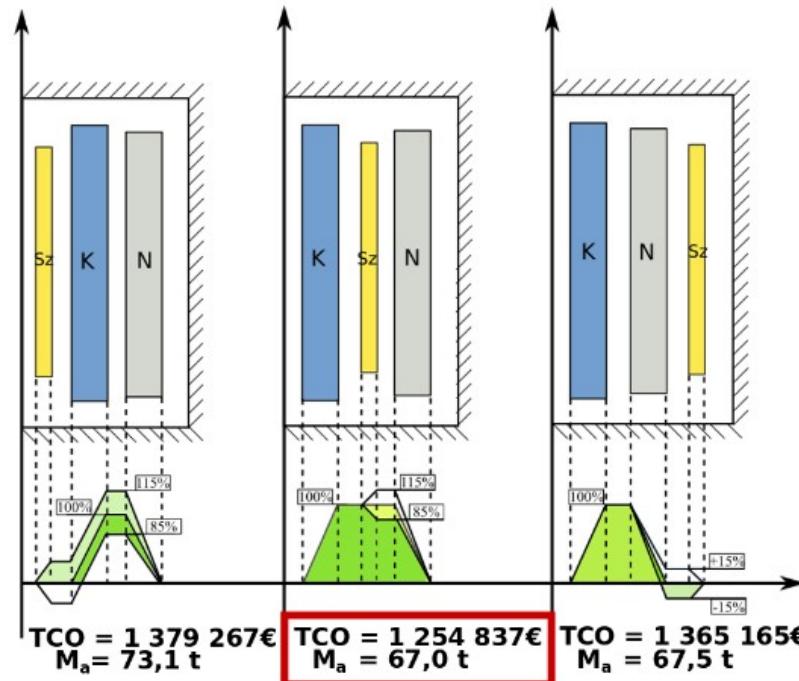
A szigetelési rendszer szigetelési távolságainak minimalizálása mag típusú, szabályozótekercset tartalmazó, koncentrikus tekercselrendezésű nagytranszformátorok esetén a következő megfontolásokhoz vezet⁵:

- a K (kis feszültségű) tekercset helyezik el a vasmaghoz közel, a szigetelési távolságok csökkentése érdekében
- a szabályozó tekercset helyezik el a legkülső átmérőn, hiszen ennek a tekercsnek a legkisebb a tömege, ha a két főtekercs között, vagy előtt helyeznénk el, akkor jelentősen növelné a főtekercsek tömegét és a szigetelési távolságokat.



⁵Karsai, Kerényi Kiss (1973). Nagytranszformátorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.

200 MVA - 420/230 kV-os nagytranszformátor teljes élettartam költségei különböző tekercselrendezések nél



A metaheurisztikus optimalizáló(Opt) által számolt rövidzárási impedancia és a rövidzárási veszteség végeselem módszerrel (FEM) kapott eredményekkel.

		Sz I	Sz II	Sz III			
		Opt	FEM	Opt	FEM	Opt	FEM
Aktív rész teljes rövidzárási vesztesége	kW	246,8	253,8	219,1	233	238,2	246,2
Rövidzárási impedancia abszolút értéke	%	13,5	13,38	13,5	13	13,5	13,57
képzetes része	%	13,5	13,38	13,5	13	13,5	13,57
valós része	%	-	0,13	-	0,12	-	0,12

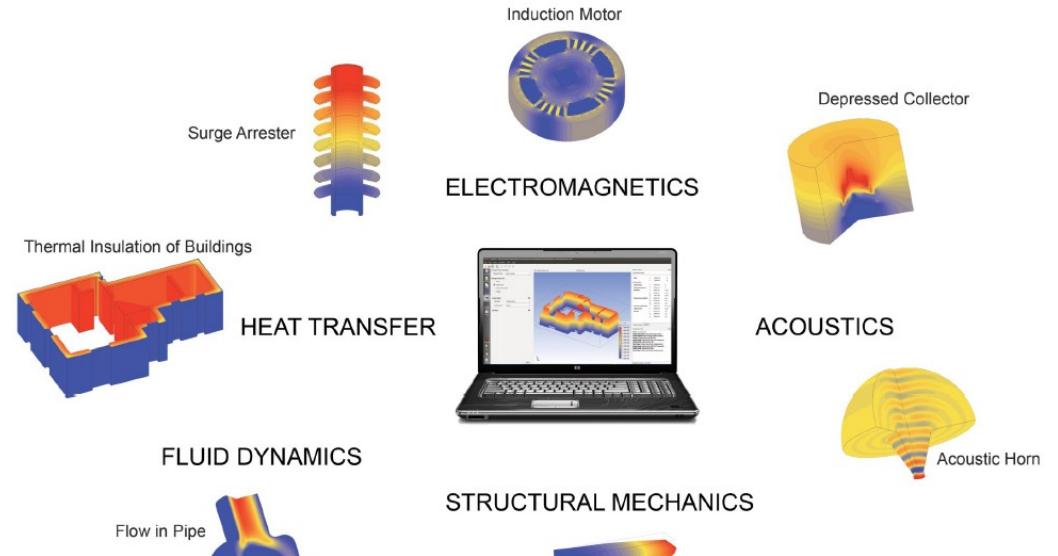
Artap, Adze-modeler Robust Design Optimization framework

Artap

Open source framework for robust design optimization

interfaces for a broad collection of optimization algorithms:

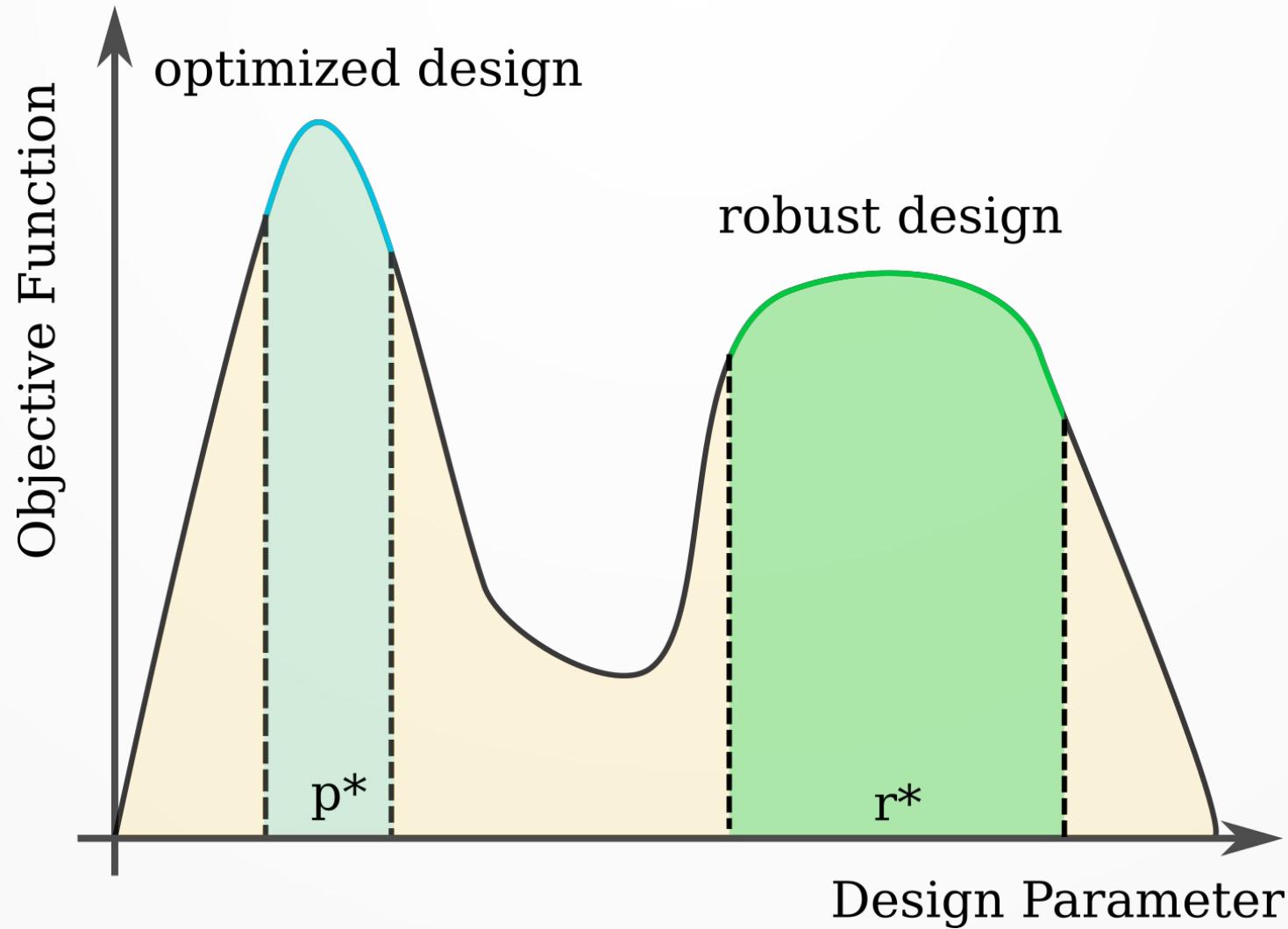
- genetic and evolutionary algorithms,
- interfaces to libraries such as Nlopt, Bayesopt, etc .
- tools for machine learning (neural networks, Gaussian processes, etc.)
- finite element solvers: Agros-suite, Comsol, Multiphysics, Deal.II



- Multiplatform C++ application (GNU Linux, Windows)
- Open Source software distributed under GNU GPLv2
- Development since 2009
- Collaborations with other universities and industrial partners

Artap, Adze-modeler

Robust Design Optimization framework



Motivation Induction brazing

Make a fast and accurate
temperature control of
induction brazing process

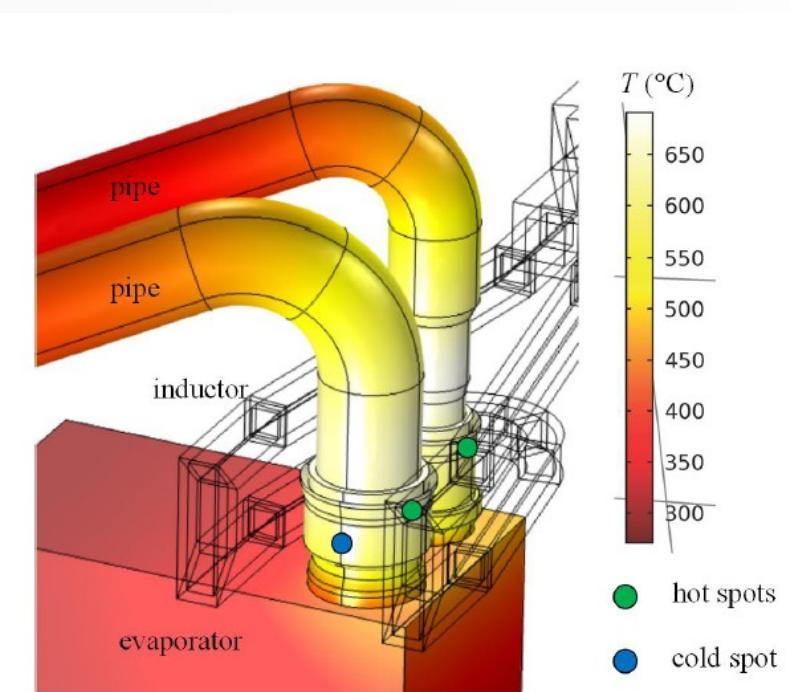
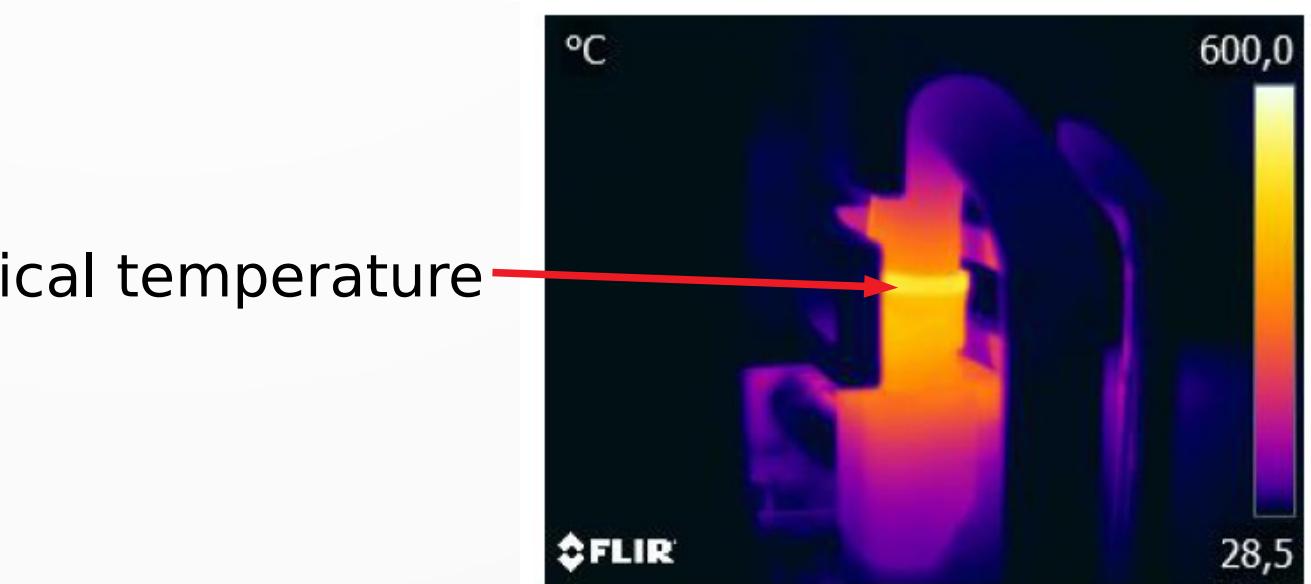
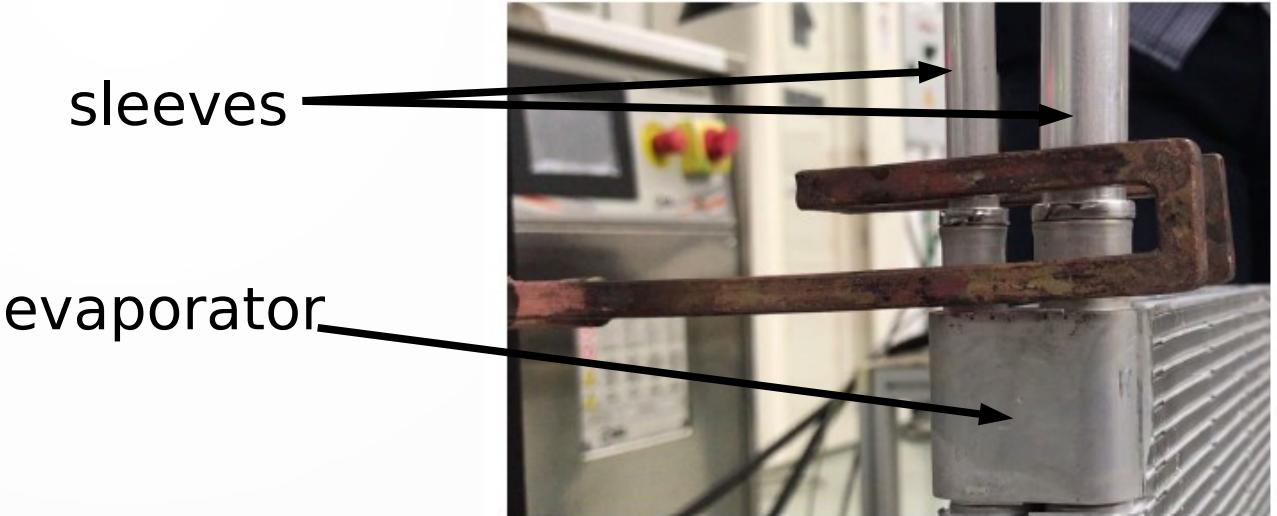
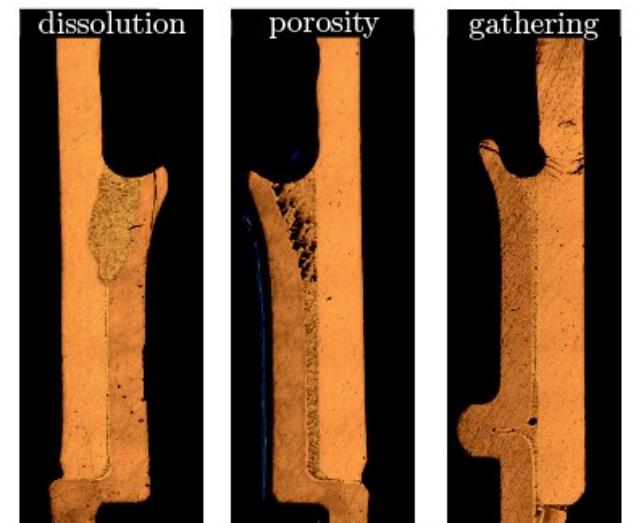
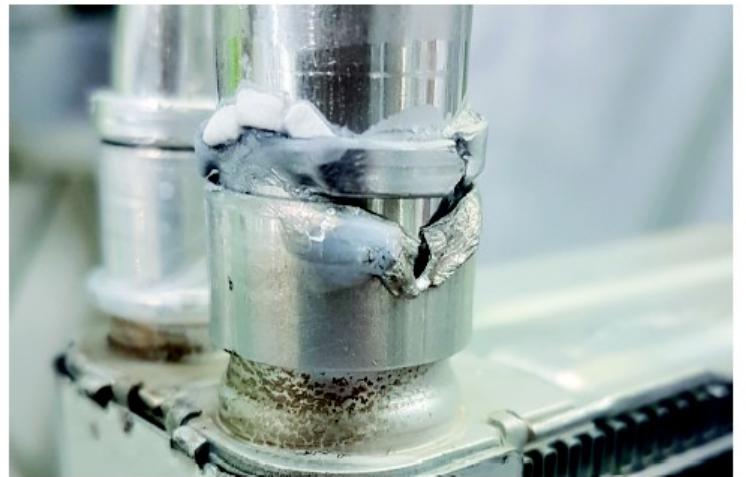


Fig. 1. Temperature map of system after heating.



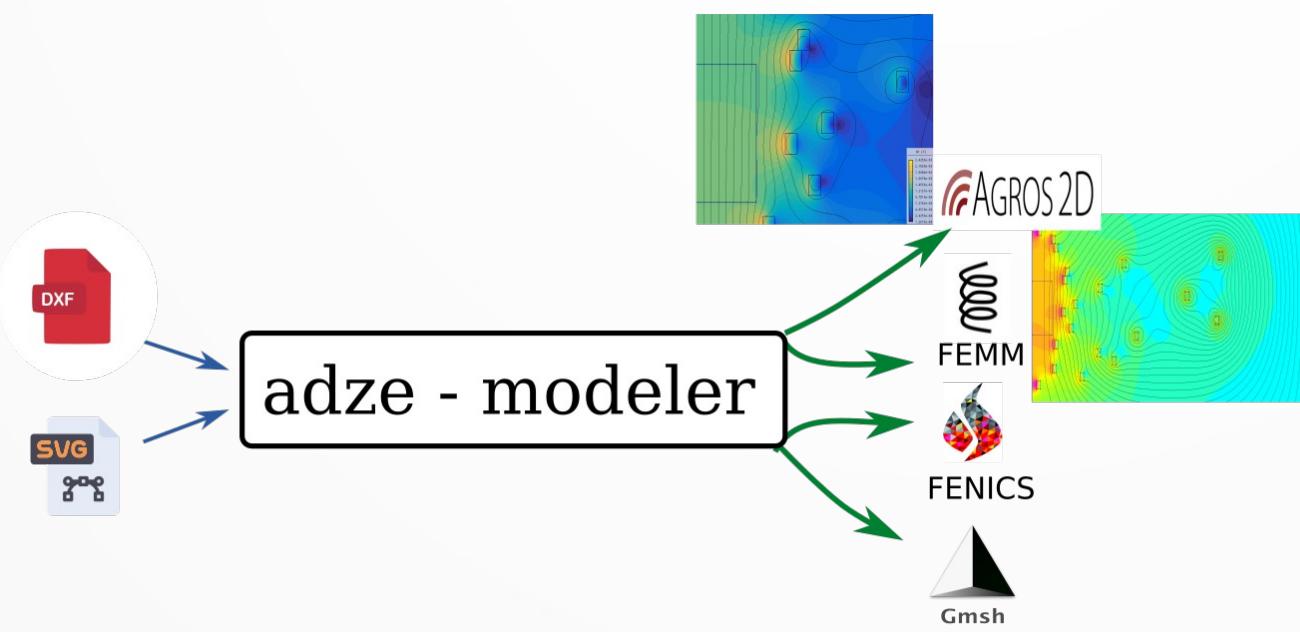
Importance of Temperature Control Induction brazing

- A precise and fast temperature control is required
- The melting point of the applied:
 - Aluminum alloy: 660°C
 - Soldering material (AlSi12): 580°C
- The optimal brazing temperature in the hot-spot is ~620 °C

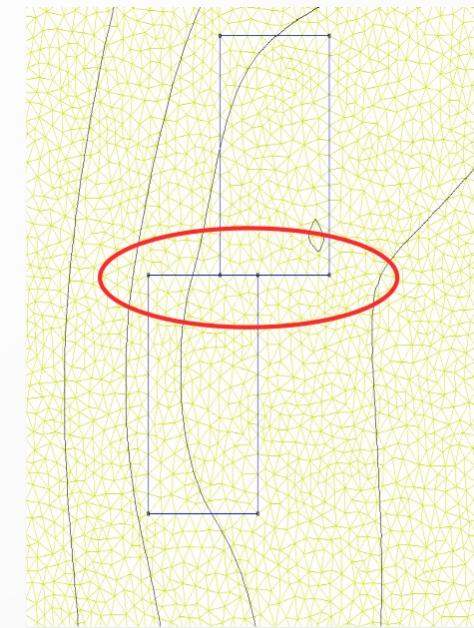


Types of brazing defects

ADZE-modeler



a)



b)

ADZE-modeler

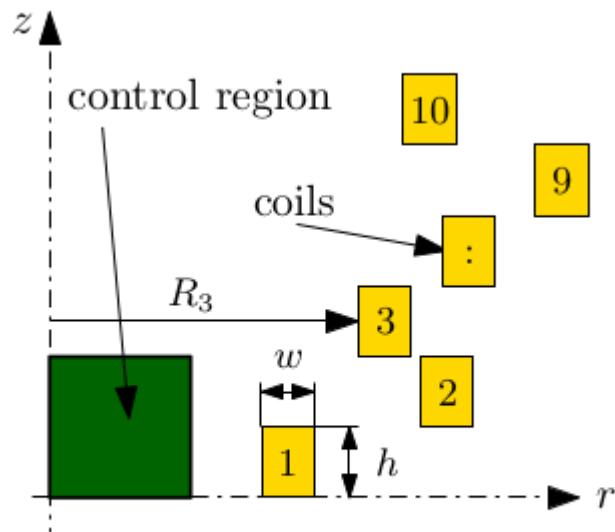
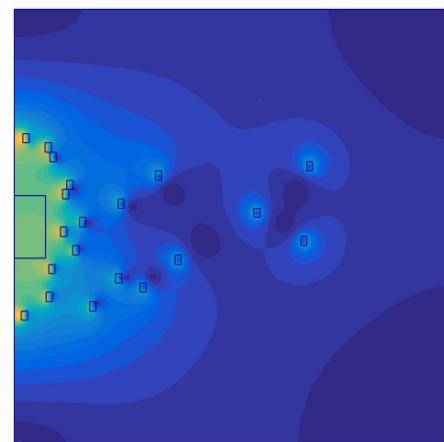
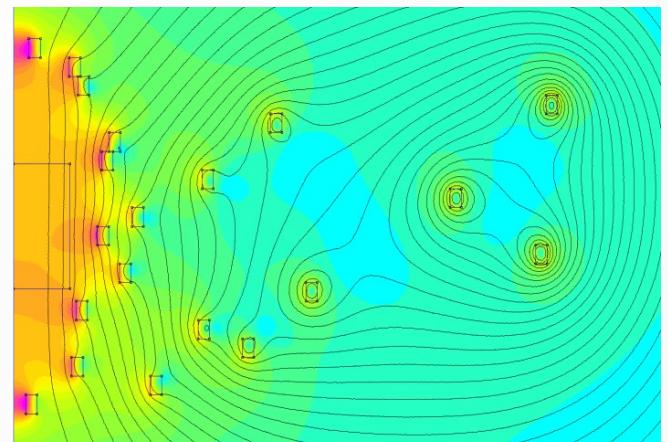


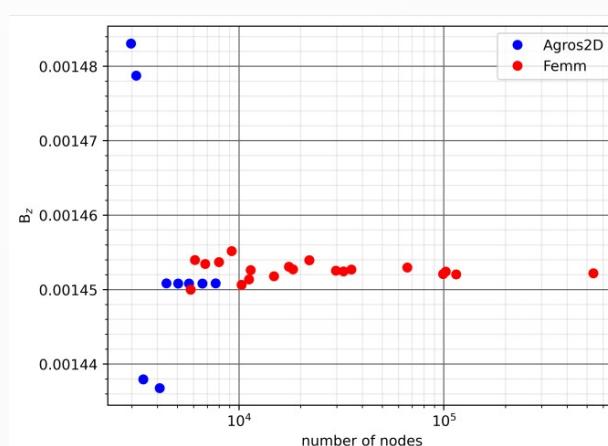
Fig. 8: Geometry and design variables



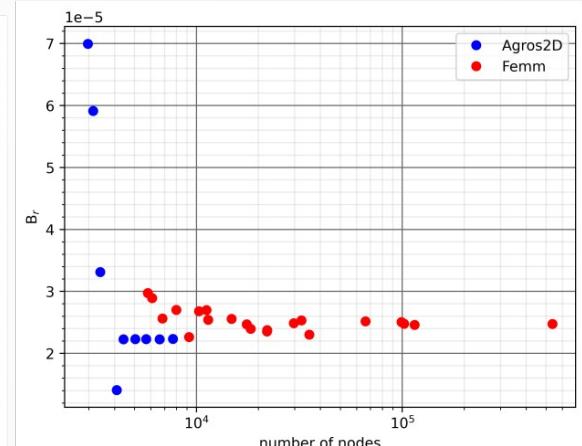
a)



b)

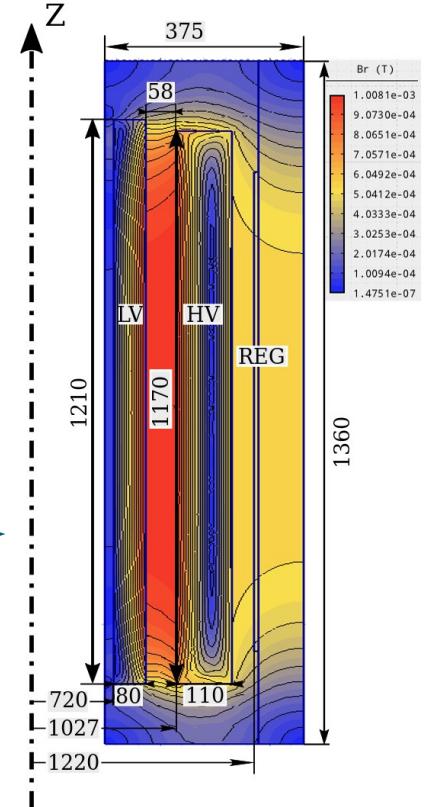
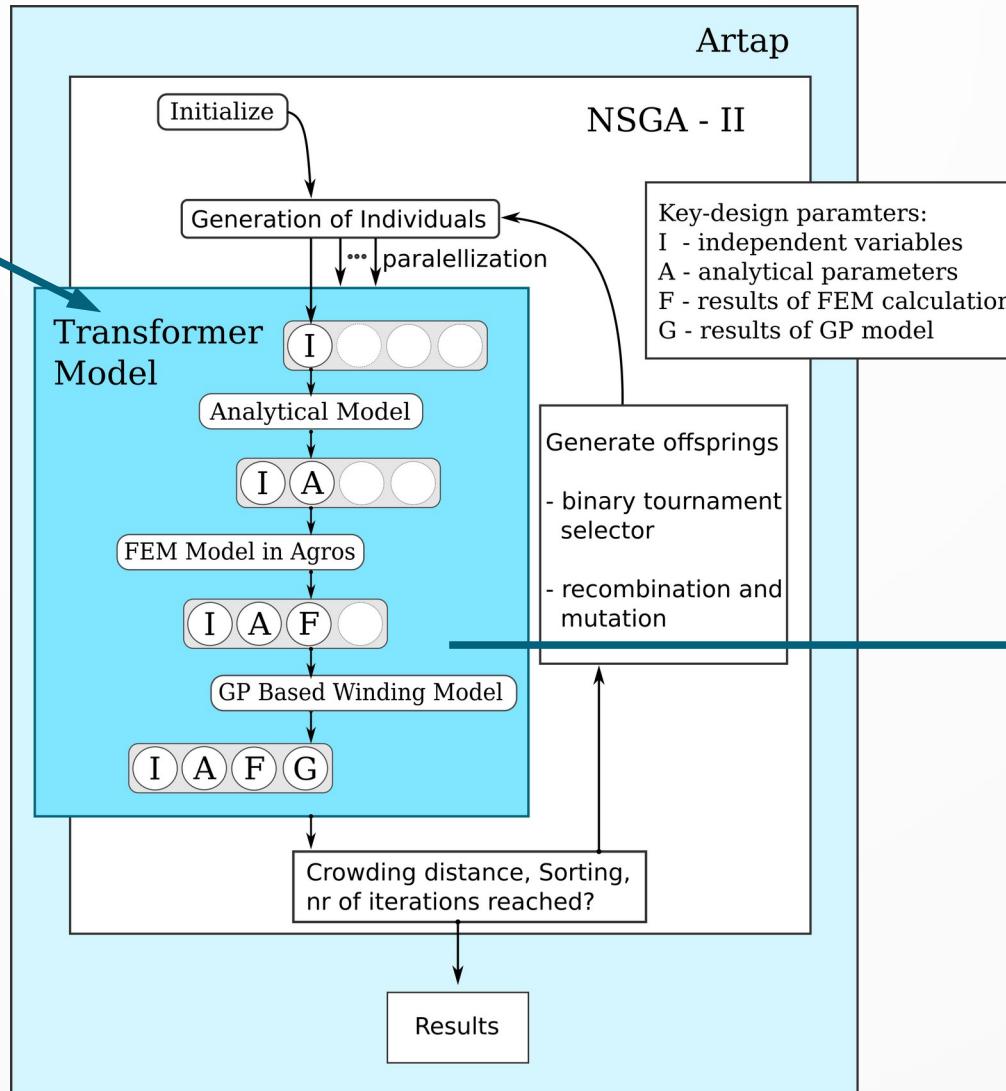
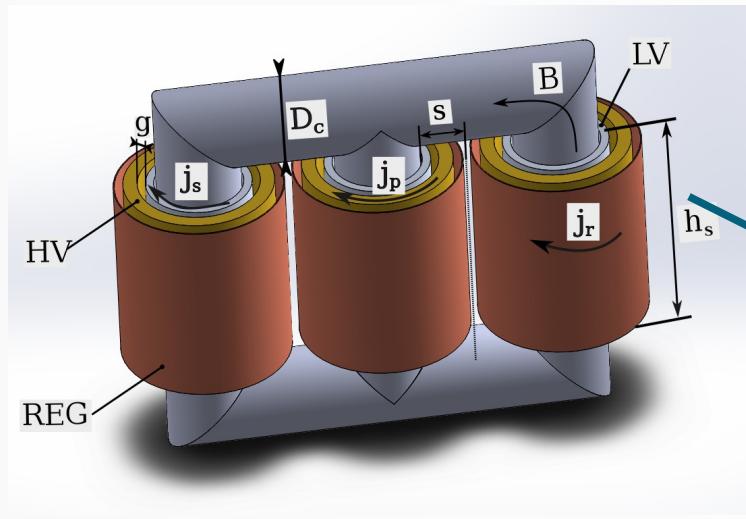


c)



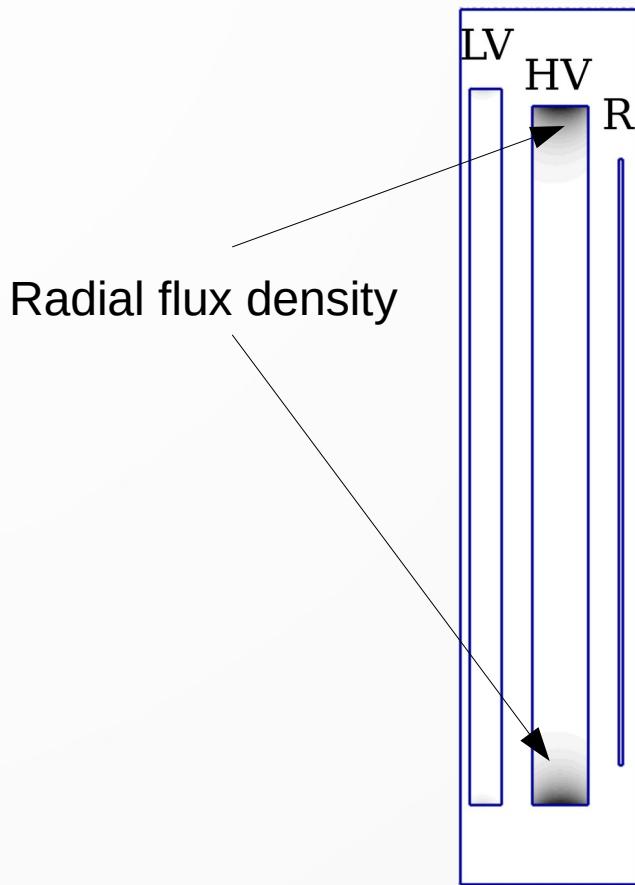
d)

Artap Optimization model



Arta Tekercs modell

- Radial flux density is concentrated at the winding ends -> cause high losses
- Modern windings are made from more than one segment
- The impact of the modern, ester or silicon oil type transformer oils cannot be considered on the design without the knowledge of the optimal conductor sizes



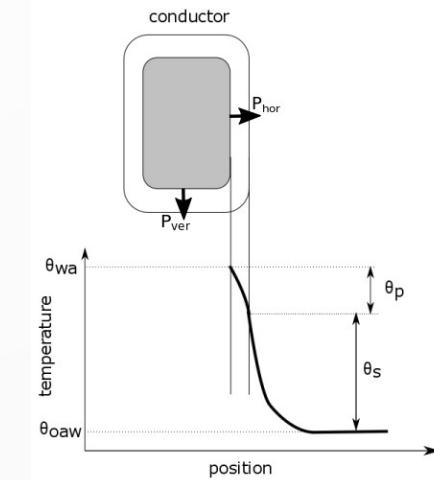
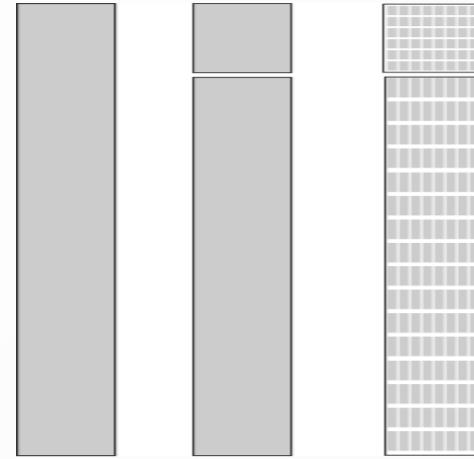
Artap Tekercs-kiosztás

- calculating and extending the the optimal transformer model with the conductor sizes for the different winding segments - d^* and h^*
- with these values the eddy losses can be calculated by a 2D FEM method:

$$P_{ax} = \frac{1}{24\rho} (\omega d^* B_z)^2$$

$$P_{rad} = \frac{1}{24\rho} (\omega h^* B_r)^2$$

- then the temperature gradients from an electro-thermal analogy

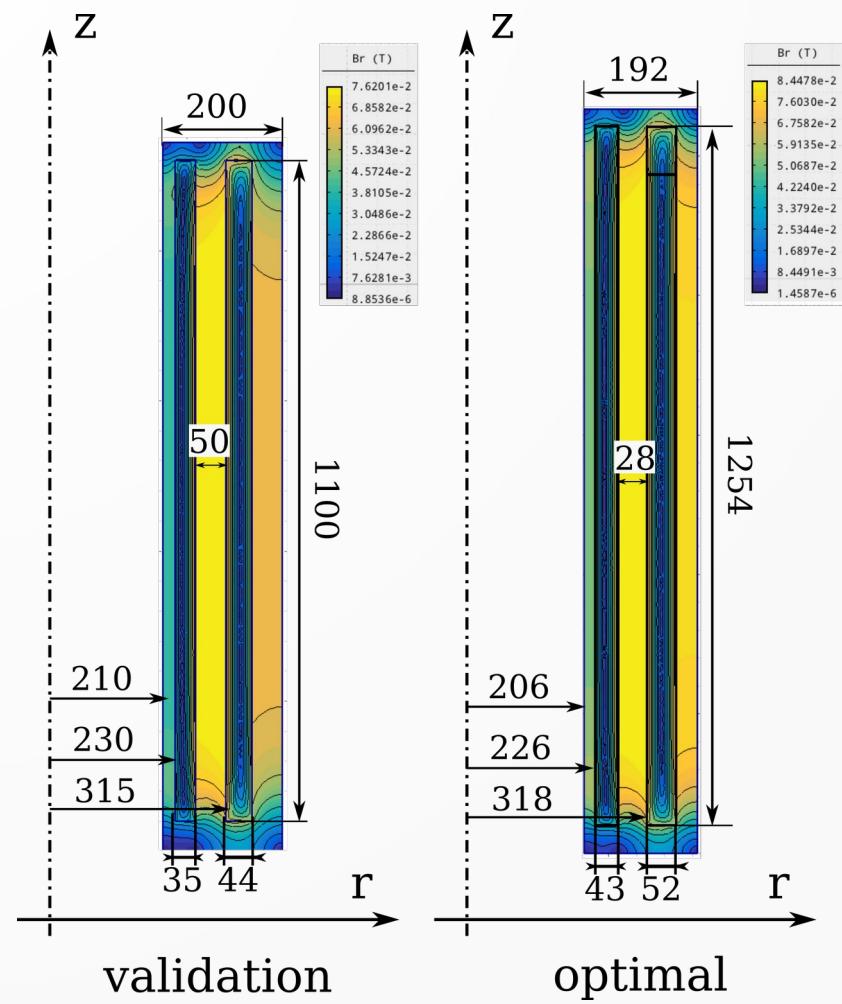


Eredmények

The physical correctness of the transformer model has been validated by an existing, 10 MVA, 33/6.9 kV, star/star connected transformer.

The resulting value of the short-circuit impedance (SCI) from the finite element analysis is **7.52%**, which is very close to the measured value (**7.34%**).

The measured eddy loss of the LV winding is **489.55 W**, **583 W** after the GP optimization. The resulting conductors are 1.7 mm thick, compared to the manufactured transformers 2.3 mm .The GGP algorithm calculated 14 K for the temperature gradient.



Ārtap

ADZE-modeler egy AGPL licenszű eszköz, letölthető a

www.github.com/RobustDesignStack/Adze-modeler

Artap is a MIT licenszű eszköz, you download it from here:

www.agros2d.org/artap

orosz.tamas@montana.hu

Köszönöm a figyelmet!