

OPTIMIZAREA CONSTRUCTIVĂ A UNUI TRANSFORMATOR ELECTRIC DE PUTERE FOLOSIND METODA SUPRAFETEI DE RĂSPUNS

Ana-Maria Marilena DUMITRU, Cristina Mihaela GHEORGHE, Leonard Marius MELCESCU
Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea POLITEHNICA din București
anna.maria0796@gmail.com, cristina.gheorghe@upb.ro, leonard.melcescu@upb.ro

Rezumat. Transformatorul electric de putere reprezintă una dintre cele mai importante și scumpe componente ale sistemului energetic. Din cauza fluctuațiilor prețului materiilor prime, profitul producătorilor acestor echipamente depinde de identificarea variantei constructive a transformatorului pentru care raportul dintre masa miezului feromagnetic și masa materialului conductor minimizează costul de producție, cu luarea în considerare a condițiilor de gabarit și a variației pe piață a prețului celor două categorii de materiale, tablă electrotehnică și material conductor.

În acest context, lucrarea propune o metodologie de analiză constructivă a transformatoarelor electrice de putere în vederea identificării unei variante constructive optime. Metoda suprafeței de răspuns (Response Surface Methodology, RSM) este aplicată pentru determinarea ansamblului de soluții (variante constructive) sub forma unei suprafețe a variației raportului M_{Fe}/M_{cond} în funcție de două dintre dimensiunile de gabarit ale transformatorului, înălțime (H_m) respectiv lungime (L_m), unde M_{Fe} este masa miezului feromagnetic iar M_{cond} masa înfășurărilor. Exemplificarea aplicării metodologiei propuse este realizată pentru un transformator electric trifazat de putere, cu înfășurări realizate din aluminiu și răcire în ulei, cu puterea aparentă nominală $S_n=630kVA$.

1. INTRODUCERE

Transformatorul electric de putere este o componentă importantă a sistemului energetic, optimizarea constructivă a acestuia reprezentând o parte semnificativă a preocupărilor specialiștilor din domeniu. Temele abordate de către aceștia urmăresc, în principal, aplicarea de diferite metode în procesul de proiectare a transformatoarelor electrice, cu scopul final de reducere a efortului de calcul și a costului de producție și funcționare [1-12].

Lucrarea de față propune o metodologie de analiză constructivă a transformatoarelor electrice de putere în vederea identificării unei variante constructive optime care să minimizeze costul de producție în vederea maximizării profitului producătorilor sau pentru a răspunde unor condiții de gabarit impuse.

Lucrarea este structurată după cum urmează. În prima parte, sunt prezentate, succint, etapele pe care le implică o analiză constructivă folosind Metoda suprafeței de răspuns (*Response Surface Methodology*, RSM). În continuare, se exemplifică parcurgerea fiecărei etape pentru analiza constructivă a unui transformator de putere cu următoarele mărimi nominale: $S_n=630kVA$, $U_{in}=10kV$, $U_{jn}=0,42kV$, $u_{sc}=5,58\%$, $P_{sc}=6000W$, $P_0=900W$, $f=50Hz$, materialul conductor fiind aluminiu. Alături de funcția obiectiv $M_{Fe}/M_{Al}=f(H_m, L_m)$, se propun și se determină expresiile analitice și a altor funcții obiectiv: $M_{Fe}=f(H_m, L_m)$, $M_{Al}=f(H_m, L_m)$ și $M_{Fe}+M_{Al}=f(H_m, L_m)$. Cele patru funcții răspuns sunt considerate a fi potrivite în optimizarea constructivă sau cea tehnico-economică a oricărui transformator electric de putere.

2. DETERMINAREA EXPRESIEI ANALITICE A FUNCȚIILOR DE OPTIMIZARE FOLOSIND METODA SUPRAFETEI DE RĂSPUNS

Metoda suprafeței de răspuns aplicată în proiectarea produselor permite modelarea modului în care schimbarea, modificarea unor variabile semnificative afectează un răspuns de interes. Acest tip de modelare contribuie la [13]:

- o înțelegere mai bună a răspunsului prin cartografierea suprafeței acestuia;
- realizarea unei optimizări prin identificarea nivelurilor de variație a răspunsului.

Aplicarea acestei metode în analiza constructivă a unui echipament, în vederea unei optimizări constructive ulterioare, necesită parcurgerea următoarelor etape:

- 1) identificarea variabilelor semnificative, X_i , în funcție de care se va analiza variația răspunsului și stabilirea funcțiilor obiectiv (funcțiile răspuns), Y_k , a căror expresie analitică urmează a fi determinată. Pentru un model polinomial de ordinul doi (cu două variabile semnificative, X_1 și X_2), funcția răspuns, Y_1 , este descrisă de următoarea relație [14-15]:

$$Y_1 = \beta_{20} \cdot X_1^2 + \beta_{02} \cdot X_2^2 + \beta_{11} \cdot X_1 \cdot X_2 + \beta_{10} \cdot X_1 + \beta_{01} \cdot X_2 + \beta_{00} + \varepsilon. \quad (1)$$

- 2) determinarea experimentală a unor valori inițiale pentru variabilele X_i , stabilite anterior. Metoda suprafeței de răspuns necesită valori inițiale experimentale obținute prin aplicarea metodei experimentului de tip central compozit, cunoscută și ca metoda experimentului compus central (în limba engleză, *Central Composite Design, CCD*). Această procedură experimentală stabilește numărul punctelor experimentale, $N=2^k+2k+n_c$, necesare determinării expresiei analitice a funcției răspuns [14-16]. Pentru un model polinomial de ordinul doi, cu două variabile semnificative, numărul punctelor este nouă ($N=2^2+2*2+1=9$);
- 3) determinarea expresiei analitice a funcțiilor răspuns prin determinarea coeficienților de regresie corespunzători; astfel, coeficienții β_{ij} din relația (1) pot fi calculați folosind diverse metode cum ar fi metoda celor mai mici pătrate sau prin utilizarea diferitelor aplicații software, cum este, de exemplu, funcția CFtool din Matlab;
- 4) optimizarea răspunsului prin minimizarea sau maximizarea funcțiilor răspuns a căror expresie analitică a fost anterior obținută.

În continuare, lucrarea prezintă aplicarea metodologiei propuse în analiza constructivă a unui transformator electric de putere, pentru a se determina cum este afectată masa părților active ale acestuia de variația dimensiunilor de gabarit, cu scopul final de optimizare constructivă a transformatorului. *Tabelul 1* prezintă mărimile nominale ale transformatorului electric trifazat de putere care face obiectul studiului de caz.

Tabel 1. Mărimile nominale ale transformatorului electric de putere folosit ca studiu de caz

S_n [kVA]	U_{it} [kV]	U_{jt} [kV]	f [Hz]	u_{sc} [%]	P_{sc} [W]	P_0 [W]	Material conductor	g [mm]	Reglaj de tensiune [%]	Tip răcire
630	10	0,42	60	5,58	6000	900	Al	0,35	±5	În ulei

2.1. Stabilirea variabilelor de optimizare

Pentru analiza constructivă a unui transformator electric de putere, în vederea optimizării sale ulterioare, s-au considerat:

- variabile semnificative – două dimensiuni de gabarit ale transformatorului, înălțimea (H_m) și lungimea (L_m), după cum se observă în Fig. 1. Nu s-a luat în considerare și lățimea transformatorului din motive de simplificare, pentru ca modelul să rămână unul polinomial de ordinul doi (cu două variabile semnificative, X_1 și X_2);
- funcții răspuns, pentru care se dorește determinarea expresiei analitice:
 - (a) $M_{Fe} = f(H_m, L_m)$ – variația masei fierului, M_{Fe} , în funcție de modificările de gabarit;
 - (b) $M_{Al} = f(H_m, L_m)$ – variația masei înfășurărilor realizate din aluminiu, M_{Al} , în funcție de modificările de gabarit;

- (c) $M_{Fe/Al} = f(H_m, L_m)$ – variația raportului dintre masa fierului și masa înfășurărilor, $M_{Fe/Al}$, în funcție de modificările de gabarit;
- (d) $M_{Fe+Al} = f(H_m, L_m)$ – variația masei totale a transformatorului, M_{Fe+Al} , în funcție de modificările de gabarit;

Pentru simplificarea modelului, analiza nu ia în considerare cantitatea de ulei și dimensiunile cuvei, tipul de răcire fiind utilizat doar în alegerea dimensiunilor canalelor de răcire.

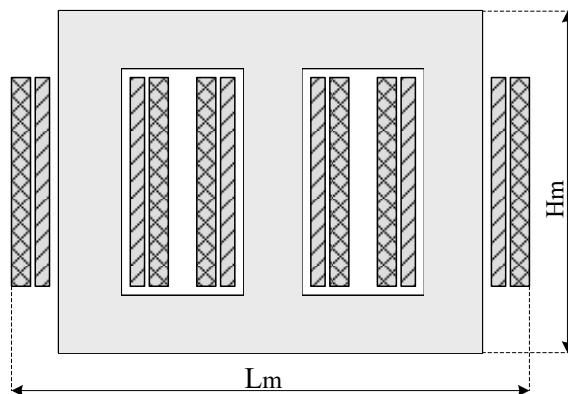


Fig.1. Dimensiunile de gabarit considerate

2.2. Determinarea experimentală a variabilelor de optimizare

Aplicarea Metodei suprafeței de răspuns necesită existența unor date inițiale experimentale ("proiecte de experimentare" [16]) pe baza cărora să se poată determina expresia analitică a funcției obiectiv a răspunsului. Aceste valori trebuie obținute folosind metoda experimentului central compus (*Central Composite Design, CCD*).

În cazul de față, variabilele considerate fiind înălțimea (H_m) și lungimea (L_m) unui transformator electric de putere, determinarea experimentală a valorilor acestora s-a realizat prin proiectare analitică clasică [17-18], cu respectarea constrângerilor privind încadrarea tensiunii de scurtcircuit, u_{sc} , și a pierderilor Joule, P_{sc} , în intervalele impuse. Valorile limită determinate experimental a celor două variabile considerate sunt prezentate în *Tabelul 2* și reprezentate grafic în Fig. 2.

Tabel 2. Valorile limită ale variabilelor de optimizare, determinate folosind metoda experimentului central compus (CCD)

Variabile de optimizare constructivă	Valorile limită ale variabilelor de optimizare		
	-1	0	1
X_1 [cm] (H_m)	120	140	160
X_2 [cm] (L_m)	120	125	130

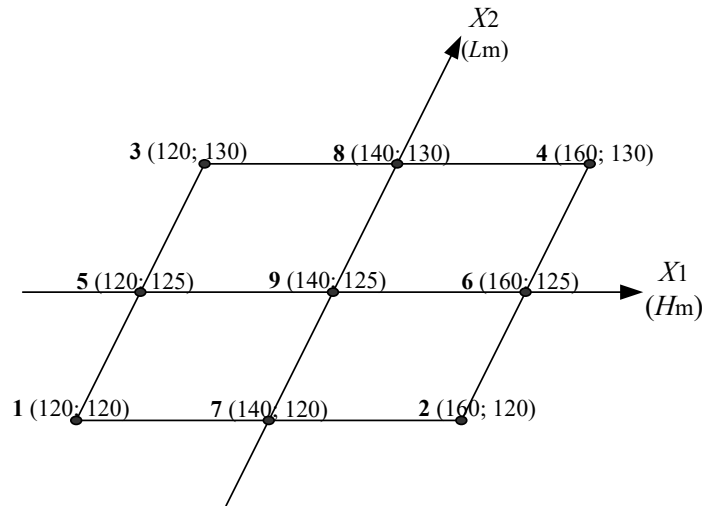






Fig.2. Reprezentarea punctelor obținute conform unui plan experimental central compozit

Fiecare punct experimental, din cele nouă necesare, reprezintă o variantă constructivă a transformatorului electric de putere cu mărimile nominale din *Tabelul 1*, varianta obținută prin proiectare analitică clasică [17-18]. Încadrarea tensiunii de scurtcircuit, u_{sc} , și a pierderilor Joule, P_{sc} , în limitele admisibile s-a realizat prin următoarele acțiuni de proiectare:

- modificarea conductoarelor alese pentru spira înfășurării de joasă tensiune (JT);
- modificarea numărului de conductoare din componența spirei de JT (*Tabelul 3*);
- modificarea aranjării inițiale a conductoarelor în spira de JT;
- modificarea numărului de spire pentru înfășurarea de JT și de înaltă tensiune (ÎT);
- modificarea diametrului coloanei.

Toate aceste acțiuni, pe lângă obținerea valorii dorite a tensiunii de scurtcircuit și a pierderilor Joule, au avut efect și asupra dimensiunilor celor două înfășurări și a miezului feromagnetic, în final obținându-se valorile din *Tabelul 4* și *Tabelul 5*. Precizia valorilor celor două variabile considerate, H_m și L_m , conform planului experimental de tip central compozit (CCD), s-a obținut prin ajustarea dimensiunilor între limite inferioare și superioare recomandate [17], a următoarelor canale de răcire: canalul de răcire dintre bobina de JT și cea de ÎT, canalul de răcire dintre bobinele de ÎT de pe coloane diferite și canalul de răcire dintre înfășurări și juguri.

Tabel 3. Aranjarea conductoarelor în spira de joasă tensiune (JT)

Numărul de conductoare în spira de JT	6	8	10	12
Aranjarea conductoarelor în spira de JT				

Tabelul 4. Parametrii celor nouă variante constructive ale transformatorului electric considerat

Puncte CCD	H_m	L_m	u_{sc}	P_{sc}	B	D	w_j	n_{cond}
	[cm]	[cm]	[%]	[W]	[T]	[cm]	[nr. spire]	[nr. conductoare]
1	120	120	5,31	6086	1,65	18,5	28	12
2	160	120	5,51	6217	1,52	20	26	6
3	120	130	5,65	5795	1,52	20	26	8
4	160	130	5,65	6676	1,52	20	26	6
5	120	125	5,32	5995	1,69	19	26	12
6	160	125	5,65	6676	1,52	20	26	6
7	140	120	5,31	5822	1,63	18	30	10
8	140	130	5,39	5859	1,52	20	26	10
9	140	125	5,35	5784	1,69	19	26	10

Tabelul 5. Variabilele de optimizare, determinate conform modelului CCD

Punctele CCD	H_m	L_m	M_{Fe}	M_{Al}	$M_{Fe}+M_{Al}$	M_{Fe}/M_{Al}
	[cm]	[cm]	[kg]	[kg]	[kg]	[u.r.]
1	120	120	838	117	955	7,16
2	160	120	1218	118	1336	10,32
3	120	130	998	110	1108	9,07
4	160	130	1260	127	1387	9,92
5	120	125	895	100	995	8,95
6	160	125	1237	127	1364	9,74
7	140	120	911	118	1029	7,72
8	140	130	1124	114	1238	9,86
9	140	125	1004	112	1116	8,96

2.3. Determinarea expresiei analitice a funcțiilor răspuns

Determinarea expresiei analitice a funcțiilor răspuns propuse în secțiunea (2.1), s-a realizat cu ajutorul funcției CFtool a mediului de calcul MATLAB, folosind expresia (1) și punctele experimentale din Tabelul 5. Funcția CFtool permite determinarea coeficienților de regresie și, prin urmare, determinarea expresiei analitice a unei funcții obiectiv. În cazul de față, s-au obținut următoarele expresii ale suprafețelor de răspuns:

(a) Expresia analitică a funcției răspuns $M_{Fe}=f(H_m, L_m)$:

$$M_{Fe} = 0,1533 \cdot H_m^2 + 0,5133 \cdot L_m^2 - 0,295 \cdot H_m \cdot L_m + 2,141 \cdot H_m - 73,2 \cdot L_m + 3991 \quad (2)$$

(b) Expresia analitică a funcției răspuns $M_{Al}=f(H_m, L_m)$:

$$M_{Al} = 0,00458 \cdot H_m^2 + 0,1733 \cdot L_m^2 + 0,04 \cdot H_m \cdot L_m - 5,908 \cdot H_m - 49 \cdot L_m + 3566 \quad (3)$$

(c) Expresia analitică a funcției răspuns $M_{Fe}/M_{Al}=f(H_m, L_m)$:

$$M_{Fe} / M_{Al} = 0,00087 \cdot H_m^2 - 0,00833 \cdot L_m^2 - 0,00578 \cdot H_m \cdot L_m + 0,5192 \cdot H_m + 3,014 \cdot L_m - 226,1 \quad (4)$$

(d) Expresia analitică a funcției răspuns $M_{Fe}+M_{Al}=f(H_m, L_m)$:

$$M_{Fe} + M_{Al} = 0,1579 \cdot H_m^2 + 0,6867 \cdot L_m^2 - 0,255 \cdot H_m \cdot L_m - 3,767 \cdot H_m - 122,2 \cdot L_m + 7557 \quad (5)$$

Reprezentarea grafică a funcțiilor răspuns cu expresiile analitice (2), (3), (4) și (5) sunt prezentate în Fig.3, Fig.4, Fig.5 și Fig.6. Se observă că soluția constructivă a transformatorului care minimizează masa fierului (a miezului feromagnetic) este diferită de cea care minimizează masa aluminiului (a înfășurărilor). Masa totală a părților active este minimă pentru două soluții constructive.

În Fig.3, reprezentarea grafică a funcției răspuns $M_{Fe} = f(H_m, L_m)$, se poate observa că dimensiunile de gabarit care conduc la minimizarea masei de fier a transformatorului, $M_{Fe} = 838\text{kg}$, sunt $H_m = 120\text{cm}$ respectiv $L_m = 120\text{cm}$.

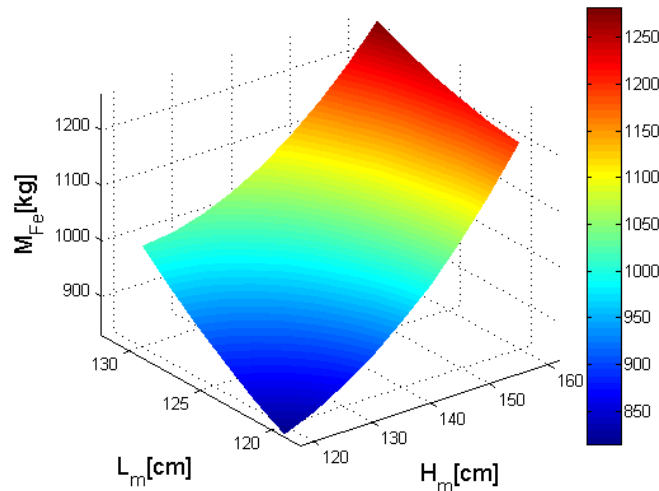


Fig. 3. Reprezentarea grafică a suprafeței de răspuns pentru funcția obiectiv $M_{Fe} = f(H_m, L_m)$.

Varianta constructivă pentru care s-a obținut un minim al masei înfășurărilor transformatorului, $M_{Al} = 100\text{kg}$, este cea cu dimensiunile $H_m = 120\text{cm}$ și $L_m = 125\text{cm}$, după cum se observă în Fig. 4.

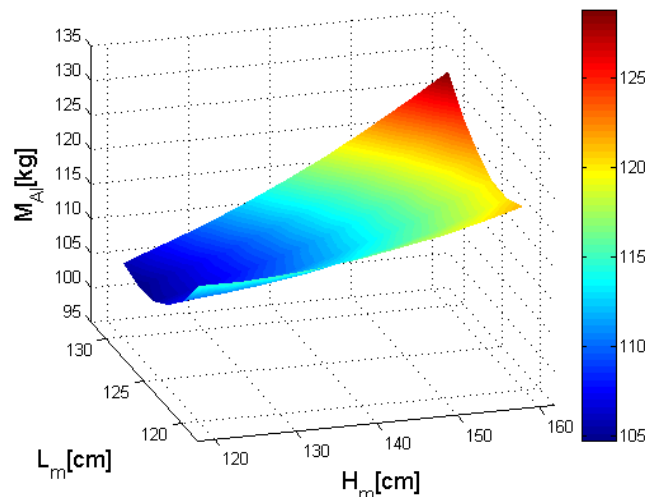


Fig. 4. Reprezentarea grafică a suprafeței de răspuns pentru funcția obiectiv $M_{Al} = f(H_m, L_m)$.

În Fig. 5, reprezentarea grafică a funcției $M_{Fe}/M_{Al} = f(H_m, L_m)$, se poate observa cum variază raportul dintre masa celor două tipuri de materiale, fier (miezul feromagnetic) respectiv aluminiu (înfășurărilor), în funcție de dimensiunile de gabarit. Astfel, dacă se dorește o valoare maximă a raportului dintre cele două tipuri de materiale (în această lucrare, 10,32u.r.), se

poate opta pentru varianta constructivă a transformatorului care conduce la valoarea respectivă a raportului (în lucrare, $H_m=160\text{cm}$ și $L_m=120\text{cm}$). Această analiză este utilă în cazul în care prețul materialului activ, în cazul de față aluminiiu, crește semnificativ iar producătorul transformatorului intenționează să minimizeze cantitatea masei înfășurărilor cu respectarea constrângerilor privind încadrarea datelor nominale în intervalele impuse.

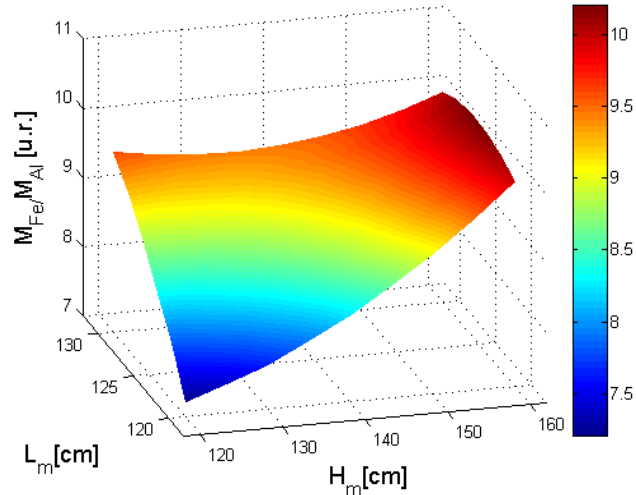


Fig. 5. Reprezentarea grafică a suprafeței de răspuns pentru funcția obiectiv $M_{Fe}/M_{Al}=f(H_m, L_m)$.

Vizualizarea grafică a funcției obiectiv $M_{Fe}+M_{Al} = f(H_m, L_m)$, în Fig. 6, permite identificarea dimensiunilor de gabarit pentru care se obține valoarea minimă a masei totale a părților active ($M_{Fe}+M_{Al}=995\text{kg}$), anume $H_m=120\text{cm}$ și $L_m=120\text{cm}$ respectiv $H_m=120\text{cm}$ și $L_m=125\text{cm}$. Se observă că, pentru studiul de caz analizat, indiferent că se optează pentru minimizarea cantității de fier sau cea de aluminiiu, soluția constructivă rezultată a transformatorului minimizează masa totală a părților active, decizia finală putând fi influențată și de locația finală a transformatorului electric de putere.

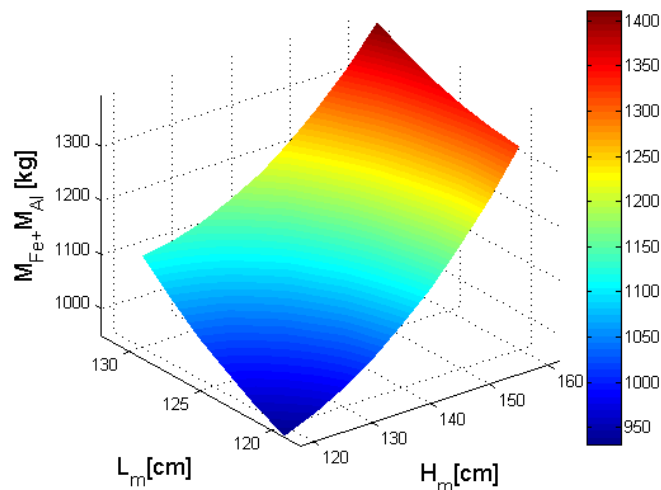


Fig. 6. Reprezentarea grafică a suprafeței de răspuns pentru funcția obiectiv $M_{Fe}+M_{Al} = f(H_m, L_m)$.

Vizualizarea grafică a suprafețelor de răspuns în Fig. 3 – Fig. 6, permite o identificare facilă a intervalelor în care variabila răspuns analizată (M_{Fe} , M_{Al} , M_{Fe}/M_{Al} sau $M_{Fe}+M_{Al}$), are valori maxime respectiv minime, stabilindu-se astfel variantele constructive ale transformatorului necesare procesului de optimizare vizat.

3. CONCLUZII

Lucrarea prezintă o metodologie de analiză constructivă a transformatoarelor electrice de putere folosind Metoda suprafeței de răspuns. Pe baza acestui demers, s-au determinat expresiile analitice a patru funcții obiectiv: $M_{Fe} = f(H_m, L_m)$, $M_{Al} = f(H_m, L_m)$, $M_{Fe}/M_{Al} = f(H_m, L_m)$ și $M_{Fe} + M_{Al} = f(H_m, L_m)$.

Cele patru funcții obiectiv propuse pot fi utilizate în optimizarea constructivă sau tehnico-economică a unui transformator electric de putere, astfel:

- (a) dacă este necesară stabilirea dimensiunilor de gabarit care minimizează masa totală a transformatorului, atunci se minimizează funcția $M_{Fe} + M_{Al} = f(H_m, L_m)$;
- (b) dacă se dorește determinarea cantității minime de material conductor și / sau de fier, atunci se vor minimiza funcțiile $M_{Al} = f(H_m, L_m)$, $M_{Fe} = f(H_m, L_m)$, și $M_{Fe}/M_{Al} = f(H_m, L_m)$. Această optimizare devine necesară în condițiile unei creșteri importante a prețului unuia dintre cele două tipuri de materiale active. Un exemplu este cazul în care prețul materialului conductor crește substanțial, astfel devenind necesară identificarea variantei constructivă a transformatorului care conducerea la obținerea parametrilor funcționali ceruți cu cantitatea minimă de material conductor și la un cost de producție care să permită obținerea celui mai mare profit pentru producător.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. D. Phaengkio, S. Ruangsinchaiwanich. (2014). Design optimization of electrical transformer using genetic algorithm. The 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22-25 October 2014, Hangzhou, China.
- [2]. Tamas Orosz, Peter Poor, Pavel Karban, David Panek. (2019). Power Transformer Design Optimization for Carbon Footprint. The 2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM), 12-15 June 2019, Kärđla, Estonia.
- [3]. Orosz, Tamas. Evolution and Modern Approaches of the Power Transformer Cost Optimization Methods. (2019). *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*.
- [4]. Amoiralis, E. I., Tsili, M. A., Kladas, A. G. (2009). Transformer Design and Optimization: A Literature Survey. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), pp. 1999–2024.
- [5]. Mgunda, M.C. (2017). Optimization of Power Transformer Design: Losses, Voltage Regulation and Tests. *Journal of Power and Energy Engineering*, 5, pp. 45-74.
- [6]. Ali Soldoozy, Abdolreza Esmali, Hamidreza Akbari, Seyed Ziya Mazloom. (2019). Implementation of tree pruning method for power transformer design optimization. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2019; 29:e2659.
- [7]. Samuel R. Cove, Martin Ordonez, Federico Luchino, John E. Quaicoe. (2013). Applying Response Surface Methodology to Small Planar Transformer Winding Design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(2), pp. 483-493.
- [8]. Amr A. Adly, Salwa K. Abd-El-Hafiz. (2015). A performance-oriented power transformer design methodology using multi-objective evolutionary optimization. *Journal of Advanced Research*, 6, pp. 417–423.
- [9]. Aniket Ranade, E. Rajkumar, Sunil Gaikwad. (2016). Transformer Tank Optimization using Design of Experiments. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(34), September 2016.
- [10]. Muhammad Ali Masood, Rana A. Jabbar, M.A.S. Masoum, Muhammad Junaid, M. Ammar. (2012). An Innovative Technique for Design Optimization Of Core Type 3-Phase Distribution Transformer Using Mathematica. *Transaction on Power distribution and optimization*, June 2012.
- [11]. Eleftherios I. Amoiralis, Pavlos S. Georgilakis, Erion Litsos. (2006). Methodology for the Optimum Design of Power Transformers Using Minimum Number of Input. Parameters ICEM 2006, paper number 470.

- [12]. H. D. Mehta, Rajesh M. Patel. (2014). A Review on Transformer Design Optimization and Performance Analysis Using Artificial Intelligence. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(9).
- [13]. ***. *What are response surface designs, central composite designs, and Box-Behnken designs?* Online la: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/> (accesat începând cu 30.10.2019)
- [14]. Douglas C. Montgomery. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. (8th Edition). John Wiley & Sons Inc.
- [15]. A. Semon, L. Melcescu, O. Craiu, A. Crăciunescu. (2019). Design Optimization of the Rotor of a V-type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor using Response Surface Methodology. The 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE2019), Bucharest, Romania, March 28-30, 2019.
- [16]. ***. *Experimentul compus central*. Online la: https://ro.wikipedia.org/wiki/Proiectarea_experimentelor#Experimentul_compus_central (accesat începând cu 30.10.2019)
- [17]. Bichir, Năstase. Stanciu, Valerius. (2001). *Proiectarea și reproiectarea transformatoarelor electrice*. Editura ICPE, București.
- [18]. I. Cioc, C. Nica. (1994). *Proiectarea mașinilor electrice*. București: Editura Didactică și Pedagogică, R.A.