

ZONA DE INCERTITUDINE A PIERDERILOR DE ENERGIE ÎN TRANSFORMATOARELE DE PUTERE, DETERMINATĂ DE LIPSA CURBEI DE SARCINĂ

V. Arion, I. Stratan, A. Cojocari
Universitatea Tehnică a Moldovei

INTRODUCERE

La consumatorii ce dețin transformatoare de putere în proprietate, la care odată cu facturarea consumului de energie urmează a fi puse la plată și pierderile de energie în transformatoare (în cazul în care aparatele de evidență a energiei nu se află în punctul de delimitare, ci la partea de joasă tensiune) apare problema calculului periodic al pierderilor de energie.

Determinarea pierderilor în transformatoarele aflate în funcționare presupune cunoașterea parametrilor pasivi ai acestora, precum și regimul de încărcare a lor pe parcursul perioadei de calcul. În practica reală pot fi întâlnite mai multe situații ce privesc disponibilitatea datelor necesare efectuării

calculului pierderilor de energie. Însă cel mai frecvent este cazul când se cunoaște doar volumul consumului de energie înregistrat pe contor, fără a deține curba de sarcină.

Pentru a înțelege cât poate „costa” lipsa de informații cu privire la forma curbei de sarcină, mai jos se analizează sensibilitatea pierderilor de energie activă în transformatoarele de putere la variația regimului de consum.

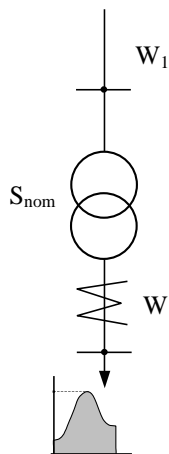


Figura 1. Un transformator cu curba de sarcină

Circulația de energie prin transformator (fig.1) cauzează pierderi de putere activă și reactivă -

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_s \quad \text{și} \quad \Delta Q = \Delta Q_0 + \Delta Q_s,$$

precum și pierderi de energie activă și reactivă -

$$\Delta W_a = \Delta W_{0,a} + \Delta W_{s,a} \quad \text{și} \quad \Delta W_r = \Delta W_{0,r} + \Delta W_{s,r}.$$

Pierderile constante de putere ΔP_0 și ΔQ_0 se determină în baza parametrilor tehnici ai transformatorului. Pierderile ΔP_0 reprezintă date de pașaport (catalog), iar pierderile ΔQ_0 se calculează cu formula:

$$\Delta Q_0 = \sqrt{(I_0 \times S_{nom} / 100)^2 - \Delta P_0^2},$$

unde atât curentul I_0 , %, cât și puterea S_{nom} sunt date de pașaport.

Calculul pierderilor constante de energie $\Delta W_{0,a}$ și $\Delta W_{0,r}$ este simplu și se bazează pe aplicarea formulelor -

$$W_{0,a} = \Delta P_0 \times T_c \quad \text{și} \quad W_{0,r} = \Delta Q_0 \times T_c,$$

unde T_c reprezintă durata perioadei de calcul (de regulă o luna).

Cea mai completă informație necesară calculului pierderilor variabile ar rezulta din curba de sarcină (activă, reactivă) înregistrată pe perioada T_c . În lipsa informațiilor cu privire la forma curbei de sarcină determinarea pierderilor variabile de energie în transformatoare ridică un șir de probleme.

1. DOUĂ GRAFICE DE SARCINĂ MARGINALE

Vom considera un transformator cu puterea nominală S_{nom} prin care este tranzitat către consumator un volum anual de energie W (W_a , W_r) înregistrat pe contor. Se presupune că regimul de consum nu este cunoscut, ceea ce înseamnă că curba de sarcină nu se înregistrează.

Să admitem de asemenea că puterea maximă a consumului S_M (P_M , Q_M), care nu e cunoscută, este limitată de puterea nominală a transformatorului S_{nom} , iar volumul maximal al energiei tranzitate W^+ (W_a^+ , W_r^+) - respectiv de capacitatea transformatorului -

$$W_{nom} = S_{nom} T_{an}.$$

Caz particular: Fie că volumul energiei W înregistrate pe contor pe durata unui an (T_{an}) constituie W_{nom} . În ipoteza de mai sus, aici ne rămâne să acceptăm că consumul de după transformator a fost unul uniform și că curba de sarcină a reprezentat o linie dreaptă (fig.2).

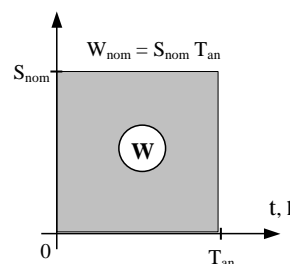


Figura 2. Volumul maximal al energiei tranzitate

Cât privește calculul pierderilor de energie în transformator pentru acest caz - el este simplu și (cuasi) determinist, în ciuda faptului că curba de sarcină n-a fost înregistrată.

Caz general: Să admitem acum că $0 < W < W_{nom}$. Pentru un asemenea caz curba de sarcină ar putea avea una din multitudinea de forme posibile. În fig. 3 sunt indicate două din ele – grafice marginale, idealizate, pentru care volumul anual de energie este unul și același și egal cu W , însă pierderile de energie în transformator sunt diferite. Formulele de calcul a pierderilor variabile (active) pentru graficul de sarcină vertical ($\Delta W_{s,a}^+$, fig.3,a) și cel orizontal ($\Delta W_{s,a}^-$, fig.3,b) respectiv sunt următoarele:

$$\Delta W_{s,a}^+ = \Delta P_{sc} W / S_{nom} \quad (1) ,$$

$$\Delta W_{s,a}^- = \Delta P_{sc} W^2 / (S_{nom}^2 \cdot T_{an}) \quad (2) ,$$

unde $W = \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$.

Este ușor de observat, că pentru un volum de energie W cunoscut, $\Delta W_{s,a}^+$ reprezintă valoarea

maximă posibilă a pierderilor variabile (ipoteza graficului vertical, fig.3,a), iar $\Delta W_{s,a}^-$ - valoarea minimă posibilă a pierderilor (grafic orizontal, fig.3,b).

Este important de a realiza cu cât pot să se deosebească pierderile pentru aceste două grafice - lucru care ne-ar vorbi despre erorile maxime posibile cauzate de lipsa informației cu privire la forma reală a graficului de sarcină.

Vom mai remarca, că durata T^+ (fig.3,a) are și semnificația duratei utilizării sarcinii maxime egale cu puterea nominală a transformatorului.

Să revenim la graficele din fig.3, considerând diverse valori ale volumului energiei W , tranzitate prin transformator. În cele ce urmează vom trece de la valoarea W la gradul de încărcare a transformatorului K_u , de altfel numit și coeficient de utilizare a puterii instalate a transformatorului, care în acest caz reprezintă rapoartele -

$$K_u = W / W_{nom} = T^+ / T_{an} = S_{med} / S_{nom} . \quad (3)$$

Mai întâi să precizăm care este relația dintre pierderile de energie (variabile și cele totale) și gradul de încărcare a transformatorului. Pentru graficul de sarcină vertical (fig.3,a) avem funcții liniare -

$$\Delta W_{s,a}^+ = a_1 K_u \quad \text{și} \quad \Delta W_a^+ = a_0 + a_1 K_u , \quad (4)$$

iar pentru cel orizontal (fig.3,b) rezultă funcții pătratice -

$$\Delta W_{s,a}^- = a_1 K_u^2 \quad \text{și} \quad \Delta W_a^- = a_0 + a_1 K_u^2 , \quad (5)$$

unde a_0 și a_1 - coeficienți, ce au semnificația unor pierderi anuale de energie, cauzate respectiv de pierderile de putere ΔP_0 și ΔP_{sc} - $a_0 = \Delta W_{0,a} = \Delta P_0 T_{an}$ și $a_1 = \Delta W_{s,a}^{nom} = \Delta P_{sc} T_{an}$.

În tabela din Anexa 2 sunt prezentate valorile pierderilor anuale de energie pentru transformatorul TM-100kVA, 10/0.4kV, calculate în funcție de K_u pentru cele două grafice idealizate din fig.3.

2. ZONA DE INCERTITUDINE A PIERDERILOR DE ENERGIE ȘI CARACTERISTICILE ACESTEIA

În fig.4 este prezentată dependența pierderilor totale maxime ΔW_a^+ și minime ΔW_a^- de gradul de încărcare K_u a transformatorului. Aria cuprinsă între curbele $\Delta W_a^+(K_u)$ și $\Delta W_a^-(K_u)$ reprezintă *zona de incertitudine a pierderilor totale de energie* în transformator, cauzată de lipsa de informație cu privire la forma curbei de sarcină.

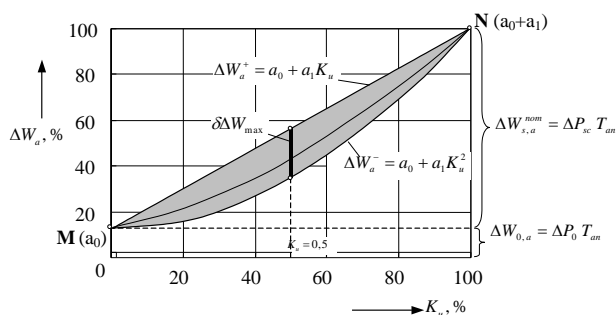


Figura 4. Zona de incertitudine a pierderilor totale de energie activă în transformator ($S_{nom} = 100$ kVA)

Punctul N în fig. 4 pentru întreaga gamă a transformatoarelor existente este un punct fix, pe când punctul M variază în dependență de tipo-dimensiunea transformatorului, în particular, de valoarea raportului pierderilor la mers în gol la pierderile de scurtcircuit,

$$\lambda = \Delta P_{sc} / \Delta P_0 .$$

Variația indicatorului λ pentru transformatoarele 10kV, aflate în folosință în țară [1], este arătată în fig.5. Valoarea medie a raportului λ rezultă egală cu 4,7.

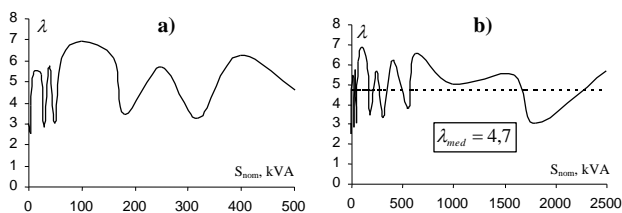


Figura 5. Raportului $\Delta P_{sc} / \Delta P_0$ în funcție de puterea nominală a transformatorului

Poziția punctului M pe axa pierderilor totale (%) este determinată de relația $\Delta W_{a,M} = 100 / (1 + \lambda)$.

Suprafața zonei de incertitudine se determină cu formula -

$$S = \int_0^1 [\Delta W_{s,a}^+(K_u) - \Delta W_{s,a}^-(K_u)] \partial K_u \quad (33)$$

și numeric constituie o șesime din pierderi nominale -

$$S = a_1 \int_0^1 (K_u - K_u^2) \partial K_u = a_1 / 6$$

In fig.6 sunt prezentate zonele de incertitudine pentru alte trei transformatoare cu puterile 25, 30 și 1000kVA.

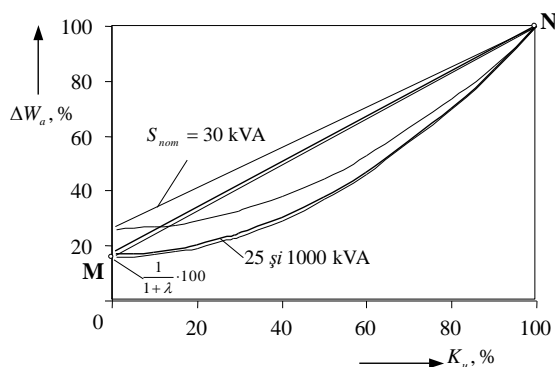


Figura 6. Zonele de incertitudine pentru transformatoarele 25, 30 și 1000 kVA

Pentru o valoare concretă a gradului de încărcare a transformatorului, intervalul $[\Delta W_a^-, \Delta W_a^+]$ cu lungimea $\delta \Delta W$ ($\delta \Delta W = \Delta W_a^+ - \Delta W_a^-$ sau $\delta \Delta W = \Delta W_{s,a}^+ - \Delta W_{s,a}^-$), reprezintă *intervalul de incertitudine a pierderilor de energie* în transformator [2] (fig. 7).

I. Raportul pierderilor variabile. Vom determina raportul A_* al pierderilor variabile maxime (fig.3,a) la cele minime (fig.3,b) pentru un volum cunoscut al energiei tranzitate W - $A_* = \Delta W_{s,a}^+ / \Delta W_{s,a}^-$.

Aplicând formulele (1) și (2), pentru A_* rezultă expresia de calcul - $A_* = 1 / K_u$.

Valoarea A_* , după cum se dovedește, este determinată doar de gradul de încărcare a transformatorului și nu depinde nici de capacitatea acestuia și nici de

coeficientul de putere a consumului. Ar fi de subliniat, că raportul A_* indică asupra incertitudinii pierderilor variabile cauzate de lipsa de informație cu privire la forma curbei de sarcină.

În tab.1 sunt prezentate valorile indicatorului A_* calculate pentru diferite valori ale gradului de încărcare a transformatorului K_u .

Datele din tab.1 indică asupra faptului că la volume mici ale energiei tranzitate ($T^+ < 1000$ h/an sau $K_u < 10\%$) pierderile variabile de energie în transformator, pentru cele două grafice extreme din fig.3, pot să se deosebească de zeci de ori! Acest lucru ne îndreaptă cu gândul spre concluzia că necunoașterea curbei de sarcină ar putea "costa" mult. Însă trebuie să ținem cont, că indicatorul A_* se referă doar la pierderile variabile, care la consumuri mici și ele au valori mici în raport cu pierderile constante de energie.

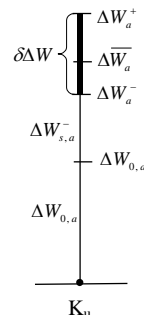


Figura 7. Intervalul de incertitudine a pierderilor

Tab.1. Raportul A_* în funcție de gradul de încărcare a transformatorului

$K_{us}, \%$	1	5	10	20	40	60	80	90	100
$T^+, \text{ h/an}$	88	438	876	1752	3504	5256	7008	7884	8760
$A_* = \Delta W_{s,a}^+ / \Delta W_{s,a}^-$	100	20	10	5	2,50	1,67	1,25	1,11	1,00

II. Raportul pierderilor totale. Un interes practic deosebit îl are un alt raport, B_* , al pierderilor totale maxime (fig.3,a) la cele minime (fig.3,b) -

$$B_* = \Delta W_a^+ / \Delta W_a^-.$$

Cu referințe la cele două grafice din fig.3, raportul B_* indică de câte ori pierderile totale în transformator, în cazul graficului de sarcină vertical, sunt mai mari față de cazul cu grafic orizontal. Altfel spus, B_* ne arată care poate fi incertitudinea în valoarea pierderilor totale de energie cauzată de necunoașterea formei reale a curbei de sarcină.

Formula de calcul al indicatorului B_* este -

$$B_* = \Delta W_a^+ / \Delta W_a^- = (1 + \lambda K_u) / (1 + \lambda K_u^2).$$

De observat, că B_* depinde atât de gradul de încărcare a transformatorului (K_u), cât și de caracteristicile lui constructive (λ), însă nu depinde de $\cos \phi$.

Raportul $\Delta W_a^+ / \Delta W_a^-$ atinge valoarea maximă pentru un grad de încărcare $K_{u(B=\max)}$, determinat cu formula

$$K_{u(B=\max)} = (\sqrt{1 + \lambda} - 1) / \lambda.$$

TM-100kVA, spre exemplu, pentru care $\lambda = 6.88$, rezultă $K_{u(B=\max)} = 0.26$ (vezi tabelul din Anexa 2).

Analiza arată, că pentru transformatoarele existente în țară, $K_{u(B=\max)}$ variază între 26...35 %, iar indicatorul B_{\max} între 143...190 %.

III. Lungimea intervalului de incertitudine

Din analiza efectuată pentru tipo-dimensiunile transformatoarelor existente în țară se desprind câteva observații cu privire la intervalul de incertitudine a pierderilor de energie:

Lungimea intervalului de incertitudine a pierderilor totale de energie electrică activă în transformator, $\delta\Delta W$, cauzată de necunoașterea formei curbei de sarcină a acestuia, variază în dependența de gradul de încărcare a transformatorului.

La „cozi” $\delta\Delta W$ are valori mici, iar în centru - valori mari (vezi fig.4).

a) Se dovedește că valoarea maximă a intervalului de incertitudine $\delta\Delta W_{\max}$ are loc pentru $K_u = 0.5$, indiferent de puterea nominală a transformatorului și $\cos\varphi$; ea se determină cu expresia

$$\delta\Delta W_{\max} = a_1 / 4 = \Delta P_{sc} T_{an} / 4,$$

și reprezintă a patra parte din pierderile variabile „nominale”, $\Delta W_{s,a}^{\text{nom}} = \Delta P_{sc} T_{an}$ (vezi fig.4). De observat, că abaterea $\delta\Delta W$ și raportului B_* ating valorile maxime pentru diferite valori ale K_u .

Raportul $\delta\Delta W_{\max}$ la volumul energiei active tranzitate ($K_u = 0.5$) se determină cu formula –

$$\delta\Delta W_{\max} / W_{a(K_u=0,5)} = 0,5\Delta P_{sc} / (S_{nom} \cos\varphi)$$

și în dependența de tipodimensiunea transformatorului constituie între 0,6...1,6 % din volumul energiei active tranzitate;

În tab.2 este prezentat un sumar al analizei valorii maxime a intervalului de incertitudine pentru trei transformatoare de distribuție.

Tabelul 2. Caracteristicile intervalului de incertitudine al pierderilor de energie pentru diferite transformatoare, cauzat de necunoașterea formei curbei de sarcină

Rapoarte	Formula de calcul	Unități	Puterea nominală S_{nom} , kVA		
			25	100	1000
$\delta\Delta W_{\max}(K_u=0,5)$	$0,25\Delta P_{sc} T_{an}$	kWh	1 511	4 971	26 718
$\delta\Delta W_{\max} / W_{a(K_u=0,5)}$	$0,5\Delta P_{sc} / (S_{nom} \cos\varphi)$	%	1,53	1,26	0,68
$\delta\Delta W_{\max} / W_{s,a}^{\text{nom}}$	1/4	%	25,00	25,00	25,00
$\delta\Delta W_{\max} / \Delta W_a^{\text{nom}}$	$0,25\lambda / (1 + \lambda)$	%	21,04	21,83	20,82
$\delta\Delta W_{\max} / \Delta W_a^-(K_u=0,5)$	$\lambda / (4 + \lambda)$	%	57,02	63,23	55,45

Raportul $\delta\Delta W_{\max}$ la pierderile active totale

„nominale”, $\Delta W_a^{\text{nom}} = (\Delta P_o + \Delta P_{sc}) T_{an}$, se determină cu formula -

$$\delta\Delta W_{\max} / \Delta W_a(K_u=1,0) = 0,25\lambda / (1 + \lambda)$$

și constituie între 21 ... 22 %;

- Raportul $\delta\Delta W_{\max}$ la pierderile active totale, ce corespund graficului orizontal pentru $K_u = 0.5$, se determină cu formula -

$$\delta\Delta W_{\max} / \Delta W_a^-(K_u=0,5) = \lambda / (4 + \lambda)$$

și constituie între 55 ... 65 %.

b) Valoare medie $\delta\Delta W_{m.tr.}$ a intervalul de incertitudine, determinată pentru toată mulțimea valorilor posibile ale gradului de încărcare K_u , $K_u = 0...1.0$ (mai departe - abaterea medie a transformatorului), este numeric egală cu suprafața zonei de incertitudine -

$$\delta\Delta W_{m.tr.} = a_1 / 6 .$$

Așadar, abaterea medie a transformatorului $\delta\Delta W_{m.tr.}$ constituie o șesime din pierderile variabile „nominale”, pe când abaterea maximă $\delta\Delta W_{\max}$ - o pătrime.

Ușor de constatat, că abaterea reală $\delta\Delta W$ este egală cu $\delta\Delta W_{m.p.}$ pentru două valori simetrice ale K_u , $K_{u(\delta\Delta W=a_1/6)} = 0,5 \pm 0,29 = 0,21$ și $0,79$.

IV. Ponderele valorii incerte în pierderile totale de calcul

Ținând cont de prezenta incertitudinii, pierderile ΔW_a , pentru un grad de încărcare K_u cunoscut, pot fi prezentate ca cuprinzând două componente –

$$\Delta W_a = \Delta W_a^- + \delta\Delta W_{med},$$

una deterministă, ΔW_a^- , ce poate fi calculată cu exactitate,

$$\Delta W_a^- = \Delta W_{0,a} + \Delta W_{s,a}^-$$

și alta - incertă, $\delta\Delta W_{med}$, ce reprezintă o valoare medie pentru intervalul de incertitudine dat.

În acest context prezintă interes raportul pierderilor totale ΔW_a (cu cele două componente) la volumul energiei active tranzitate prin transformator W_a pe perioada de calcul (tab.3). Analiza efectuată pentru transformatoarele 25...1000 kVA indică că pentru sarcini (K_u) cuprinse între 20...50%, ceea ce este caracteristic pentru majoritatea transformatoarelor consumatorilor, raportul pierderilor certe la energia W_a pot atinge 1,2...3,5 %, pierderilor incerte - 0,3...1,3 % și celor totale - 1,5...4,8 %. Ponderele pierderilor incerte constituie 0,2...0,3 din pierderile totale, ceea ce ne vorbește despre impactul substanțial al incertitudinii formei curbei de sarcină asupra pierderilor de energie activă.

Tabelul 3. Pierderile de energie activă (pe componente – valori certe/incerte), raportate la energia activă tranzitată, funcție de gradul de încărcare ($S_{nom} = 25 - 1000$ kVA, $\cos\varphi = 0.9$)

Transfor mator, kVA	Parametru	Rapoarte	T ⁺ , h											
			88	438	876	1 314	1 752	2 628	3 504	4 380	5 256	7 008	7 884	8 760
	K_u, %	T⁺ / 8760	1 %	5 %	10 %	15 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	80 %	90 %	100 %
25	Valoare certă, %	$\Delta W_a^- / W_a$	57,81	11,71	6,08	4,31	3,50	2,85	2,67	2,69	2,80	3,18	3,40	3,64
	50% valoare incertă*, %	$\delta\Delta W_{med} / W_a$	1,52	1,46	1,38	1,30	1,23	1,07	0,92	0,77	0,61	0,31	0,15	0,00
	Total, %,	$\Delta W_a^{med} / W_a$	59,33	13,17	7,46	5,62	4,73	3,92	3,59	3,46	3,42	3,48	3,56	3,64
	din care 50 % pierderile incerte constituie, u.r.	$\delta\Delta W_{med} / \Delta W_a^{med}$	0,03	0,11	0,18	0,23	0,26	0,27	0,26	0,22	0,18	0,09	0,04	0,00
100	Valoare certă, %	$\Delta W_a^- / W_a$	36,69	7,46	3,92	2,82	2,34	1,98	1,93	1,99	2,12	2,48	2,68	2,89
	50% valoare incertă, %	$\delta\Delta W_{med} / W_a$	1,25	1,20	1,14	1,07	1,01	0,88	0,76	0,63	0,50	0,25	0,13	0,00
	Total, %,	$\Delta W_a^{med} / W_a$	37,94	8,66	5,05	3,89	3,35	2,86	2,68	2,63	2,63	2,73	2,80	2,89
	din care 50 % pierderile incerte constituie, u.r.	$\delta\Delta W_{med} / \Delta W_a^{med}$	0,03	0,14	0,22	0,28	0,30	0,31	0,28	0,24	0,19	0,09	0,04	0,00
1000	Valoare certă, %	$\Delta W_a^- / W_a$	27,24	5,51	2,86	2,02	1,63	1,31	1,22	1,22	1,27	1,42	1,52	1,63
	50% valoare incertă, %	$\delta\Delta W_{med} / W_a$	0,67	0,64	0,61	0,58	0,54	0,47	0,41	0,34	0,27	0,14	0,07	0,00
	Total, %,	$\Delta W_a^{med} / W_a$	27,91	6,16	3,47	2,59	2,17	1,79	1,63	1,56	1,54	1,56	1,59	1,63
	din care 50 % pierderile incerte constituie, u.r.	$\delta\Delta W_{med} / \Delta W_a^{med}$	0,02	0,10	0,18	0,22	0,25	0,27	0,25	0,22	0,18	0,09	0,04	0,00
25 - 1000	Valoare certă, %	$\Delta W_a^- / W_a$					3,50	...	...	1,22				
	50% valoare incertă, %	$\delta\Delta W_{med} / W_a$					1,23	...	...	0,34				
	Total, %,	$\Delta W_a^{med} / W_a$					4,73	...	...	1,56				
	din care 50 % pierderile incerte constituie, u.r.	$\delta\Delta W_{med} / \Delta W_a^{med}$					0,30	...	...	0,22				

(*) mai precis 45,6%

CONCLUZII

1. Lipsa de informație cu privire la forma reală a curbei de sarcină a transformatorului implică o incertitudine în valorile de calcul ale pierderilor totale de energie activă în transformatoare. Lungimea intervalului de incertitudine depinde de tipodimensiunea transformatorului și de gradul de încărcare a acestuia pe perioadă de calcul
2. Atât timp, cât se cunoaște doar volumul energiei tranzitate, fără înregistrarea curbei de sarcină, pierderile de energie în transformator, în principiu, nu pot fi cunoscute cu exactitate
3. La un grad de încărcare a transformatoarelor între 25...50%, ceea ce corespunde nivelului real la faza actuală, incertitudinea în valoarea de calcul a pierderilor de energie atinge cota maximă de 0,2-0,3 din pierderile totale.

Bibliografie

1. *Spravocinic poelectrosnabjeniu i electrooborudovanii. Sub red. A.A.Fiodorov, Vol.2, Moskva, Energoatomizdat, 1987, 591p.*
2. *Arion V.D., Caratun V.S., Pasincovski P.A. Optimizacia sistem electrosnabjenia v usloviah neopredelennosti. Chisinau, Știința, 1981.*

ANEXE

Anexa 1. Notații

- ΔP și ΔQ pierderile totale de putere activă și reactivă în transformator,
- ΔP_0 și ΔQ_0 pierderile constante de putere activă și reactivă,
- ΔP_s și ΔQ_s pierderile variabile de putere activă și reactivă,
- ΔP_{sc} pierderile active de scurtcircuit,
- W_a și W_r energia activă și reactivă, tranzitate prin transformator pe parcursul perioadei de facturare,
- ΔW_a și ΔW_r pierderile totale de energie activă și reactivă pe parcursul perioadei de facturare,
- $\Delta W_{0,a}$ și $\Delta W_{0,r}$ pierderile constante de energie activă și reactivă,
- $\Delta W_{s,a}$ și $\Delta W_{s,r}$ pierderile variabile de energie activă și reactivă,
- S_{max} puterea aparentă maximă a sarcinii, înregistrată pe parcursul perioadei de facturare,
- S_{nom} puterea aparentă nominală a transformatorului,
- T_M durata de utilizare a puterii aparente maxime,
- T_c perioada de facturare,
- τ durata pierderilor maxime,
- U_{nom} tensiunea nominală (primară) a transformatorului,
- $\cos \varphi$ factorul de putere.

Anexa 2. Pierderile totale de energie în transformatorul TM-100kVA în funcție de K_u și forma curbei de sarcină

Gradul de încărcare K_u , %	T^+ , h	Pierderile de energie activă, kWh					Raportul $\frac{\Delta W_a^+}{\Delta W_a^-}$, %	ΔW , kWh
		Pierderi constante ΔW_0	fig. 3,a		fig. 3,b			
			Variabile $\Delta W_{s,a}^+$	Totale ΔW_a^+	Variabile $\Delta W_{s,a}^-$	Totale ΔW_a^-		
1	88	2891	199	3090	2	2893	106,8	197
5	438	2891	994	3 885	50	2 941	132,1	945
10	876	2891	1 989	4 879	199	3 090	157,9	1790
15	1 314	2891	2 983	5 874	447	3 338	175,9	2535
20	1 752	2891	3 977	6 868	795	3 686	186,3	3182
26,3	2301	2891	5 223	8 114	1 372	4 263	190,3	3851
30	2628	2891	5 966	8 856	1 790	4 680	189,2	4176
40	3 504	2891	7 954	10 845	3 182	6 072	178,6	4772
50	4 380	2891	9 943	12 833	4 971	7 862	163,2	4971
60	5 256	2891	11 931	14 822	7 159	10 049	147,5	4772
80	7 008	2891	15 908	18 799	12 727	15 617	120,4	3182
90	7 884	2891	17 897	20 787	16 107	18 998	109,4	1790
100	8 760	2891	19 885	22 776	19 885	22 776	100,0	0

Anexa 3. Analiza sensibilității pierderilor anuale de energie în funcție de gradul de încărcare a transformatorului ($S_{nom} = 100$ kVA, $\cos\varphi = 0,9$)

Parametru	Rapoarte, %	T^+ , h												
		88	438	876	1 752	1 752	2 301	2 628	3 504	7 008	1 752	2 628	3 504	7 008
K_u	$T^+ / 8760$	1 %	5 %	10 %	15 %	20 %	26,27 %	30 %	40 %	50 %	60 %	80 %	90 %	100 %
$\delta\Delta W$	$\frac{\delta\Delta W}{\Delta W_a^+}$	6,37	24,3	36,7	43,2	46,3	47,5	47,2	44,0	38,7	32,2	16,9	8,6	0,0
	$\frac{\delta\Delta W}{\Delta W_a^-}$	6,60	28,0	45,8	56,4	61,9	64,0	63,4	57,9	49,1	39,0	18,6	9,0	0,0
	$\frac{\delta\Delta W}{\Delta W_{s,a}^-}$	6,81	32,1	57,9	75,9	86,3	90,3	89,2	78,6	63,2	47,5	20,4	9,4	0,0
	$\frac{\delta\Delta W}{W_a}$	2,50	2,40	2,27	2,14	2,02	1,86	1,77	1,51	1,26	1,01	0,50	0,25	0,00
$\delta\Delta W^-$	$\frac{\delta\Delta W^-}{\Delta W_a}$	3,1	14,6	26,4	34,6	39,4	41,2	40,7	35,8	28,8	21,7	9,3	4,3	0,0
	$\frac{\delta\Delta W^-}{\Delta W_{0,a}}$	3	15	28	40	50	61	66	75	78	75	50	28	0
ΔW_a^+	$\frac{\Delta W_a^+}{W_a}$	39,19	9,86	6,19	4,97	4,36	3,92	3,74	3,44	3,26	3,13	2,98	2,93	2,89
ΔW_a	$\frac{\Delta W_a}{\Delta W_{0,a}}$	37,83	8,55	4,95	3,80	3,26	2,91	2,78	2,62	2,57	2,58	2,71	2,79	2,89
$\Delta W_{s,a}^+$	$\frac{\Delta W_{s,a}^+}{\Delta W_{0,a}}$	7	34	69	103	138	181	206	275	344	413	550	619	688
	$\frac{\Delta W_{s,a}^-}{\Delta W_a^+}$	0,06	1,28	4,08	7,6	11,6	16,9	20,2	29,3	38,7	48,3	67,7	77,5	87,3
$\Delta W_{s,a}^-$	$\frac{\Delta W_{s,a}^-}{\Delta W_a^-}$	0,07	1,47	5,09	10,0	15,5	22,8	27,2	38,6	49,1	58,6	74,6	81,3	87,3
	$\frac{\Delta W_{s,a}^-}{\Delta W_{s,a}^-}$	0,07	1,69	6,44	13,4	21,6	32,2	38,2	52,4	63,2	71,2	81,5	84,8	87,3
	$\frac{\Delta W_{s,a}^-}{\Delta W_{0,a}}$	0,07	1,72	6,88	15,5	27,5	47,5	61,9	110,1	172,0	247,6	440,2	557,2	687,9
	$\frac{\Delta W_{0,a}}{\Delta W_a^+}$	93,6	74,4	59,2	49,2	42,1	35,6	32,6	26,7	22,5	19,5	15,4	13,9	12,7
ΔW_0	$\frac{\Delta W_{0,a}}{\Delta W_{0,a}}$	96,9	85,7	74,0	64,3	56,3	48,0	43,9	35,0	28,5	23,6	16,9	14,6	12,7
		99,9	98,3	93,6	86,6	78,4	67,8	61,8	47,6	36,8	28,8	18,5	15,2	12,7