

**Wielu Czytelników
dopominało się
w listach i e-mailach
o ten temat.**

Metody projektowania transformatorów dla napięć sinusoidalnych na rdzeniach

toroidalnych w zasadzie nie odbiegają od metod stosowanych przy rdzeniach płaskich, a stopień trudności obliczeń dla wszystkich typów jest taki sam. Transformatory na rdzeniach toroidalnych mają jednak odmienne od pozostałych typów cechy konstrukcyjne. Na przykładzie obliczenia transformatora małej mocy zostaną przedstawione różnice między transformatorami na rdzeniach toroidalnych a pozostałymi typami transformatorów.

Specyfiką transformatorów na rdzeniach toroidalnych jest brak szczeliny powietrznej na styku dwóch blach. Zwiększa się przez to przewodność magnetyczna rdzenia i maleją straty na rozproszenie strumienia. Podobnie jak i w innych typach rdzeni, pole magnetyczne w przekroju poprzecznym toroidu jest rozłożone nierównomiernie. Największe jego natężenie występuje od strony mniejszej średnicy, maleje w kierunku warstwy zewnętrznej. Różnice natężenia pola między warstwą wewnętrzną a zewnętrzną wynoszą około 10%. W pozostałych typach transformatorów nierównomierność rozłożenia natężenia pola magnetycznego jest znacznie większa. Zjawisko to wykorzystujemy, przyjmując do obliczeń większe natężenie pola magnetycznego w rdzeniu, bez obawy o nasycenie. Dla uproszczenia obliczeń, przyjmujemy średnią wartość natężenia pola magnetycznego, uznając je za jednorodne w całym przekroju. Przykład charakterystyki magnesowania stali transformatorowej przedstawiono na rys. 1.

Parametry transformatorów

W praktyce, na ogół, nie są potrzebne duże dokładności obliczeń i można wprowadzić pewne uproszczenia (co jednak nie dotyczy pomiarowych przekładników napięciowych i prądowych). Do obliczeń potrzebna jest znajomość wymiarów geometrycznych rdzenia oraz jego parametrów magnetycznych, takich jak indukcja nasycenia

Uproszczona metoda obliczania transformatorów na rdzeniach toroidalnych ⁽¹⁾

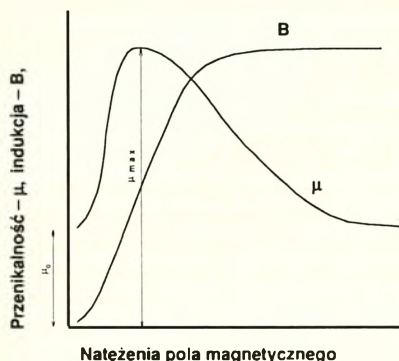
nia B_{max} , przenikalność rdzenia μ . Dane te podaje producent lub trzeba uzyskać z pomiarów magnetycznych rdzenia. W transformatorach toroidalnych, dzięki lepszemu odprowadzaniu ciepła do otoczenia, dopuszczalne jest zwiększenie gęstości prądu w przewodach (prąd na jednostkę przekroju oznaczany δ). Przykładowe dane liczbowe stosowanych obciążeń prądowych przewodów są podane w tablicy 1. Porównanie parametrów magnetycznych stali anizotropowej produkcji polskiej (EP-300 i EP330) i rosyjskiej (Э-310) przy częś-

tliwości 50 Hz przedstawiono w tablicy 2. Polska norma branżowa BN-74/0893-02 w pkt. 3.4 str. 2 dopuszcza produkcję magnetowodów ze stali o parametrach odbiegających od normy. Wymiary rdzeni i parametry magnetyczne mogą być uzgadniane z odbiorcą i nie muszą być oznakowane. Taką dowolność produkcyjną sprawia, że na rynku mamy transformatory wykonane z blach bez oznaczeń materiałowych i o różnej przenikalności magnetycznej. Przed uzwajaniem transformatora wykonanego ze stali produkcji krajowej celowe jest wykonanie pomiaru parametrów przenikalności i maksymalnej indukcji magnetycznej. Pomiar własne wykazały różnice indukcji magnetycznej do 0,3 T w różnych partiach tych samych gatunków blach magnetowodów. Z danych w tabl. 1 widać, że indukcja magnetyczna stali zależy w pewnej mierze od natężenia pola magnetycznego (amperozwojów).

W tablicy 3 podano wymiary krajowych rdzeni toroidalnych, w tabl. 4 – wymiary rdzeni produkcji rosyjskiej. Zasadę wymiarowania przedstawiono na rys. 2.

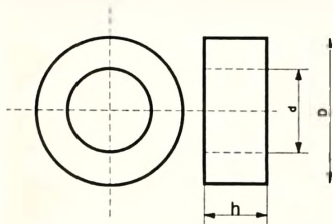
Różnice między parametrami stali na blachy transformatorowe produkcji rosyjskiej i polskiej są niewielkie, możemy więc przyjąć do obliczeń dane rosyjskie, gdyż dane krajowe nie są rozpowszechniane. Z tych danych

Rys. 1. Charakterystyka magnesowania stali E-310



Tablica 1. Parametry transformatorów toroidalnych z rdzeniem Э-310 (rosyjskim)

Suma mocy uzwojeń wtórnych ΣP2	[VA]	15+50	50+150	150+300	300+500
Indukcja nasycenia	B [T]	1,7	1,7	1,65	1,6
Gęstość prądu	δ [A/mm ²]	5+4,5	4,5+3,5	3,5	3,0
Współczynnik wypełnienia okna miedzią	k_{ok}	0,18+0,20	0,20+0,26	0,26+0,27	0,27+0,28
Współczynnik sprawności transformatora	η	0,76+0,88	0,88+0,92	0,92+0,95	0,95+0,96



Rys. 2. Wymiarowanie rdzeni toroidalnych

(tabl. 1) widać, że indukcja magnetyczna tego samego gatunku blach maleje ze wzrostem mocy transformatorów i należy to uwzględnić przy obliczeniach. Dla transformatorów o charakterystyce napięciowej "sztywnej", w których napięcie strony wtórnej w niewielkim stopniu zmienia się z obciążeniem, początkową indukcję pracy B_1 bierze się w pobliżu indukcji nasycenia B_{max} . Dla

transformatorów "miękkich", o charakterystyce quasi-liniowej, wartość B_1 przyjmuje się ok. 10% poniżej B_{max} .

Takie podejście empiryczne wynika z charakteru przebiegu indukcji i przenikalności magnetycznej w funkcji amperozwojów. Poprawki napięciowe dla uzwojeń pierwotnych i wtórnych w rdzeniach toroidalnych są podane w tabl. 5. W tablicy 6 podano dla po-

równania poprawki dla tychże uzwojeń transformatorów na rdzeniach EI.

Marian Salamon

Tablica 3. Magnetowody toroidalne wg BN-74/0893-02. (Wszystkie wymiary w mm)

Typ	Średnica zewn. D	Średnica wewn. d	Wysokość h
D20/15	20	15	5+20
D25/15	25	15	5+20
D25/20	25	20	5+20
D30/20	30	20	5+25
D30/25	35	25	5+25
D35/30	35	30	5+25
D40/20	40	20	5+25
D80/50	80	50	5+25
D80/60	80	60	5+25
D85/60	80	60	5+25
D90/50	90	50	5+25
D90/60	90	60	5+25
D90/70	90	70	5+25
D90/75	90	75	5+25
D95/50	95	50	10+30
D60/60	95	60	10+30
D95/70	95	60	10+30
D100/60	100	60	10+30
D100/70	100	70	10+30
D135/90	135	90	10+30
D135/100	135	100	10+30
D140/115	140	115	10+30
D140/120	140	120	10+30
D180/120	180	120	10+30
D180/150	180	150	10+30

Tablica 4. Parametry rdzeni toroidalnych ze stali anizotropowej produkcji rosyjskiej

Typ OIT	Rozmiary rdzenia			Powierzchnia przekr.	Droga magnet.	$S_{st} \cdot S_{ok}$	Objętość rdzenia	Masa rdzenia	Moc (orientac.) dla 50 Hz ΣP_2
	[mm]			[cm ²]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ³]	[kg]	[W]
	d	h	D	S_{st}	l	$S_{st} \cdot S_{ok}$	V_{st}	G_{st}	ΣP_2
32/50 - 16	32	16	50	1,44	12,8	11,50	18,4	0,1250	9,3
32/50 - 20	32	20	50	1,80	12,8	14,40	23,1	0,1560	11,6
32/50 - 25	32	25	50	2,25	12,8	18,00	28,8	0,1940	14,6
32/50 - 32	32	32	50	2,88	12,8	23,00	36,8	0,2490	18,7
40/64 - 20	40	20	64	2,40	16,3	30,0	39,1	0,2640	24,0
40/64 - 25	40	25	64	3,00	16,3	38,0	48,9	0,3290	30,0
40/64 - 32	40	32	64	3,84	16,3	48,0	62,5	0,4210	39,0
40/64 - 40	40	40	64	4,8	16,3	60,0	78,3	0,5270	49,5
50/80 - 25	50	25	80	3,75	20,4	75	76,5	0,518	58,5
50/80 - 32	50	32	80	4,80	20,4	94,0	98,0	0,663	75
50/80 - 40	50	40	80	6,00	20,4	118,0	122,3	0,829	93,5
50/80 - 50	50	50	80	7,5	20,4	148,0	153,0	1,035	117,0
64/100 - 32	64	32	100	5,76	20,4	187,0	148,5	1,010	148,0
64/100 - 40	64	40	100	7,20	25,8	232,0	185,5	1,265	186,0
64/100 - 50	64	50	100	9,00	25,8	290,0	232,0	1,580	233,0
64/100 - 64	64	64	100	11,50	25,8	370,0	297,0	2,020	296,0
80/128 - 40	80	40	128,0	9,6	32,6	482,0	313,0	2,120	340,0
80/128 - 50	80	50	128,0	12,0	32,6	603,0	390,0	2,670	428,0
80/128 - 64	80	64	128,0	15,3	32,6	775,0	498,0	3,420	548,0
80/128 - 80	80	80	128,0	19,2	32,6	965,0	625,0	4,260	685,0

Tablica 6. Poprawki napięciowe uzwojeń wtórnych transformatorów z blach "E I"

	Suma mocy uzwojeń wtórnych ΣP_2 [W]				
	5+15	15+50	50+150	150+300	300+1000
ΔU_1 [%]	20+13	13+6	6+4,5	4,5+3	3+1
ΔU_2 [%]	25+18	8+10	10+8	8+6	6+2

Tablica 5. Poprawki napięciowe uzwojeń pierwotnych i wtórnych dla transformatorów na rdzeniach toroidalnych ($f = 50$ Hz)

	Suma mocy uzwojeń wtórnych ΣP_2 [W]				
	8+25	25+62	60+125	125+250	250+600
ΔU_1 [%]	7	6	5	3,5	2,5
ΔU_2 [%]	7	6	6	3,5	2,5

**Wielu Czytelników
dopominało się
w listach i e-mailach
o ten temat.**

Obliczanie transformatorów

W transformatorach współpracujących z jednofazowym układem prostowniczym ($f = 50 \text{ Hz}$) moc obliczeniowa uzwojenia wtórnego nie jest równa mocy uzwojenia pierwotnego pomnożonego przez współczynnik sprawności η . W uzwojeniu wtórnym płynie składowa stała prądu wyprostowanego, przesuwająca na charakterystyce początkowy punkt pracy w kierunku "kolana" i w krańcowych przypadkach doprowadzająca rdzeń do stanu nasycenia. Wtedy to gwałtownie maleje przenikalność magnetyczna μ i w wyniku większego prądu magnesowania rosną straty w żelazie – transformator nadmiernie się przegrzewa. Najczęściej popełnianym błędem przy obliczaniu mocy transformatora jest nieuwzględnienie rodzaju obciążenia strony wtórnej. Stosowane obciążenia po stronie wtórnej są przedstawione na rys. 3.

Przy obliczaniu transformatora na rdzeniu toroidalnym dla napięcia sinusoidalnego należy przestrzegać następującej kolejności działań:

1. Obliczenie mocy uzwojeń wtórnych transformatora [ΣP₂].
2. Dobieranie przekroju poprzecznego rdzenia z tablicy i stosownego typu.
3. Ustalenie gatunku stali i parametrów magnetycznych.
4. Na podstawie bilansu mocy uzwojeń wtórnych i rozmiarów rdzenia wyznaczenie B_{max} , δ , k_{ok} , sprawności transformatora η oraz iloczynu $k_{\text{ok}} \cdot \eta$.
5. Obliczenie strat w żelazie i prądu jałowego.
6. Dokonanie poprawek w obliczeniach i ostateczny dobór wielkości rdzenia.
7. Obliczenie liczby zwojów dla uzwojeń pierwotnego i wtórnego oraz przekroju drutu nawojowego.

Podstawą do dobierania powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia jest moc obliczeniowa transformatora. Z tablic dla odpowiedniego typoszeru wybieramy rozmiar rdzenia o przekroju poprzecznym równym lub nieco większym od obliczonego. W dalszych obliczeniach przyjmujemy z tablic: przekrój poprzeczny rdzenia, indukcję magnetyczną, długość drogi magnetycznej, masę rdzenia, straty ciepłe w żelazie i wymiary geometryczne. Producent rdzeni po-

Uproszczona metoda obliczania transformatorów na rdzeniach toroidalnych ⁽²⁾

daje również przenikalność magnetyczną blach. Wszystkie dane wykorzystywane są przy obliczeniach transformatora z uwzględnieniem poprawek na rodzaj obciążenia. W rzeczywistych układach prostowniczych równoległe do rezystancji czynnej obciążenia transformatora jest włączona pojemność kondensatora filtru wygładzającego napięcie. Układ ten powoduje przesunięcie chwilowych wartości wektorów prądu i napięcia z wynikającymi z tego skutkami. Sposoby obliczeń dla takich warunków nie zostaną tu podane z uwagi na większą złożoność problemu, wykraczającą poza metodę uproszczoną.

Przykład

Obliczamy transformator na rdzeniu toroidalnym o parametrach:

■ napięcie zasilania uzwojenia pierwotnego $U_1 = 220 \text{ V}$

■ napięcie uzwojenia wtórnego $U_2 = 16 \text{ V}$

■ nominalny prąd uzwojenia wtórnego $I_{2\text{nom}} = 3 \text{ A}$.

Transformator zasilą prostownik w układzie mostkowym (Graetza).

Obliczeniowy prąd $I_{2\text{obl}}$ uzwojenia wtórnego wyniesie

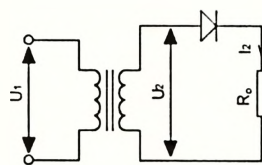
$$I_{2\text{obl}} = I_{2\text{nom}} \cdot 1,11 = 3 \cdot 1,11 = 3,33 \text{ A}$$

Indukcja maksymalna

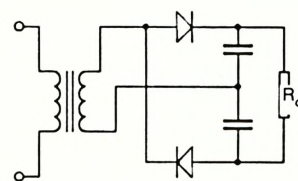
$B_{\text{max}} = 1,65 \text{ T}$ – przyjmujemy blachę produkcji krajowej EP 330 – 35A.

Pozostałe parametry odczytujemy z tabl. 4 dla rdzeni rosyjskich, które pełniej opisują właściwości rdzenia. Parametry dla rdzeni krajowych są, jak wspomniano, niedostępne, ale bardzo zbliżone:

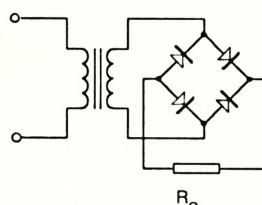
$k_{\text{ok}} = 0,18$ – przyjęto wartość niższą niż



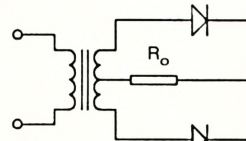
$$I_2 = 1,57 I_0$$



$$I_2 = 1,11 I_0$$



$$I_2 = 1,11 I_0$$



$$I_2 = 0,785 I_0$$

Rys. 3.
Rodzaje obciążeń transformatora:
 R_0 – obciążenie czynne,
 I_0 – prąd strony wtórnej

w tablicy 1 (0,20÷0,26) ze względu na nawijanie ręczne, zapewniające mniej dokładne przyleganie przewodu do rdzenia.

$\eta = 0,88$ sprawność transformatora dla mocy 50÷150 VA

$\delta = 3,5 \text{ A/mm}^2$ gęstość prądu w przewodzie.

Obliczenie mocy strony wtórnej transformatora:

$$\Sigma P_2 = 1,11 \cdot U_2 \cdot I_{2\text{nom}} = 1,11 \cdot 16 \text{ V} \cdot 3 \text{ A} = 53,28 \text{ VA}$$

Poprzeczny przekrój rdzenia toroidalnego.

Wyliczamy iloczyn charakterystyczny $S_{st} \cdot S_{ok}$ z wzoru, który jest podstawą do określenia niezbędnego przekroju poprzecznego rdzenia:

$$S_{st} \cdot S_{ok} = \frac{P_2 \cdot 10^2}{2,22 \cdot B_{\text{max}} \cdot f \cdot \delta \cdot k_{ok} \cdot \eta}$$

przy czym: η – sprawność transformatora.
Po podstawieniu danych otrzymamy:

$$S_{st} \cdot S_{ok} = \frac{53,28 \cdot 10^2}{2,22 \cdot 1,65 \cdot 50 \cdot 3,5 \cdot 0,18 \cdot 0,88} = 52,47 \text{ cm}$$

Najbliższy większy rozmiar rdzenia ma iloczyn $S_{st} \cdot S_{ok} = 75 \text{ cm}^4$.

Z tablicy 4 wybieramy rdzeń o symbolu ОП 50/80-25, którego krajowym odpowiednikiem jest rdzeń D80/50-25 wg BN-74/0893-02. Rdzeń ma przekrój poprzeczny o powierzchni "czystego" żelaza $S_{st} = 3,75 \text{ cm}^2$ a odpowiadająca mu przenoszona moc $\Sigma P_2 = 58,75 \text{ VA}$.

Na podstawie wymiarów i masy rdzenia możemy dla danego gatunku materiału określić straty na ciepło w żelazie.

Obliczenie uzwojeń

Liczba zwojów uzwojenia pierwotnego:

$$w_1 = \frac{E_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{max}} \cdot S_{st}}$$

Liczba zwojów uzwojenia wtórnego:

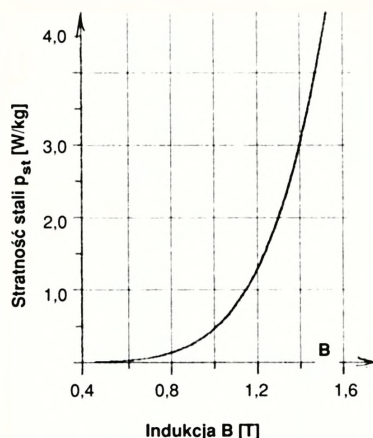
$$w_2 = \frac{E_2 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{max}} \cdot S_{st}}$$

Przyjmując, że straty rezystancyjne i magnetyczne po stronie pierwotnej i wtórnej są sobie równe, należy wprowadzić poprawki napięciowe. Prawdziwą stanie się wtedy znana zależność przekładni napięciowej i zwojowej w transformatorze pod nominalnym obciążeniem:

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

przy czym:

w_1, w_2 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.



Rys. 4. Stratność stali w funkcji indukcji magnetycznej

Procentowe straty napięcia stosownie do mocy transformatora przyjmujemy z tabl. 5:

$$\Delta U_1 = 6\% \quad \Delta U_2 = 6\%$$

Obliczeniowe napięcia uzwojeń E_1, E_2 wynoszą:

$$E_1 = U_1 (1 - \Delta U_1 \cdot 10^{-2}) =$$

$$= 220 \left(1 - \frac{6}{100} \right) = 206,8 \text{ V}$$

$$E_2 = U_2 (1 - \Delta U_2 \cdot 10^{-2}) =$$

$$= 16 \left(1 + \frac{6}{100} \right) = 16,96 \text{ V}$$

Obliczamy liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego:

$$w_1 = \frac{206,8 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 3,75} = 1505,5 \approx 1506 \text{ zwojów}$$

$$w_2 = \frac{16,96 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 3,75} = 123,47 \approx 124 \text{ zwoje}$$

Obliczanie średnicy przewodów

Przekrój przewodu nawojowego obliczamy na podstawie dopuszczalnych maksymalnych obciążeń prądowych i przewidywanego prądu roboczego:

$$\delta = \delta_1 = \delta_2 = 3,5 \text{ A/mm}^2$$

Powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu nawojowego uzwojenia pierwotnego (płynie w nim prąd I_1 równy 53,28 VA : 220 V = 0,242 A) wyniesie

$$\delta_1 = \frac{I_1}{\delta} = \frac{0,242}{3,5} = 0,069 \text{ mm}^2$$

Analogicznie dla uzwojenia wtórnego (płynie w nim prąd I_2 równy 53,28 VA : 16,96 V = 3,14 A):

$$\delta_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{3,14}{3,5} = 0,898 \text{ mm}^2$$

Średnicę drutu nawojowego odczytujemy z tablic lub obliczamy z wzoru:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \delta = 1,13 \sqrt{\delta}$$

gdzie podstawiając δ_1 i δ_2 obliczymy średnice przewodów:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{0,069} = 0,2968 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1,13 \sqrt{0,898} = 1,07 \text{ mm}$$

Dobieramy przewody nawojowe produkowanych średnic. Obowiązuje zasada zaokrąglania średnicy w górę, przyjmujemy więc: $d_1 = 0,31 \text{ mm}$

$d_2 = 1,1$ lub $1,00 \text{ mm}$

Obliczenie prądu biegu jałowego transformatora

Za dostatecznie dokładną można uznać metodę obliczania tylko składowej czynnej prądu biegu jałowego, pomijając składową bierną:

$$I_0 = \frac{P_{st}}{U_1}$$

$$P_{st} = P_{st} \cdot G_{st}$$

przy czym:

P_{st} – moc strat w stali [W],

P_{st} – stratność stali zależna od gatunku [W/kg],

G_{st} – masa rdzenia toroidalnego [kg],

U_1 – napięcie zasilania uzwojenia pierwotnego [V].

Jak wynika z wykresu na rys. 4, straty nie są funkcją liniową. Przebieg strat (zamiana na ciepło) w funkcji natężenia pola magnetycznego jest podobny w różnych gatunkach stali. Dla przyjętej wartości B_{max} z wykresów lub tablic odczytujemy wartość strat, wyrażonych w watach na kilogram stali.

Do dalszych obliczeń przyjmujemy stratność 5 W/kg dla gatunku EP 300-35 A przy $B_{\text{max}} = 1,65 \text{ T}$. Masę rdzenia odczytujemy z tabl. 4. Dla rdzenia П 50/80-25 otrzymujemy $G_{st} = 0,518 \text{ kg}$ i po podstawieniu danych otrzymamy:

$$P_{st} = 5 \cdot 0,518 = 2,59 \text{ W}$$

stąd prąd biegu jałowego wyniesie:

$$I_0 = \frac{2,59}{220} = 11,7 \text{ mA}$$