

TRANSFORMATORY W PRAKTYCE MAJSTERKOWICZA

Część I

Transformator ma za zadanie przystosowanie odbiornika do współpracy z siecią elektryczną przez zmianę napięcia, przeważnie z wyższego na niższe. Prócz tego izoluje on urządzenia niskonapięciowe od sieci, co często jest niezbędne, ze względu na bezpieczeństwo korzystającego z tego urządzenia. Odbiorniki elektryczne małej mocy mogą być zasilane bezpośrednio z sieci bez transformatora, ale zasilacz w takim układzie nie osiąga najkorzystniejszych parametrów.

Cechą charakterystyczną transformatorów jest system ich uzwojeń wtórnych. W urządzeniach małej mocy transformator przystosowuje napięcie sieci do urządzeń zasilanych prądem elektrycznym, a ponieważ spełnia też funkcję zabezpieczenia przed porażeniem, w związku z tym musi mieć odpowiednią izolację. Transformator dobrze zaprojektowany powinien wytrzymywać krótkie przeciążenia i nie może nadmiernie nagrzewać się. Nowoczesne materiały magnetyczne umożliwiają miniaturyzację transformatorów i zmniejszenie ich strat.

Parametry transformatorów dostosowuje się do zapotrzebowania mocy urządzeń, jakie mają zasilać. W tablicy 1 zamieszczone zostały dane typowych transformatorów produkcji fabrycznej, wraz z ich oznaczeniami handlowymi.

Obliczenia transformatorów sprowadzają się do wyznaczenia typu i materiału rdzeni oraz liczby zwojów i średnic użytych na uzwojenia przewodów.

Dobór materiału rdzenia zależy od wymagań stawianych zasilaczowi. Oczywiście należy dążyć do stosowania materiałów o małych stratach na histerezę. W rdzeniu z blach żalazokrzemowych, walcowanych na gorąco, maksymalna wartość indukcji może wynosić 1 T (10^4 Gs).

Jeżeli do sieci prądu stałego włączona zostanie cewka nawinięta na rdzeniu z materiału magnetycznego, to prąd ograniczony jest tylko rezystancją uzwojenia. Gdy tę samą cewkę włączymy w obwód prądu przemiennego, to popłynie znacznie mniejszy prąd, przy takiej samej wartości napięcia. Na wielkość prądu ma bowiem wpływ rezystancja i reaktancja indukcyjna uzwojenia. Prąd płynący przez uzwojenie wytwarza strumień magnetyczny, zmienny w czasie, który indukuje siły elektromotoryczne w uzwojeniach cewki:

$$e = -z \cdot \frac{d \cdot \Phi}{dt}, \text{ gdzie:}$$

z – liczba zwojów cewki,
 Φ – strumień magnetyczny,
 t – czas,
 e – siła elektromotoryczna.

W każdym obwodzie elektrycznym suma sił elektromotorycznych i spadków napięć jest równa zero:

$$u + e = 0$$

$$u = U_m \cdot \sin \omega \cdot t, \quad U_m = U\sqrt{2},$$

$$z \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \cdot 10^{-8} = U_m \sin \omega \cdot t; \quad \omega = 2\pi f,$$

$$U = 4,44 \cdot z \cdot \Phi \cdot 10^{-8},$$

$$\frac{z}{U} = \frac{1}{4,44 \cdot s \cdot f \cdot B \cdot 10^{-8}}$$

przy $f = 50 \text{ Hz}$ i $B = 1 \text{ T}$,
 gdzie:

U – skuteczna wartość napięcia,
 U_m – maksymalna wartość napięcia,
 z – liczba zwojów,
 u – chwilowa wartość napięcia,
 s – przekrój kolumny w cm^2 ,
 Φ – strumień magnetyczny,
 e – wartość siły elektromotorycznej indukowanej w obwodzie,
 B – indukcja rdzenia.

Przy pracy transformatora bez obciążenia można zmierzyć straty w rdzeniu, bo prąd pobierany w tym czasie jest nieznaczny i nie powoduje strat w miedzi uzwojenia:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

gdzie:

U – napięcie pierwotne (1) lub wtórne (2),
 n – zwoje uzwojenia pierwotnego (1) i wtórnego (2).

Przy zwarciu uzwojenia wtórnego, do uzwojenia pierwotnego można przyłożyć maksimum 10% napięcia nominalnego, aby ograniczyć prąd płynący przez uzwojenia.

Transformator impulsowy

Używany jest do zapłonu tyrystorów. Transformator ten obniża napięcie do wartości dopuszczalnej dla struktury bramka – katoda w tyrystorze. Musi mieć on optymalną liczbę zwojów, gdyż zbyt duża liczba zwojów poprzez wpływ pojemności międzyzwojowej sprawia, że transformator zaczyna całkować napięcie, co objawia się spłaszczeniem czoła impulsu zapłonowego. Jeżeli zaś liczba zwojów będzie za mała, to amplituda impulsu może być za niska do zapłonu tyrystora, mogą też wystąpić nie przewidywane przepięcia i oscylacje. Na pracę transformatora impulsowego bardzo korzystnie wpływa szczelina w rdzeniu. Aby zmniejszyć straty do minimum, transformatory te wykonuje się o jak najmniejszej liczbie warstw drutu. Liczba zwojów jednego uzwojenia na ogół nie przekracza 100.

Projektowanie transformatora

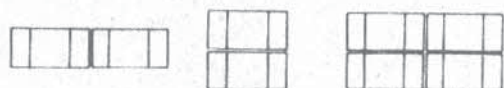
Do budowy transformatorów małej mocy najczęściej używane są rdzenie blaszcowe. Są one składane z cienkich blach izolowanych od siebie lakierem, papierem lub warstwą tlenków uzyskiwanych metodą chemiczną lub przez wyżarzanie. Na

Tablica 1
 Parametry typowych transformatorów

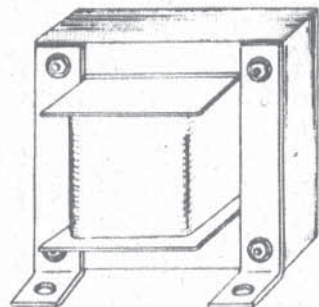
Typ	Moc (VA)	Napięcie U_1 (V)	Napięcie U_2 (V)	Prąd I_2 (A)	Prąd I_1 (A)	Kształtka
TS2(5)676	2	220	21	0,06	0,02	EI36/12
TS3(3)676	3	110, 220	4,2+4,2	0,35, 0,35	0,05	CP10,5×29
TS6(2)676	6	110, 220	5,5	1	0,027	EI48/16
TS6(9)676	6	220	6,1	1	0,07	EI49/16
TS8(8)678	8	220	6,8	1,2	0,045	EI54/18
TS12(1)676	12	110, 220	5,5	1,2	0,027	EI54/18
TS15(3)676	15	220	6	2,5	0,11	EI66/22
TS18(2)676	18	220	6,1+6,1	1,54, 1,54	0,05	EI66/22
TS20(2)676	20	220	9+9	1, 1	0,04	EI60/20
TS30(14)676	30	220	13,1	2,5	0,07	EI66/33
TS40(31)676	40	220	12,5	3,9	0,15	EI84/35
TS70(2)676	70	115, 230	14+14 28+28	2, 2 0,7, 0,7	0,15	CP16×44/12×40
TS80(6)676	80	220	12,8	5,3	0,25	CP16×44/12×40
TS90(5)676	90	130, 220	32,5+35+6,5	0,5, 2, 2,5	0,15	EI84/42
TS250(2)676	250	115, 230	12+78	0,2, 3	0,15	RZC25/60/50



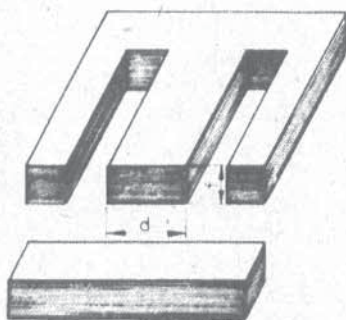
RYS 1



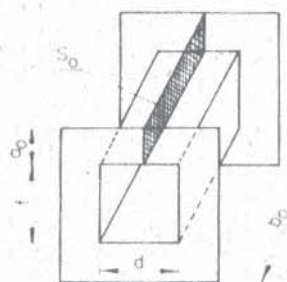
RYS 2



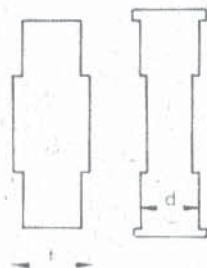
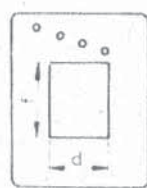
RYS 3



RYS 4



RYS 5



rys. 1 pokazane są typowe kształtki rdzeni transformatorów.

Aby zwiększyć rezystancję blaszek dla prądów wirowych, składając rdzeń blaszki układa się na przemian, tzn. tak, by szczeliny blach wypadały po przeciwnych stronach cewki transformatora.

Wielkość poprzecznego przekroju rdzenia jest ściśle związana z wielkością mocy przenoszonej przez transformator. Najczęściej spotykane są kwadratowe przekroje rdzeni, ale zdarzają się też prostokątne. W poszukiwaniu sposobu polepszenia własności magnetycznych stali zwrócono uwagę na anizotropowe właściwości kryształów żelaza. Stwierdzono, że kryształy te najłatwiej dają się magnesować w kierunku równoległym do krawędzi. Tak powstały żelazokrzemowe taśmy anizotropowe. W tablicy 2 podane są wymiary kształtek z tych blach. Kształtki można składać podwójnie i poczwórnie, na rys. 2 pokazane są przekroje rdzeni po złożeniu kilku kształtek.

Inny rodzaj kształtek transformatorowych, typu CP, oraz ich zasadnicze wymiary, przedstawiony został w tablicy 3.

Uzwojenia cewek nawijają się na korpusie nazywanym potocznie karkasem. Korpusy cewek można wykonać z papieru bakelizowanego lub z tkaniny bakelizowanej, nazywanej getinaksem, lub tekstoli-

tem. Płytki takie można kupić w zestawach dla radioamatorów w Składnicy Harcerskiej. Niekiedy w większych transformatorach fabrycznych stosowane są uzwojenia bezkorpusowe, ale ze względu na znaczne trudności wykonawcze (klejenie, izolacje termiczne drutów) nie będziemy się nimi zajmowali.

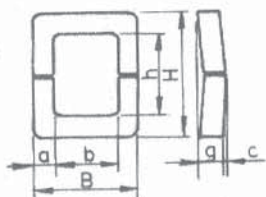
Uzwojenia małych transformatorów wykonuje się z drutów miedzianych o przekroju kołowym (okrągłych), izolowanych emalią. Drutów o przekroju profilowanym używa się do transformatorów dużej mocy, nie ma ich natomiast w handlu.

W tablicy 4 podane są parametry techniczne najczęściej spotykanych drutów nawojowych.

Na przykładki izolacyjne warstw uzwojeń można użyć papieru kondensatorowego grubości 0,06 mm, którego wytrzymałość dielektryczna wynosi około 800 V. Można też zastosować folię poliestrową grubości 0,01 mm o wytrzymałości dielektrycznej 1 kV.

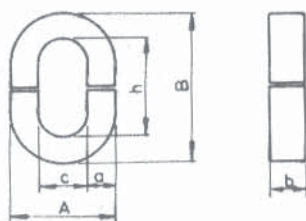
Transformator, a właściwie jego uzwojenia, można zaimpregnować, co zwiększy o około 40% wytrzymałość dielektryczną izolacji uzwojeń. W warunkach domowych nawinięty korpus transformatora można np. zanurzyć w gorącej parafinie, można też uzwojenie zalać epidianem, szczególnie lekko ogrzanym, aby był rzadszy.

Tablica 2
Kształtki o izolacji karlitowej – indukcja 1,5 T–1,8 T, straty 0,7–1,3 W/kg dla 1 T



Typ rdzenia	h	b	a	g	H	B	c
	mm						
RZC10/35–15	35	10	6	15	47	22	0,5
RZC13/34–20,3	34	13	8,5	20,3	51	30	1,0
RZC13,5/51–15	51	13,5	9,5	15	70	32,5	1,0
RZC13,5/51–20	51	13,5	9,5	20	70	32,5	1,0
RZC13,5/51–25	51	13,5	9,5	25	70	32,5	1,0
RZC13,5/51–30	51	13,5	9,5	30	70	32,5	1,0
RZC25/60–20	60	25	12,5	20	85	50	1,0
RZC25/60–25	60	25	12,5	25	85	50	1,0
RZC25/60–30	60	25	12,5	30	85	50	1,0
RZC25/60–40	60	25	12,5	40	85	60	1,0
RZC25/60–50	60	25	12,5	50	85	60	1,0
RZC32/86–20	86	32	16	20	118	64	1,0
RZC32/86–30	86	32	16	30	118	64	1,0
RZC32/86–50	86	32	16	50	118	64	1,0
RZC35/100–20	100	35	20	20	140	75	1,5
RZC35/100–30	100	35	20	30	140	75	1,5
RZC35/100–40	100	35	20	40	140	75	1,5
RZC35/100–50	100	35	20	50	140	75	1,5
RZC45/115–20	115	45	25	20	165	95	1,5
RZC45/115–25	115	45	25	25	165	95	1,5
RZC45/115–30	115	45	25	30	165	95	1,5
RZC45/115–50	115	45	25	50	165	95	1,5
RZC50/140–35	140	50	35	35	210	120	1,5
RZC50/140–70	140	50	35	70	210	120	1,5
RZC51/154–50	154	51	50	50	254	151	2,0
RZC70/230–70	230	70	70	70	370	210	2,0

Tablica 3
Rdzenie typu CP



Typ	a	c	h	b	A	B	S _{fe}	S _p	P _r
	mm					cm ²	cm ²	VA	
CP12×33/10×13	10	12	33	13	34	56	1,28	3,96	8
CP10,5×29/10×10	10	10,5	29	10	32	51,4	0,95	3,0	3
CP11×34/8×25	8	11	34	25	29	52,6	1,90	3,74	15
CP12×34/10×32	10	12	34	32	34	56,6	3,0	4,0	30
CP12×44/10×32	10	12	44	32	34	66,6	3,0	5,28	40
CP16×44/12×44	12	16	44	44	43	70,6	4,75	7,0	80

Pomiędzy uzwojenie pierwotne i wtórne wprowadza się ekran elektrostatyczny, który stanowi jeden zwój miedzianej lub aluminiowej folii ułożony na całej szerokości uzwojenia. **Końce folii bezwzględnie muszą być odizolowane od siebie, aby nie utworzył się zwarty zwój.**

Do obliczenia transformatora trzeba znać napięcie zasilania (U_1) i sumę wtórnych napięć (ΣU_2) oraz wartości prądów uzwojeń wtórnych. Na podstawie tych parametrów można obliczyć przekrój rdzenia, liczbę zwojów uzwojeń, przekroje drutów nawojowych, rezystancję uzwojeń i rozmieszczenie uzwojeń na szpuli.

Dla znanej mocy pobieranej z transformatora dobieramy odpowiedni przekrój rdzenia, a dla znanych prądów dobiera się później przekroje przewodów. Należy przewidzieć miejsce na warstwę izolującą uzwojenia od rdzenia (karkas) i izolację międzyzwojową – przekładki.

Znając wymiary rdzenia można przystąpić do obliczeń. Rzeczywisty przekrój (s) kolumny rdzenia jest mniejszy od zmierzonego przekroju ze względu na izolację blach (lakierowanie, utlenianie) (rys. 4):

$$s = 0,8 \cdot d \cdot f$$

gdzie:

s – przekrój rdzenia,

d – szerokość kolumny rdzenia,

f – grubość kolumny rdzenia.

$$P = 1,2 \cdot \Sigma P = 1,2 (U_2 \cdot I_2 + U \cdot I_3 + \dots + U_n \cdot I_n)$$

W celu skompensowania spadków napięcia na rezystancji uzwojeń zwiększa się o 5% liczbę zwojów uzwojenia wtórnego, a liczbę zwojów w uzwojeniu pierwotnym zmniejsza się o 10%.

Moc (P_2) możliwa do uzyskania z rdzenia wynosi:

$$P_2 = 0,9 \cdot s^2$$

gdzie:

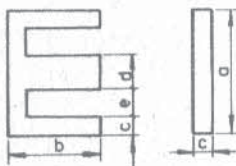
P_2 – moc uzwojeń wtórnych,

s – przekrój kolumny transformatora.

Przy większych mocach poszczególne warstwy uzwojeń należy bezwzględnie izolować przekładkami. Między uzwojenie pierwotne i wtórne, oprócz ekranu elektrostatycznego, należy nawinąć podwójną przekładkę izolacyjną.

Może się zdarzyć, że będziemy mieli transformator z rdzeniem o odpowiednim przekroju z nawiniętymi już uzwojeniami. Wprawdzie napięcia wtórne tego transformatora nie będą dla nas odpowiednie, ale możemy wykorzystać przecież gotowe i na pew-

Tablica 4
Kształtki transformatorowe EI



Typ	a	b	mm		
			c	d	e
EI30	30	20	5	10	15
EI36	36	24	6	12	18
EI48	48	32	8	16	24
EI54	54	36	9	18	27
EI60	60	40	10	20	30
EI66	66	44	11	22	33
EI75	75	50	12,5	25	37,5
EI84	84	56	14	28	42
EI102	102	68	17	34	51

no dobrze nawinięte uzwojenie sieciowe. Co należy zrobić w takiej sytuacji? Oczywiście, trzeba odwinąć stare uzwojenia wtórne i na ich miejsce nawinąć nowe uzwojenia, odpowiednie do naszych celów. Pamiętajmy jednak, by odwijając jedno z wtórnych uzwojeń, najlepiej najkrótsze, dokładnie policzyć jego zwoje. Następnie, wiedząc, jakie napięcie dawało to uzwojenie, z łatwością wyliczymy liczbę zwojów nowego uzwojenia, bowiem:

$$\frac{\text{liczba zwojów}}{\text{napięcie uzwojenia}} = \frac{\text{zw.}}{V}$$

Można również inaczej postąpić, aby znaleźć liczbę zwojów na 1 V jakiegos transformatora. Na istniejące uzwojenia trzeba nawinąć 5 lub 10 zwojów drutu o dowolnej średnicy i zmierzyć napięcie, jakie będzie występowało na końcach tego uzwojenia. Dzieliąc następnie liczbę zwojów przez napięcie, znajdziemy interesującą nas wielkość.

Przykład: $U_2 = 12 \text{ V}$, $U_3 = 5 \text{ V}$, prądy: $I_2 = 0,6 \text{ A}$, $I_3 = 0,5 \text{ A}$. Do dyspozycji mamy kształtki typu EI66 o grubości pakietu $f = 2,3 \text{ cm}$ (patrz tablica 4). Obliczyć liczbę zwojów i przekroje drutów nawojowych tego transformatora.

Przekrój kolumny transformatora:

$$s = 0,8 \cdot d \cdot f = 0,8 \cdot 2,2 \cdot 2,3 = 4 \text{ cm}^2$$

Liczba zwojów przypadająca na 1 V napięcia:

$$\frac{z}{U} = \frac{45}{s} = \frac{45}{4} = 11 \text{ zw/V}$$

– co wynika z przyjętej indukcyjności rdzenia $B = 1 \text{ T}$.

Dla różnych indukcji różna będzie oczywiście liczba zwojów przypadająca na 1 V napięcia wg następującej zależności:

B	0,8 T	0,9 T	1 T	1,1 T	1,2 T
$\frac{z}{U}$	$\frac{52}{s}$	$\frac{48}{s}$	$\frac{45}{s}$	$\frac{42}{s}$	$\frac{38}{s}$

Moc uzyskiwana z tego przekroju rdzenia:

$$P_1 = 0,9 \cdot s^2 = 0,9 \cdot 16 = 14 \text{ VA}$$

Moc uzwojenia wtórnego wynosi przy tym:

$$P_2 = P_1 \cdot 0,8 = 11,2 \text{ W, \quad lub}$$

$$P_2 = 1,2 \Sigma P = 1,2 (12 \cdot 0,6 + 5 \cdot 0,5) = 11,5 \text{ W.}$$

Jeżeli z obliczeń wyniknie, że $P_2 > P_1$, należy po prostu dobrać rdzeń o większym przekroju.

Liczba zwojów poszczególnych uzwojeń wynosi:

$$z_1 = U_1 \frac{z}{U} 10\% = 220 \cdot 11 - 10\% = 2200 \text{ zw.}$$

$$z_2 = 12 \text{ V} \cdot 11 + 5\% = 132 + (132 \cdot 0,05) = 140 \text{ zw.}$$

$$z_3 = 5 \text{ V} \cdot 11 + 5\% = 55 + (55 \cdot 0,05) = 58 \text{ zw.}$$

Średnice drutów nawojowych można obliczyć według wzoru na gęstość prądu:

$$I = \frac{I[A]}{S_d \cdot \text{mm}^2} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right],$$

$$\text{przy założeniu, że } I = 2,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{2,5A}{\text{mm}^2} = \frac{0,6A}{S_{d_2}},$$

skąd

$$2,5 S_{d_2} = 0,6 \text{ mm}^2, \quad \text{więc } S_{d_2} = 0,24 \text{ mm}^2.$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_{d_1}}{\pi}},$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,24 \text{ mm}^2}{3,14}} = \sqrt{0,3} = 0,55 \text{ mm.}$$

Można posłużyć się tutaj również innym wzorem:

$$d = \sqrt{\frac{I}{2}}, \quad \text{przy } I = 2,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{I_2}{2}} = \sqrt{\frac{0,6}{2}} = \sqrt{0,3} = 0,55 \text{ mm,}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{I_3}{2}} = \sqrt{\frac{0,5}{2}} = \sqrt{0,25} = 0,5 \text{ mm.}$$

Średnicę drutu nawojowego pierwotnego uzwojenia obliczymy, wiedząc, że $P_1 = 14 \text{ VA}$:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1, \quad 11 = \frac{14 \text{ VA}}{220 \text{ V}} = 0,06 \text{ A,}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{I_1}{2}} = \sqrt{0,03} = 0,16 \text{ mm.}$$

Powierzchnia przeznaczona na uzwojenie (rys. 5) wynosi:

$$S_0 = a_0 \cdot b_0$$

jeżeli:

$$a_0 = 1 \text{ cm}, \quad b_0 = 3 \text{ cm}, \quad \text{to: } S_0 = 3 \text{ cm}^2$$

Powierzchnia zajmowana przez uzwojenia wynosi wg tablicy 5:

$$S_{01} = 1 \text{ cm}^2, \quad S_{02} = 0,5 \text{ cm}^2, \quad S_{03} = 0,6 \text{ cm}^2 \\ \Sigma S_0 = 2,1 \text{ cm}^2.$$

A więc 0,9 cm² zostaje na izolacyjne przekładki, ekran elektrostatyczny i wyprowadzenia, które mogą być wykonane np. linką TLY.

Każdy transformator podczas pracy nagrzewa się do jakiejś określonej temperatury, która nie może przekroczyć maksymalnej temperatury wytrzymałanej przez izolację uzwojeń.

Projektując transformator, szczególnie większej mocy, musimy zastanowić się, czy przypadkiem moc konieczna do zasilania jakiegoś urządzenia przez transformator nie będzie powodowała nagrzewania tego transformatora powyżej dopuszczalnej temperatury. W związku z tym jeszcze przed rozpoczęciem projektowania transformatora należy wyliczyć odpowiedni zapas mocy, który umożliwi zasilanie urządzenia, a nie będzie powodował przeciążenia transformatora.

Przykład: mamy zaprojektować transformator do pracy ciągłej w temperaturze otoczenia 30° przy temperaturze uzwojeń nie przekraczającej 65°C, oddający moc 3 kW. Na jaką moc należy go obliczyć?

$$P = P_{(65^\circ\text{C})} \sqrt{\frac{\Delta t}{\Delta t - \Delta t'}}$$

gdzie:

P – moc transformatora,

$P_{(65^\circ\text{C})}$ – moc oddawana przy temperaturze 65°C,

t – temperatura pracy (65°C),

t' – temperatura otoczenia

$$P = 3 \sqrt{\frac{65}{65-30}}, \quad P = 4,1 \text{ kW}$$

A więc potrzebny nam będzie transformator o mocy 4,1 kW.

Jeżeli dysponujemy jakimś transformatorem o określonej mocy, np. 3 kW, i chcemy dowiedzieć się, jaką moc można będzie z niego pobierać bez przegrzewania go powyżej np. 65°C, to skorzystamy z następującego wzoru:

$$P_{\pm \Delta t} = P \sqrt{\frac{\Delta t - t'}{\Delta t}}$$

Tablica 5
Druły nawojowe

Średnica mm	Przekrój mm ²	Prąd w przy l = 2 $\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	Rezystancja 1 m w Ω	zw/cm ²	zw/cmb	Ciężar 100 mb w kg
0,05	0,0019	0,005	8,5	18 500	136	0,0018
0,07	0,0038	0,009	4,5	10 500	102	0,0035
0,08	0,0050	0,012	3,4	8 500	92	0,0046
0,10	0,0078	0,019	2,2	5 700	76	0,0072
0,12	0,0113	0,028	1,5	4 000	63	0,0093
0,14	0,015	0,038	1,1	3 100	56	0,014
0,16	0,020	0,050	0,85	2 500	50	0,018
0,18	0,025	0,064	0,70	2 050	45	0,023
0,20	0,031	0,080	0,55	1 680	41	0,028
0,22	0,038	0,095	0,45	1 290	36	0,034
0,25	0,049	0,12	0,35	1 090	33	0,044
0,28	0,061	0,15	0,28	900	30	0,056
0,30	0,070	0,17	0,25	790	28	0,070
0,32	0,080	0,20	0,21	710	26	0,082
0,35	0,096	0,24	0,18	580	24	0,10
0,38	0,113	0,28	0,15	500	22	0,119
0,40	0,120	0,31	0,14	450	21	0,13
0,42	0,138	0,34	0,125	410	20	0,15
0,45	0,159	0,40	0,11	360	19	0,16
0,50	0,196	0,49	0,088	299	17	0,19
0,55	0,237	0,59	0,073	246	16	0,23
0,60	0,283	0,70	0,062	207	14	0,27
0,66	0,332	0,83	0,052	180	13	0,32
0,70	0,385	0,96	0,045	156	12	0,37
0,75	0,442	1,10	0,039	132	11	0,43
0,80	0,503	1,25	0,034	116	10,8	0,49
0,85	0,567	1,42	0,030	106	10,3	0,54
0,90	0,636	1,60	0,027	96	9,8	0,61
0,95	0,709	1,77	0,024	84	9,2	0,68
1,0	0,785	1,96	0,021	77	8,8	0,76
1,1	0,95	2,38	0,018	59	7,7	0,91
1,2	1,13	2,83	0,015	50	7,0	1,03
1,3	1,32	3,32	0,012	43	6,6	1,25
1,5	1,76	4,42	0,0096	33,6	5,8	1,6
1,7	2,27	5,64	0,008	26,4	5,1	2,13
2,0	3,14	7,85	0,0054	18,9	4,3	2,9
2,2	3,80	9,50	0,0045	15,7	3,96	3,55
2,5	4,9	12,2	0,0034	12,2	3,50	4,50
2,7	5,72	14,3	0,003	10	3,18	5,20
3,0	7,06	17,6	0,0024	8,3	2,88	6,35
3,2	8,04	19,3	0,0022	7,0	-	7,25
3,5	9,62	24	0,0017	6,1	-	8,7
3,8	11,34	28,4	0,0015	5,0	-	10,2
4,0	12,57	31,4	0,0014	4,6	-	11,5
4,3	13,85	34,8	0,0012	4,2	-	12,8
4,5	15,9	39,7	0,0010	3,7	-	14,6
4,8	18,1	45,3	0,0009	3,3	-	16,5
5,0	19,64	49,1	0,0008	3,0	-	17,8

Wytrzymałość izolacji drutu: Ø 0,05-0,07 = 300 V
 Ø 0,07-0,13 = 400 V
 do Ø 0,21 = 500 V
 do Ø 0,5 = 800 V
 powyżej Ø 0,5 = 1 kV

$$P_{(65^\circ\text{C})} = 3 \sqrt{\frac{65^\circ - 30^\circ}{65^\circ}} = 3 \sqrt{\frac{35^\circ}{65^\circ}} = 2,2 \text{ kW.}$$

Zatem z transformatora o mocy 3 kW możemy pobierać w sposób ciągły moc 2,2 kW bez niebezpieczeństwa przegrzania go powyżej 65°C.

Inż. Antoni Białoszewski