

TRANSFORMATORY

K. Schönhoff

Powstanie transformatorów wiąże się ściśle z historią napięcia przemienne-
go. Duński fizyk Hans Christian Oersted odkrył w roku 1820, że prąd płynący przez przewód wytwarza pole magnetyczne. Dziesięć lat później amerykański fizyk Joseph Henry odkrył indukcję elektromagnetyczną - przetwarzanie magnetyzmu w elektryczność. Pod koniec 1831 Michael Faraday przeprowadził serię doświadczeń z urządzeniem, składającym się z żelaznego pierścienia i nawiniętych na nim dwóch uzwojeń z izolowanego drutu miedzianego (*rysunek 1*). Przyłączył on baterię do jednego z uzwojeń w nadziei, że w drugim zaindukuje się stałe napięcie. Ale ku jego zdumieniu, nawet po dwustu próbach galwanometr przyłączony do uzwojenia B wychylał się tylko w momencie przyłączania i odłączania baterii do uzwojenia A.

Wkrótce po tym francuski konstruktor instrumentów Pixii zbudował w 1832 roku ręczny generator napięcia przemienne (alternator), który umożliwił dalsze badania nad indukcją elektromagnetyczną i w efekcie wynalezienie transformatora.

Pierwsi badacze, którzy przykładali napięcie przemienne do indukcyjności i mierzyli wywołane napięcia i prądy odkryli, że oporność cewki zmienia się, gdy wsuwa się do niej żelazny pręt. Oporność ta zwiększała się, gdy z pręta formowano obwód zamknięty. Rodzaj żelaza też wpływał na tę oporność, była ona największa w przypadku miękkiego żelaza (czyli o małej zawartości węgla, które nie było zdolne do zachowania magnetyzmu). Gdy na żelaznym rdzeniu zostało umieszczone odizolowane od pierwszego drugie uzwojenie, wówczas okazało się, że indukuje się w nim napięcie przemienne, gdy napięcie przemienne zostało przyłożone do pierwszego. Napięcie wtórne było wysokie, gdy wtórne uzwojenie miało wiele zwojów.

Rdzeń transformatora

Żelazny rdzeń dwójako usprawnia działanie transformatora. Po pierwsze, zwiększa oporność elektryczną uzwojenia wobec przyłożonego napięcia

przemienne. Prąd w cewce powietrznej jest około czterokrotnie większy od prądu w cewce z rdzeniem żelaznym. Po drugie, żelazo zawiera mnóstwo małych przypadkowo ukierunkowanych magnesików, których pola znośzą się wzajemnie. Są one jednak ruchome i zewnętrzne pole porządkuje ich ułożenie w taki sposób, że pole magnetyczne zostaje wzmocnione. To wzmocnione pole wytwarza znacznie większą indukcyjność własną.

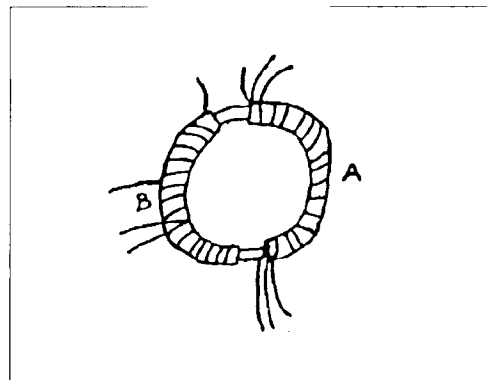
Prądy wirowe

Żelazny rdzeń transformatora jest przewodnikiem elektrycznym. Jego obwód tworzy zamkniętą pętlę i działa jak zwarty zwoj. Indukuje się w nim napięcie, a zatem płynie w nim prąd. Można sobie wyobrazić w rdzeniu bardzo wiele takich zamkniętych pętli, w których płyną małe prądy zwane prądami wirowymi. Prądy te wywołują straty mocy, ujawniające się w postaci nagrzewania się rdzenia w czasie pracy.

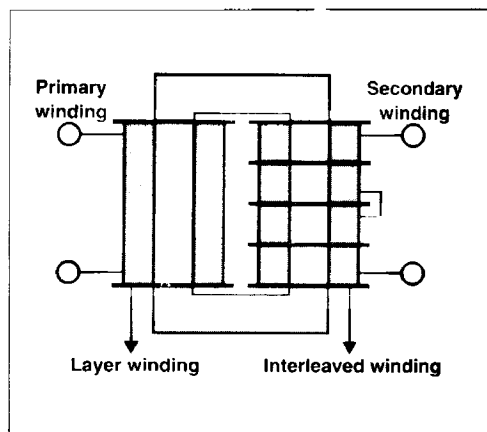
Straty te można zmniejszyć wykonując rdzeń nie z litego żelaza, tylko z cienkich blaszek stalowych, wzajemnie izolowanych elektrycznie. Przewodność elektryczną rdzenia można ponadto zmniejszyć przez dodanie do stali niewielkiej ilości krzemu.

Izolacja pomiędzy warstwami stali składa się zwykle z jednostronnej warstewki lakieru o grubości 6...10µm oraz obustronnych warstewek fosforanu o grubości 2..3µm i tlenku o grubości 2..3µm.

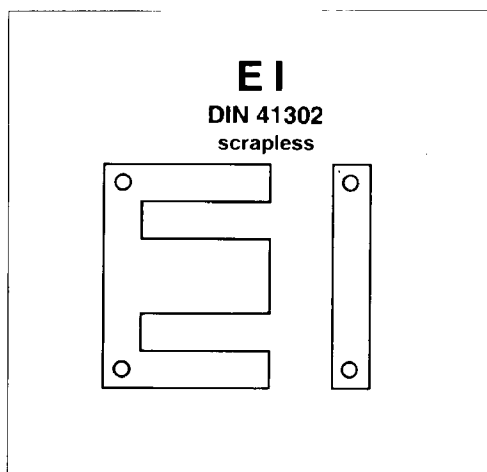
Współczynnik upakowania, czyli stosunek powierzchni aktywnego przekroju rdzenia do całkowitego, wynosi od 0,75 (grubość blachy 0,05mm) do 0,92 (grubość blachy 0,5mm).



Rys. 1.



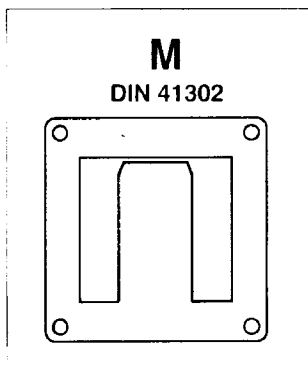
Rys. 2.



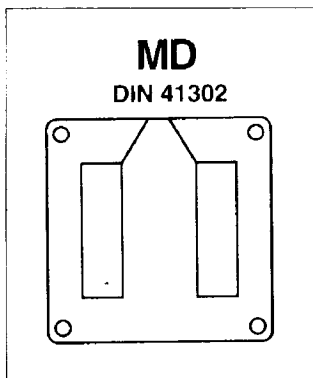
Rys. 3.

Tabela 1. Średnice kilku często spotykanych drutów nawojowych.

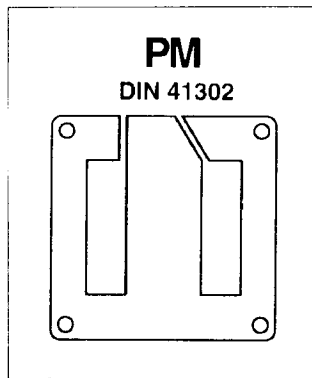
izolacja		średnica drutu [mm]			
		0,1	0,5	1	5
emalia	pojed.	0,011	0,028	0,040	0,060
	podw.	0,021	0,045	0,065	0,100
szt. jedwab	pojed.	0,05	0,06	0,07	—
	podw.	0,09	0,11	0,12	—
bawełna	pojed.	—	0,10	0,12	—
	podw.	—	0,16	0,22	0,40
papier	pojed.	—	0,12	0,12	0,20
	podw.	—	0,22	0,22	0,35



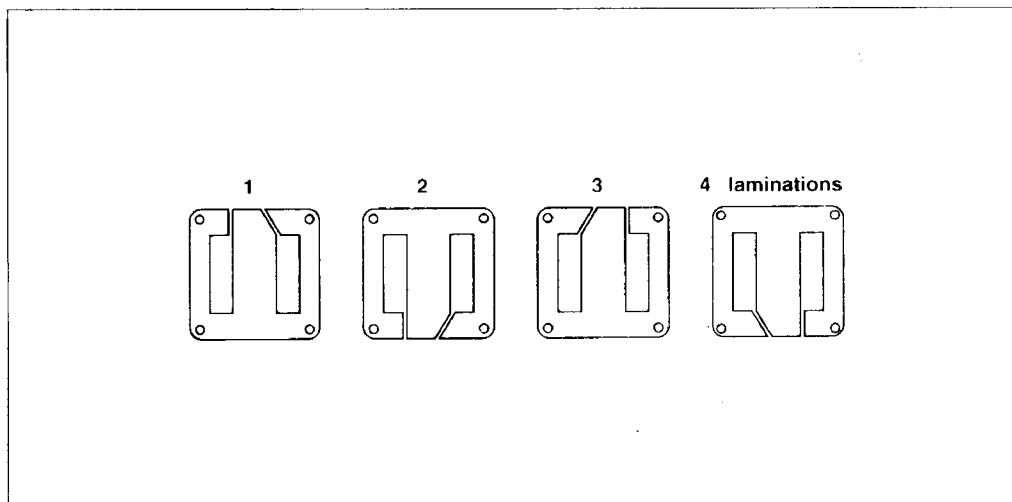
Rys. 4.



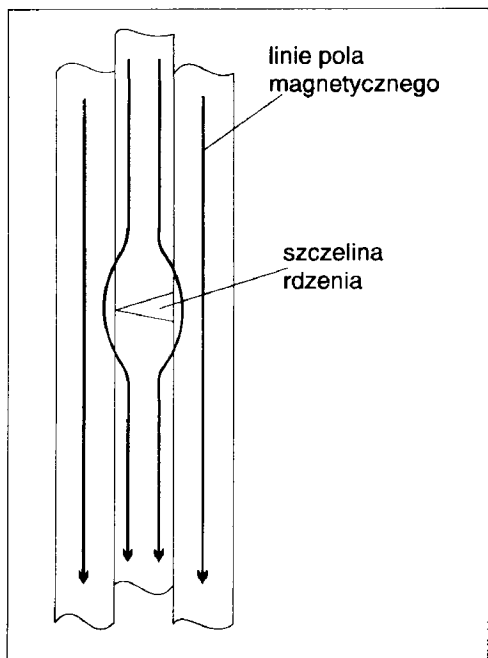
Rys. 5.



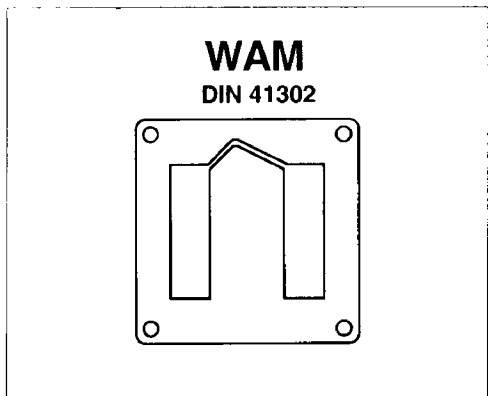
Rys. 6.



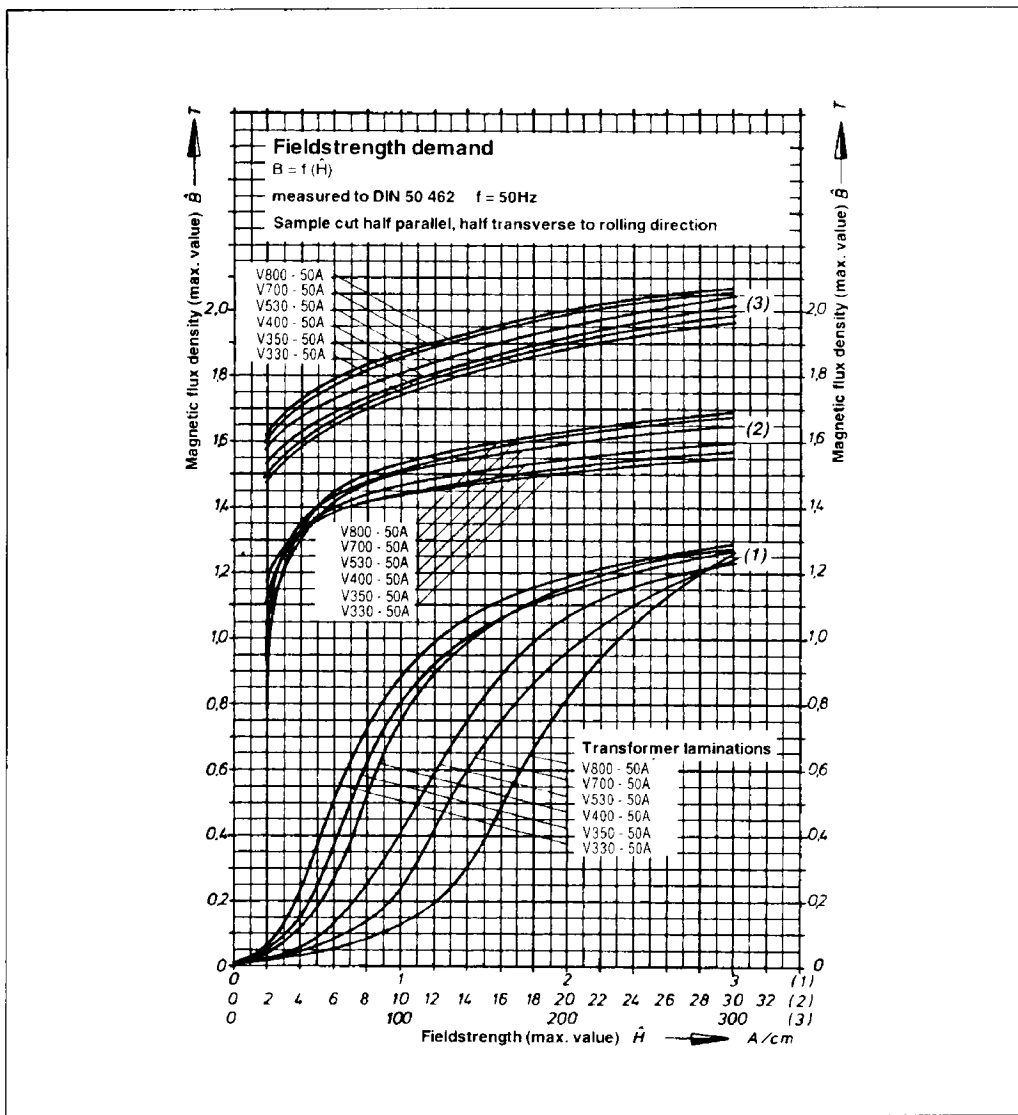
Rys. 7.



Rys. 8.



Rys. 9.

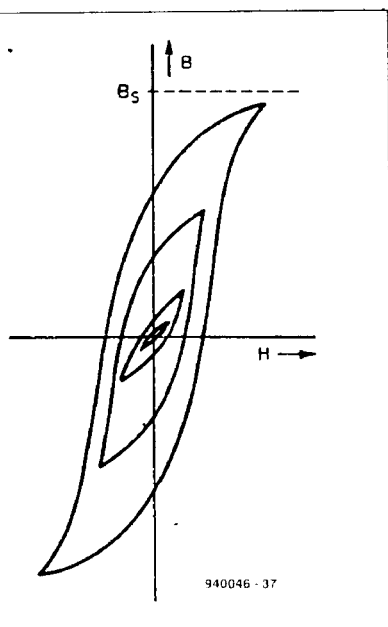


Rys. 10.

Średnice kilku często spotykanych drutów nawojowych zestawiono w **tabeli 1**.

Nasycenie

Wraz ze wzrostem prądu w uzwojeniu pierwotnym rośnie natężenie pola i magnetyzacja w rdzeniu. Jednakże począwszy od pewnego natężenia prądu magnetyzacja przestaje rosnąć: rdzeń jest nasycony, wzrasta jednak (słabe) pole wokół transformatora. To rozproszone pole może wywoływać zakłócenia w układach elektronicznych. Ponadto do wtórnego uzwojenia nie jest przekazywana cała energia, ponieważ nie wszystkie linie pola wytwarzanego przez uzwojenie pierwotne obejmują uzwojenie wtórne. Pole rozproszone bardziej daje się we znaki, gdy pierwotne i wtórne uzwojenia są odsunięte od siebie, jak na przykład na rdzeniu UI. Udział pola rozproszonego jest mniejszy, gdy uzwojenia znajdują się blisko siebie, na tym samym ramieniu rdzenia a jeszcze mniejszy, gdy uzwojenia nawinięte są



Rys. 11.

jedno na drugim, jak w większości transformatorów.

Szczególnie ważne dla projektowania transformatorów są dwie właściwości rdzenia: stopień magnetyzacji rdzenia, przy którym jeszcze nie występuje nasycenie i przenikalność, czyli stopień wzmacniania pola zewnętrznego. Te parametry wyznaczają ilość zwojów potrzebną dla określonego napięcia. Im jest wyższa magnesowalność, tym mniej w obu uzwojeniach potrzeba zwojów. Ilość zwojów zależy także od powierzchni przekroju rdzenia i od współczynnika kształtu transformatora.

Uwarstwienie

Pierwsze transformatory były potrzebne w systemach energetycznych do dostarczania stosunkowo dużej energii. Używano do nich prostokątnego rdzenia i dobrze odseparowanych uzwojeń, zapewniających dobrą izolację elektryczną (rysunek 2). Uzwojenia takie są zawsze wykonane z drutu w izolacji bawełnianej. W razie uszkodzenia każde z uzwojeń może zostać wyjęte, naprawione, albo wymienione.

Gdy następnie rosło zapotrzebowanie na transformatory do zasilania małych urządzeń, zaczęto do nich używać tzw. rdzeni płaszczykowych, jak na rysunku 3. Rdzenie płaszczykowe, zależnie od kształtu, dzielą się na rdzenie EI, M i F.

Rdzenie typu EI nadają się szczególnie do transformatorów wymagających małej szczeliny powietrznej (do 10µm). Napięcie wyjściowe takich transformatorów zależy od obciążenia, co jest korzystne w przypadku na przykład ładowarek akumulatorów, które powinny dostarczać prądu o stabilnym natężeniu.

niu. Szczelina powietrzna przeciwdziała wstępnemu magnesowaniu rdzenia, który przy wzroście prądu przemiennego mógłby ulec nasyceniu.

Transformatory z rdzeniami typu M (rysunek 4) są przeznaczone do specjalnych zastosowań, w których stosunkowo duże pole rozproszone nie jest szkodliwe.

Poprawa wydajności

Własności magnetyczne blach transformatorowych zostały istotnie udoskonalone doбором składu materiału stopowego oraz specjalnym sposobem walcowania. W blachach walcowanych na zimno ziarno zostaje ukierunkowane wzdłuż linii strumienia magnetycznego. Poprawia to magnesowalność równoległą, ale nie poprzeczną.

W rdzeniach typu MD (rysunek 5), które pojawiły się w latach '60, magnesowalność poprzeczna także została zwiększona. W tych kształtkach został zmniejszony efekt szczeliny powietrznej przez ułożenie szczelin w kierunku minimalnej gęstości strumienia.

Kształtka typu PM (rysunek 6) jest dalszym ulepszeniem typu M. Ulepszenie polega na poszerzeniu płaszcza zewnętrznego w porównaniu z wewnętrznym, co prowadzi do zmniejszenia magnetyzacji w ramionach zewnętrznych w stosunku do ramienia wewnętrznego. Wynikiem wzmocnienia tych ramion jest mniejsza ich oporność magnetyczna, rdzeń może więc pomieścić więcej linii sił, co obniża straty. Ponadto wskutek układania kształtek w rdzeniu w czterech różnych pozycjach (rysunek 7) każda szczelina powietrzna sąsiaduje z trzema warstwami ciągłymi, przechwytyjącymi linie sił (rysunek 8). Skutkiem tego ulepszenia jest wyższa sprawność i mniejsze pole rozproszone niż w kształtce typu MD.

Przed kilku laty kształtka PM została ulepszona przez przedłużenie okna i optyimizację szczeliny, co poprawiło wydajność o dalsze kilka procent.

Poza standardowymi istnieje jeszcze kilka kształtek specjalnych różnych producentów, jak np. pokazana na rysunku 9. Producent twierdzi, że jej własności są równie dobre jak typu PM, a stabilność fizyczna lepsza niż kształtki typu M.

Obliczenia

Podstawową zależnością do obliczania transformatora jest:

$$U_1 = 4,44 \cdot 10^{-4} \cdot B \cdot A_C \cdot f \cdot N_1 \quad (1)$$

gdzie U_1 oznacza napięcie pierwotne [V], B - indukcja magnetyczna [T], A_C - powierzchnia przekroju rdzenia [cm²], f - częstotliwość sieci [Hz], N_1 - ilość zwojów uzwojenia pierwotnego. Załóżmy, że transformator zasilany napięciem sieci 240V/50Hz ma dostarczać napięcia 24V. Użyta zostanie kształtka M65 (zob. tabela 2) o przekroju 4,9cm² i maksymalnej indukcji magnetycznej 1,42T, przy mocy wtórnej 35,7W. Ile zwojów powinno liczyć uzwojenie pierwotne?

Po przekształceniu i wstawieniu wartości liczbowych wzór (1) przyjmie postać:

$$N_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot 10^{-4} \cdot B \cdot A_C \cdot f} = \frac{240}{4,44 \cdot 10^{-4} \cdot 1,42 \cdot 4,9 \cdot 50} = 1553 \text{zw.}$$

Jeżeli napięcie wejściowe wzrosłoby do 250V, to:

$$B = \frac{U_1}{4,44 \cdot 10^{-4} \cdot N_1 \cdot A_C \cdot f} = 1,48 \text{T}$$

co przekracza dopuszczalne maksimum - transformator zostałby wprowadzony w nasycenie. Pokazuje to, że w obliczeniach musi zostać uwzględnione najwyższe możliwe napięcie wejściowe, a więc maksymalne wahania napięcia sieci (+10%, -15%). Odczytana z tab. 2 sprawność rzeczywista wynosi 77%. Gdyby użyć blachy o ukierunkowanym ziarnie VM 111-35, rdzeń o tych samych wymiarach dopuszczałby moc 43W, zaś sprawność wyniosłaby 81%. Warto zwrócić uwagę na zacytowane wyżej zależności, z których wynika, że indukcja magnetyczna B jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości.

Histereza

Przy znacznie większej częstotliwości straty w rdzeniu stają się tak duże, że jego struktura warstwowa przestaje być skutecznym lekarstwem. Zamiast blach stosuje się więc rdzenie prasowane ze sproszkowanego żelaza, w których straty są dużo mniejsze. Szeroko stosowane są także rdzenie ferrytowe, z materiału magnetycznego o wysokiej oporności, składającego się głównie z tlenków żelaza i jednego lub kilku innych metali.

W ferrytach spiekanych z proszków straty na prądy wirowe przy wielkich częstotliwościach są bardzo małe; są

Tabela 2. Dane elektryczne transformatorów z rdzeniami z kształtek M i EI. Blacha typu V170-50A według DIN41302, część 2 ($\mu = 0,94$).

Typ i rozmiar rdzenia	moc wiorna $\cos\phi=1$	indukcja magnetyczna $\hat{B}_N$	gęstość prądu S_N	moc bierna P_o	straty w rdzeniu P_{Fe}	straty w uzwojeniu P_{CuW}	wsp. prądowy Δ_i	wsp. napięciowy Δ_u	sprawność rzeczywista η_w	sprawność pozorna η_s	wsp. mocy $\cos\phi$	rezystancja cieplna	
												dla strat w uzwojeniu R_{ThCu}	dla strat w rdzeniu R_{ThFe}
	W	T	—	V·A	W	W	—	—	—	—	—	—	—
M42	3,94	1,37	6,7	4,31	0,68	3,81	1,365	1,76	0,467	0,416	0,89	22,6	10,8
M55	15,8	1,38	4,97	11,6	1,78	5,7	1,267	1,301	0,68	0,61	0,89	14,1	6,4
M65	34,1	1,39	4,1	21,5	3,25	7,6	1,228	1,188	0,76	0,69	0,9	10,2	4,45
M74	62	1,39	3,51	34,5	5,2	9,3	1,198	1,13	0,81	0,74	0,91	7,9	3,35
M85	a	82	1,37	43,2	6,9	10,4	1,189	1,111	0,83	0,76	0,92	6,8	2,8
	b	108	1,33	51	9,1	10,9	1,17	1,09	0,84	0,78	0,93	6,1	2,5
M102	a	143	1,42	67	10,8	13,5	1,163	1,084	0,85	0,79	0,93	5	2,02
	b	198	1,31	79	14,6	14,1	1,139	1,065	0,87	0,82	0,94	4,45	1,75

Typ i rozmiar rdzenia	moc wiorna $\cos\phi=1$	indukcja magnetyczna $\hat{B}_N$	gęstość prądu S_N	moc bierna P_o	straty w rdzeniu P_{Fe}	straty w uzwojeniu P_{CuW}	wsp. prądowy Δ_i	wsp. napięciowy Δ_u	sprawność rzeczywista η_w	sprawność pozorna η_s	wsp. mocy $\cos\phi$	rezystancja cieplna	
												dla strat w uzwojeniu R_{ThCu}	dla strat w rdzeniu R_{ThFe}
	W	T	—	V·A	W	W	—	—	—	—	—	—	—
EI42	4,05	1,38	6,8	4,53	0,51	3,91	1,348	1,76	0,478	0,421	0,88	22,6	10,8
EI55	16,4	1,4	5,1	12,7	1,36	6	1,262	1,301	0,69	0,61	0,88	14,1	6,4
EI65	35,7	1,42	4,21	24,4	2,5	8	1,231	1,188	0,77	0,68	0,88	10,2	4,45
EI74	65	1,43	3,62	40,8	4,06	9,9	1,208	1,129	0,82	0,73	0,89	7,9	3,35
EI85	a	87	1,41	53	5,5	11,2	1,204	1,109	0,84	0,75	0,89	6,8	2,8
	b	116	1,39	66	7,5	11,8	1,193	1,087	0,86	0,77	0,9	6,1	2,5
EI102	a	154	1,42	86	8,7	14,6	1,184	1,083	0,87	0,78	0,9	5	2,02
	b	215	1,39	111	12,4	15,2	1,169	1,062	0,89	0,81	0,91	4,45	1,75

to więc idealne materiały na rdzenie indukcyjności i elementów przełączających stosowanych w technice w.c.z. Inne rdzenie stosowane w transformatorach i indukcyjnościach w.c.z. wykonuje się ze spineli ferromagnetycznych, będących materiałami o charakterze ceramicznym, o dużej przenikalności, małej przewodności i bardzo małych stratach na prądy wirujące.

Na **rysunku 10** są przedstawione typowe krzywe magnetyzacji rdzeni uwarstwionych, zaś na **rysunku 11** - typowe krzywe histerezy transformatorów z takimi rdzeniami.

Histeresa jest to tendencja materiału magnetycznego do nasycania się i do zachowywania części magnetyzmu po zmianie polaryzacji pola magnetycznego, któremu jest poddany. Histeresa wywołuje w ten sposób opóźnienie magnetyzacji w stosunku do siły magnesującej. Powierzchnia pętli histerezy

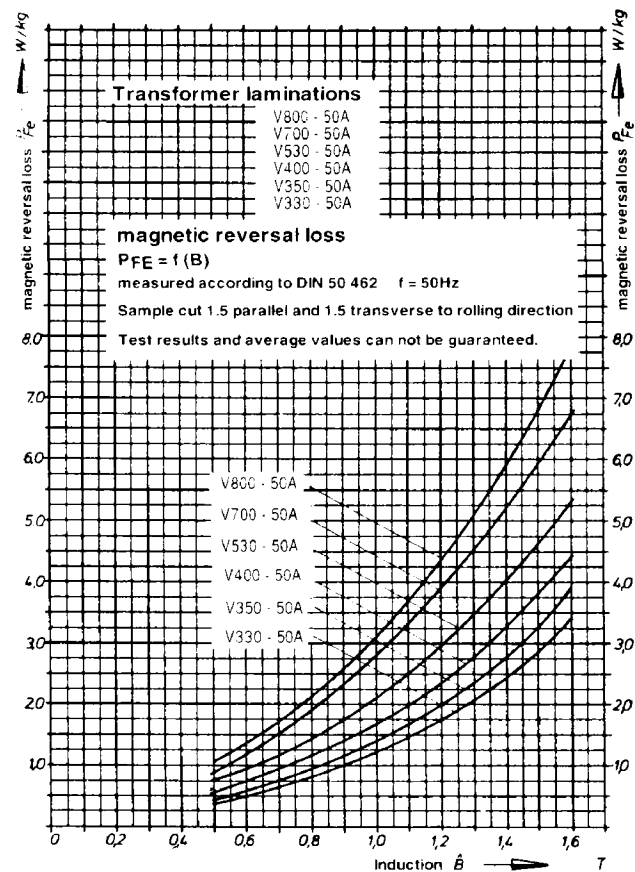
jest miarą straty energii w każdym przemagnesowaniu. **Rysunki 12 i 13** przedstawiają charakterystyki strat energii dla różnych rodzajów uwarstwienia przy 50Hz. Straty na histerezę szybko rosną ze wzrostem częstotliwości. Przy częstotliwości kilku kHz jedynie ferryty wykazują małe straty na histerezę.

Transformatory toroidalne

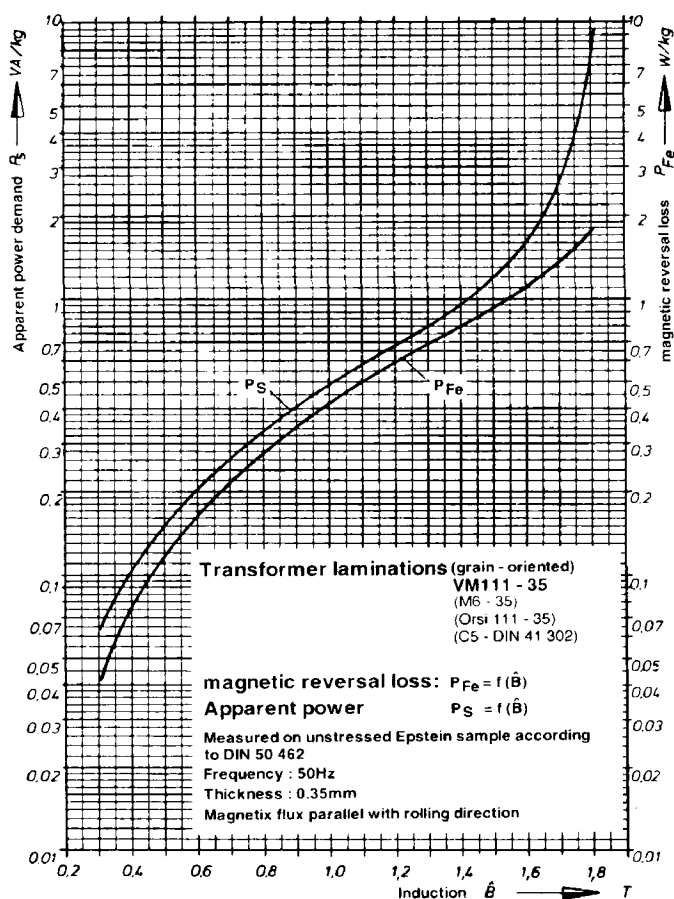
W transformatorach toroidalnych rdzeń jest wykonany z jednej długiej taśmy blachy, zwiniętej w formie pierścienia. Uzwojenia nawija się na nim za pomocą specjalnej nawijarki, w sposób pokazany na **rysunku 14** (rysunek nawijarki jest błędny; skonstruowany według niego przyrząd na pewno nie będzie działał, jednak rysunek dość dobrze odaje ideę funkcjonowania urządzenia - przyp. red.). W takich transformatorach wszystkie

linie sił są ułożone w tym samym kierunku.

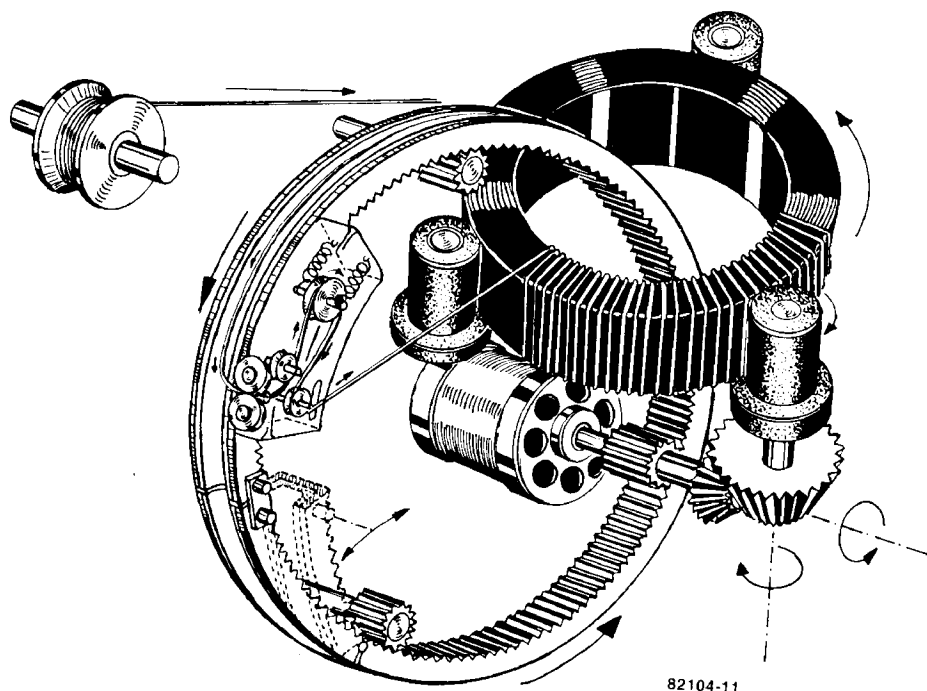
Z im cieńszej blachy magnetycznej jest zwinięty rdzeń, tym mniejsze są straty w żelazie. Rdzenie toroidalne są więc zazwyczaj zwijane z bardzo cienkiej folii. Trudno sobie wyobrazić lepiej zamkniętą pętlę magnetyczną. Rdzeń taki jest całkowicie osłonięty uzwojeniami, ma więc tendencję do nagrzewania się, jednakże jest to wyrównywane przez łatwość z jaką uzwojenia wypromieniowują ciepło. Znakończona przewodność cieplna miedzi jest wykorzystywana przy projektowaniu transformatorów toroidalnych, gdzie dopuszcza się do większych strat w miedzi poprzez stosowanie cieńszego drutu. Oporność transformatora toroidalnego jest więc większa niż transformatora konstrukcji tradycyjnej o tej samej mocy, za to wymiary fizyczne transformatora toroidalnego są mniejsze.



Rys. 12.



Rys. 13.



Rys. 14.

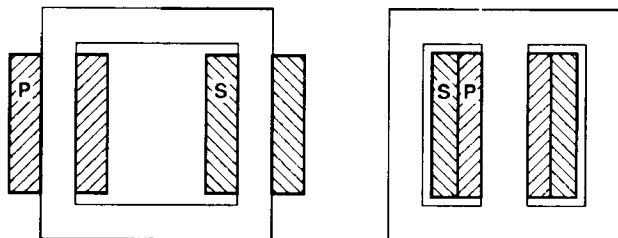
Trochę teorii

Podstawą działania transformatora jest zjawisko indukcyjności wzajemnej. Uzwojenia pierwotne i wtórne obejmują ten sam strumień magnetyczny. Konstrukcja transformatora jest przedstawiona na **rysunku 15**, a jego schemat elektryczny na **rysunku 16**. Prąd przemienny w uzwojeniu pierwotnym wywołuje powstanie strumienia magnetycznego w rdzeniu. Jeżeli prąd jest sinusoidalny i jeżeli strumień jest proporcjonalny do prądu, wówczas zależność

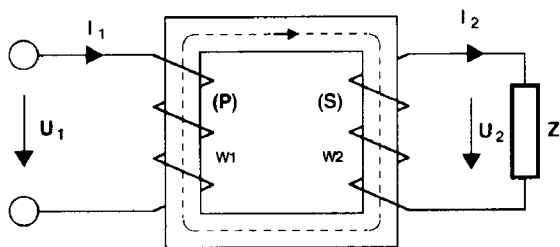
$$\Phi = \Phi_m \sin 2\pi f t \quad (2)$$

opisuje zmiany strumienia w czasie, Φ oznacza strumień w momencie t , Φ_m jest wartością maksymalną strumienia, f oznacza częstotliwość z którą zmienia się prąd, a zatem i strumień. Indukowana w jednym zwoju siła elektromotoryczna SEM wynosi:

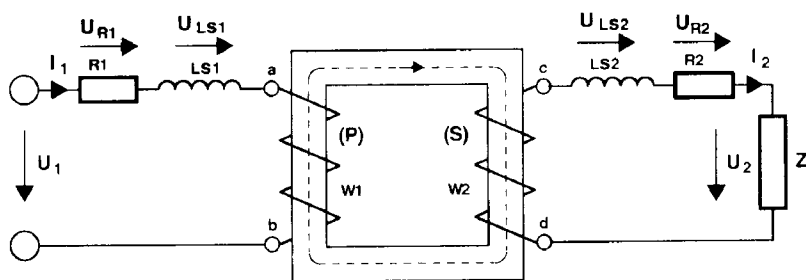
$$\begin{aligned} U &= - \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) = \\ &= - \left[\frac{d(\Phi_m \sin 2\pi f t)}{dt} \right] = \\ &= -2\pi f \Phi_m \cos 2\pi f t \end{aligned}$$



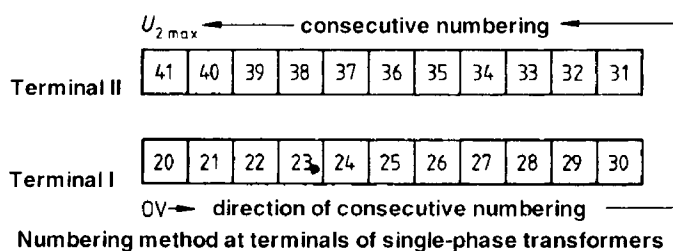
Rys. 15.



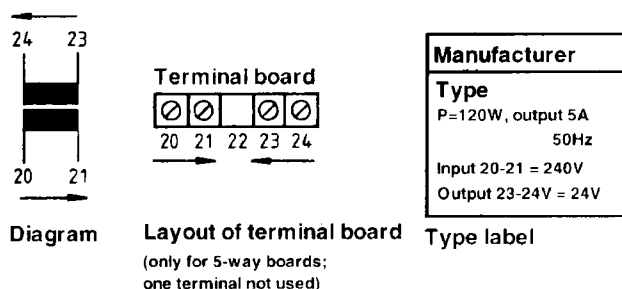
Rys. 16.



Rys. 17.



Rys. 18.



Rys. 19.

Ta indukowana w jednym zwoju SEM osiąga wartość maksymalną U_m w momencie, gdy cosinus osiąga wartość 1:

$$U_m = 2\pi f \Phi_m$$

Wartość skuteczna tej SEM - U_{sk} - wynosi:

$$U_{rms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f \Phi_m$$

Jeżeli pierwotne uzwojenie ma N_1 zwojów, to pierwotna SEM wynosi $4,44 N_1 f \Phi_m$. Jeżeli wtórne uzwojenie ma N_2 zwojów, to wtórna SEM wyniesie $4,44 N_2 f \Phi_m$.

Stosunek $U_1 : U_2 = N_1 : N_2 = n$ jest nazywany przekładnią (albo współczynnikiem transformacji) transformatora.

Gdy do wtórnego uzwojenia zostanie przyłączone obciążenie, popłynie przez nie prąd wtórny I_2 , przeciwstawiający się zmianom strumienia. Obniża to siłę przeciw-elektromotoryczną w uzwojeniu pierwotnym, wzrasta więc prąd pierwotny I_1 . Wzrost ten dokładnie równoważy rozmagasowujący wpływ prądu wtórnego.

Jak dotąd w tych rozważaniach pomijane były wpływy oporności uzwojeń i wpływ pola rozproszonego. W rzeczywistości uzwojenie pierwotne wytwarza strumień rozproszony Φ_{S1} , z którym nie jest sprzężone uzwojenie wtórne. Również uzwojenie wtórne wytwarza strumień rozproszony Φ_{S2} niesprężony z uzwojeniem pierwotnym. Strumienie te indukują napięcia U_{S1} i U_{S2} , opóźnione w stosunku do strumieni rozproszonych o $\pi/2$.

Ponieważ strumienie te przebiegają głównie w powietrzu, to można przyjąć, że nie zależą od indukcji. Strumienie rozproszone, a zatem i napięcia U_{S1} i U_{S2} , są wprost proporcjonalne do I_1 i I_2 . Dla naszych rachunków nie jest istotne, czy te napięcia są indukowane w uzwojeniach, czy w oddzielnych cewkach powietrznych. Indukcyjności tych wymyślonych cewek są wyznaczone przez:

$$j\omega L_{S1} = jX_{S1} = \frac{U_{S1}}{I_1}$$

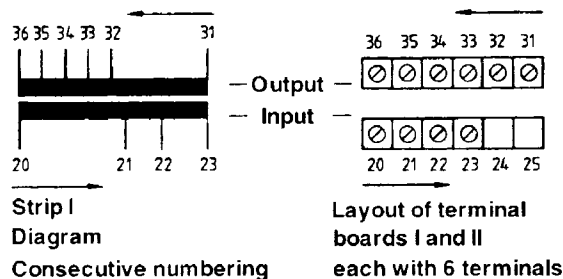
oraz

$$j\omega L_{S2} = jX_{S2} = \frac{U_{S2}}{I_2}$$

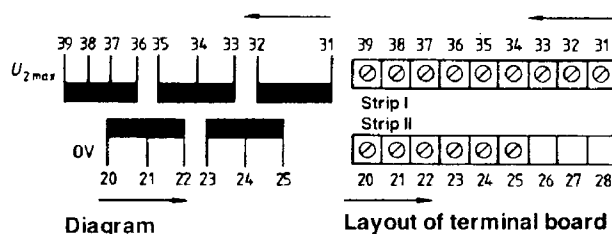
Indukcyjności te i oporności uzwojeń są przedstawione na rysunku 17.

Wyprowadzenia

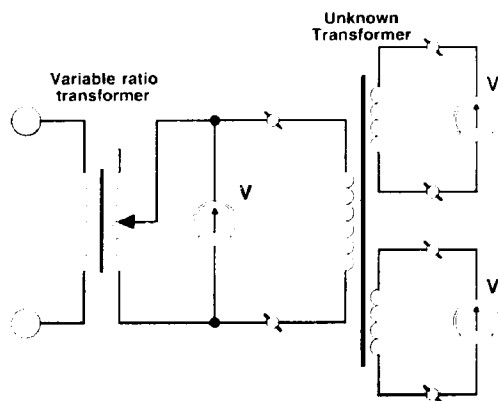
Wyprowadzenia nieznanymi transformatorów, oznaczone dwoma rzędami



Rys. 20.



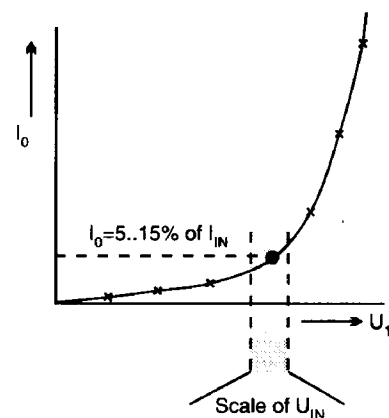
Rys. 21.



Rys. 22.

liczb pomiędzy 20 i 99, niemal na pewno są zgodne z DIN 42200. Liczby te zawierają użyteczne informacje. Większość dobrej jakości transformatorów jest oznaczona dwoma rzędami numerów, jak pokazano na rysunku 18: Wyprowadzenia o obciążeniu do 25A max

1 rząd: od 20 do 60
2 rząd: od 31 do 60
Wyprowadzenia o obciążeniu do 60A max
1 rząd: od 61 do 99
2 rząd: od 71 do 99
Dla rzędu z wyprowadzeniami pier-



Rys. 23.

wotnymi oznacza to początek od 0V na wyprowadzeniu 20 i dalej w kolejności wzrastającego napięcia (**rysunki 19...21**).

Dla rzędu z wyprowadzeniami wtórnymi oznacza to początek od najwyższego napięcia na wyprowadzeniu o najwyższym numerze i dalej w dół, w kolejności malejącego napięcia (rys. 19...21).

Napięcia nieznanego nieobciążonego transformatora można ustalić w sposób pokazany na **rysunku 22**. Prąd pierwotny nieobciążonego transformatora będzie niewielki, na poziomie 5...10% jego wielkości nominalnej, o ile nie występuje nasycenie. Początkowo rośnie on proporcjonalnie do przyłożonego napięcia, a po osiągnięciu nasycenia zwiększa się gwałtownie według krzywej na **rysunku 23**. W czasie testowania nieznanego transformatora mogą pojawić się bardzo wysokie napięcia, próby te powinny więc być wykonywane bardzo ostrożnie, poczynając od stosunkowo niskiego napięcia. Zakrzywienie charakterystyki na rys. 23 wyznacza nominalne napięcie wejściowe. ■