

Nr ćwicz.: 202	26.10.2023	Jakub Bilski	Wydział Informatyki i Telekomunikacji	Semestr III	Grupa 2, L8 (Informatyka)
Prowadzący: mgr inż. Taras Zhezhera					

## Podstawy teoretyczne

**Prąd przemienny** to typ prądu elektrycznego, który zmienia kierunek i wartość natężenia w sposób okresowy w czasie. W przeciwieństwie do prądu stałego, gdzie kierunek i wartość natężenia prądu pozostaje stały, prąd przemienny oscyluje między wartościami dodatnimi i ujemnymi. Prąd przemienny jest szeroko używany w systemach dystrybucji energii elektrycznej ze względu na łatwość transformacji napięcia przy użyciu transformatorów.

Charakterystyka prądu przemiennego opisana jest przez kilka parametrów:

Amplituda ( $I_{max}$  lub  $U_{max}$ ) - maksymalna wartość natężenia prądu lub napięcia w cyklu.

Częstotliwość ( $f$ ) - liczba cykli na sekundę, wyrażona w hercach ( $Hz$ ).

Okres ( $T$ ) - czas trwania jednego cyklu, wyrażony w sekundach ( $s$ ), gdzie  $T = \frac{1}{f}$ .

Faza ( $\varphi$ ) - przesunięcie fazowe prądu lub napięcia względem punktu odniesienia, wyrażone w radianach lub stopniach.

Wartość skuteczna ( $I_{RMS}$  lub  $U_{RMS}$ ) - wartość średnia prądu lub napięcia w cyklu, wyznaczona jako

$$I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Chwilowe natężenie i napięcie prądu przemiennego zależne od czasu  $t$  możemy wyznaczyć przy pomocy funkcji cosinus:

$$u = U_0 \cos(\omega t)$$

$$i = I_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

Gdzie:

$U_0$  - napięcie szczytowe

$u$  – chwilowa wartość napięcia

$I_0$  – natężenie szczytowe

$i$  – chwilowa wartość natężenia

$\omega$  – częstotliwość kołowa

**Transformator** to urządzenie szeroko stosowane w różnych dziedzinach, takich jak energetyka, elektrotechnika, elektronika czy spawalnictwo, pełniące kluczową rolę w przekształcaniu napięcia i natężenia prądu przemiennego na inne wartości, bez zmiany częstotliwości prądu. Na przykład, transformatory pozwalają na konwersję wysokiego napięcia używanego w liniach przesyłowych (na przykład 400000 V) na niższe napięcie, które można bezpiecznie wykorzystać w urządzeniach domowych.

Transformator składa się z ferromagnetycznego rdzenia oraz co najmniej dwóch uzwojeń (cewek) nawiniętych na rdzeń. Uzwojenie pierwotne (zasilające) i wtórne (odbiorcze) są elementami elektrycznymi transformatora, natomiast rdzeń pełni rolę obwodu magnetycznego. Działanie transformatora bazuje na zjawisku indukcji elektromagnetycznej.

Wyróżniamy trzy główne stany pracy transformatora: stan jałowy, stan zwarcia oraz stan obciążenia. Każdy z tych stanów ma swoje specyficzne charakterystyki i zrozumienie ich jest kluczowe dla zrozumienia podstaw działania transformatora.

## **A. Badania transformatora w stanie jałowym - wyznaczenie przekładni transformatora**

### Oznaczenia:

$U_1$  – napięcie pierwotne

$U_2$  – napięcie wtórne

$n_1$  – liczba zwojów w uzwojeniu pierwotnym

$n_2$  – liczba zwojów w uzwojeniu wtórnym

$e_1$  – wartość chwilowa siły elektromotorycznej na uzwojeniu pierwotnym,

$e_2$  – wartość chwilowa siły elektromotorycznej na uzwojeniu wtórnym

$\frac{d\phi}{dt}$  - pochodna strumienia magnetycznego  $\Phi$  po czasie  $t$  (szybkość z jaką strumień przenikający przez jeden zwój zmienia się w czasie)

$K$  – przekładnia transformatora

### Stan jałowy:

- uzwojenie pierwotne jest podłączone do źródła prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne jest rozwarne (w konsekwencji rezystancja odbiornika  $R = \infty$ )
- prąd przemienny przepływający w uzwojeniu pierwotnym indukuje w rdzeniu przemienny strumień magnetyczny  $\Phi$
- zgodnie z prawem indukcji Faradaya, przez uzwojenia pierwotne i wtórne indukują się chwilowe siły elektromotoryczne pod wpływem zmiennego pola magnetycznego
- wartości chwilowych sił elektromotorycznych:

$$e_1 = -n_1 \frac{d\phi}{dt}, \quad e_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt},$$

W typowych warunkach rezystancje uzwojeń transformatora są niewielkie, dlatego w stanie jałowym transformatora można stwierdzić, że chwilowe spadki napięć na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym równają się wartościowo indukowanym w nich siłom elektromotorycznym:

$$u_1 = e_1, \quad u_2 = e_2$$

Na podstawie podanych zależności możemy stwierdzić, że prawdziwe jest równanie:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

I dalej:

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

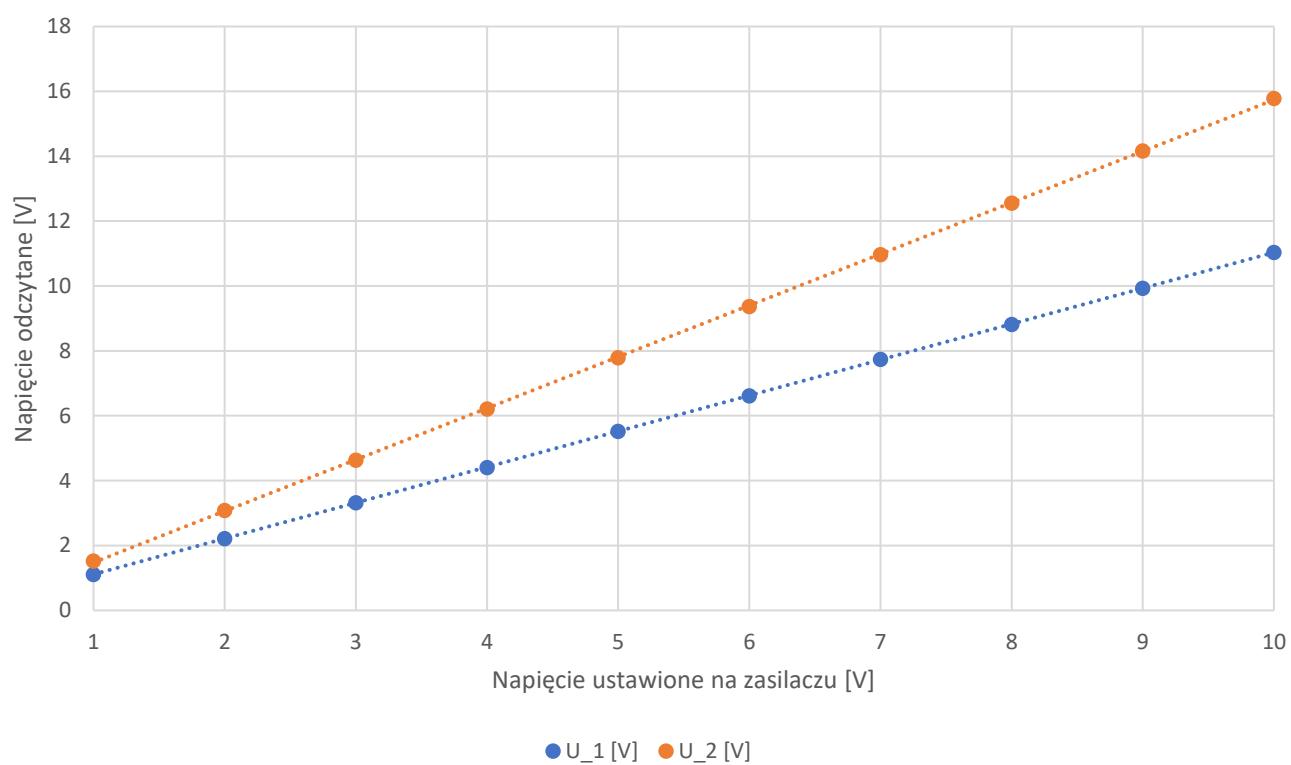
Dzięki powyższemu równaniu możemy stwierdzić, że w celu uzyskania żadanego spadku lub wzrostu napięcia na wyjściu transformatora w stosunku do napięcia zasilającego, musimy dobrać odpowiednią do sytuacji liczbę zwojów w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym.

### Zależność napięcia wtórnego od napięcia pierwotnego $U_2 = f(U_1)$

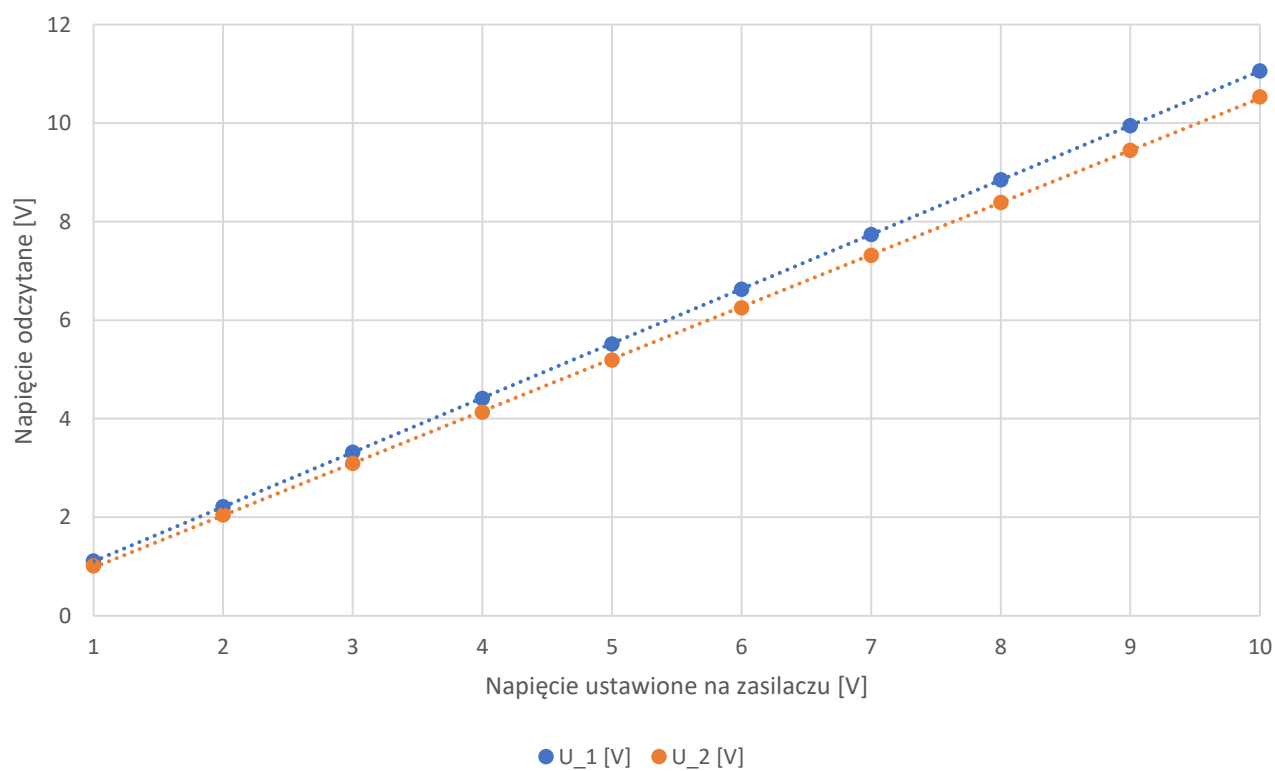
Wartości pomiarów:

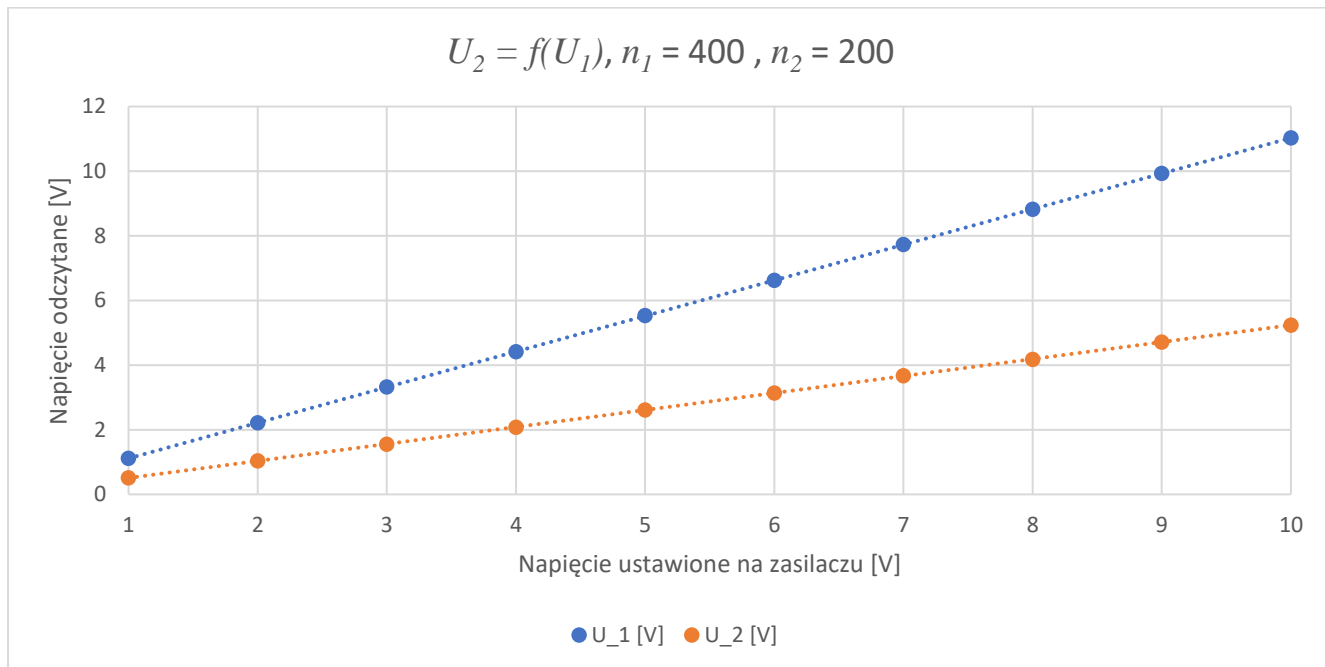
	$n_1 = 400, n_2 = 600$		$n_1 = 400, n_2 = 400$		$n_1 = 400, n_2 = 200$	
Napięcie źródła [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]
1	1.112	1.521	1.112	1.012	1.112	0.513
2	2.218	3.080	2.214	2.048	2.217	1.032
3	3.325	4.630	3.32	3.094	3.32	1.555
4	4.410	6.210	4.41	4.13	4.41	2.081
5	5.520	7.790	5.52	5.19	5.53	2.61
6	6.620	9.370	6.63	6.25	6.62	3.14
7	7.740	10.970	7.74	7.32	7.73	3.67
8	8.820	12.560	8.85	8.39	8.82	4.18
9	9.930	14.170	9.95	9.45	9.93	4.71
10	11.040	15.780	11.06	10.53	11.03	5.24

$$U_2 = f(U_1), n_1 = 400, n_2 = 600$$



$$U_2 = f(U_1), n_1 = 400, n_2 = 400$$





Napięcie wtórne rosną proporcjonalnie do napięcia pierwotnego przy jednoczesnym zachowaniu wartości przekładni transformatora  $\frac{U_1}{U_2} = K$ .

Wyznaczenie przekładni transformatora:

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

Wartość teoretyczna przekładni transformatora (liczba uzwojeń jest ustalona, nie mierzymy jej):  $\frac{n_1}{n_2} = K$

Wartość doświadczalna przekładni transformatora (wartości napięć należy odczytać z multimetrów):  $\frac{U_1}{U_2} = K$

$n_1 = 400, n_2 = 600$		
$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$K_{dośw}$
1.112	1.521	0.731098
2.218	3.080	0.72013
3.325	4.630	0.718143
4.410	6.210	0.710145
5.520	7.790	0.708601
6.620	9.370	0.70651
7.740	10.970	0.705561
8.820	12.560	0.702229
9.930	14.170	0.700776
11.040	15.780	0.69962

$n_1 = 400, n_2 = 400$		
$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$K_{dośw}$
1.112	1.012	1.098814
2.214	2.048	1.081055
3.32	3.094	1.073045
4.41	4.13	1.067797
5.52	5.19	1.063584
6.63	6.25	1.0608
7.74	7.32	1.057377
8.85	8.39	1.054827
9.95	9.45	1.05291
11.06	10.53	1.050332

$n_1 = 400, n_2 = 200$		
$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$K_{dośw}$
1.112	0.513	2.167641
2.217	1.032	2.148256
3.32	1.555	2.135048
4.41	2.081	2.119173
5.53	2.61	2.118774
6.62	3.14	2.10828
7.73	3.67	2.106267
8.82	4.18	2.110048
9.93	4.71	2.10828
11.03	5.24	2.104962

Obliczenia przekładni teoretycznej:

$$K_1 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{400}{600} = \frac{2}{3} \cong 0.66667$$

$$K_2 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{400}{400} = 1$$

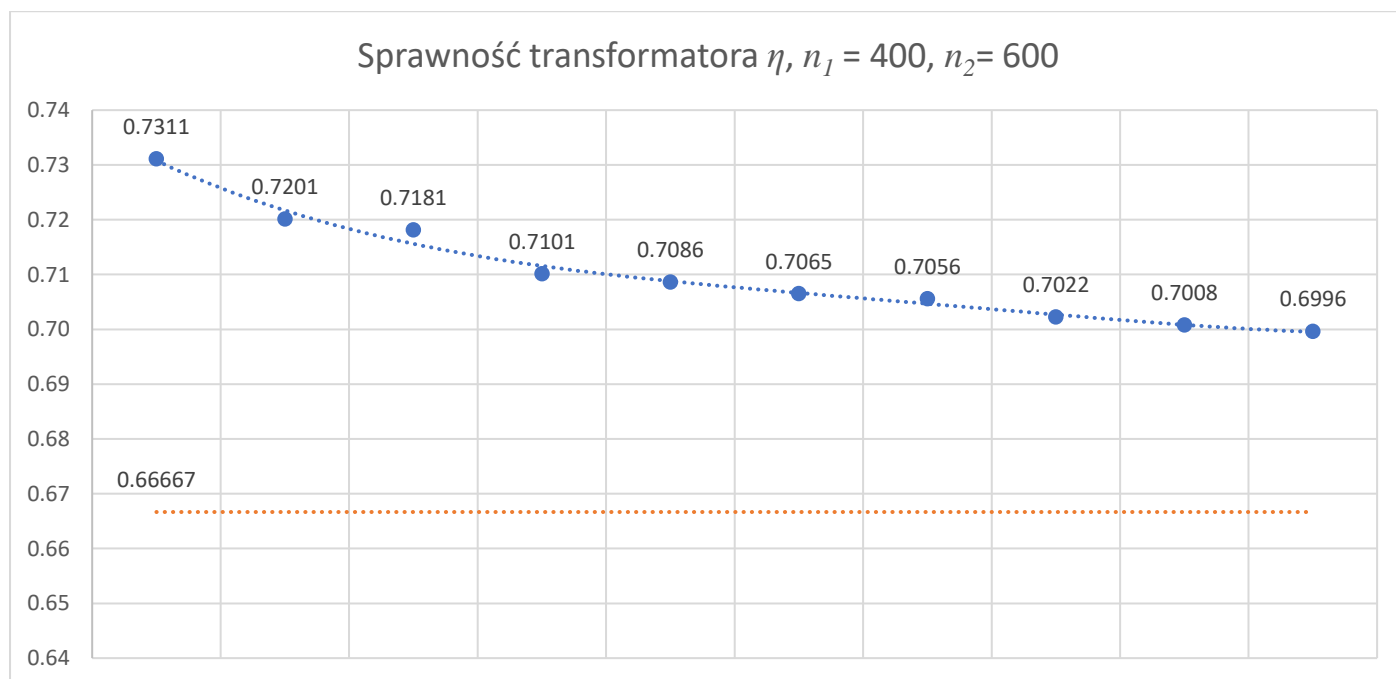
$$K_3 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{400}{200} = 2$$

Przykładowe obliczenia przekładni doświadczalnej:

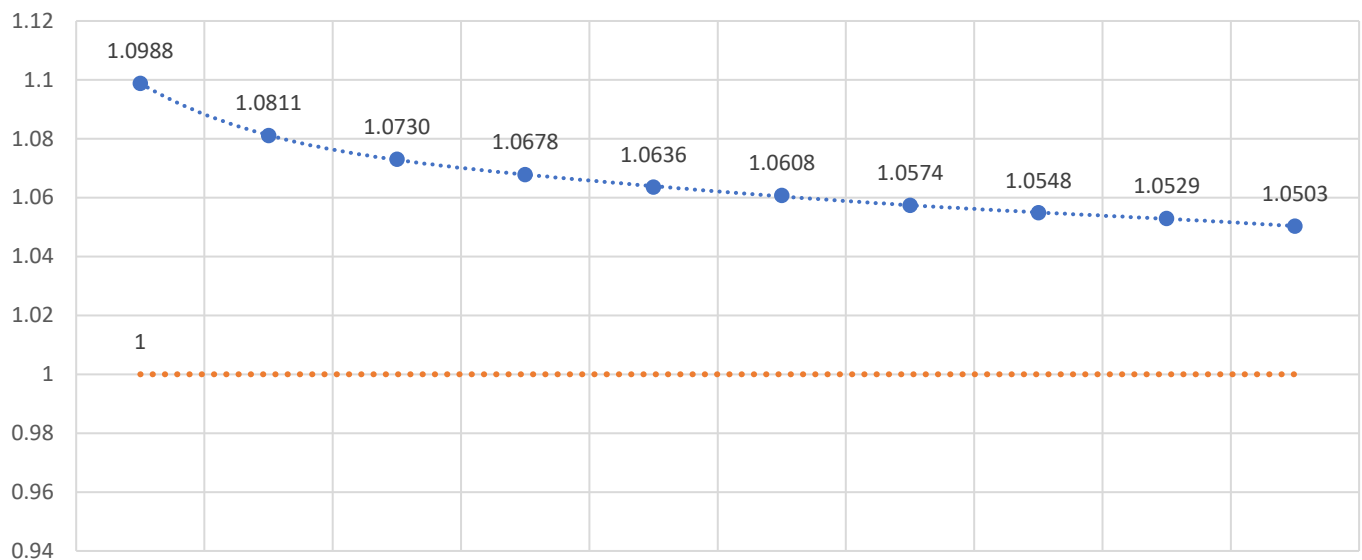
$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1.112}{1.521} \cong 0.7311$$

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1.112}{1.012} \cong 1.0988$$

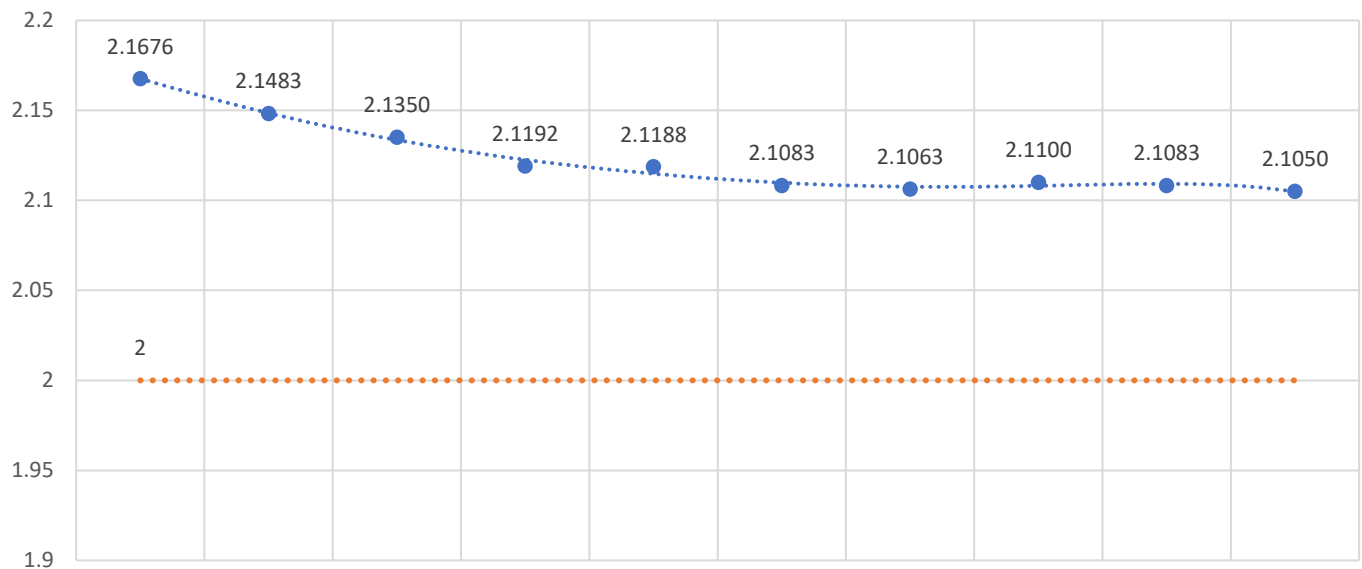
$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1.112}{0.513} \cong 2.1676$$



Sprawność transformatora  $\eta$ ,  $n_1 = 400$ ,  $n_2 = 400$



Sprawność transformatora  $\eta$ ,  $n_1 = 400$ ,  $n_2 = 200$



Wyznaczenie średnich wartości przekładni transformatora:

$$\bar{K} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_i$$

gdzie:

$m$  – liczba pomiarów (wyznaczonych przekładni dla danej liczby uzwojeń)

Dla  $n_1 = 400$  i  $n_2 = 600$ :

$$\bar{K} = \frac{0.7311+0.7201+0.7181+0.7101+0.7086+0.7065+0.7056+0.7022+0.7008+0.6996}{10} \cong 0.7103$$

Dla  $n_1 = 400$  i  $n_2 = 400$ :

$$\bar{K} \cong 1.0661$$

Dla  $n_1 = 400$  i  $n_2 = 200$ :

$$\bar{K} \cong 2.1227$$

Niepewności pomiarowe:

Ocena niepewności typu A:

Jako najlepsze oszacowanie wartości mierzonej przyjmujemy średnią arytmetyczną z pomiarów:

$$K = \bar{K} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_i$$

Jako miarę rozrzutu pojedynczego pomiaru używamy estymator odchylenia standardowego:

$$S_K = \sqrt{\sum \frac{(K_i - \bar{K})^2}{m - 1}}$$

Za niepewność pomiaru uznajemy estymator odchylenia standardowego średniej:

$$u(K) = S_{\bar{K}} = \sqrt{\sum \frac{(K_i - \bar{K})^2}{m(m - 1)}}$$

$m$  – liczba pomiarów

Dla  $n_1 = 400$  i  $n_2 = 600$ :

$$\bar{K} \cong 0.7103$$

$$u(K) = \sqrt{\frac{(0.7311 - 0.7103)^2 + (0.7201 - 0.7103)^2 + (0.7181 - 0.7103)^2 + (0.7101 - 0.7103)^2 + (0.7086 - 0.7103)^2 + \dots}{10 \cdot 9}}$$

$$u(K) \approx 0.0220$$

Dla  $n_1 = 400$  i  $n_2 = 400$ :

$$\bar{K} \cong 1.0661$$

$$u(K) \approx 0.0048$$

Dla  $n_1 = 400$  i  $n_2 = 200$ :

$$\bar{K} \cong 2.1227$$

$$u(K) \approx 0.0067$$



## B. Badania transformatora w stanie zwarcia

### Oznaczenia:

$I_1$  – natężenie prądu pierwotnego

$I_2$  – natężenie prądu wtórnego

$U_1$  – napięcie pierwotne

$U_2$  – napięcie wtórne

$R$  – rezystancja

$n_1$  – liczba zwojów w uzwojeniu pierwotnym

$n_2$  – liczba zwojów w uzwojeniu wtórnym

### Stan zwarcia:

- uzwojenie pierwotne jest połączone ze źródłem prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne jest zwarte
- w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd o chwilowym natężeniu  $i_1$ , który indukuje zmienny strumień pola magnetycznego w rdzeniu.
- w wyniku tego, w uzwojeniu wtórnym pojawia się prąd przemienny o chwilowym natężeniu  $i_2$
- rezystancja odbiornika  $R = 0$
- zakładając, że pomijamy straty w transformatorze, możemy, korzystając z zasady zachowania energii, stwierdzić, że moc przekazywana przez źródło do uzwojenia pierwotnego ( $U_1 I_1$ ) jest równa mocy przekazywanej do obwodu wtórnego ( $U_2 I_2$ ):

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Na podstawie tego możemy wywnioskować:

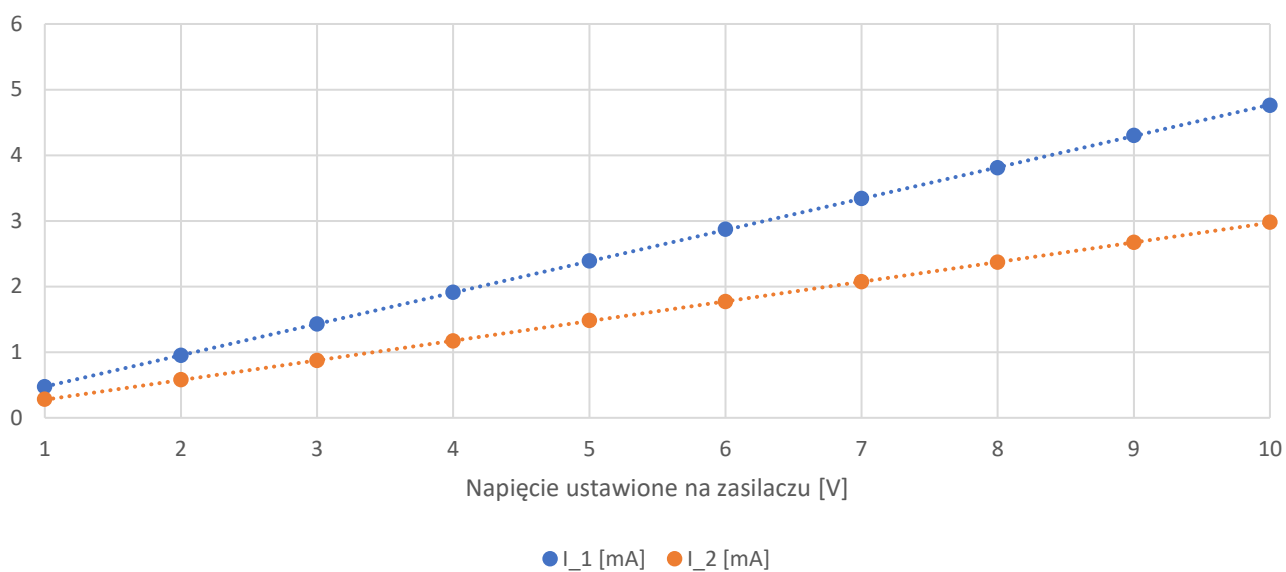
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{K}$$

Zależność natężenia prądu wtórnego od natężenia prądu pierwotnego  $I_2 = f(I_1)$

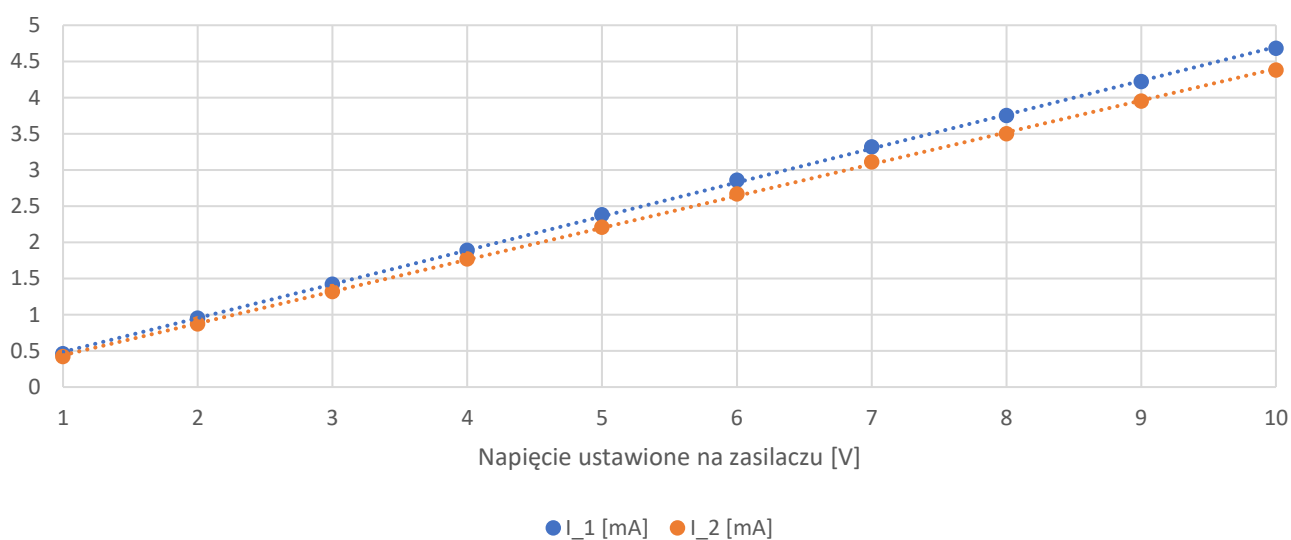
Wyniki pomiarów:

	$n_1 = 400, n_2 = 600$		$n_1 = 400, n_2 = 400$		$n_1 = 400, n_2 = 200$	
Napięcie na zasilaczu [V]	$I_1$ [mA]	$I_2$ [mA]	$I_1$ [mA]	$I_2$ [mA]	$I_1$ [mA]	$I_2$ [mA]
1	0.47	0.28	0.46	0.42	0.41	0.76
2	0.95	0.58	0.95	0.87	0.83	1.53
3	1.43	0.87	1.42	1.32	1.08	1.9
4	1.91	1.17	1.89	1.77	1.5	2.71
5	2.39	1.48	2.38	2.21	2.15	3.89
6	2.87	1.77	2.86	2.67	2.64	4.94
7	3.34	2.07	3.32	3.11	3.05	5.62
8	3.81	2.37	3.75	3.5	3.48	6.53
9	4.3	2.67	4.22	3.95	3.93	7.37
10	4.76	2.98	4.68	4.38	4.35	8.19

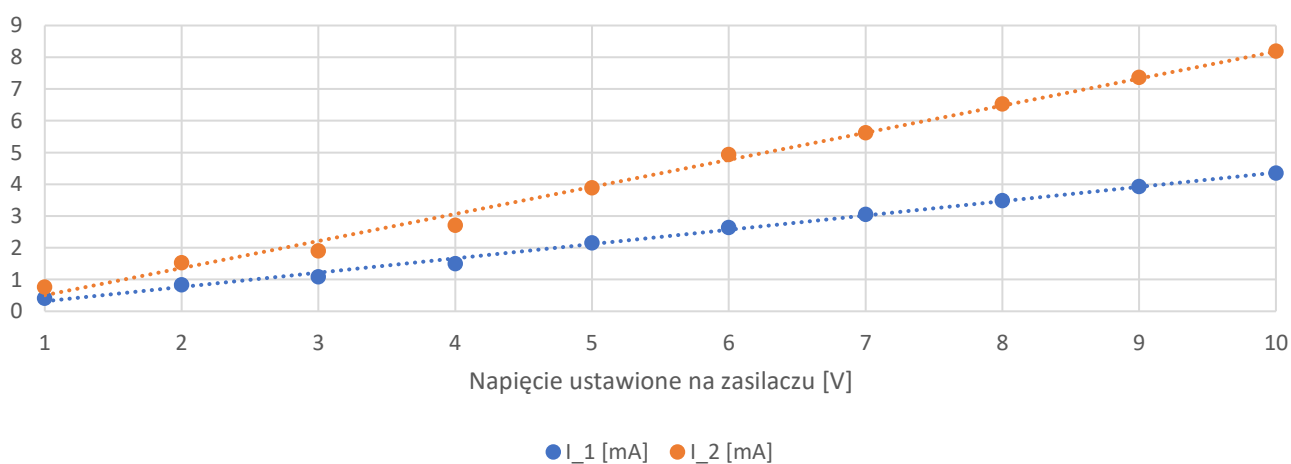
$$I_2 = f(I_1), R = 0 \Omega, n_1 = 400, n_2 = 600$$



$$I_2 = f(I_1), R = 0 \Omega, n_1 = 400, n_2 = 400$$



$$I_2 = f(I_1), R = 0 \Omega, n_1 = 400, n_2 = 200$$



Jeśli natężenie prądu jest mniejsze na uzwojeniu wtórnym, to transformator zwiększył napięcie, a jeśli większe, to transformator zmniejszył napięcie.

## C. Badania transformatora w stanie obciążonym

### Oznaczenia:

$U_1$  – napięcie pierwotne

$U_2$  – napięcie wtórne

$I_1$  – natężenie prądu pierwotnego

$I_2$  – natężenie prądu wtórnego

$R$  – rezystancja

$n_1$  – liczba zwojów w uzwojeniu pierwotnym

$n_2$  – liczba zwojów w uzwojeniu wtórnym

$\eta$  – sprawność transformatora

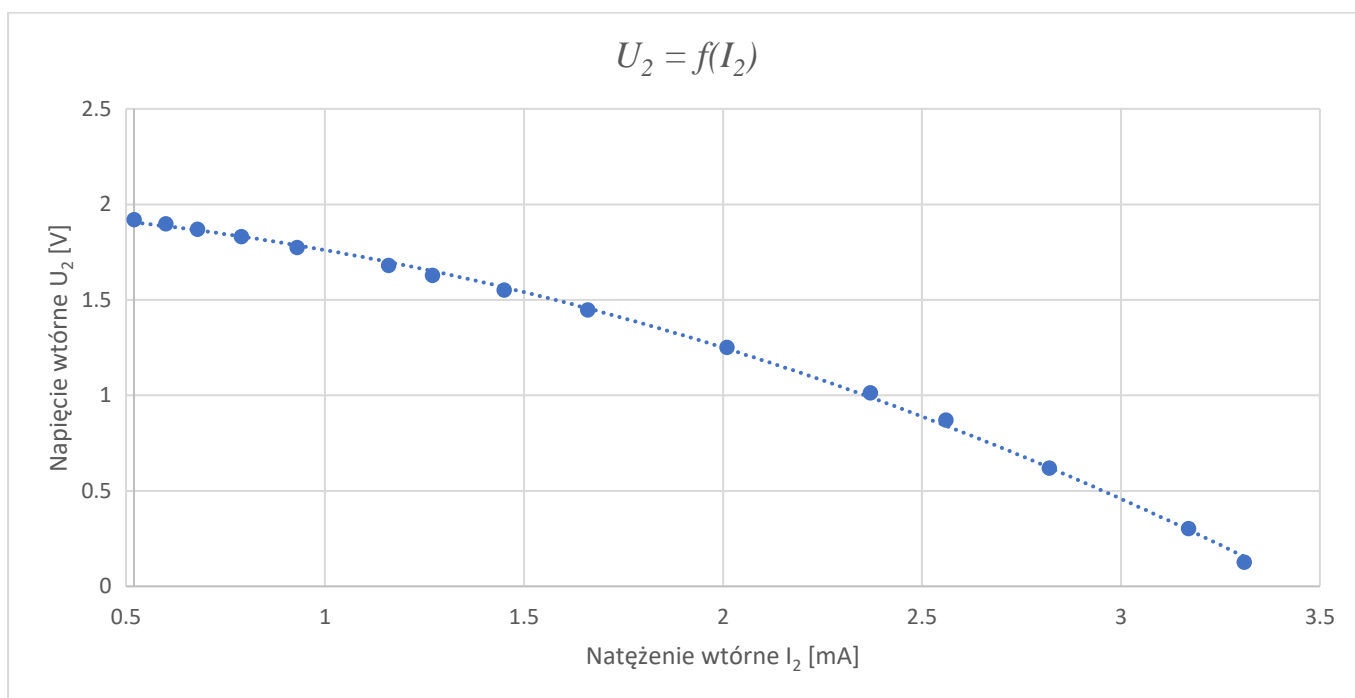
### Stan obciążenia

- występuje, gdy uzwojenie pierwotne jest połączone z źródłem prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne jest połączone z odbiornikiem o określonej, skończonej rezystancji  $R$
- stosunek napięć na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym nie jest identyczny z przekładnią transformatora, ponieważ w obwodzie uzwojenia wtórnego występuje spadek napięcia związanego z przepływem prądu przez rezystancję uzwojenia wtórnego
- wartość napięcia na uzwojeniu wtórnym zmniejsza się wraz ze wzrostem natężenia prądu płynącego przez to uzwojenie

### Zależność napięcia od natężenia prądu w obwodzie wtórnym $U_2 = f(I_2)$

Wyniki pomiarów:

$n_1 = 400$	$n_2 = 200$	$U = 4 \text{ V}$ (napięcie źródła)		
$R [\Omega]$	$U_1 [\text{V}]$	$I_1 [\text{mA}]$	$I_2 [\text{mA}]$	$U_2 [\text{V}]$
0	4.35	1.78	3.31	0.127
1	4.37	1.71	3.17	0.303
2	4.35	1.55	2.82	0.62
3	4.35	1.39	2.56	0.872
4	4.35	1.3	2.37	1.013
6	4.36	1.11	2.01	1.251
8	4.37	0.93	1.66	1.448
10	4.38	0.82	1.45	1.551
12	4.37	0.73	1.27	1.629
14	4.38	0.68	1.16	1.681
18	4.4	0.56	0.93	1.774
22	4.4	0.5	0.79	1.831
26	4.39	0.45	0.68	1.871
30	4.41	0.41	0.6	1.899
34	4.41	0.38	0.52	1.92



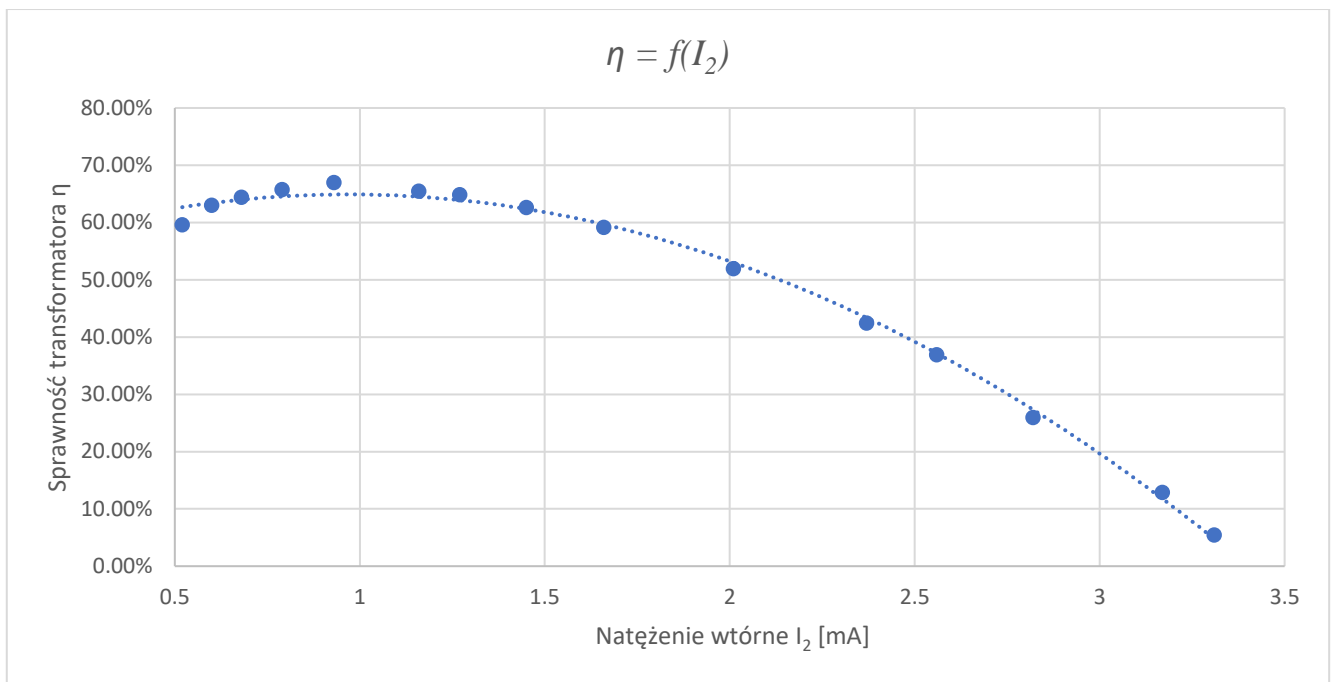
Im wyższe natężenie, tym mniejsze napięcie – podobna sytuacja jak w przypadku transformatora w stanie zwarcia.

Zależność sprawności transformatora od natężenia prądu w uzwojeniu wtórnym  $\eta = f(I_2)$

Obliczanie sprawności transformatora:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} 100\% = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

$n_1 = 400, n_2 = 200, U = 4 \text{ V}$		
R [Ω]	$I_2$ [mA]	Sprawność $\eta$
0	3.31	0.05429
1	3.17	0.128536
2	2.82	0.25931
3	2.56	0.369192
4	2.37	0.424546
6	2.01	0.51957
8	1.66	0.591442
10	1.45	0.626169
12	1.27	0.648516
14	1.16	0.654701
18	0.93	0.66957
22	0.79	0.657495
26	0.68	0.644029
30	0.6	0.630164
34	0.52	0.595775



Największa sprawność (66,96%) transformatora została osiągnięta dla  $I_2 = 0.93$  mA i  $R = 18 \Omega$ .

## Wnioski

- Wyniki podkreślają znaczenie transformatora w przekształcaniu napięć w systemach przesyłowych energii elektrycznej oraz w dostosowywaniu napięć do bezpiecznego poziomu dla urządzeń domowych.
- Analiza różnych stanów pracy transformatora (jałowy, zwarcia, obciążenia) pozwala na lepsze zrozumienie jego działania i efektywności w różnych warunkach, co ma bezpośrednie przełożenie na projektowanie i eksploatację systemów energetycznych.
- Pomiary napięć i obliczenia przekładni transformatora dostarczają danych, które mogą być wykorzystane do kalibracji i projektowania transformatorów o określonych parametrach.
- Wyniki wskazują na to, jak stosunek liczby zwojów wpływa na wydajność transformatora. Te informacje mogą być wykorzystane do optymalizacji konstrukcji transformatorów, aby uzyskać pożądane napięcia przy jak najmniejszych stratach energii.
- Różnice między teoretyczną a doświadczalną wartością przekładni transformatora mogą wynikać z idealizacji teoretycznych modeli, które nie uwzględniają: błędów i zużycia urządzeń pomiarowych, sprawności urządzenia badanego, błędów zaokrąglenia przez osobę wykonującą pomiary.
- W stanie jałowym transformator pozwala na zbadanie napięcia na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym, ale nie na pomiar natężenia prądu z powodu braku odbiornika i rozwarcia zacisków uzwojenia wtórnego.
- W stanie zwarcia możliwy jest pomiar prądu, przy zerowym napięciu na zaciskach uzwojenia zwartego, energia nie jest oddawana do odbiornika, a pobierana moc pokrywa straty i generuje ciepło.
- Stan obciążony umożliwia pomiar napięcia i natężenia na obu uzwojeniach, co w pozwala na wyznaczanie sprawności badanego transformatora dla danych parametrów.

1.  $U_2 = f(U_1)$

$n_1 = 400$   $n_2 = 600$

	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]
1	1,112	1,521
2	2,218	3,080
3	3,325	4,63
4	4,41	6,21
5	5,52	7,79
6	6,62	9,37
7	7,74	10,97
8	8,82	12,56
9	9,93	14,17
10	11,04	15,78

~~STAN ZWARCIA~~

STAN JAŁOWY

$n_1 = 400$ $n_2 = 400$		$n_1 = 400$ $n_2 = 200$	
$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]
1,112	1,012	1,112	0,513
2,214	2,048	2,217	1,032
3,32	3,094	3,32	1,555
4,41	4,13	4,41	2,081
5,52	5,19	5,53	2,61
6,63	6,25	6,62	3,14
7,74	7,32	7,73	3,67
8,85	8,39	8,82	4,18
9,95	9,45	9,93	4,71
11,06	10,53	11,03	5,24

2.  $I_2 = f(I_1)$ ,  $R = 0,5 \Omega$

STAN ZWARCIA

	$n_1 = 400$ $I_1$ [A]	$n_2 = 600$ $I_2$ [A]	$n_1 = 400$ $I_1$ [A]	$n_2 = 400$ $I_2$ [A]	$n_1 = 400$ $I_1$ [A]	$n_2 = 200$ $I_2$ [A]
1	0,47	0,28	0,46	0,42	0,41	0,76
2	0,95	0,58	0,95	0,87	0,83	1,53
3	1,43	0,87	1,42	1,32	1,08	1,90
4	1,91	1,17	1,83	1,77	1,50	2,41
5	2,39	1,48	2,38	2,21	2,15	3,89
6	2,87	1,77	2,86	2,67	2,64	4,97
7	3,34	2,07	3,32	3,11	3,05	5,62
8	3,81	2,37	3,75	3,5	3,48	6,53
9	4,30	2,67	4,22	3,95	3,93	7,37
10	4,76	2,98	4,68	4,38	4,35	8,19

$\Delta R = 0,5 \Omega$

$\Delta U = 0,005 V$

$\Delta I = 0,05 mA$

524 26.10.23



3.  $U_2 = f(I_2)$

	$n_1 = 400$ $R, [S]$	$n_2 = 200$ $U_1, [V]$	$U_1 = 4V$ $I_1, [mA]$	$U_2, [V]$	$I_2, [mA]$	
1	0	4,35	1,78	0,127	3,31	0,05429
2	1	4,34	1,71	0,303	3,17	<del>0,1449</del> 0,1285
3	2	4,35	1,55	<del>0,620</del> 0,620	2,82	0,2593
4	3	4,35	1,39	0,872	2,56	
5	4	4,35	1,30	1,013	2,37	
6	6	4,36	1,11	1,251	2,01	
7	8	4,37	0,93	1,448	1,66	
8	10	4,38	0,82	1,551	1,45	
9	12	4,37	0,73	1,629	1,27	
10	14	4,38	0,68	1,681	1,16	
11	18	4,40	0,56	1,744	0,93	
12	22	4,40	0,50	1,831	0,79	
13	26	4,39	0,45	1,871	0,68	
14	30	4,41	0,41	1,899	0,60	
15	34	4,41	0,38	1,920	0,52	

WYKŁADNIK: ODBIORNIK:

4.  $I_1 = 0,21 \text{ mA}$   $U_1 = 4,42 \text{ V}$   $I_2 = 0 \text{ A}$   $U_2 = 2,073 \text{ V}$

724

$\eta = f(I_2)$

$\eta = \frac{U_2}{U_1}$

$\eta \uparrow$