

OKREŚLENIE ZNAMIONOWYCH STRAT STANU JAŁOWEGO TRANSFORMATORA NA PODSTAWIE POMIARÓW NISKONAPIĘCIOWYCH

dr inż. Zbigniew Szymański



Wstęp

W przypadku wystąpienia zwarcia w uzwojeniach, w obwodzie zwartym pojawi się prąd wymuszający dodatkowy strumień, a to z kolei przełoży się na wzrost prądu magnesującego i strat stanu jałowego. Wykrycie tego typu uszkodzeń, jak również zwarć w obwodzie magnetycznym, jest możliwe na podstawie pomiaru prądów magnesujących lub strat w rdzeniu.

Pomiar prądów magnesujących jest szeroko stosowany w praktyce pomiarowej, natomiast pomiar strat dotychczas nie był wykorzystywany w celach diagnostycznych. Dlatego podjęto prace mające na celu opracowanie nowej metody badawczej, polegającej na porównaniu strat występujących podczas eksploatacji transformatora ze stratami charakteryzującymi go po wyprodukowaniu.

Pomiary strat stanu jałowego na transformatorze o mocy 150 MVA i przekładni $120\pm 10 \times 1\% / 13,8$ kV

Wyniki pomiarów w elektrowni

Napięcie					Prąd				Straty
Nap. zasil.	$U_{2U_{rms}}$	$U_{2V_{rms}}$	$U_{2W_{rms}}$	$U_{rms\ \acute{s}r}$	I_{2U}	I_{2V}	I_{2W}	$I_{2\acute{s}r}$	P_2
[%]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[A]	[A]	[A]	[A]	[kW]
100	13,79	13,79	13,79	13,79	2,66	2,98	3,99	3,21	56,41
105	14,5390	14,5390	14,5320	14,5367	4,23	4,43	5,93	4,86	66,76

Wyniki pomiarów w wytwórni

Wartości zmierzone						Straty [kW]	Prąd [% I_n]
Nap. zasil.	U_{rms} [kV]	I_{2U} [A]	I_{2V} [A]	I_{2W} [A]	Straty [kW]		
100%	13,82	2,771	2,442	3,592	54,68	54,60	0,047
105%	14,54	3,866	3,430	4,778	64,14	63,91	0,064

Pomiar strat stanu jałowego na transformatorze o mocy 270 MVA i przekładni 250 / 15,75 kV

Wyniki pomiarów w elektrowni

Wartości zmierzone						Straty ¹ [kW]	Prąd [%In]
Nap. zasil.	V _{rms} [kV]	I _{2U} [A]	I _{2V} [A]	I _{2W} [A]	Straty [kW]		
100%	15,76	4,20	5,60	5,60	93,00	92,82	0,052

Wyniki pomiarów w wytwórni

Wartości zmierzone						Straty ¹ [kW]	Prąd [%In]
Nap. zasil.	V _{rms} [kV]	I _{2U} [A]	I _{2V} [A]	I _{2W} [A]	Straty [kW]		
110%	17,43	6,372	6,308	8,328	121,7	120,9	0,071
105%	16,59	3,982	4,084	5,584	102,0	101,7	0,046
100%	15,77	3,086	3,334	4,548	88,12	87,99	0,037
90%	14,18	2,365	2,792	3,651	68,57	68,54	0,030

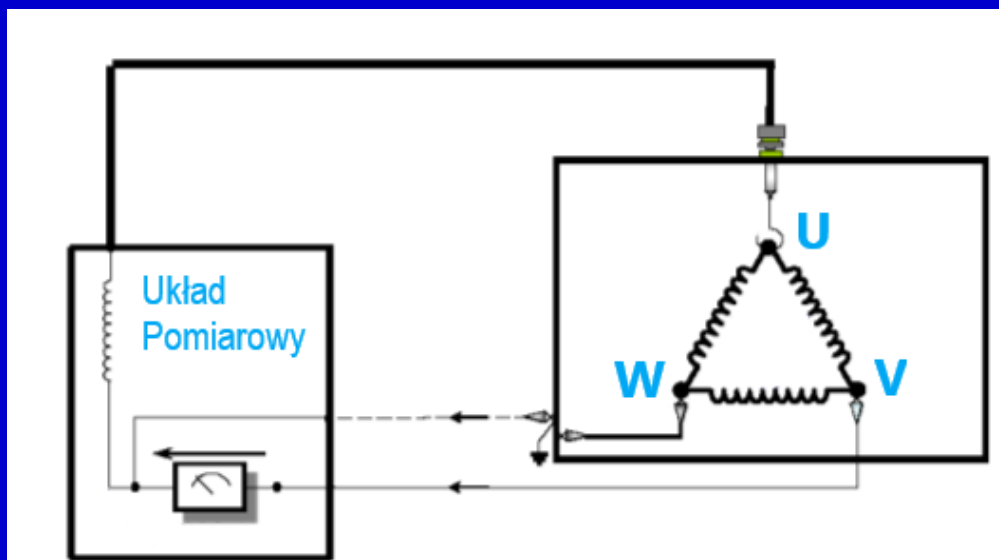
¹⁾ Straty przeliczone na warunki znamionowe.

OKREŚLENIE ZNAMIONOWYCH STRAT STANU JAŁOWEGO TRANSFORMATORA NA PODSTAWIE POMIARÓW NISKONAPIĘCIOWYCH

Zakres wykonanych prac obejmował:

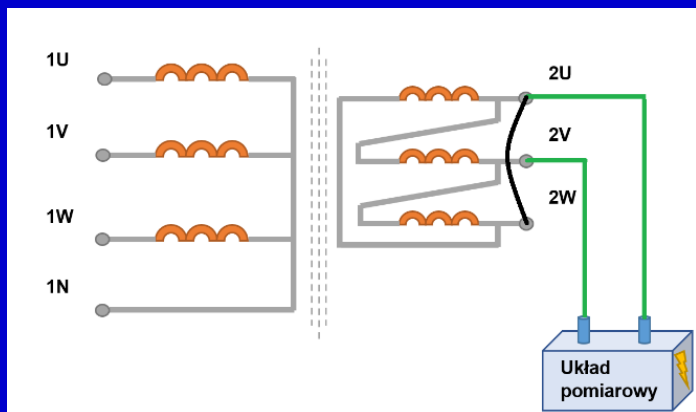
- wstępny pomiar strat transformatora 25MVA na trzech fazach przy obniżonym napięciu w układzie jednofazowym,
- pomiar strat w szerokim zakresie napięć od około 1kV do $1,1 U_n$ u producenta na stacji prób w układzie trójfazowym,
- aproksymację wykresu strat trójfazowych krzywą wykładniczą oraz zestawienie różnic między wartościami pomierzonymi a obliczonymi na podstawie krzywej,
- pomiary strat jednofazowych kilku transformatorów przy obniżonym napięciu i przeliczenie ich na straty znamionowe za pomocą wyznaczonej zależności funkcyjnej,
- oszacowanie dokładności wykonanych obliczeń w oparciu o współczynniki determinacji.

Schemat układu do pomiaru prądu stanu jałowego przy zasilaniu jednofazowym

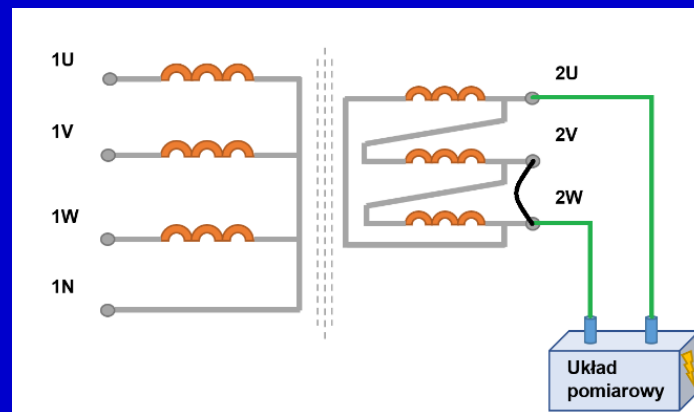


Schemat układu do pomiaru prądu stanu jałowego przy zasilaniu jednofazowym uzwojenia połączonego w trójkąt

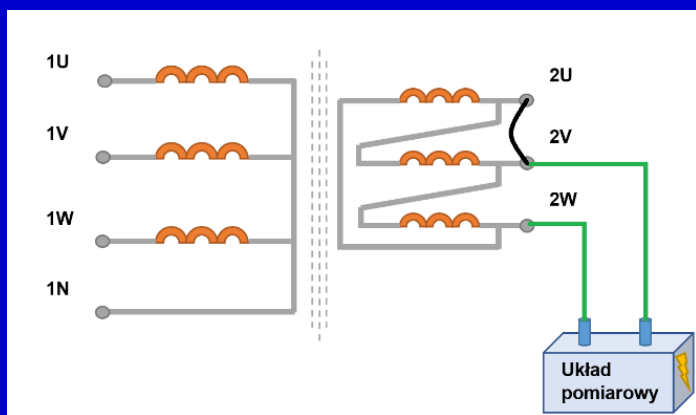
Schematy układów do pomiaru strat stanu jałowego przy zasilaniu jednofazowym dla uzwojeń połączonych w trójkąt



a)



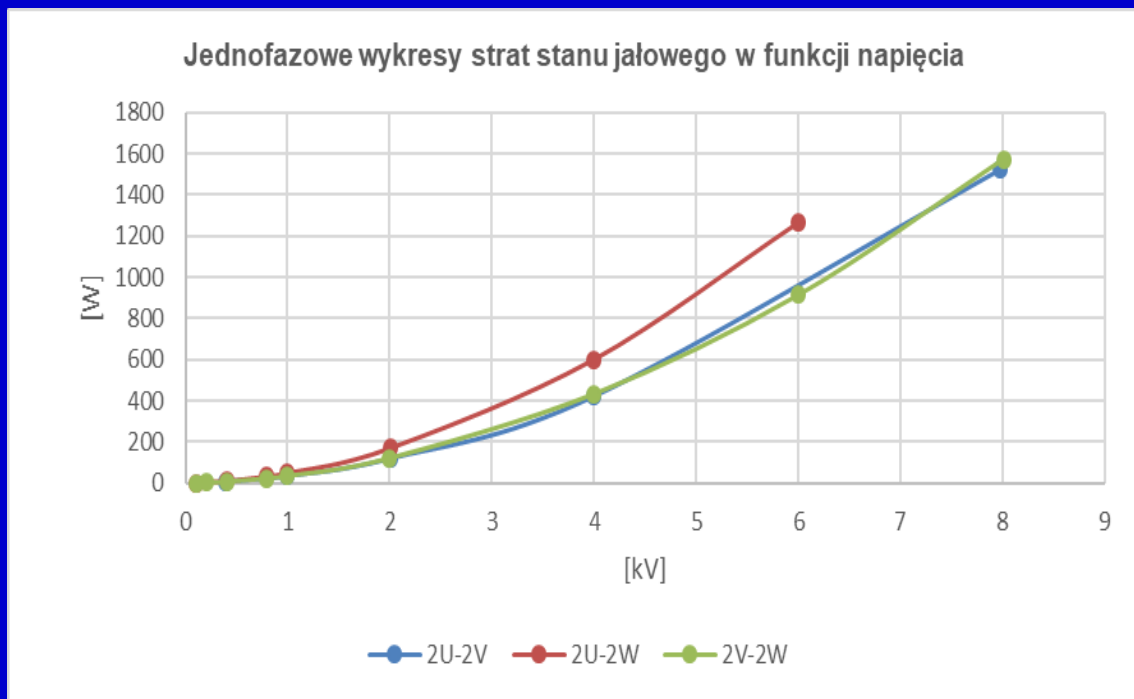
b)



c)

Schematy układów do pomiarów strat stanu jałowego przy obniżonym napięciu

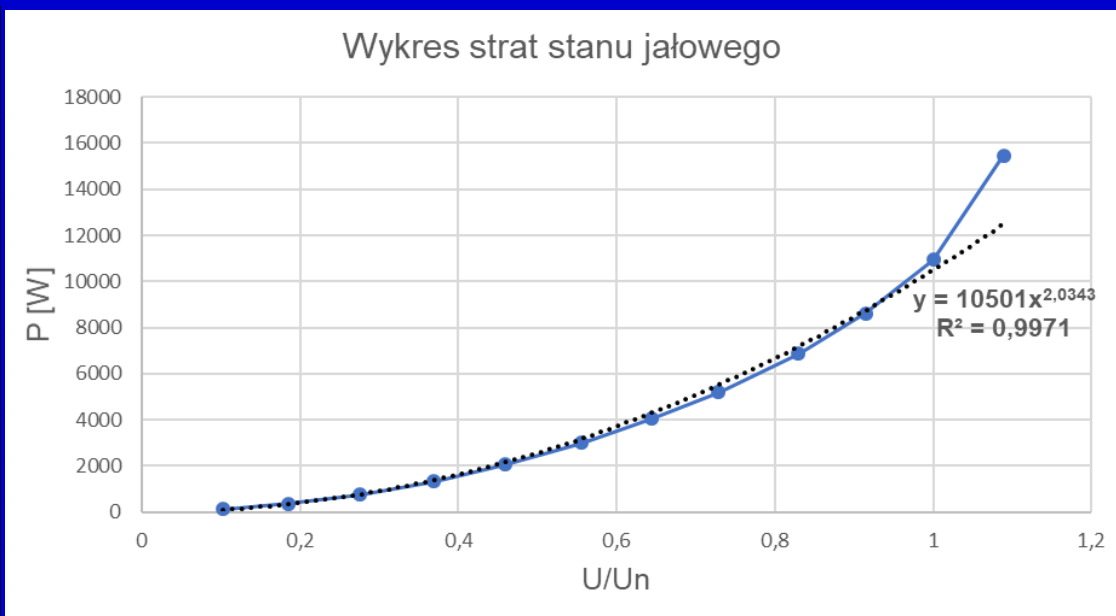
Wykresy strat stanu jałowego w funkcji napięcia



Wykresy strat stanu jałowego w zależności od napięcia na transformatorze o mocy 25MVA przy zasilaniu jednofazowym

Wyznaczenie charakterystyki strat stanu jałowego na transformatorze o mocy 25 MVA

Napięcie średnie [V]	U/U_n	Prąd średni [A]	Moc [W]
1699	0,103	0,0465	111,5
3055	0,185	0,0751	345,6
4533	0,275	0,104	746,8
6093	0,369	0,133	1330
7571	0,459	0,161	2042
9174	0,556	0,193	2998
10630	0,644	0,224	4036
12029	0,729	0,256	5200
13687	0,830	0,299	6861
15101	0,915	0,355	8621
16492	1,000	0,508	10946
17966	1,089	1,804	15456



Wyniki pomiarów strat stanu jałowego w wytwórni

Wykres strat stanu jałowego w funkcji U/U_n

Aproksymacja wykresu strat stanu jałowego

Napięcie U [V]	U/U_n	Straty z wykresu po aproksymacji [W]	Straty rzeczywiste [W]	Różnice [W]
1699	0,103	111,9	111,5	0,4
3055	0,185	369,3	345,6	23,7
4533	0,275	824,2	746,8	77,4
6093	0,369	1504,4	1330	174,4
7571	0,459	2340,2	2042	298,2
9174	0,556	3459,0	2998	461,0
10630	0,644	4667,7	4036	631,7
12029	0,729	6002,7	5200	802,7
13687	0,830	7806,2	6861	945,2
15101	0,915	9534,7	8621	913,7
16492	1,000	11406,8	10946	460,8
17966	1,089	13577,0	15456	1879,0

Zestawienie różnic pomiędzy wielkościami pomierzonymi
a uzyskanymi z wykresu

Pomiar strat stanu jałowego przy obniżonym napięciu na transformatorze o mocy 25 MVA.

Pomiar	U (kV)	I (mA)	L (H)	Popom (W)	Opis
1	0,397	24,5	71,3	6,65	Pomiar 2U-2V Zwarte 2U-2W
2	1,000	43,2	117,6	33,46	
3	2,001	68,7	182,6	117,60	
4	4,002	113,1	332,4	421,86	
5	7,970	201,6	498,3	1522,66	
6	0,101	17,2	23,1	1,00	Pomiar 2U-2W Zwarte 2V-2W
7	0,401	36,4	46,5	9,54	
8	0,798	56,9	63,4	32,03	
9	1,000	66,1	70,6	48,04	
10	2,002	106,0	100,4	168,91	
11	3,991	172,7	151,1	598,89	
12	5,991	233,1	198,4	1263,82	Pomiar 2V-2W Zwarte 2U-2V
13	0,100	11,1	37,0	0,69	
14	0,203	16,2	52,4	2,13	
15	0,403	24,3	74,8	6,86	
16	0,799	37,5	106,7	23,01	
17	0,999	43,5	120,5	34,31	
18	1,997	69,8	186,3	120,78	
19	3,994	115,4	334,9	431,40	
20	5,998	159,4	471,6	912,57	
21	8,006	207,1	488,6	1572,17	

Trójfazowe straty stanu jałowego transformatora wyznaczono ze wzoru

$$P_{0pom} = \frac{P_{0UV} + P_{0UW} + P_{0VW}}{2}$$

Gdzie:

P_{0pom} - straty pomierzone przy obniżonym napięciu,

P_{0UV} , P_{0UW} , P_{0VW} - straty stanu jałowego przy zasilaniu jednofazowym

Zestawienie wyników przeliczeń strat przy obniżonym napięciu na warunki znamionowe dla transformatora o mocy 25 MVA.

U_{pom} [kV]	U_{sr} [kV]	P [W]	P_{0pom} [W]	U_n/U_{pom}	$(U_n/U_{pom})^{1,9}$	P_{0ZN} [W]
0,397	0,4006	6,65	11,525	41,198	1170,23	13487
0,401		9,54				
0,403		6,86				
0,999	0,999	33,46	57,905	16,506	205,85	11919
1,000		48,04				
0,999		34,31				
2,001	2,000	117,6	203,6	8,247	55,87	11215
2,002		168,9				
1,997		120,7				
4,0016	3,995	421,8	726,05	4,129	14,793	10745
3,9907		598,9				
3,9941		431,4				

Gdzie:

P_{0ZN} - straty stanu jałowego przy napięciu znamionowym,

P_{0pom} - straty stanu jałowego pomierzone przy napięciu obniżonym,

U_n - napięcie znamionowe,

U_{pom} – napięcie, przy którym wykonano pomiaru strat stanu jałowego.

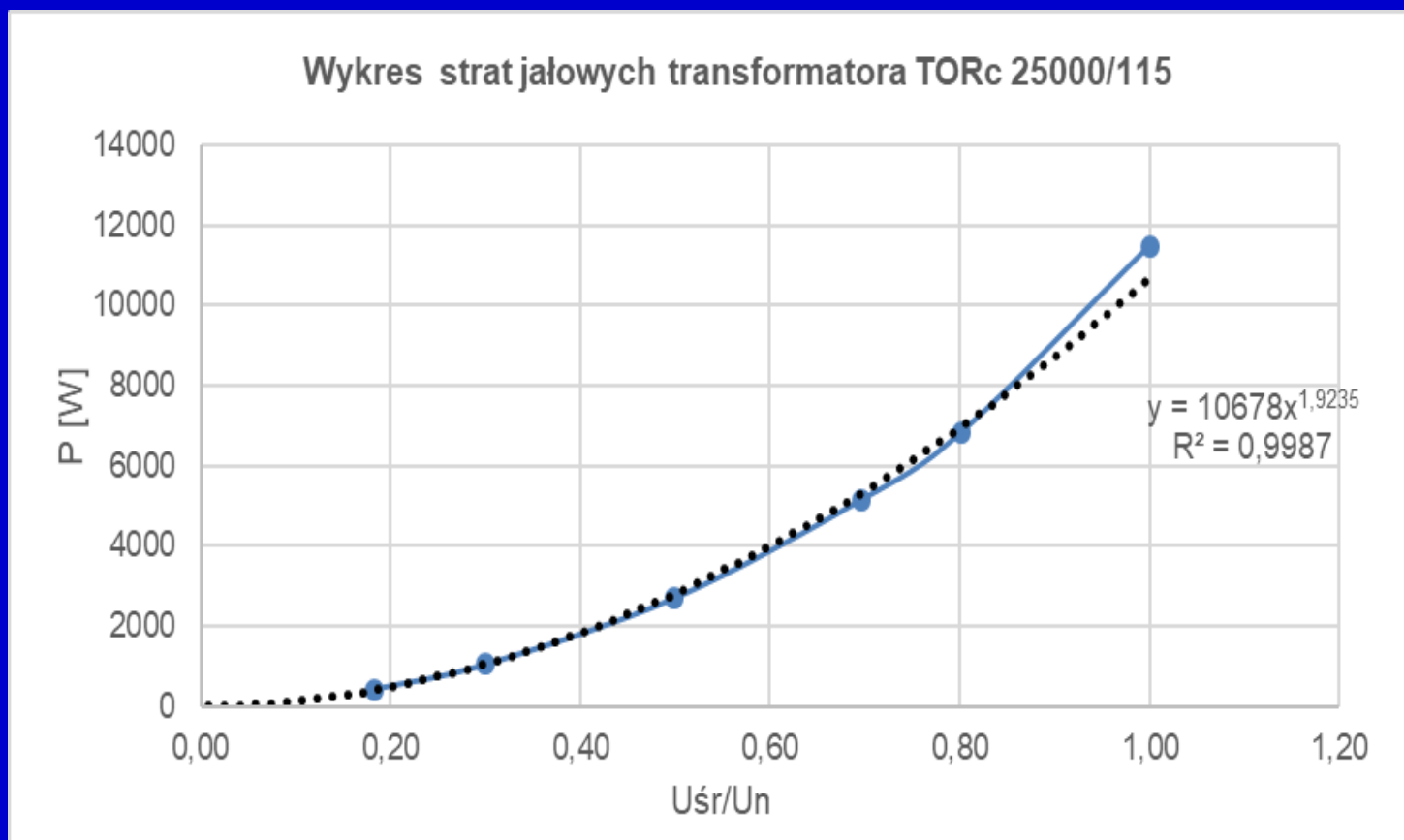
$$P_{0ZN} = P_{0pom} * \left(\frac{U_n}{U_{pom}} \right)^{1,9}$$

Zestawienie wyników pomiarów strat na transformatorze o mocy 25 MVA w wytwórni

U/U _n [%]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	U ₃ [V]	U _{sr} [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	I _{sr} [A]	P [W]
0,18	3034	3043	3010	3029	0,117	0,089	0,069	0,092	424
0,30	4968	4978	4929	4958	0,167	0,132	0,096	0,132	1046
0,50	8253	8262	8206	8240	0,255	0,203	0,148	0,202	2694
0,70	11505	11513	11462	11493	0,374	0,289	0,224	0,296	5149
0,80	13220	13229	13227	13225	0,469	0,355	0,291	0,372	6833
1,00	16502	16513	16476	16497	0,933	0,683	0,637	0,751	11475
1,02	16799	16812	16774	16795	1,043	0,769	0,723	0,845	12128
1,04	17168	17181	17143	17164	1,231	0,910	0,877	1,006	13022
1,06	17515	17529	17490	17511	1,496	1,116	1,093	1,235	14064
1,08	17834	17853	17812	17833	1,862	1,405	1,394	1,554	15195
1,10	18171	18193	18148	18171	2,456	1,882	1,889	2,076	16586
1,12	18480	18507	18459	18482	3,321	2,595	2,623	2,846	18100
1,14	18799	18831	18778	18803	4,652	3,728	3,789	4,056	19590
1,16	19103	19141	19082	19109	6,494	5,356	5,455	5,768	21390
1,18	19411	19477	19426	19438	11,091	9,796	9,718	10,202	24100
1,20	19787	19857	19768	19804	15,987	14,762	14,674	15,141	27310

Straty stanu jałowego wynoszą 11475W, natomiast przeliczone ze strat pomierzonych przy obniżonym napięciu o wartości 1000V wynoszą 11919W. Różnica między tymi wartościami wynosi 444W, co stanowi około 3,9% wartości znamionowej.

Wykres strat stanu jałowego w wytwórni na transformatorze o mocy 25 MVA

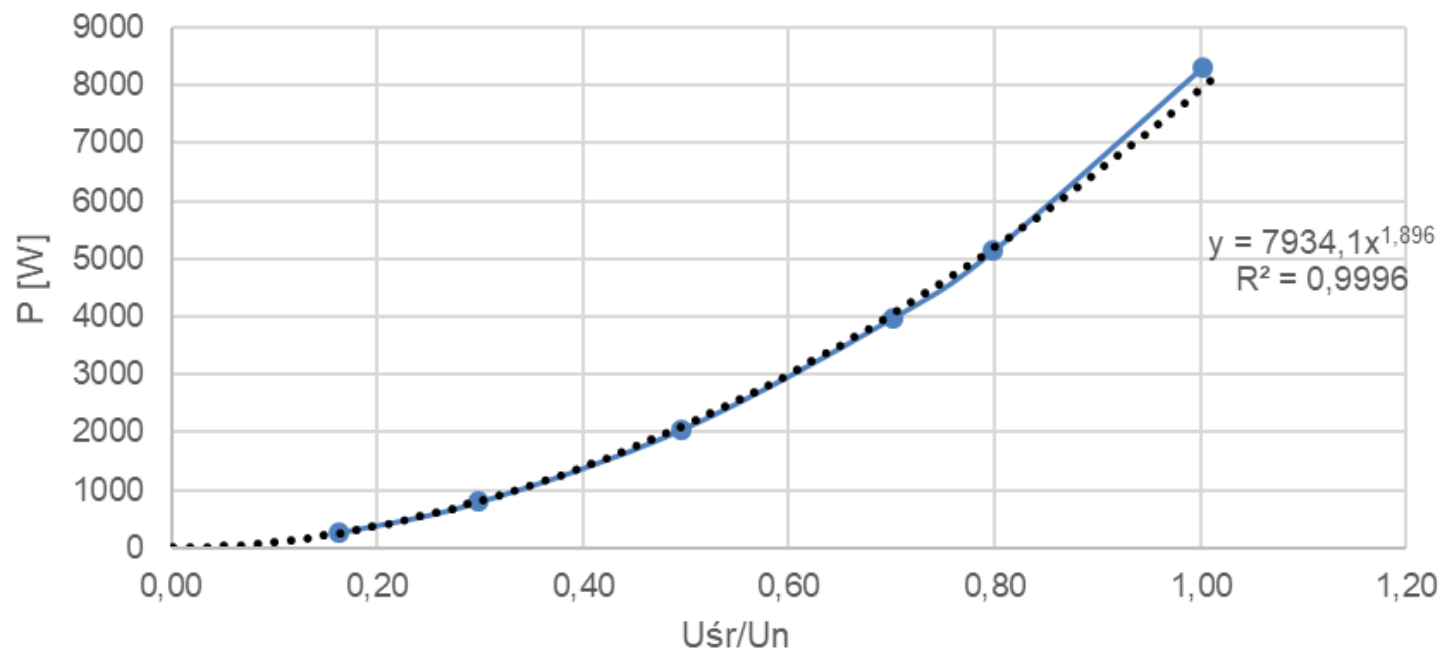


Zestawienie wyników pomiarów strat na transformatorze o mocy 16 MVA w wytwórni

U/U _n [%]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	U ₃ [V]	U _{sr} [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	I _{sr} [A]	P [W]
0,16	2685	2690	2660	2678	0,079	0,063	0,044	0,062	258
0,30	4937	4947	4897	4927	0,123	0,104	0,067	0,098	794
0,50	8197	8207	8145	8183	0,186	0,159	0,103	0,149	2046
0,70	11591	11599	11538	11576	0,263	0,218	0,147	0,209	3979
0,80	13198	13204	13148	13183	0,307	0,251	0,175	0,244	5138
1,00	16519	16574	16479	16524	0,459	0,353	0,280	0,364	8294
1,02	16827	16831	16788	16815	0,482	0,369	0,298	0,383	8657
1,04	17160	17165	17127	17151	0,511	0,388	0,319	0,406	9074
1,06	17503	17507	17465	17492	0,547	0,412	0,346	0,435	9532
1,08	17786	17791	17750	17776	0,583	0,437	0,374	0,465	9937
1,10	18188	18192	18152	18177	0,648	0,482	0,425	0,518	10538
1,12	18500	18505	18465	18490	0,712	0,529	0,479	0,573	11091
1,14	18839	18845	18805	18830	0,813	0,509	0,557	0,626	11720
1,16	19106	19113	19073	19097	0,914	0,673	0,639	0,742	12299
1,18	19470	19480	19438	19463	1,106	0,815	0,794	0,905	13168
1,20	19809	19823	19779	19804	1,355	1,009	1,002	1,122	14121

Wykres strat stanu jałowego w wytwórni na transformatorze o mocy 16 MVA

Wykres strat jałowych transformatora TORc 16000/115



Zestawienie wyników przeliczeń strat przy obniżonym napięciu na warunki znamionowe dla transformatora o mocy 16 MVA.

U_{pom} [kV]	U_{sr} [kV]	P [W]	P_{0pom} [W]	U_n/U_{pom}	$(U_n/U_{pom})^{1,9}$	P_{0ZN} [W]
0,399	0,3986	1,17	7,01	41,39	1180,59	8270
0,399		5,43				
0,398		7,41				
1	1	11,78	39,52	16,5	205,69	8127
1,001		28,47				
0,998		38,78				
2,002	2,001	42,21	141,04	8,246	55,06	7765
1,999		100,73				
2,001		139,13				
3,999	3,992	149,44	499,51	4,13	14,8	7392
3,992		353,63				
3,985		495,95				

Straty stanu jałowego pomierzona przy obniżonym napięciu 1000V i przeliczona do napięcia znamionowego różni się od znamionowej o 167 W. Procentowa różnica wynosi około 2%.

Wnioski końcowe

- Przeprowadzone pomiary i przeliczenia wykazały możliwość wyznaczenia znamionowych strat stanu jałowego transformatora na podstawie pomiarów strat wykonanych przy obniżonym napięciu.
- Pomiar strat stanu jałowego w eksploatacji pozwala na wykrycie zwarć w obwodzie magnetycznym, w drutach równoległych oraz doziemień.
- Celowe byłoby rozszerzenie zakresu prób fabrycznych transformatorów o pomiary strat stanu jałowego przy obniżonym napięciu.

Dziękuję za uwagę