

Franciszek Mosiński¹, Tomasz Piotrowski¹

ZASTOSOWANIE METODY TESTOWANIA HIPOTEZ STATYSTYCZNYCH DO WSPOMAGANIA DIAGNOSTYKI TRANSFORMATORA

Streszczenie: Zaproponowano dwie nowe metody wykorzystujące narzędzia analizy statystycznej, wspomagające proces diagnozowania transformatora energetycznego na podstawie wyników badania chromatograficznego oleju. Przedstawiono przykłady wykorzystania tych metod. Transformator energetyczny, chromatografia gazowa, analiza statystyczna.

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, diagnostyka stanu izolacji; analiza ilości gazów rozpuszczonych w oleju.

1. Wstęp

Znaczny procent awarii transformatorów jest spowodowany powolnym pogarszaniem się właściwości układu izolacyjnego. Dla stwierdzenia tego stanu zazwyczaj wystarczające są przeprowadzane regularnie badania okresowe oraz należyte ich dokumentowanie. Wśród badań okresowych podstawową rolę odgrywa kontrola właściwości oleju oraz zawartości gazów w nim rozpuszczonych.

Istnieje szereg metod algorytmizujących proces interpretacji wyników badania chromatograficznego próbek oleju, których podstawę stanowi raczej intuicja i doświadczenie niż rozważania teoretyczne poparte zależnościami matematycznymi.

Zastosowanie metod statystyki matematycznej jako pomocniczych narzędzi do generacji sygnałów ostrzegawczych o rozpoczęciu i rozwoju uszkodzenia wewnątrz transformatora energetycznego z izolacją papierowo-olejową uzasadnione jest następującymi, udowodnionymi założeniami [3, 4, 5]: ilość danego gazu rozpuszczonego w oleju transformatora jest zmienną losową; znane są rozkłady statystyczne zawartości poszczególnych gazów w transformatorach bez uszkodzeń i w transformatorach z rozwijającymi się uszkodzeniami.

¹ Politechnika Łódzka, Katedra Wysokich Napięć, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22

Autorzy dysponując własnymi programami numerycznymi, służącymi do interpretacji wyników chromatograficznej analizy zawartości gazów w oleju [1] oraz ich statystycznej obróbki [2] opracowali metody statystyczne wspomagające znane już metody DGA.

2. Metoda deskryptorów statystycznych

Wartości stężeń poszczególnych gazów rozpuszczonych w oleju transformatora tworzą oddzielne populacje. Po każdorazowym zwiększeniu się liczności takiej populacji, należy wyznaczyć dla niej wartość średnią μ i odchylenie standardowe σ .

Porównując wartości bieżącego stężenia gazu z wartością średnią powiększoną o odchylenie standardowe: σ , 2σ , 3σ stopniuje się, po przekroczeniu przez nią kolejnych granic, wagę ostrzeżeń wskazujących na możliwość wystąpienia awarii transformatora. Przykładowo, jeśli wartość bieżąca jest większa od $\mu + \sigma$ to mamy ostrzeżenie 1-go stopnia (o bardzo małym znaczeniu), a gdy jest większa od $\mu + 3\sigma$ to odpowiednio ostrzeżenie 3-go stopnia (o dużej randze). W przypadku, gdy wartość bieżąca maleje, ostrzeżenie pomija się.

Metodę można stosować już po wykonaniu drugiego oznaczenia zawartości gazów rozpuszczonych w oleju transformatora.

3 Metoda badania jednomodalności rozkładu statystycznego

Jednomodalność rozkładu statystycznego jest oznaką, że zbiór zmiennych losowych należy do tej samej populacji generalnej. W przypadku zmiennej losowej będącej ilością gazu rozpuszczonego w oleju jest to populacja odpowiednio transformatorów sprawnych lub z defektem. Jeżeli założymy, że określony gaz przynależał początkowo do populacji transformatorów sprawnych to utrata jednomodalności przez rozkład statystyczny opisujący stężenie tego gazu świadczy, iż przynależy on teraz do populacji transformatorów z defektem.

Wnioski przedstawione w [3], uzupełnione szeregiem symulacji wykazały, że najlepiej jest badać jednomodalność rozkładów Gaussa, Gumbela oraz Weibulla. Różnią się one właściwościami, a co za tym idzie łatwością utraty jednomodalności.

Opisywana metoda polega na testowaniu hipotez o zgodności trzech branych pod uwagę rozkładów teoretycznych z rozkładem empirycznym ilości danego gazu rozpuszczonego w oleju. Cała procedura jest wykonywana w oparciu o test istotności χ^2 .

Autorzy wszystkie obliczenia wykonywali na poziomie istotności 0,05 za pomocą programu MOSTAT [2]. Parametrem charakteryzującym wynik testu istotności jest w tym programie współczynnik niejednorodności H . Wartość $H > 1$ oznacza, że należy odrzucić hipotezę o zgodności rozważanego rozkładu teoretycznego z rozkładem empirycznym stężeń gazu.

Negatywny wynik testu istotności dla dowolnego z rozkładów statystycznych stanowi sygnał alarmowy, gdyż z punktu widzenia analizowanego gazu, transformator przeszedł do populacji uszkodzonych. Sygnał ten jest tym bardziej znaczący im dla większej liczby rozkładów został wygenerowany. Jeżeli zbliżamy się podczas przeprowadzania testów istotności dla rozkładów statystycznych uwzględniających kolejne wartości bieżące do wartości H bliskiej jedności to również otrzymujemy sygnał o pogłębiającym się stanie nienormalności w pracy transformatora.

Wspomaganie diagnozowania stanu izolacji transformatora przedstawioną metodą można przeprowadzić dopiero, gdy dostępnych jest, co najmniej 5 wyników badania chromatograficznego oleju. Uzasadnione jest to tym, że rozkład Weibulla o trzech parametrach musi mieć niezerową liczbę stopni swobody podczas wykonywania testu. Wiarygodność analizy rośnie wraz z liczbą oznaczeń ilości gazów. Metoda jest, zatem szczególnie przydatna do diagnozowania transformatorów o kilkunastoletnim okresie eksploatacji.

Jeśli transformator został poddany remontowi to należy traktować go, z punktu widzenia metody, jako jednostkę nową i nie brać pod uwagę danych uzyskanych przed remontem, gdyż prowadzi to do nonsensownych wniosków.

4. Prawdopodobieństwo stwierdzenia pomierzonej wartości stężenia gazu w transformatorze z defektem

Znajomość rozkładów, jakim podlegają stężenia gazów w transformatorach z defektem oraz wartości liczbowych ich parametrów pozwala na oszacowanie globalnego prawdopodobieństwa P_g , które jest prawdopodobieństwem stwierdzenia w całej populacji transformatorów z defektem stężenia gazu mniejszego lub równego pomierzonemu stężeniu bieżącemu. Wnioski z [3] upoważniają do obliczania tej wielkości z rozkładu Weibulla. Parametry rozkładu Weibulla brane są z tabeli 1 dla transformatora z defektem.

Tab. 1. Parametry rozkładu Weibulla dla gazów rozpuszczonych w oleju transformatora energetycznego bez przelącznika zaczełow [3]

Gaz	Transformator sprawny		Transformator z defektem	
	$U_{63\%}$ [ppm]	k	$U_{63\%}$ [ppm]	k
H_2	120,8	0,889	558,1	0,785
CH_4	12,7	0,905	958,0	0,783
C_2H_2	4,9	1,310	237,1	0,876
C_2H_4	30,2	0,550	2275,0	0,770
C_2H_6	8,9	0,760	586,2	0,792
CO	193,5	1,246	364,3	0,861
CO ₂	557,7	1,503	4089,0	1,514
TCG	184,1	1,054	3572	0,803

Wartość P_g pozwala ocenić, z punktu widzenia analizowanego gazu, z jakim prawdopodobieństwem badany transformator przynależy do populacji transformatorów z defektem. Prawdopodobieństwo P_g może i powinno służyć dodatkowemu uwiarygodnieniu i jednocześnie wartościowaniu znaczenia współczynnika niejednorodności w metodzie badania jednomodalności rozkładów statystycznych. Stanowi ono również istotny parametr w interpretacji wyników uzyskanych w metodzie deskryptorów statystycznych.

5. Zastosowanie proponowanych metod diagnostycznych

5.1 Przykład I

Analizowany transformator uległ awarii wywołanej przez czynniki zewnętrzne. Spowodowało to gwałtowną zmianę stężenia większości gazów (także tlenku węgla), co obrazuje pomiar oznaczony numerem 17 w tabeli 2 i 3.

Jak wynika z tabeli 2, przekroczenia granicy $\mu + \sigma$ występowały poczynając od pomiaru 3, jednakże niskie wartości P_g , pozwalają traktować te ostrzeżenia jako mało istotne. I rzeczywiście, poczynając od pomiaru 7 sygnał zanika, by znów pojawić się, przy 14, lecz nadal przy względnie niskich prawdopodobieństwach globalnych. Dla oznaczenia 17 występuje poważny sygnał ostrzegawczy (przekroczona jest granica $\mu + 3\sigma$) wraz z gwałtownym wzrostem prawdopodobieństwa (75,04%) przynależności badanego transformatora do populacji transformatorów z defektem.

W tabeli 3 pokazano wyniki uzyskane za pomocą testu istotności dla trzech rozkładów statystycznych. Utrata jednomodalności miała miejsce dla ostatniego pomiaru (widoczna jest korelacja z sygnałem uzyskanym w metodzie deskryptorów bieżących) i dotyczyła rozkładu Gumbela. Dla tego pomiaru należy także zwrócić uwagę na zbliżenie się wartości współczynnika niejednorodności H do granicznej wartości 1 dla rozkładu Weibulla.

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń w metodzie deskryptorów bieżących dla CO

Numer próbki	Stężenie	$\mu + \sigma$	$\mu + 2\sigma$	$\mu + 3\sigma$	P_g
	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]
1	11				
2	15	15,00	17,00	19,00	6,21
3	34	30,03	40,07	50,10	12,17
4	76	59,76	85,52	111,28	22,85
5	107	85,79	122,99	160,18	29,41
6	112	100,53	141,90	183,26	30,39
7	79	100,92	139,84	178,76	23,52
8	103	105,98	144,83	183,68	28,61
9	93	107,52	145,04	182,56	26,56
10	93	108,56	144,82	181,07	26,56
11	104	110,93	146,68	182,44	28,81
12	83	110,13	144,43	178,73	24,41
13	84	109,49	142,51	175,53	24,63
14	113	112,26	145,44	178,62	30,58
15	143	119,14	154,95	190,75	36,05
16	158	127,10	166,20	205,29	38,56
17	533	225,54	336,91	448,27	75,04

Tab. 3. Zestawienie wyników obliczeń w metodzie badania jednomodalności rozkładu statystycznego dla CO

Numer próbki	Stężenie [ppm]	Rozkład Gaussa		Rozkład Gumbela		Rozkład Weibulla		P _g [%]
		μ [ppm]	H [-]	U _m [ppm]	H [-]	U ₁ [ppm]	H [-]	
5	107	47,57	0,09763	71,60	0,11881	52,32	0,05624	29,41
6	112	58,88	0,11195	83,87	0,11952	71,19	0,12803	30,39
7	79	62,2	0,10924	84,31	0,10271	74,98	0,17547	23,52
8	103	67,97	0,15828	89,37	0,13216	82,28	0,2651	28,61
9	93	71,3	0,20322	90,94	0,14674	86,72	0,35815	26,56
10	93	72,26	0,27263	90,50	0,18033	86,86	0,50249	26,56
11	104	74,35	0,35417	92,99	0,24408	90,37	0,60467	28,81
12	83	76,88	0,42749	93,08	0,27535	91,65	0,72531	24,41
13	84	78,12	0,51354	92,96	0,31846	91,52	0,8715	24,63
14	113	80,8	0,54821	95,47	0,32651	96,10	0,91948	30,58
15	143	84,68	0,44529	101,13	0,27262	99,20	0,88468	36,05
16	158	88,81	0,35248	106,94	0,29617	103,99	0,7778	38,56
17	533	93,27	0,30769	183,87	2,98116	121,74	0,9895	75,04

5.2 Przykład II

Transformator był w dłuższym okresie czasu diagnozowany jako pracujący z rozwijającym się uszkodzeniem. Była również znana przyczyna (choć nie skutek) defektu. W trakcie eksploatacji przeprowadzono kilkakrotnie odgazowywanie oleju, co odwzorowują oznaczenia na poziomie czułości 0,1 ppm. Po oddaniu do remontu okazało się, że z usterką, którą miał mógł nadal pracować. Głównym celem analizy takiego właśnie przypadku jest sprawdzenie, czy proponowane metody pozwalają na przeczekanie alarmów generowanych przez inne metody diagnostyczne.

W przykładzie tym przedstawiono wyniki tylko dla jednego gazu (C₂H₂), który został wybrane po analizie wszystkich jako najbardziej interesujący i charakterystyczny przypadek. Pierwsze sygnały ostrzegawcze (w tabeli 4) wynikające z przekroczenia przez wartość bieżącą stężenia gazu, granicy $\mu + \sigma$ pojawiają się już od drugiego pomiaru. Są to sygnały zanikające, które dodatkowo mają miejsce dla niskich wartości prawdopodobieństwa P_g. Od pomiaru 18 do 21 następuje wzmocnienie ich wagi, gdyż przekraczane są naprzemiennie kolejne granice $\mu + 2\sigma$ i $\mu + 3\sigma$. Zjawisko to zachodzi jednak nadal przy stosunkowo niskich wartościach P_g. Oddanie transformatora do remontu wydaje się na podstawie przeprowadzonej analizy dyskusyjne, tym bardziej, że ostatni sygnał ostrzegawczy był słaby. Można było podjąć próbę dalszej eksploatacji transformatora, przynajmniej do czasu przeprowadzenia następnego oznaczenia stężeń gazów.

Tab. 4. Zestawienie wyników obliczeń w metodzie deskryptorów bieżących dla C_2H_2

Numer próbki	Stężenie	$\mu + \sigma$	$\mu + 2\sigma$	$\mu + 3\sigma$	P_g
	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]
1	0,1				
2	0,1	0,10	0,10	0,10	0,11
3	20,7	16,68	26,39	36,10	11,14
4	0,1	14,17	23,09	32,01	0,11
5	20,4	18,30	28,32	38,34	11,01
6	0,1	16,56	26,20	35,84	0,11
7	22	19,44	29,81	40,18	11,72
8	24	21,82	32,71	43,59	12,58
9	29	24,67	36,40	48,12	14,68
10	0,1	23,43	35,21	46,98	0,11
11	22	24,21	35,82	47,44	11,72
12	0,1	23,20	34,84	46,49	0,11
13	0,1	22,27	33,87	45,46	0,11
14	26	23,62	35,47	47,32	13,43
15	26	24,71	36,69	48,68	13,43
16	27	25,72	37,83	49,94	13,85
17	6	25,05	36,93	48,81	3,91
18	68	33,27	50,34	67,40	9,10
19	57	37,30	56,24	75,18	24,94
20	113	50,77	78,45	106,14	40,69
21	93	57,26	88,11	118,96	35,63
22	87	61,84	94,52	127,19	34,00

Tab. 5. Zestawienie wyników obliczeń w metodzie badania jednomodalności rozkładu statystycznego dla C_2H_2

Numer próbki	Stężenie [ppm]	Rozkład Gaussa		Rozkład Gumbela		Rozkład Weibulla		P_g [%]
		μ [ppm]	H [-]	U_m [ppm]	H [-]	U_1 [ppm]	H [-]	
5	20,4	5,0	0,198	13,4	0,197			11,01
6	0,1	0,2	0,179	9,5	0,178			0,11
7	22	4,2	0,232	13,2	0,228	1,8	0,338	11,72
8	24	7,5	0,293	16,0	0,279	3,6	0,445	12,58
9	29	10,5	0,298	18,7	0,259	6,2	0,567	14,68
10	0,1	7,4	0,292	16,5	0,258	3,0	0,550	0,11
11	22	9,2	0,474	17,6	0,423	4,2	0,863	11,72

Numer próbki	Stężenie [ppm]	Rozkład Gaussa		Rozkład Gumbela		Rozkład Weibulla		P _g [%]
		μ [ppm]	H [-]	U _m [ppm]	H [-]	U ₁ [ppm]	H [-]	
12	0,1	8.2	0.492	16.5	0.441	3.0	0.818	0,11
13	0,1	7.4	0.539	15.6	0.487	2.4	0.792	0,11
14	26	9.1	0.574	17.1	0.503	3.4	0.911	13,43
15	26	10.7	0.705	18.5	0.619	5.8	1.124	13,43
16	27	11.9	0.785	19.5	0.674	5.8	1.323	13,85
17	6	11.3	0.656	18.6	0.564	6.8	1.297	3,91
18	68	12.4	0.686	23.3	0.956	8.4	1.305	9,10
19	57	14.2	0.509	25.4	0.665	10.1	1.346	24,94
20	113	15.5	0.850	34.3	1.171	12.6	1.294	40,69
21	93	18.1	0.621	36.7	0.827	15.1	1.292	35,63
22	87	21.1	0.531	40.8	0.658	17.7	1.310	34,00

Analiza tabeli 5 wskazuje, że poczynając od pomiaru 15 wystąpił sygnał ostrzegawczy wynikający z utraty jednomodalności rozkładu Weibulla. Dla pomiaru 20 dołączył się sygnał pochodzący od rozkładu Gumbela. Uwzględniając jednakże niskie lub stosunkowo niskie prawdopodobieństwa P_g przynależności transformatora do populacji uszkodzonych sygnały te można próbować zignorować i podjąć ryzyko dalszej pracy urządzenia.

Reasumując, można stwierdzić, że przykład analizy statystycznej dający sygnał ostrzegawczy z ilościowym określeniem prawdopodobieństwa uszkodzenia na poziomie poniżej 40% mógłby ułatwić decyzję podjęcia ryzyka dalszej pracy transformatora, przy np. zwiększeniu częstotliwości pobierania próbek oleju do analizy. Propozycję taką należy oczywiście rozważać w przypadku braku sygnałów ostrzegawczych pochodzących od innych gazów rozpuszczonych w oleju.

6. Wnioski

Zaproponowane zostały dwie nowe metody mogące służyć diagnozowaniu izolacji transformatora na podstawie statystycznej analizy ilości gazów rozpuszczonych w oleju. Liczne obliczenia weryfikacyjne, także te zamieszczone w pracy, potwierdzają przydatność metod, jako uzupełniających w procesie diagnostyki.

Podejmowanie decyzji dotyczących dalszej eksploatacji transformatora, na podstawie rezultatów otrzymywanych w proponowanych metodach, powinno być poprzedzone zarówno analizą wszystkich gazów rozpuszczonych w oleju, jak i konfrontacją z wynikami otrzymanymi za pomocą innych metod.

Ponieważ każdy z gazów jest rozpatrywany oddzielnie możliwe jest obserwowanie przesuniętych w czasie sygnałów ostrzegawczych od nich pochodzących. Pozwala to na identyfikację zakłóceń złożonych, nakładających się na siebie w różnych momentach eksploatacji transformatora, co w wielu tradycyjnych metodach DGA jest trudne lub wręcz niemożliwe.

Stwierdzono duży stopień zgodności w generowaniu sygnałów alarmowych przez obydwie rozważane metody. W metodzie deskryptorów bieżących sygnały te występują znacznie częściej, ale z reguły dla niskich wartości stężeń danego gazu.

Bardzo istotnym parametrem, z punktu widzenia obydwu metod, jest prawdopodobieństwo przynależności transformatora do populacji jednostek uszkodzonych. W wielu przypadkach pozwala ono na skorygowanie diagnozy wypracowanej tylko na podstawie wartości współczynnika niejednorodności H, czy też ostrzeżeń generowanych przy przekraczaniu przez stężenia bieżące gazu, kolejno nałożonych granic od $\mu + \sigma$ do $\mu + 3\sigma$.

Literatura

- [1] **Mosiński F., Piotrowski T.** – *Numeryczna kartoteka transformatora energetycznego*, IV Konferencja Naukowo-Techniczna ELEKTROWNIE CIEPLNE, Eksploatacja - Modernizacje-Remonty, Słok 23-25 września 1999, s. 141-146
- [2] **Mosiński F.** – *Zastosowanie metod statystycznych dla inżynierów elektryków*, Wyd. PŁ, Łódź 2000
- [3] **Mosiński F., Khalaf Mukbel, Galoch J.** – *Rozkład prawdopodobieństwa zawartości gazów rozpuszczonych w oleju transformatorowym*, IX Konferencja Remontowa Energetyki, Szczyrk, 14-15 września 1995
- [4] **Mosiński F., Piotrowski T.** – *Statystyczna analiza zawartości gazów rozpuszczonych w oleju transformatora energetycznego*, III Konferencja Naukowo-Techniczna TRANSFORMATORY ENERGETYCZNE I SPECJALNE – Diagnostyka, Eksploatacja, Modernizacja, Kazimierz Dolny 11 – 13 października 2000, str. 193-199
- [5] **Mosiński F., Piotrowski T.** – *Statystyczna analiza ilości gazów rozpuszczonych w oleju transformatorowym*, IW-2000, Poznań –Kiekrz, 22-24 maja 2000, str. 275