

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgra inż. Patryka Bohatyrewicza**  
**pt. „Zastosowanie indeksu zdrowia do wstępnej oceny stanu**  
**technicznego oraz analizy zmian starzeniowych transformatorów**  
**energetycznych”.**

**Podstawa formalna wykonania recenzji:**

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, dr hab. inż. Pawła Dworaka, prof. ZUT, zgodnie z uchwałą nr 15 ww. rady z dnia 30.06.2023 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Szymon Banaszak, prof. ZUT.

**1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy**

W ciągu ostatnich lat nastąpił bardzo znaczący rozwój metod i narzędzi diagnostycznych wykorzystywanych do oceny stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych. Nastąpił również dynamiczny rozwój narzędzi informatycznych, które stworzyły nowe możliwości cyfrowego przetwarzania i analizy wyników pomiarowych wykorzystywanych w diagnostyce tych urządzeń. Znaczący postęp technologiczny w obszarze diagnostycznym spowodował zwiększenie ilości parametrów umożliwiających wykrycie wielu defektów występujących podczas eksploatacji jednostek transformatorowych. Obecnie pełna diagnostyka transformatora elektroenergetycznego obejmuje kilkadziesiąt szczegółowych wskaźników. Kompleksowa ocena stanu technicznego wymaga specjalistycznej wiedzy opartej o znajomość metodyki prowadzenia pomiarów, kryteriów diagnostycznych i relacji między poszczególnymi parametrami. W przypadku eksploatacji licznej populacji transformatorów ilość wykonywanych badań jest zazwyczaj bardzo duża, co pociąga za sobą konieczność prowadzenia analizy wielu specjalistycznych parametrów. Ze względu na szybki rozwój technologii wykorzystywanych w diagnostyce transformatorów i konieczność posiadania specjalistycznej wiedzy technicznej, wiele podmiotów prowadzących eksploatację transformatorów nie posiada kadry technicznej dysponującej odpowiednimi kompetencjami do przeprowadzenia zaawansowanej i kompleksowej diagnostyki. Aby uprościć interpretację szczegółowych wyników badań diagnostycznych transformatorów przez osoby podejmujące decyzje finansowo – ekonomiczne związane z procesem remontowo – inwestycyjnym, które nie posiadają ww. kompetencji, od kilku lat prowadzone są prace zmierzające do opracowania sposobu prezentacji wyników w sposób uogólniony





opisujący w formie względnej lub bezwzględnej stan techniczny badanej jednostki. Systemy te zazwyczaj wskazują stopień zużycia danej jednostki określając jednocześnie w sposób przybliżony perspektywy dalszej eksploatacji. W Polsce obecnie funkcjonuje wdrożony w firmie Tauron Dystrybucja S.A. autorski system wspomagający zarządzanie populacją transformatorów w oparciu o wyniki badań diagnostycznych pod nazwą Zintegrowany System Diagnostyki Sieciowej oraz komercyjny system TrafoGrade opracowany przez firmę Energo – Complex. Aktualnie przez wiele ośrodków naukowo – technicznych na świecie prowadzone są również prace zmierzające do opracowania podobnych systemów obejmujących różny zakres badań diagnostycznych.

Kompleksowy proces diagnostyki jest kosztowny i pracochłonny, gdyż wymaga wyłączenia transformatora i przeprowadzenia szczegółowych pomiarów w sposób off-line. Dlatego w celu przeprowadzenia wstępnej oceny stanu technicznego z całej puli dostępnych parametrów diagnostycznych wybiera się zazwyczaj te, które nie wymagają wyłączenia jednostki. W tym celu bardzo przydatne są metody bazujące na parametrach oleju izolacyjnego, którego próbkę można pobrać z pracującego transformatora. Do wstępnej oceny stanu technicznego transformatora można wykorzystać metodę analizy chromatograficznej gazów rozpuszczonych w oleju oraz pomiar jego parametrów fizykochemicznych. Metody te umożliwiają prowadzenie wstępnej diagnostyki urządzenia i wykrycie symptomów wskazujących na występowanie defektu w układzie izolacyjnym transformatora.

Genezą prac podjętych przez Autora było opracowanie innowacyjnej metody wstępnej oceny stanu technicznego transformatora, stanowiącej uzupełnienie funkcjonujących obecnie systemów diagnostycznych, opierającej się na analizie pojedynczego wskaźnika liczbowego tzw. „indeksu zdrowia”. W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autor zaproponował metodykę wstępnej oceny stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych, nie wymagającą wyłączenia transformatora, opartą o wyniki badań oleju. Zastosowanie tego typu podejścia umożliwia prowadzenie częstych badań diagnostycznych przy ograniczeniu nakładów finansowych niezbędnych do wykonania pełnej diagnostyki. Autor opracował algorytm, który ma postać „indeksu zdrowia” wyrażonego w postaci wskaźnika liczbowego, pozwalającego w łatwy sposób ocenić osobom odpowiedzialnym za zarządzanie majątkiem sieciowym stan techniczny urządzenia. Na podstawie otrzymanych wyników obejmujących wstępną diagnostykę istnieje możliwość zlecenia dodatkowych badań szczegółowych lub planowania zabiegów remontowych lub inwestycyjnych. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy były prowadzone w oparciu o 1133 rzeczywiste wyniki badań oleju różnego rodzaju transformatorów: blokowych, hutniczych, dystrybucyjnych i przemysłowych. W pracy przedstawiono wyniki populacyjne oraz wyniki otrzymane dla poszczególnych podgrup. Opracowano również wytyczne oceny charakteru zmian między kolejnymi badaniami. Dodatkowo określono wpływ poszczególnych grup parametrów na zmianę „indeksu zdrowia” między kolejnymi badaniami. W pracy przedstawiono również wyniki kilku wybranych przypadków jednostek znajdujących się w eksploatacji.

**Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest aktualna i ważna ze względu na jej znaczenie poznawcze i praktyczne.**

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie metody wstępnej oceny stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych w oparciu o powszechnie stosowane metody diagnostyczne niewymagające wyłączenia jednostek z ruchu elektrycznego, która pozwoli w uproszczony sposób prowadzić analizę porównawczą urządzeń oraz klasyfikację zmian stanu



technicznego między badaniami. Szczegółowym celem pracy było opracowanie algorytmu w postaci „indeksu zdrowia” umożliwiającego wykonanie w prosty sposób interpretacji wyników pomiarowych.

**Uważam, że przedstawiony cel pracy jest ambitny i spełniający wymagania stawiane pracom doktorskim.**

Autor przedstawił tezy pracy, które sformułował w sposób jawny na stronie 11 rozprawy.

*„Istnieje możliwość skutecznej oceny zmian stanu technicznego transformatorów mocy w oparciu o powszechnie stosowane metody diagnostyczne oleju izolacyjnego”.*

*„Na podstawie archiwalnych wyników badań diagnostycznych oraz analizy populacyjnej transformatorów możliwe jest określenie, jakie wartości zmian indeksu zdrowia między kolejnymi sprawdzeniami są zagrożeniem dla bezpiecznej pracy jednostki”.*

Pierwsza część tezy pracy ma nieco oczywisty charakter, ponieważ skuteczność metod diagnostycznych oleju izolacyjnego w ocenie stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych została udowodniona już wiele lat temu. Powstało na ten temat wiele publikacji zarówno o zasięgu krajowym, jak również międzynarodowym. Doniesienia literaturowe zawierają wiele przykładów praktycznych skuteczności ww. metod.

**Natomiast druga część tezy zawierająca odniesienie do wpływu zmian wartości opracowanego „indeksu zdrowia” na możliwość bezpiecznej pracy jednostki transformatorowej uważam za popraną i odpowiednio sformułowaną.**

## 2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 151 stron. Zawiera wprowadzenie oraz cel, tezę i zakres pracy, a także dziesięć rozdziałów, bibliografię, spis tabel oraz spis rysunków. Spis literatury zawiera 133 pozycje, wśród których znajdują się zarówno publikacje krajowe, jak i liczne publikacje międzynarodowe. Uważam, że literatura zacytowana w rozprawie doktorskiej została dobrana w sposób poprawny. Doktorant jest współautorem 3 cytowanych pozycji, wśród których dwie opublikowano w czasopiśmie Energies (140 pkt. na liście Ministerstwa Nauki i Edukacji), a jedną w czasopiśmie Applied Sciences (100 pkt.).

Rozprawę doktorską rozpoczynają dwie nienumerowane części. Pierwszą stanowi wprowadzenie do podjętej tematyki pracy. Omówiono w niej znaczenie transformatorów w systemie elektroenergetycznym oraz rolę diagnostyki stanu technicznego tych urządzeń w procesie zarządzania majątkiem sieciowym. W sposób syntetyczny sformułowano problem badawczy.

Drugą część stanowi opis celu, tezy i zakresu rozprawy.

Następnie Autor przedstawia 10 ponumerowanych rozdziałów tematycznych, z czego pierwsze cztery zawierają zagadnienia teoretyczne ściśle związane z tematyką rozprawy.

W rozdziale pierwszym przedstawiono w sposób ogólny budowę transformatorów elektroenergetycznych. Scharakteryzowano część aktywną znajdującą się wewnątrz transformatora, a także rodzaje materiałów izolacyjnych wykorzystywanych w procesie produkcji. Następnie w sposób



syntetyczny omówiono budowę kadzi, układu chłodzenia oraz elementów stanowiących wyposażenie transformatora.

Rozdział drugi zawiera charakterystykę typowych przyczyn defektów wewnętrznych oraz usterek osprzętu występujących w jednostkach znajdujących się w eksploatacji. Dodatkowo przedstawiono statystyki awaryjności opracowane na podstawie międzynarodowych danych opublikowanych przez grupę roboczą CIGRE.

Rozdział trzeci poświęcono zagadnieniom dotyczącym diagnostyki oleju izolacyjnego. Omówiono główne parametry oraz związane z nimi metody diagnostyki. Scharakteryzowano właściwości fizykochemiczne oleju oraz metodę analizy chromatograficznej gazów rozpuszczonych w oleju powszechnie stosowaną w praktyce eksploatacyjnej jako wstępną metodę oceny stanu technicznego transformatorów. Ponadto przedstawiono opis metody oceny stopnia zesterzenia izolacji celulozowej na podstawie analizy zawartości związków furanów w oleju. Scharakteryzowano również dodatkowe parametry oleju takie jak: stabilność oksydacyjna oleju, zawartość siarki korozyjnej oraz zawartość inhibitorów.

W rozdziale czwartym omówiono zagadnienia dotyczące zarządzania populacją transformatorów w kontekście aspektów technicznych, ekonomicznych i środowiskowych. Omówiono metodę indeksów zdrowia podając konkretne przykłady systemów wspomagających proces podejmowania decyzji w zakresie eksploatacji transformatorów na podstawie parametrów określających ich stan techniczny.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały piąty, szósty, siódmy, ósmy i dziewiąty zawierające wyniki badań Doktoranta.

Rozdział piąty zawiera opis opracowanej metodyki oceny stanu technicznego transformatorów na podstawie wyników badań oleju izolacyjnego i charakterystykę algorytmu interpretacji uzyskanych wyników określonego przez Autora jako „indeks zdrowia” transformatora. Scharakteryzowano parametry uwzględnione podczas analizy oraz opisano opracowany algorytm z uwzględnieniem doboru parametrów wagowych oraz kryteriów oceny uzyskanego wyniku.

W rozdziale szóstym przedstawiono charakterystykę badanej populacji transformatorów, która obejmowała dane archiwalne uzyskane w wyniku wykonywania badań dla transformatorów znajdujących się w eksploatacji. Ze względu na zróżnicowany charakter pracy badanych jednostek, Autor wprowadził podział badanych urządzeń na cztery grupy transformatorów: blokowe, hutnicze, przemysłowe oraz dystrybucyjne.

Rozdział siódmy zawiera analizę wyników badanej populacji transformatorów wykonanej z podziałem na cztery wymienione wcześniej grupy. Dla każdego transformatora wyznaczono wartość „indeksu zdrowia” i wykonano ocenę stanu technicznego jednostki, przypisując jej jeden z czterech stanów: dobry, przeciętny, mierny lub ryzykowny. Ponadto dla każdej grupy transformatorów przedstawiono wyniki w postaci graficznej prezentując wartość „indeksu zdrowia” w funkcji wieku urządzenia oraz określono zależność średniej wartości wskaźnika zdrowia względem wieku jednostki dla dwóch różnych scenariuszy starzenia urządzeń.

W rozdziale ósmym przedstawiono wyniki badań dotyczących zmiany stanu technicznego transformatora między kolejnymi pomiarami. Wykonano symulacje obliczeniowe zmian wartości „indeksu zdrowia” przy użyciu wybranych danych źródłowych oraz danych opracowanych dla grupy testowej. Dodatkowo omówiono wpływ każdego podindeksu na zmianę wartości końcowej punktacji zaproponowanego „indeksu zdrowia”.



Rozdział dziewiąty zawiera praktyczne przykłady zastosowania opracowanego „indeksu zdrowia” do obserwacji typowych scenariuszy eksploatacyjnych, takich jak: normalna eksploatacja, starzenie przyspieszone lub awaria. W badaniach uwzględniono również specyficzne przypadki takie jak: wady fabryczne oraz wpływ zabiegów konserwacyjnych oleju.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań.

### 3. Główne osiągnięcia rozprawy

**Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:**

- opracowanie modelu matematycznego autorskiego „indeksu zdrowia” transformatora oraz zdefiniowanie wag dla parametrów diagnostycznych uwzględnionych w analizie,
- wyznaczenie kryteriów oceny stanu technicznego transformatorów przeprowadzonej za pomocą opracowanego „indeksu zdrowia”, uwzględniających rodzaj i znaczenie badanej jednostki w systemie elektroenergetycznym,
- wykonanie analizy wpływu poszczególnych grup parametrów na zmianę wartości „indeksu zdrowia” między kolejnymi badaniami,
- opracowanie rekomendacji w zakresie praktycznego zastosowania autorskiej metody badawczej do zarządzania populacją transformatorów,
- praktyczna weryfikacja poprawności działania opracowanego algorytmu w różnych warunkach: pracy normalnej, przy zmianach stanu technicznego transformatora wynikających z procesów starzeniowych lub awarii, przy występujących wadach fabrycznych, a także przy zmianie parametrów oleju wynikających z zabiegów konserwacyjnych.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale także praktycznej, w oparciu o dobre rozeznanie problemów naukowo – badawczych dotyczących metod diagnostycznych wysokonapięciowych układów izolacyjnych oraz zagadnień inżynierskich umożliwiających weryfikację uzyskanych rezultatów w warunkach rzeczywistych. Potrafił przeprowadzić kompleksową procedurę badawczą obejmującą szczegółowe rozpoznanie teoretyczne realizowanego tematu, opracowanie autorskiego modelu matematycznego stanowiącego uzupełnienie istniejących obecnie systemów diagnostycznych oraz przeprowadzenie weryfikacji poprawności jego działania w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe.

**Stwierdzam, że doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z zakresu dyscypliny naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

### 4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Praca jest napisana poprawnym językiem technicznym, jednak można w niej znaleźć błędy o charakterze edytorskim, stylistycznym i gramatycznym. Występują również sformułowania o charakterze nietechnicznym np.: „... znaczniejszy koszt ...” (str. 23), „... uwięzienie strumienia rozproszenia...” (str. 25), „... repertuar badań...” (str. 71), „... na usterkach głównych akcesoriów



transformatora...” (str. 40), „... napięcie przebicia potrafi samodzielnie wykluczyć transformator...” (str. 72), „... oddychania transformatora...” (str. 73 ) itp. W pracy występują również powtórzenia. Przykładowo ostatni akapit na str. 91 został powtórzony pod rys. 7.2 na str. 92. Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany, jednak moim zdaniem warto byłoby wprowadzić numerację rozdziałów od początku pracy, obejmując nią również wstęp oraz cel, zakres i tezę pracy. Szata graficzna jest staranna i dopracowana, ale zdarzają się nieliczne przypadki nieczytelnych opisów na rysunkach spowodowane zastosowaniem zbyt małej czcionki np.: rys. 1.15, 3.5, 4.5.

Jednakże pomimo zastrzeżeń natury edytorskiej, czytając rozprawę odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autora. Wskazane powyżej uchybienia nie wpływają generalnie na pozytywną ocenę redakcji rozprawy.

## 5. Uwagi merytoryczne

1. Opisując w rozdziale pierwszym budowę transformatora elektroenergetycznego Autor scharakteryzował układy do pomiaru temperatury oleju i uzwojeń bazujące na zastosowaniu czujników oporowych Pt100. W rozdziale drugim stwierdza, że „*dla typowej konstrukcji układu pomiarowego temperatury, pomiar rzeczywistej temperatury punktu gorącego nie jest możliwy*”. W swoich rozważaniach zupełnie pominął opis światłowodowych systemów pomiaru temperatury, które coraz częściej są instalowane w nowych jednostkach transformatorowych. Umożliwiają one bezpośredni pomiar temperatury uzwojeń w tzw. „punktach gorących”, co z diagnostycznego punktu widzenia ma istotne znaczenie przy interpretacji wartości niektórych parametrów diagnostycznych.
2. Na stronie 80 Autor formułuje następujące twierdzenie: „*Transformatory są urządzeniami o zróżnicowanym poziomie ryzyka eksploatacyjnego, co wskazuje na konieczność różnicowania kryteriów oceny w zależności od ocenianych populacji*”. W zaproponowanych kryteriach uzależniono końcową ocenę stanu technicznego w sposób bezpośredni od poziomu krytyczności transformatora. Wszystkie metody diagnostyczne wykorzystywane w procesie oceny stanu technicznego transformatorów, w tym również metody wykorzystywane w niniejszej rozprawie wykorzystują zjawiska fizyczne lub chemiczne towarzyszące występowaniu defektu w części aktywnej urządzenia. Zmiana pojedynczego parametru lub grupy parametrów wskazuje na możliwość występowania defektu lub procesów starzeniowych. Dzieje się tak bez względu na to jakim ryzykiem eksploatacyjnym jest obciążony transformator. Znaczenie transformatora w systemie elektroenergetycznym nie ma zatem bezpośredniego wpływu na ocenę stanu technicznego badanej jednostki, ale ma istotne znaczenie na sposób postępowania z transformatorem i zakres ewentualnych zabiegów eksploatacyjnych lub remontowych. Jakimi przesłankami kierował się Doktorant różnicując kryteria oceny stanu technicznego ze względu na poziom krytyczności transformatora?
3. Na jakiej podstawie wyznaczono kryteria ogólnej oceny opracowanego „indeksu zdrowia” w zależności od znaczenia transformatora przedstawione w tabeli 5.13?



4. W rozdziale 5 przedstawiono wagi przypisane poszczególnym parametrom diagnostycznym i poszczególnym podindeksom. W pracy brakuje szczegółowego wyjaśnienia na jakiej podstawie przeprowadzono dobór wartości tych wag. Czy wykonano badania lub analizy mające na celu optymalny dobór ich wartości, biorąc pod uwagę maksymalizację skuteczności opracowanego wskaźnika diagnostycznego?
5. Poszczególne parametry wchodzące w skład „indeksu zdrowia” są scharakteryzowane za pomocą funkcji matematycznych. Na jakiej podstawie dobrano zaproponowane postacie równań? Czy analizowano przydatność innych równań lub współczynników tych równań do scharakteryzowania poszczególnych parametrów?
6. W rozdziale 7 przedstawiono wartości średnich „indeksów zdrowia” za pomocą regresji liniowej i wielomianowej. Uwagę zwracają niskie wartości współczynników determinacji. Czy rozpatrywano wykorzystanie innych rodzajów regresji?
7. Autor miał do dyspozycji bazę danych zawierającą dużą liczbę wyników pomiarowych wykonanych dla transformatorów znajdujących się w eksploatacji, co umożliwiałoby wykorzystanie w prowadzonych badaniach narzędzi sztucznej inteligencji. Czy Autor rozważył możliwość ich wykorzystania w swojej pracy?

**Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy.**

## **6. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Autor podjął interesującą próbę opracowania nowej metody wstępnej oceny stanu technicznego transformatorów opartą o wyniki badań oleju, która może być wykorzystywana w praktyce eksploatacyjnej bez konieczności wyłączenia transformatora. Zaproponował uproszczony sposób oceny wyników pomiarowych, którego interpretacja nie wymaga specjalistycznej wiedzy z zakresu metod diagnostycznych wykorzystywanych do oceny stanu technicznego transformatorów. W mojej ocenie opracowana metoda jest innowacyjna na tle innych istniejących rozwiązań, gdyż wykorzystuje jedynie badania oleju izolacyjnego, co dodatkowo powoduje ograniczenie kosztów ponoszonych na zabiegi diagnostyczne.

Przeprowadzone badania wymagały od Doktoranta dużej wiedzy teoretycznej z zakresu budowy, diagnostyki i eksploatacji transformatorów elektroenergetycznych, a także analizy i przetwarzania dużej ilości danych pomiarowych. Wykazał się również znajomością narzędzi matematycznych oraz informatycznych, a także umiejętnościami zastosowania ich do rozwiązania problemu technicznego związanego z opracowaniem modelu matematycznego „indeksu zdrowia” transformatora.

Doktorant wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązał w sposób oryginalny zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe z punktu widzenia możliwości przyszłego zastosowania w praktyce. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny Doktoranta.



**Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Patryka Bohatyrewicza do publicznej obrony przedłożonej pracy.**



*Prof. dr hab. inż. Andrzej Cichoń*