

**TrafoGrade –  
zarządzanie transformatorami**

## **SPIS TREŚCI:**

1. Wstęp.....	3
2. Charakterystyka systemu TrafoGrade.....	4
3. Ocena stanu technicznego transformatora.....	4
4. Ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym.....	7
5. Analiza perspektyw eksploatacji.....	8
6. Komputerowy system zarządzania .....	9
7. Przykład wdrożenia systemu TrafoGrade.....	10
8. Ekonomiczne aspekty wdrożenia systemu TrafoGrade.....	13
9. Podsumowanie.....	15

## 1. WSTĘP

Spółki dystrybucyjne działające na terenie Polski eksploatują kilka tysięcy transformatorów średniej mocy, które łączą sieci wysokich napięć z siecią rozdzielczą średniego napięcia. W grupie tej przeważają w szczególności jednostki o mocach 10, 16, 25 i 40 MVA, a wiele z nich znajduje się już ponad 30 lat w eksploatacji. Pomimo tak długiego czasu pracy stan techniczny większości transformatorów pozwala na ich dalszą eksploatację, co w głównej mierze jest spowodowane znacznymi zapasami bezpieczeństwa izolacji, które zakładano kilkanaście lat temu podczas projektowania transformatorów.

Nowoczesne podejście do eksploatacji transformatorów energetycznych oparte jest na kompleksowej ocenie stanu technicznego transformatora oraz jego znaczenia w systemie elektroenergetycznym. Powiązanie tych dwóch czynników pozwala na rzetelne określenie perspektyw dalszej eksploatacji jednostki oraz ekonomiczną ocenę opłacalności wykonania koniecznych remontów lub wymiany transformatora.

Kierując się powyższymi przesłankami firma Energo-Complex wraz z pracownikami Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego oraz Politechniki Opolskiej opracowała kompleksowy system zarządzania transformatorami o nazwie TrafoGrade. Ideą systemu, który wprowadza punktową skalę ocen stanu technicznego transformatora oraz jego znaczenia w sieci elektroenergetycznej, jest powiązanie technicznych aspektów diagnostyki z czynnikami ekonomiczno – finansowymi w celu optymalizacji decyzji w zakresie bieżącej eksploatacji, gospodarki remontowej oraz polityki inwestycyjnej.

W niniejszej broszurze przedstawiono podstawowe informacje dotyczące systemu TrafoGrade oraz podano przykładowe wyniki oceny 44 transformatorów pracujących w jednej z polskich spółek dystrybucyjnych. Dokonano również analizy ekonomicznej wdrożenia systemu w odniesieniu do kosztów wystąpienia awarii transformatora.

## 2. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU TRAFOGRADE

System zarządzania transformatorami TrafoGrade składa się z czterech modułów, które przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Moduły systemu TrafoGrade.

W omawianym systemie przyjęto punktowe wartościowanie każdej właściwości lub parametru wchodzącego w skład zarówno oceny stanu technicznego, jak i znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym. Zastosowano przy tym trójstopniową skalę oceny: dobry, zadowalający, mierny. Prosta – punktowa forma opisu stanu technicznego transformatora umożliwia analizowanie wyników badań zarówno przez kadrę inżynierską, jak i nie posiadającą specjalistycznej wiedzy technicznej służby ekonomiczne.

## 3. OCENA STANU TECHNICZNEGO TRANSFORMATORA

Głównym elementem systemu TrafoGrade jest rzetelna ocena stanu technicznego transformatora wykonywana za pomocą nowoczesnych metod diagnostycznych. W skład wieloparametrycznej oceny stanu technicznego wchodzi 14 parametrów diagnostycznych:

- analiza gazów rozpuszczonych w oleju (DGA),
- analiza odkształceń uzwojeń (FRA),
- historia pracy,
- napięcie przebicia oleju,
- oględziny zewnętrzne,
- ocena podobciążeniowego przełącznika zaczeów (PPZ),
- ocena układu chłodzenia,
- ocena osprzętu transformatora,
- rezystancja izolacji,
- rezystancja uzwojeń,
- ocena stopnia degradacji celulozy,
- wiek transformatora,
- zawilgocenie izolacji stałej,
- zesterzenie oleju.

Wszystkie parametry diagnostyczne przypisano do trzech grup:

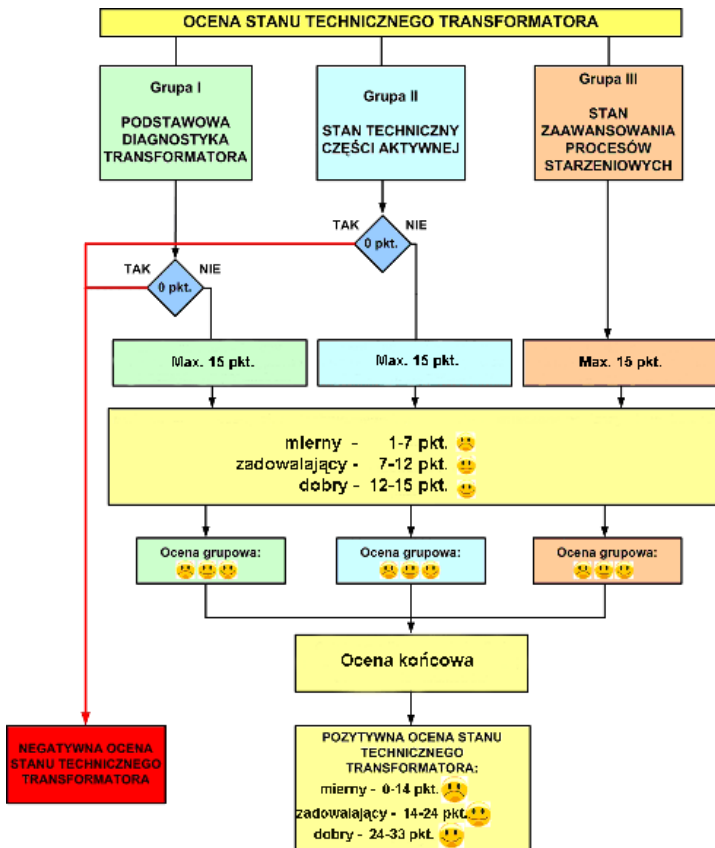
Grupa I – podstawowa diagnostyka transformatora,

Grupa II – stan części aktywnej,

Grupa III – zaawansowanie procesów starzeniowych.

**Grupa I** jest to grupa ujmująca najbardziej podstawowe cechy transformatora, których zły stan techniczny w istotny sposób nie wpływa na zdolność do pracy w ruchu wlvkroenergetycznym. Tylko w skrajnych przypadkach, katastrofalny stan techniczny którejkolwiek z nich stwarza konieczność odłączenia jednostki od sieci. Założono przy tym, że usunięcie usterek w tej grupie cech nie powinno stwarzać większych problemów technicznych i być relatywnie tanie. Przykładowo, można tu wymienić takie cechy jak ocena osprzętu lub PPZ.

Do **grupy II** należą te elementy, które spełniają istotną rolę w funkcjonowaniu transformatora. Zły stan techniczny większości z nich eliminuje transformator z ruchu elektrycznego, a przywrócenie akceptowalnego stanu technicznego wymaga na ogół znacznych nakładów finansowych i organizacyjnych. Do tej grupy można zaliczyć np. analizę DGA, której negatywny wynik wymaga odłączenia transformatora od sieci i co najmniej rewizji wewnętrznej.



Rys. 2. Algorytm oceny stanu technicznego transformatora metodą TrafoGrade.

**Grupa III** właściwości w zasadzie nie dotyczy problemów związanych z bieżącą eksploatacją transformatora, lecz jest ukierunkowana na przewidywany „czas życia” oraz planowanie remontów i modernizacji. Dlatego nawet negatywna ocena którejkolwiek z nich nie eliminuje jednostki z ruchu, wymaga natomiast odpowiedniego zaplanowania remontu. Do tej grupy przyporządkowano takie cechy jak np. wiek transformatora czy też fizyko-chemiczne właściwości oleju transformatorowego.

Na potrzeby systemu TrafoGrade opracowano szczegółową instrukcję, która zawiera sposób definiowania i różnicowania wartości poszczególnych parametrów, a także metodykę grupowej i końcowej punktacji.

#### **4. OCENA ZNACZENIA TRANSFORMATORA W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM**

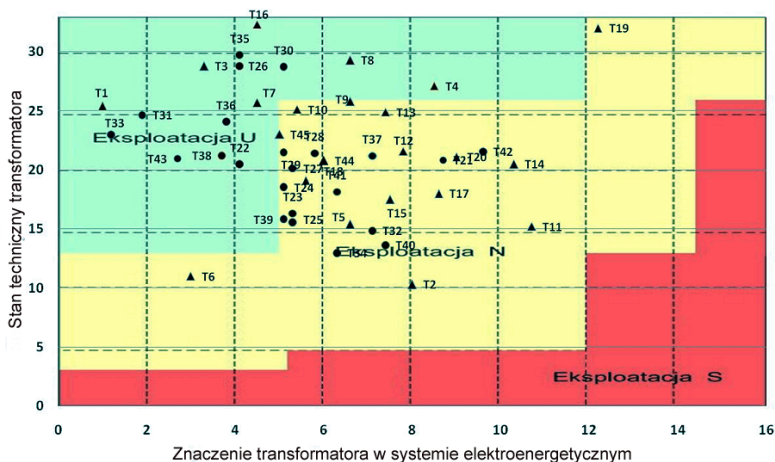
W procesie decyzyjnym dotyczącym polityki inwestycyjno – remontowej poza oceną stanu technicznego transformatora powinno się uwzględnić jego znaczenie w sieci elektroenergetycznej. Zagadnienie to ma szczególne znaczenie w aspekcie zwiększenia niezawodności dostaw energii do odbiorców, a także poprawę bezpieczeństwa energetycznego danego obszaru. W systemie TrafoGrade ocena znaczenia transformatora wyrażona została również w skali punktowej i realizowana jest m. in. poprzez analizę:

- konfiguracji sieci elektroenergetycznej, w której transformator pracuje, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów niezawodnościowych,
- rodzaju zasilanych odbiorców,
- możliwości rezerwowania transformatora itp.

Powiązanie dwóch niezwykle istotnych z punktu widzenia działania spółki dystrybucyjnej atrybutów transformatora pozwala przypisać go do odpowiedniej grupy eksploatacyjnej. Na rys 3 przedstawiono rezultaty oceny 44 transformatorów przeprowadzonej w jednej ze spółek dystrybucyjnych.

W systemie TrafoGrade dokonano podziału na trzy zasadnicze grupy eksploatacyjne (rys.3):

- transformatory o eksploatacji uproszczonej (U),
- transformatory o eksploatacji normalnej (N),
- transformatory o eksploatacji pod szczególnym nadzorem (S).



Rys.3. Wyniki kompleksowej analizy stanu technicznego oraz znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym

Do pierwszej grupy (U) zaliczono jednostki wyróżniające się dwiema cechami: są to transformatory o bardzo dobrej kondycji technicznej, bądź też ich znaczenie w systemie elektroenergetycznym jest niewielkie. W takich przypadkach koszty związane z bieżącą diagnostyką można ograniczyć jedynie do okresowych oględzin połączonych z analizą DGA oleju. Z drugiej strony do grupy (S) włączono jednostki pełniące strategiczną rolę w systemie lub też transformatory o miernym stanie technicznym. Oczywiście w tym ujęciu każda grupa eksploatacyjna wymaga opracowania oddzielnej instrukcji, ale przyjęcie takiego systemu obsługi opartego o rzeczywisty stan techniczny i znaczenie transformatora prowadzi do realnej redukcji kosztów działania dystrybutorów energii elektrycznej.

## 5. ANALIZA PERSPEKTYW EKSPLOATACJI

Wynikiem końcowym kompleksowej oceny stanu technicznego transformatora jest opracowanie, indywidualnie dla każdej jednostki, perspektyw eksploatacji. Informacje te są szczególnie istotne dla osób zarządzających eksploatacją transformatorów, gdyż



umożliwiają wykonanie rzetelnego planu działań diagnostyczno – remontowych na kolejne lata. W tabeli 1 przedstawiono opracowane przykładowe perspektywy eksploatacji dla dwóch wybranych transformatorów charakteryzujących się różnym stanem techniczny.

Tabela 1. Przykładowe perspektywy eksploatacji transformatorów.

<b>TDR3b 25000/110 rok prod. 1980, 10,4 pkt.</b>	
Stan techniczny	Perspektywa eksploatacji
<p>Liczne nieszczelności, PPZ: głośna praca napędu, DGA: przegrzania niskotemp., Zawilgocenie X = 3,3%, Furany: 3,24 ppm, Fenol: 1,94 ppm, Fizykochemiczne właściwości oleju: zadowalające</p>	<p>Transformator o wysokim zaawansowaniu procesów starzeniowych w izolacji stałej i olejowej. Wysokie zawilgocenie oraz istniejący defekt termiczny przyspieszają degradację izolacji.</p> <p>Wskutek osłabienia wytrzymałości zwarciowej i możliwego zjawiska bąblowania występuje podwyższone ryzyko dalszej eksploatacji</p> <p>Ograniczenia eksploatacyjne:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-temperatura oleju do 75 °C</li> <li>-nie odstawać do zimnej rezerwy w niskiej temperaturze</li> </ul> <p>Modernizacja wymaga znacznych nakładów tj.: przezwojenia oraz wymiany oleju</p>
<b>TDR3b 16000/110, rok prod. 1985, 27,1 pkt</b>	
<p>PPZ: zadowalający DGA: początek wnz (niewielka ilość wodoru ) Zawilgocenie X = 2,8 % Furany: brak Fizykochemiczne właściwości oleju: dobre</p>	<p>Brak ograniczeń w eksploatacji.</p> <p>W perspektywie 5-7 lat prawdopodobna potrzeba suszenia izolacji</p>

## 6. KOMPUTEROWY SYSTEM ZARZĄDZANIA

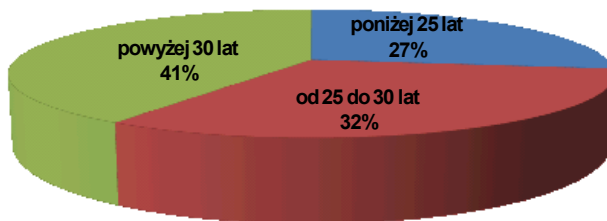
Dalsze prace nad rozwojem systemu TrafoGrade związane są z budową komputerowego systemu zarządzania transformatorami. Wszystkie dane dotyczące oceny stanu technicznego, oceny znaczenia oraz analizy perspektyw eksploatacji danej populacji transformatorów zostaną zgromadzone w komputerowym systemie zarządzania. Do głównych zadań programu można zaliczyć:

- wspomaganie procesu decyzyjnego w zakresie polityki remontowo – inwestycyjnej,
- tworzenie rzetelnej prognozy budżetowej na podstawie rzeczywistego stanu transformatorów,
- ergonomiczna prezentacja danych w postaci graficznej,
- łatwy dostęp do archiwalnych wyników pomiarowych.

Komputerowy system zarządzania systemu TrafoGrade będzie programem dopasowanym do indywidualnych wymagań użytkowników z uwzględnieniem specyfiki danego przedsiębiorstwa energetycznego.

## 7. PRZYKŁAD WDROŻENIA SYSTEMU TRAFORAGE

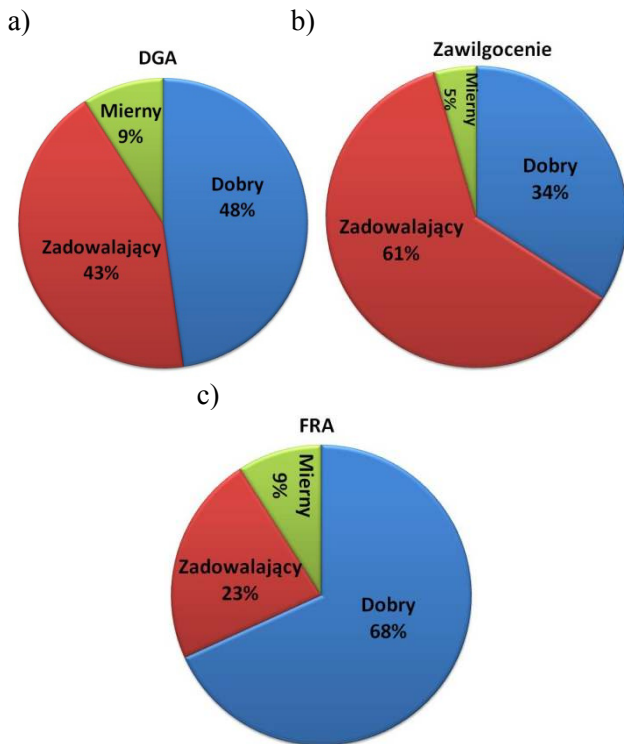
System TrafoGrade wdrożono w jednej ze spółek dystrybucyjnych, w której kompleksową ocenę przeprowadzono dla 44 transformatorów rozdzielczych. Na rys. 4 zobrazowano diagram kołowy przedstawiający okres eksploatacji badanej populacji transformatorów.



Rys. 4. Wiek badanych transformatorów

Biorąc pod uwagę dane statystyczne dotyczące polskich spółek dystrybucyjnych łatwo zauważyć, że ze względu na czasookres eksploatacji populacja ta jest reprezentatywna dla ogółu transformatorów rozdzielczych. Dlatego należy się spodziewać, że otrzymana za pomocą metody TrafoGrade charakterystyka stanu technicznego, perspektyw eksploatacji oraz główne problemy techniczne dotyczyć będą również transformatorów użytkowanych przez inne polskie podmioty zajmujące się dystrybucją energii.

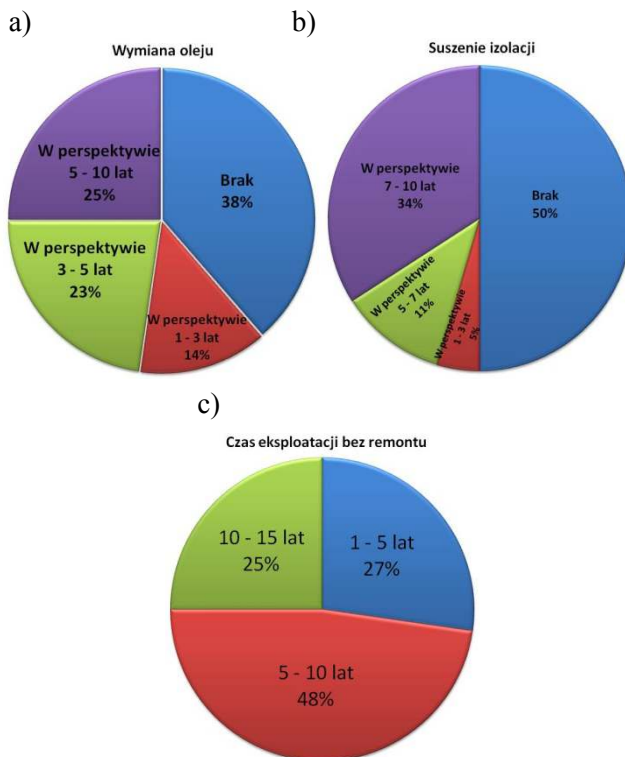
Spośród 44 przebadanych transformatorów 4 jednostki charakteryzowały się miernym stanem technicznym, 33 - stanem zadowalającym, a 7 - stanem dobrym. Głównymi składnikami rzetelnej oceny stanu technicznego transformatorów są nowoczesne, zaawansowane metody diagnozowania. Na rys. 5 przedstawiono uogólnione dla całej populacji przykładowe wyniki z badania DGA, pomiaru zawilgocenia izolacji stałej oraz oceny odkształceń mechanicznych uzwojeń metodą FRA.



Rys. 5. Ocena populacji transformatorów ze względu na wybrane cechy stanu technicznego: analiza DGA oleju (a), zawilgocenie celulozy (b), FRA (c)

Na podstawie przedstawionych na rys. 5 wyników, można stwierdzić, że tylko nieliczny procent badanej populacji transformatorów ma poważne problemy techniczne, które mogą

wymagać zaangażowania znacznych środków finansowych. Na rys. 6 przedstawiono perspektywy eksploatacyjne wyznaczone dla analizowanej populacji 44 transformatorów.



Rys. 6. Perspektywy eksploatacyjne: czas pracy do wymiany oleju (a), suszenie izolacji stałej (b), szacowany czas eksploatacji bez remontu (c)

Określona na podstawie wskaźników stanu technicznego perspektywa eksploatacji jest punktem wyjściowym dla przeprowadzenia analizy ekonomicznej.

## **8. EKONOMICZNE ASPEKTY WDROŻENIA SYSTEMU TRAFOGRADE**

Klasyczne podejście do opracowywania wyników pomiarowych wymaga od właściciela jednostki wykonania analizy technicznej danych zgromadzonych najczęściej w kilku protokołach i na tej podstawie wyciągania odpowiednich wniosków. Integracja wszystkich danych pomiarowych w systemie komputerowym, a także wprowadzenie punktowej skali ocen stanu technicznego ułatwia analizę wyników i umożliwia podjęcie decyzji menadżerom nie posiadającym szczegółowej wiedzy z zakresu diagnostyki transformatorów. Wprowadzenie kompleksowego systemu zarządzania opartego na wieloparametrycznej ocenie stanu technicznego transformatora pozwala na optymalizację wydatków inwestycyjnych ponoszonych na remonty i modernizacje. Takie podejście do zarządzania populacją transformatorów umożliwia w prosty sposób uchwycenie właściwego momentu, w którym stan techniczny danej jednostki można znacząco podnieść przy zaangażowaniu stosunkowo niskich nakładów finansowych. Przykładem może być transformator o znacznym zawilgoceniu izolacji stałej, miernych parametrach oleju ale posiadający uzwojenia wraz z izolacją stałą w dobrym stanie mechanicznym. Wykonanie remontu takiej jednostki sprowadza się do przeprowadzenia następujących czynności:

- suszenie i czyszczenie uzwojeń,
- doprasowanie rdzenia i uzwojeń,
- wymiana oleju,
- wymiana radiatorów,
- remont podobciążeniowego przełącznika zacze­pów,
- wymiana osprzętu.

Koszt remontu w takim zakresie szacuje się obecnie na ok. 15 - 20% wartości nowego transformatora. Wykonanie remontu jednostki pozwalana dalszą eksploatację transformatora przez kolejne 10-15 lat.

W przypadku miernego stanu technicznego transformatora należy podjąć decyzję o remoncie bądź wymianie jednostki. Decyzja ta powinna uwzględniać następujące czynniki:

- analizę strat biegu jałowego,
- ocenę wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną w miejscu zainstalowania transformatora,
- zmianę układu połączeń transformatorów.

Szacunkowy koszt nowego transformatora o mocy 25 MVA zawiera się w granicach 1,4 – 2,0 mln zł, natomiast wykonanie kompleksowego remontu – 650.000 – 850.000 zł. Do kosztów remontu transformatora należy również dołączyć koszty prac związanych z demontażem i przygotowaniem transportu jednostki. Koszty te wynoszą ok. 170.000 zł.

Głównym celem prowadzenia zaawansowanej diagnostyki transformatora jest uniknięcie awarii transformatora, a w szczególności awarii katastrofalnej. Wystąpienie awarii katastrofalnej, która swoim zasięgiem obejmuje zazwyczaj pole wysokiego, a często też średniego napięcia w sposób lawinowy zwiększa koszty działań remontowych. Przykładem może być awaria w jednej ze spółek dystrybucyjnych transformatora o mocy 25 MVA, który w wyniku pożaru zniszczył pole średniego i wysokiego napięcia. Całościowy koszt usunięcia tej awarii wyniósł 6,5 mln zł czyli był ok. 10 razy większy od kosztów kompleksowego remontu jednostki tego typu.

Biorąc pod uwagę typową spółkę dystrybucyjną, szacunkowy koszt wdrożenia systemu TrafoGrade zwraca się już w przypadku, kiedy w wyniku działań prewencyjnych uda się zapobiec awarii tylko jednego transformatora.

Wprowadzając punktową skalę ocen i dostosowując instrukcje eksploatacji transformatorów do standardów metody TrafoGrade możliwe jest ograniczenie kosztów związanych z okresową diagnostyką. Indywidualne podejście do danej jednostki umożliwi ograniczenie zakresu badań w przypadku transformatorów znajdujących się grupie eksploatacji U, a także racjonalizację zakresu koniecznych pomiarów w grupie N i S.

## 9. PODSUMOWANIE

Zaproponowane w publikacji podejście do zarządzania transformatorami pozwala na prowadzenie racjonalnej gospodarki remontowej podnoszącej jakość i niezawodność eksploatowanych jednostek, oraz znaczące ograniczenie awarii, a w szczególności awarii katastrofalnych. Ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym umożliwia podjęcie działań zmierzających do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego sieci. W ocenie tej istotnym elementem jest przede wszystkim ważność odbiorców zasilanych z danego transformatora. Dane te w powiązaniu z oceną stanu technicznego pozwalają na rzeczywistą ocenę skutków awarii z uwzględnieniem kosztów związanych z niedostarczoną energią. Z punktu widzenia spółek dystrybucyjnych zapobieganie przerwom w dostawach energii elektrycznej istotne jest nie tylko z powodów ekonomicznych, lecz również marketingowych uwzględniających wizerunek

i markę firmy. Kompleksowa ocena stanu technicznego dostarcza wiele cennych informacji przydatnych w działaniach logistycznych oraz polityce finansowej przedsiębiorstw eksploatujących transformatory średnich i dużych mocy.

