

## Andrzej DRABCZYK<sup>1</sup>, Paweł MOLENDĄ<sup>1</sup>, Jacek KOPIEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENERGO – COMPLEX SP. Z O. O., ul. Lotników 9, 41-949 Piekary Śląskie

<sup>2</sup>PGE DYSTRYBUCJA S.A. ODDZIAŁ ZAMOŚĆ, Koźmiana 1, 22-400 Zamość

### Testowanie systemu TrafoGrade

#### Mgr inż. Andrzej DRABCZYK

Pracownik firmy ENERGO-COMPLEX. Zajmowane stanowisko: Specjalista ds. pomiarów. Informacje o uprawianej dziedzinie: Diagnostyka transformatorów.



e-mail: andrzej.drabczyk@energo-complex.pl

#### Mgr inż. Paweł MOLENDĄ

Pracownik firmy ENERGO-COMPLEX. Zajmowane stanowisko: Specjalista ds. pomiarów. Informacje o uprawianej dziedzinie: Diagnostyka transformatorów.



e-mail: pawel.molenda@energo-complex.pl

#### Inż. Jacek KOPIEL

Pracownik PGE Dystrybucja S.A. Oddział Zamość, Kierownik Wydziału Przetwarzania i Automatyki



e-mail: jacek.kopiel@gkpge.pl

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę i przykładowe wyniki oceny stanu technicznego transformatorów za pomocą systemu TrafoGrade opracowanego w firmie Energo-Complex. System składa się z czterech modułów: ocena stanu technicznego, ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym, analiza perspektyw eksploatacji oraz komputerowy system zarządzania. Podano przykłady zastosowania systemu TrafoGrade dla 29 transformatorów rozdzielczych zainstalowanych w jednej ze spółek dystrybucyjnych działających na terenie Polski.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka transformatora, stan techniczny transformatora, TrafoGrade.

### Testing of the TrafoGrade System

#### Abstract

The paper presents the TrafoGrade system which has been developed to support decisions to be taken in respect of power transformer operation. The system has been composed of four parts. The multi parametrical evaluation of the transformer's technical condition is the most important element of the system. Evaluation of the importance index of a unit in the power system is additional information that complements the project. It is based on analysis of such factors as easiness of transformer exchange or repair and reliability or safety of the power supply. Another step is to determine perspectives of further operation of each unit separately taking into consideration technical-economical aspects. Finally, results of analysis are put into a computer based management system which supports decisions to be taken in respect of transformer operation. The paper presents an example of the system implemented in one of the distribution companies in Poland.

**Keywords:** assessment, technical condition, operation planning, transformer, TrafoGrade system.

### 1. Wprowadzenie

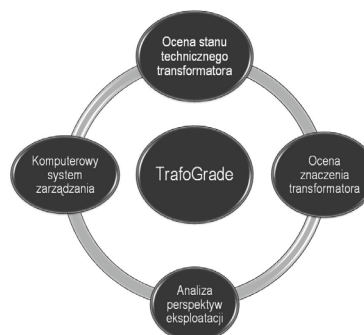
Obecnie na terenie Polski działa kilka spółek dystrybucyjnych, które eksploatują kilka tysięcy transformatorów średniej mocy. W większości są to transformatory o mocach 10, 16, 25 i 40 MVA. Ponad 50% jednostek eksploatowanych w polskim systemie elektroenergetycznym pracuje już ponad 30 lat [1]. Dlatego dla zapewnienia bezawaryjnej pracy sieci rozdzielczej niezbędna jest

znajomość stanu technicznego transformatorów, co wiąże się z koniecznością prowadzenia ich kompleksowej diagnostyki. Do spełnienia tego postulatu konieczne jest zastosowanie nowoczesnych i zaawansowanych metod diagnostycznych i systemów ekspertowych, które pozwalają na szczegółową ocenę stanu technicznego transformatora [2-7]. Problemem jest jednak ujęcie szczegółowych diagnoz w zbiorczy parametr charakteryzujący ogólną kondycję transformatora. Z drugiej strony nowoczesne podejście do eksploatacji transformatorów energetycznych powinno również uwzględniać ich znaczenie w systemie elektroenergetycznym. Dopiero powiązanie tych dwóch czynników pozwala na rzetelne określenie perspektywy dalszej eksploatacji jednostki oraz ekonomiczną analizę opłacalności koniecznych remontów lub wymiany transformatora [8]. Kierując się powyższymi przesłankami firma Energo-Complex przy współpracy z Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym oraz Politechniką Opolską opracowała kompleksowy system zarządzania transformatorami o nazwie TrafoGrade. Ideą systemu, który wprowadza punktową skalę oceny 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 [9].

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące systemu TrafoGrade oraz podano przykładowe wyniki oceny 29 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 TrafoGrade zarządzania transformatorami składa się z czterech modułów, które przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Moduły systemu TrafoGrade

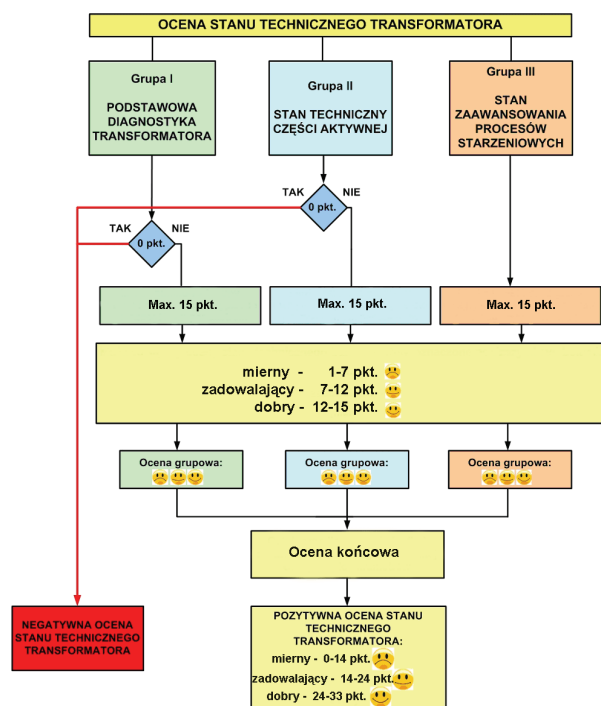
Fig. 1. Modules of TrafoGrade System

W 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 wartościowania: 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. Ocena stanu technicznego transformatora w systemie TrafoGrade oparta jest na analizie 14 charakterystycznych parametrów transformatora, które wyznaczane są podczas pomiarów, przy czym brane są pod uwagę dane archiwalne i historia badań. Uwzględniane są następujące parametry:

- analizy gazów rozpuszczonych w oleju (DGA),
- analizy odkształceń uzwojeń,
- pomiar zawilgocenia izolacji stałej,
- oceny historii pracy i wieku transformatora,
- pomiary napięcia przebicia oleju,
- wyników oględzin zewnętrznych,
- oceny podobciążeniowego przełącznika zaczepek (PPZ),
- oceny układu chłodzenia,
- oceny osprzętu transformatora,
- pomiary rezystancji izolacji,
- pomiary rezystancji uzwojeń,
- wyznaczenie stopnia degradacji celulozy,
- oceny wieku transformatora,
- oceny stopnia zesterzenia oleju.

Wszystkie składniki diagnostyczne podzielono na trzy charakterystyczne grupy właściwości (rys. 2):



Rys. 2. Algorytm oceny stanu technicznego transformatora metodą TrafoGrade  
Fig. 2. An algorithm for assessing the technical condition of the transformer by the TrafoGrade method

### Grupa I – Podstawowa diagnostyka transformatora

Grupa ta ujmuje najbardziej podstawowe cechy transformatora, których zły stan techniczny w istotny sposób nie wpływa na zdolność do pracy w ruchu elektrycznym. Tylko w skrajnych przypadkach, katastrofalny stan techniczny którejkolwiek z nich stwarza konieczność odłączenia jednostki od sieci. Założono przy tym, że usunięcie usterek dotyczących cech ujętych w tej grupie nie powinno stwarzać większych problemów technicznych i powinno

być relatywnie tanie. Jako przykład, można tu wymienić ocenę stanu technicznego osprzętu lub PPZ.

### Grupa II – Stan techniczny części aktywnej

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 akceptowalnej kondycji 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.

### Grupa III – Zaawansowanie procesów starzeniowych

Parametry grupa III w zasadzie nie dotyczą 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 fizykochemiczne 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. Algorytm postępowania przy wyznaczeniu końcowej oceny stanu technicznego pokazano na rysunku 2.

W procesie decyzyjnym dotyczącym polityki inwestycyjno – remontowej poza oceną stanu technicznego transformatora powinno się również 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. Należy przy tym podkreślić, że problematyka niezawodnościowa w spółkach dystrybucyjnych powinna w coraz szerszym zakresie uwzględniać koszty związane z wypłatą odszkodowań związanych z utratą produkcji u wybranych odbiorców pozbawianych dostawy energii choćby na krótki okres czasu. Doświadczenia krajów zaawansowanych technologicznie wskazują, że odszkodowania te mogą być wyższe od wieloletnich nakładów eksploatacyjnych dotyczących określonego fragmentu sieci elektroenergetycznej (linii, stacji, transformatorów).

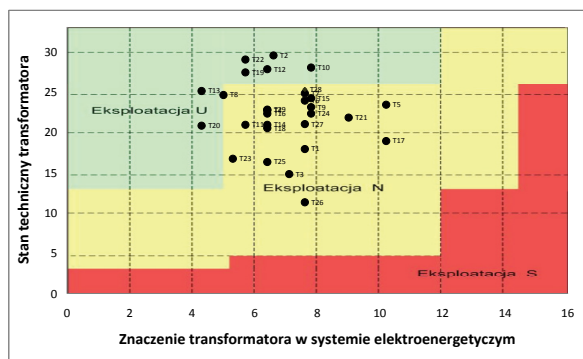
Stąd parametryczna ocena usytuowania transformatora w systemie przesyłowym lub rozdzielczym m.in. ze względu na charakter i kategorię odbiorcy jest niezwykle istotna. Ponadto dla optymalizacji kosztów eksploatacyjnych ważne są również inne dane dotyczące miejsca zainstalowania transformatora oraz zaplecza magazynowo-sprzętowego spółki dystrybucyjnej. W systemie TrafoGrade wszystkie te elementy są oceniane w skali punktowej poprzez analizę m. in.:

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

Powiązanie dwóch niezwykle istotnych z punktu widzenia działania spółki dystrybucyjnej atrybutów transformatora pozwala przypisać go do odpowiedniej grupy eksploatacyjnej. Na rysunku 3 przedstawiono rezultaty oceny 29 transformatorów należących do jednej ze spółek dystrybucyjnych, które przedstawiono na płaszczyźnie uzależniającej stan techniczny od znaczenia jednostki w systemie elektroenergetycznym.

System TrafoGrade pozwala podzielić całą populację jednostek na trzy zasadnicze grupy eksploatacyjne:

- 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

Fig. 3. Results of complex analysis of the transformer's technical condition and its importance in power system

Do pierwszej grupy (U) można zaliczyć jednostki wyróżniające się dwiema generalnymi 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) można przypisać te jednostki, które pełnią strategiczną rolę w systemie lub też transformatory o miernym stanie technicznym. Ich eksploatacja powinna być prowadzona w oparciu o indywidualne zalecenia. Oczywiście, w tym ujęciu każda grupa eksploatacyjna wymaga oddzielnej instrukcji eksploatacji, ale przyjęcie takiego systemu obsługi opartego o rzeczywisty stan techniczny i znaczenie transformatora prowadzi do realnej redukcji kosztów działania dystrybutorów energii elektrycznej.

Wynikiem końcowym kompleksowej oceny stanu technicznego transformatora jest opracowanie dla każdej jednostki perspektywy 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 technicznym.

Tab. 1. Przykładowe perspektywy eksploatacji transformatorów  
Tab. 1. Examples of transformer operation prospects

TORb 10000/110 rok prod. 1976, 14,8 pkt.	
Stan techniczny	Perspektywa eksploatacji
Liczne ślady korozji PPZ: głośna praca napędu DGA: w normie Zawilgocenie X = 3,3% Furany: brak Fizykochemiczne właściwości oleju: zle	Wskutek możliwego zjawiska bąblowania występuje podwyższone ryzyko dalszej eksploatacji Ograniczenia eksploatacyjne: - temperatura oleju do 75 °C, - nie odstawać do zimnej rezerwy w niskiej temperaturze. Przekroczona zawartość wody w oleju, zaleca się wirowanie oleju.
TNORCA 16000/110, rok prod. 1991, 29,5 pkt	
PPZ: zadowalający DGA: w normie Zawilgocenie X = 1,4%, Furany: brak Fizykochemiczne właściwości oleju: dobre	Brak ograniczeń w eksploatacji. W perspektywie 10 lat prawdopodobna potrzeba suszenia izolacji

Kolejny, nadrzędny moduł systemu TrafoGrade dotyczy komputerowego wspomaganie zarządzaniem populacją transformatorów. Wszystkie dane dotyczące oceny stanu technicznego, znaczenia w sieci oraz analizy perspektyw eksploatacji poszczególnych jednostek gromadzone są w systemie, który pozwala na dokonanie globalnej oceny całej populacji oraz identyfikację najważniejszych problemów technicznych. Należy przy tym podkreślić, że takie globalne ujęcie głównych czynników charakteryzujących populację

transformatorów stało się możliwe dzięki przyjęciu systemu parametrycznych ocen poszczególnych składników.

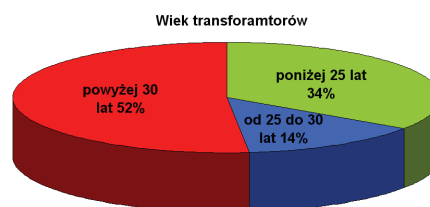
Do głównych zadań komputerowego modułu zarządzania można zaliczyć:

- 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 systemem TrafoGrade może być dopasowany do indywidualnych wymagań użytkowników z uwzględnieniem specyfiki danego przedsiębiorstwa energetycznego.

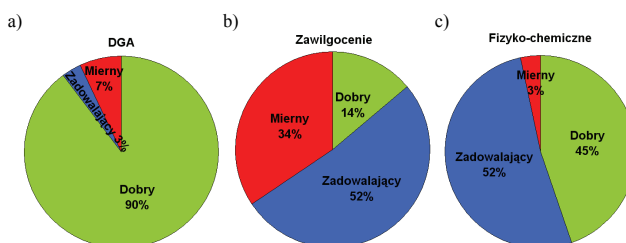
### 3. Przykład wdrożenia systemu TrafoGrade

System TrafoGrade wdrożono w jednej ze spółek dystrybucyjnych, w której kompleksową ocenę przeprowadzono dla 29 transformatorów rozdzielczych. Biorąc pod uwagę dane statystyczne dotyczące polskich spółek dystrybucyjnych łatwo zauważyć, że ze względu na czasookres eksploatacji badana populacja (rys. 4) jest reprezentatywna dla ogółu transformatorów rozdzielczych [1, 8, 9]. 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.



Rys. 4. Podział badanych transformatorów ze względu na czas eksploatacji  
Fig. 4. Distribution of surveyed transformers regarding their exploitation time

Spśród 29 przebadanych transformatorów 24 jednostki charakteryzują się stanem zadowalającym, a 5 - stanem dobrym. Na rysunku 5 przedstawiono analizy uogólnione dla całej populacji, dotyczące stanu technicznego wybranych składników grupy II właściwości transformatorów. Na ich podstawie uprawniona jest opinia, że tylko niewielki procent badanych jednostek ma poważne problemy techniczne, które mogą wymagać zaangażowania znacznych środków finansowych.



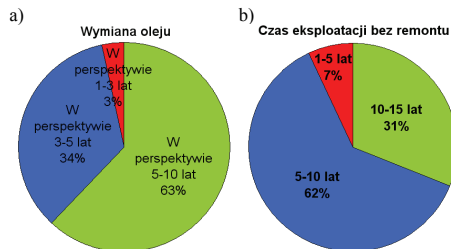
Rys. 5. Ocena populacji transformatorów ze względu na wybrane cechy stanu technicznego: a) analiza DGA oleju, b) zawilgocenie celulozy, c) analiza fizyko-chemiczna oleju

Fig. 5. Assessment of transformer population regarding some indicators of technical condition: a) oil DGA, b) moisture contents in cellulose, c) physico-chemical analysis of oil

Z kolei na rys. 6 przedstawiono wyniki zbiorczej analizy głównych problemów eksploatacyjnych. Wynika z niej, że dla podtrzymania dobrej kondycji transformatorów konieczne będą nakłady finansowe związane głównie z wymianą zestarzonego oleju oraz suszeniem izolacji. W przeważającej ilości przypadków zabiegi te pozwolą przedłużyć okres eksploatacji o kolejne 10-15



lat. Powyższe przykłady pokazują, że ocena kondycji transformatorów według metody TrafoGrade może być bardzo pomocna przy opracowywaniu założeń polityki remontowej i inwestycyjnej oraz pozwala na szczegółową techniczno-ekonomiczną analizę zamierzeń koniecznych do utrzymania akceptowalnej awaryjności transformatorów.



Rys. 6. Perspektywy eksploatacyjne: a) czas do wymiany oleju, b) szacowany czas eksploatacji bez remontu

Fig. 6. Operational prognosis: a) time to oil exchange, b) estimated time of operation without repairs

#### 4. Ekonomiczne aspekty wdrożenia systemu TrafoGrade

Klasykne podejście przy opracowywaniu wyników diagnostyki wymaga od właściciela jednostki wykonania analizy technicznej danych zgromadzonych najczęściej w kilku protokołach i na tej podstawie wyciągnięcia odpowiednich wniosków. Konieczna jest przy tym dobra znajomość szczegółowych zagadnień technicznych z zakresu diagnostyki transformatorów, która pozwala na samodzielną diagnozę ogólnej kondycji transformatora. Integracja wszystkich danych pomiarowych w systemie komputerowym oraz wprowadzenie punktowej skali ocen ułatwia tę diagnozę i umożliwia podjęcie decyzji przez kadrę menadżerską oraz służby finansowe, które z reguły takiej wiedzy nie posiadają. Ponadto system ten umożliwia w prosty sposób uchwycenie właściwego momentu, w którym stan techniczny danej jednostki można znacząco poprawić przy zaangażowaniu stosunkowo niskich nakładów. Realne korzyści finansowe płynące ze stosowania metody TrafoGrade można przedstawić na przykładzie transformatora o znacznym zawilgoceniu izolacji stałej, miernych parametrach oleju, ale posiadającego 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 PPZ,
- wymiana osprzętu.

Koszt remontu w takim zakresie szacuje się obecnie na około 300 000 zł. W zamian otrzymuje się jednostkę, którą w dobrym stanie technicznym można eksploatować nawet przez kolejne 15 lat. W ten sposób staje się realne utrzymanie w ruchu transformatorów nawet przez 50 lat.

Natomiast w przypadku miernego stanu technicznego transformatora należy podjąć decyzję o generalnym remoncie bądź wymianie jednostki. Przy czym decyzja ta, oprócz kondycji transformatora, powinna również uwzględniać takie czynniki jak:

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

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 eksploatacyjne. Przykładem może być awaria transfor-

tora o mocy 25 MVA w jednej ze spółek dystrybucyjnych. W wyniku jego pożaru zostało zniszczone pole średniego i wysokiego napięcia, zaś ciążnione koszty rewitalizacji stacji oraz usunięcia awarii wyniosły około 6,5 mln zł, czyli były kilkakrotnie większe od kosztów kompleksowego remontu jednostki tego typu.

Przytoczone wyżej dane dają podstawę do opinii, że w warunkach typowej spółki dystrybucyjnej, szacunkowy koszt wdrożenia systemu TrafoGrade zwraca się już w przypadku, kiedy w wyniku działań prewencyjnych uda się zapobiec awarii choćby tylko jednego transformatora.

Z kolei 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 umożliwia ograniczenie zakresu badań w przypadku transformatorów znajdujących się grupie eksploatacji U, a także racjonalizację zakresu koniecznych pomiarów w grupie N i S.

#### 5. Podsumowanie

Zaproponowane w artykule podejście do zarządzania transformatorami pozwala na prowadzenie racjonalnej gospodarki remontowej podnoszącej jakość i niezawodność eksploatowanych jednostek przy jednoczesnym znaczącym ograniczeniu awarii, a w szczególności awarii katastrofalnych. Ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym umożliwia podjęcie działań zmierzających do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego sieci. W tej ocenie istotnym elementem jest przede wszystkim charakter odbiorców zasilanych z danego transformatora oraz konfiguracja sieci dystrybucyjnej. Dane te w powiązaniu z oceną stanu technicznego pozwalają na ocenę skutków awarii z uwzględnieniem rzeczywistych kosztów związanych z niedostarczoną energią, do których coraz częściej należy również zaliczyć ewentualne odszkodowania z tytułu utraconej produkcji.

Istotną cechą metody TrafoGrade jest stworzenie podstaw do racjonalizacji planowania remontów oraz ekonomicznej analizy ich rentowności. Ponadto daje ona techniczne uzasadnienie do znaczącego wydłużania eksploatacji wybranych transformatorów.

#### 6. Literatura

- [1] Analiza awaryjności stacji transformatorowych SN/nn na przykładzie wybranych Spółek Dystrybucyjnych. Raport PTPIREE, Poznań, (2001, 2002).
- [2] Monasturskij A.E.: Ekonomiczeskije aspekty ekspuataciji transformatornogo oborudowanija. Metody i sredstva ocenki sostajaniija energiteczeskogo oborudowanija. Red. Tadzibajewa A.I. Wyp. 27, Sankt Petersburg (2005), s. 7 – 11.
- [3] Gulski E.: Diagnostowanie wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [4] Krüger M.: Transformer diagnosis – practical experience using simple methods like winding resistance measurement, dynamic tap changer testing, ratio, leakage reactance capacitance and dissipation factor measurement. Omicron Electronics GmbH Austria.
- [5] CIGRE-WG 12-05: An international survey on failures in large power transformers in service. Electra No. 88 1983, p. 21-48.
- [6] Szrot M., Płowucha J., Borucki S., Cichoń A., Subocz J.: Ocena stanu technicznego transformatorów energetycznych metodą TrafoGrade, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2008.
- [7] Facilities Instructions, Standards, and Techniques. Vol. 3-31, Transformer Diagnostics, June 2003, US Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- [8] Subocz J. (red.): Transformatory w eksploatacji. ISBN 978-83-924464-0-8. Energo-Complex, (2007).
- [9] Malewski R., Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Zaleski R.: Podstawy oceny opłacalności modernizacji transformatorów. Energetyka, 12, (2006), s. 884-891.