

## Marek SZROT<sup>1</sup>, Janusz PŁOWUCHA<sup>1</sup>, Jan SUBOCZ<sup>2</sup>, Sebastian BORUCKI<sup>3</sup>, Andrzej CICHON<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ENERGO – COMPLEX SP. Z O. O.

<sup>2</sup> POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA

<sup>3</sup> POLITECHNIKA OPOLSKA

### Ekonomiczne aspekty eksploatacji transformatorów z wykorzystaniem systemu TrafoGrade

#### Mgr inż. Marek SZROT

Absolwent Politechniki Śląskiej. Założyciel i Prezes firmy Energo-Complex Sp. z o.o. Autor 20 prac naukowych z zakresu eksploatacji transformatorów. Specjalizuje się w kompleksowej ocenie stanu technicznego transformatorów. Współtwórca miernika MT-3 do podstawowej diagnostyki transformatorów. Członek CIGRE.



e-mail: marek.szrot@energo-complex.pl

#### Mgr inż. Janusz PŁOWUCHA

Autor 16 prac naukowych z zakresu eksploatacji i diagnostyki transformatorów.



e-mail: janusz.plowucha@energo-complex.pl

#### Dr hab.inż. Jan SUBOCZ

Autor ponad 130 prac z zakresu elektrotechnologii, fizyki procesów relaksacyjnych w dielektrykach oraz diagnostyki urządzeń elektrycznych. Członek Komitetu Elektrotechniki PAN, Komisji Nauk Elektrycznych o/Poznań PAN, PKME SEP, IEEE.



e-mail: jan.subocz@ps.pl

#### Dr inż. Sebastian BORUCKI

Asystent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 50 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: s.borucki@po.opole.pl

#### Dr inż. Andrzej CICHON

Asystent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 50 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: a.cichon@po.opole.pl

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę i przykładowe wyniki diagnostyki transformatorów elektroenergetycznych prowadzonej z wykorzystaniem systemu TrafoGrade, który opracowano i wdrożono w firmie Energo – Complex. Scharakteryzowano poszczególne części składowe systemu takie jak ocena stanu technicznego, ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym oraz analiza ekonomicznych perspektyw eksploatacji. Przedstawiono również koncepcję stworzenia systemu komputerowego do zarządzania populacją transformatorów. Podano przykładowe analizy wykonane w oparciu o otrzymane wyniki pomiarowe z 45 transformatorów rozdzielczych zainstalowanych w jednej ze spółek dystrybucyjnych działających na terenie Polski.

**Słowa kluczowe:** ocena stanu technicznego, eksploatacja transformatorów, planowanie, system TrafoGrade.

#### Economic aspects of transformer operation with TrafoGrade system application

##### Abstract

Power transformers are significant part of assets owned by entities distributing and transferring electric energy. In Poland, there are several thousands of medium and high power transformers operated, while over 50% of them is older than 30 years, what means they have already

exceeded their planned lifetime. At present in Europe there are not sufficient production and financial means allowing to exchange most of transformers population in the close future. The only possibility is maximally to prolong the operation of already installed old units [1]. To help fulfilling this task Energo-Complex Ltd. has elaborated complex system of transformers management, named TrafoGrade, which is based on the point scale assessment of transformer's technical condition, its importance in the power grid and linking technical aspects of diagnostics with economic-financial factors to conduct decision process optimizing in the range of routine exploitation, repairs planning and investment policy [2]. The assessment of technical condition with TrafoGrade system is based on analysis of 15 parameters obtained from diagnostic measurements, divided into three groups (Fig. 2). The paper presents examples of technical condition assessment (Fig. 4, 5, 6) and describes operational possibilities for 45 distribution transformers installed in one of distribution companies operating in Poland. For the operation planning and rationalization, the technical condition of transformers was linked to their importance in power system (Fig. 7), which allowed to divide given population into three basic groups of further exploitation: transformers with simplified operation (U), transformers with normal operation (N) and transformers with special operation (S). TrafoGrade system is a modern tool for diagnostics and management of transformers. The complex assessment of technical condition gives a lot of important information to be applied in logistic actions and financial policy of transformers operators. The important advantage of TrafoGrade system is simple form of assessment presentation, helping to analyze results of measurement both by engineering staff and managing personnel without wide technical knowledge.

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

#### 1. Wprowadzenie

Uwolnienie rynku energetycznego w Polsce spowodowało zmiany w sposobie zarządzania majątkiem sieciowym. Konieczność ograniczenia kosztów związanych z działalnością przedsiębiorstwa energetycznego wiąże się z optymalizacją zarządzania majątkiem technicznym, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiego poziomu niezawodności. Zmniejszenie nakładów inwestycyjnych pociąga za sobą konieczność zwiększenia czasu eksplo-

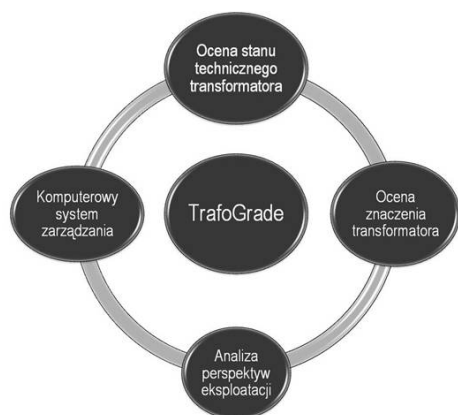
atacji poszczególnych elementów systemu elektroenergetycznego, przy jednoczesnym zachowaniu niskiego poziomu ryzyka wystąpienia awarii. Ma to szczególne znaczenie w odniesieniu do transformatorów, które stanowią ważny element systemu przesyłowo – rozdzielczego [1-5].

Ponad 50% transformatorów eksploatowanych w polskim systemie elektroenergetycznym pracuje dłużej niż 25 lat. Dlatego dla zapewnienia bezawaryjnej pracy sieci rozdzielczej niezbędna jest znajomość stanu technicznego transformatorów, co wiąże się z koniecznością prowadzenia ich kompleksowej diagnostyki. Nowoczesne podejście do diagnostyki transformatorów jest oparte na wieloparametrycznej ocenie stanu technicznego oraz określeniu perspektywy eksploatacji [6-7]. Kierując się powyższymi przesłankami firma Energo-Complex opracowała kompleksowy system zarządzania transformatorami o nazwie TrafoGrade. Ideą systemu, który wprowadza punktową ocenę 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 [8].

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące systemu TrafoGrade, a następnie w oparciu o jego założenia dokonano analizy perspektywy eksploatacyjnej populacji 45 transformatorów pracujących w jednej z polskich spółek dystrybucyjnych.

## 2. Charakterystyka systemu TrafoGrade

System TrafoGrade jest narzędziem służącym do kompleksowej oceny stanu technicznego transformatora z równoczesną analizą jego znaczenia w systemie elektroenergetycznym oraz analizą perspektywy eksploatacji. Na rys. 1 przedstawiono poszczególne elementy systemu TrafoGrade.



Rys. 1. Elementy systemu TrafoGrade  
Fig. 1. Components of TrafoGrade system

Przyjęto w nim 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. Ocena stanu technicznego oparta jest na analizie 15 charakterystycznych parametrów transformatora, które wyznaczane są podczas pomiarów, przy czym brane są pod uwagę również dane archiwalne i historia badań. Generalnie, w części technicznej systemu TrafoGrade parametry diagnostyczne podzielono na trzy grupy (rys. 2):

### Grupa I - Podstawowa diagnostyka transformatora

Jest to grupa ujmująca najbardziej podstawowe cechy transformatora, których zły stan techniczny w istotny sposób nie wpływa na zdolność do pracy w ruchu elektrycznym. Tylko w skrajnych

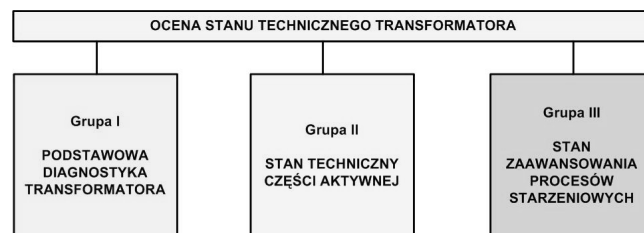
przypadkach, katastrofalny stan techniczny którejkolwiek z nich stwarza konieczność odłączenia jednostki od sieci. Założono przy tym, że usunięcie usterek w tej grupie cech nie powinno stwarzać większych problemów technicznych i być relatywnie tanie. Przykładowo, można tu wymienić takie cechy jak ocena osprzętu lub PPZ.

### 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 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.

### Grupa III - Zaawansowanie procesów starzeniowych

Parametry grupy III w zasadzie nie dotyczą problemów związanych z bieżącą eksploatacją transformatora, lecz są ukierunkowane na przewidywany „czas życia” oraz planowanie remontów i modernizacji. Dlatego nawet negatywna ocena któregoś z wskaźników w tej grupie nie eliminuje jednostki z ruchu, wymaga natomiast odpowiedniego zaplanowania remontu. W tej grupie przyporządkowano takie parametry jak np. wiek transformatora, czy też fizyko-chemiczne właściwości oleju transformatorowego.



Rys. 2. Ocena stanu technicznego transformatora  
Fig. 2. The assessment of transformer technical condition

Bardzo ważnym elementem systemu TrafoGrade jest ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym. Aby w sposób rzetelny i obiektywny ją przeprowadzić stworzono ankietę skierowaną do właściciela transformatorów, w której podaje on informacje dotyczące kategorii zasilanych odbiorców, miejsca zainstalowania jednostki w systemie elektroenergetycznym, technicznych możliwościach jej wymiany i rezerwacji w wypadku awarii, itp. W tej ankiecie trójstopniowej oceny poszczególnych parametrów i cech dokonuje właściciel transformatorów na bazie zgromadzonej wiedzy i doświadczenia eksploatacyjnego. Na końcową ocenę znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym składa się suma punktów przyznanych poszczególnym parametrom, przy czym uwzględniana jest waga każdego z nich.

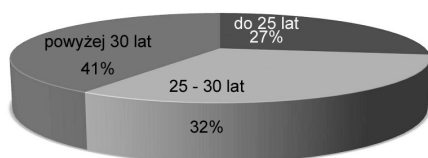
Liczba punktów oceniających ogólny stan techniczny oraz znaczenie transformatora w systemie pozwala na przypisanie badanej jednostki do jednej z trzech grup eksploatacyjnych. Są to grupy eksploatacji uproszczonej (U), normalnej (N) oraz szczególnego nadzoru (S). Do pierwszej grupy (U) zaliczono jednostki wyróżniające się w zasadzie dwiema cechami: są to transformatory o bardzo dobrej kondycji technicznej, bądź też ich znaczenie w systemie elektroenergetycznym jest niewielkie. W takich przypadkach bieżący serwis mógłby ograniczyć się jedynie do okresowych oględzin połączonych z analizą DGA oleju. Z drugiej strony do grupy „specjalnej troski” (S) włączono jednostki pełniące strategiczną rolę w systemie lub też o miernym stanie technicznym. W tym ostatnim przypadku zasady eksploatacji powinny być formułowane indywidualnie dla każdego transformatora. Doświadczenia amerykańskie oraz wstępne, dokonane przez autorów

analizy wykazały, że podział transformatorów na tak określone grupy eksploatacyjne może skutkować znacznym ograniczeniem kosztów diagnostyki i obsługi [8, 9].

Dalsze prace nad rozwojem systemu TrafoGrade związane są z budową komputerowego systemu zarządzania transformatorami. Tworzona aplikacja komputerowa będzie miała na celu m.in.: gromadzenie, przechowywanie i przetwarzanie wyników oceny stanu technicznego oraz perspektyw eksploatacyjnych badań jednostek transformatorowych.

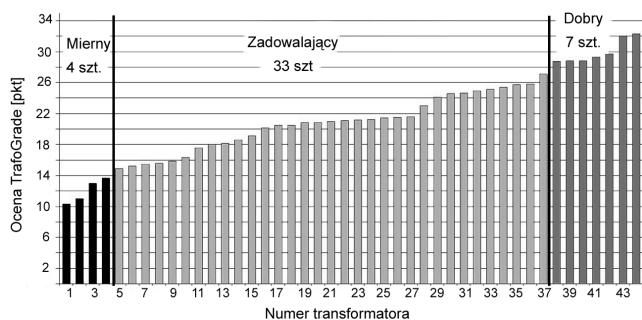
### 3. Ocena stanu technicznego i znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym

System TrafoGrade wdrożono w jednej ze spółek dystrybucyjnych, w której kompleksową ocenę przeprowadzono dla 44 transformatorów rozdzielczych. Na rys. 3 przedstawiono diagram kołowy przedstawiający okres eksploatacji badanej populacji transformatorów.



Rys. 3. Wiek badanych transformatorów  
Fig. 3. The age of tested transformers

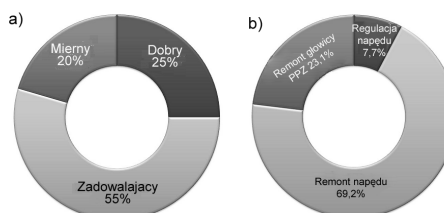
Biorąc pod uwagę dane statystyczne dot. polskich spółek dystrybucyjnych łatwo zauważyć, że z względu na czasookres eksploatacji populacja ta jest reprezentatywna dla ogółu transformatorów rozdzielczych. Dlatego należy się spodziewać, że otrzymana za pomocą metody TrafoGrade charakterystyka stanu technicznego, perspektywa eksploatacji oraz główne problemy techniczne dotyczyć będą również transformatorów użytkowanych przez inne polskie podmioty zajmujące się dystrybucją energii. Na uwagę zasługuje fakt, iż ponad 70 % transformatorów w analizowanej grupie charakteryzuje się dłuższym niż 25 lat czasem eksploatacji, a więc przekroczyło projektowany „czas życia”. Na rys. 4 przedstawiono wyniki oceny stanu technicznego transformatorów metodą TrafoGrade.



Rys. 4. Wyniki oceny stanu technicznego transformatorów metodą TrafoGrade  
Fig. 4. Results of technical condition assessment of transformers with TrafoGrade method

Spśród 44 przebadanych transformatorów 4 jednostki charakteryzowały się miernym stanem technicznym, 33 - stanem zadowalającym, a 7 - stanem dobrym. Bardziej szczegółowa analiza przyczyn obniżenia się oceny kondycji technicznej wykazała, że jednym z głównych problemów technicznych w eksploatacji transformatorów okazały się podobieżeniowe przełączników zacząpów (PPZ). Ocena ta jest zbieżna ze statystykami wykonanymi przez różne ośrodki na całym świecie, z których wynika że PPZ są przyczyną około 15-40 % katastrofalnych awarii [3, 8].

W odniesieniu do badanej populacji ogólną klasyfikację stanu technicznego PPZ oraz proponowany zakres prac remontowych pokazano na rysunku 5. Wynika z niego, że nie stwierdzono żadnych problemów technicznych tylko dla 25 % PPZ, natomiast stan techniczny 55 % był zadowalający, a dla aż 20 % PPZ stwierdzono uszkodzenia wymagające wykonania czynności serwisowych (rys. 5a).

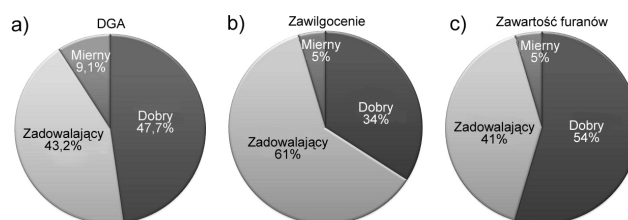


Rys. 5. Ogólna klasyfikacja stanu technicznego PPZ (a) oraz proponowany zakres prac remontowych (b)

Fig. 5. The general classification of technical condition of on-load tap changers (a) and suggested range of repairs (b)

Natomiast okazało się, że działania interwencyjne i remontowe, które należą wykonać w celu przywrócenia pełnej sprawności technicznej pracy PPZ można podzielić na trzy zasadnicze grupy (rys.5b). Pierwszą grupę stanowią zabiegi remontowe polegające wyłącznie na regulacji napędu (około 8 %), drugą - generalne remonty napędu (około 69 %) oraz trzecią - gruntowne remonty głowicy PPZ.

Korzyści płynące z oceny stanu technicznego według metody TrafoGrade można również przedstawić m.in. na przykładzie uogólnionych dla całej populacji transformatorów analiz takich niezwykle istotnych cech jak wyniki badań DGA oraz zawilgoceń i zesterzenia izolacji (rys. 6). Na podstawie badań DGA można stwierdzić, że tylko w ponad 9 % jednostek występują objawy uszkodzeń części aktywnej, które mogą w sposób istotny zagrażać pracy transformatora. Natomiast zawilgoceń, aż ponad połowy transformatorów było podwyższone, co oznacza że w najbliższym czasie (około 5 -7 lat) należy liczyć się z dość dużym zaangażowaniem finansowym związanym z koniecznością suszenia izolacji. Natomiast dla kilku procent populacji (około 5%) stan zaawansowania procesów starzenia oraz zawilgoceń izolacji celulozowej jest tak duży, że transformatory te kwalifikują się do niezwłocznego suszenia izolacji stałej lub do kapitalnego remontu obejmującego m.in. przewożenie. Jest to o tyle ważne, że obecnie stopień polimeryzacji celulozy, a tym samym wytrzymałość mechaniczna części aktywnej jest tak niska, iż zaistnienie zwarcia w systemie elektroenergetycznym może prowadzić do awarii katastrofalnej transformatora.

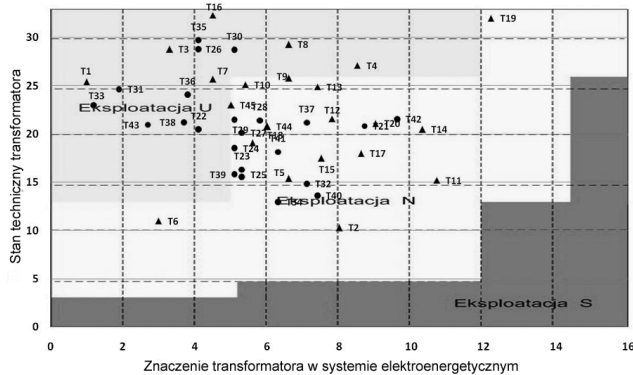


Rys. 6. Ocena populacji transformatorów ze względu na wybrane cechy stanu technicznego: analiza DGA oleju (a), zawilgoceń celulozy (b), zawartość 2-FAL (c)

Fig. 6. Assessment of transformer population from stand-point of some indicators of technical condition: oil DGA (a), moisture contents in cellulose (b), 2-FAL contents (c)

Uzupełnieniem analizy technicznej jest ocena znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym. Dopiero skojarzenie tych dwóch niezwykle istotnych z punktu widzenia działania spółki dystrybucyjnej atrybutów transformatora pozwala przypisać go do odpowiedniej grupy eksploatacyjnej (rys. 7). Należy przy tym zauważyć, że do danej grupy eksploatacyjnej mogą należeć transformatory o różnym stanie technicznym, ale ich obsługa

może być prowadzona w oparciu o jedną np. uproszczoną instrukcję (Eksploatacja U). Oczywiście w tym ujęciu każda grupa eksploatacyjna wymaga opracowania oddzielnej instrukcji, ale przyjęcie takiego systemu obsługi opartego o rzeczywisty stan techniczny i znaczenia transformatora prowadzi do realnej redukcji kosztów działania dystrybutorów energii elektrycznej.

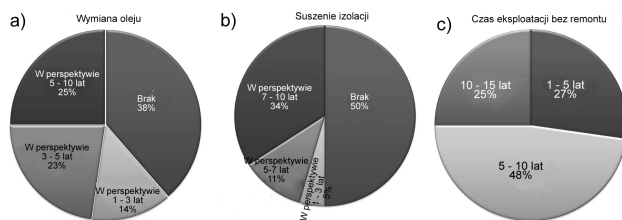


Rys. 7. Wyniki kompleksowej analizy stanu technicznego oraz znaczenia transformatora w systemie elektroenergetycznym

Fig. 7. Complex analysis results of transformer technical condition and their importance in power system

#### 4. Analiza perspektyw eksploatacji

Analiza wskaźników wykorzystywanych w systemie TrafoGrade pozwala na określenie perspektyw eksploatacji badanych jednostek. Na rys. 8 przedstawiono perspektywy eksploatacyjne wyznaczone dla analizowanej populacji 44 transformatorów.



Rys. 8. Perspektywy eksploatacyjne: czas pracy do wymiany oleju (a), suszenie izolacji stałej (b), szacowany czas eksploatacji bez remontu (c)

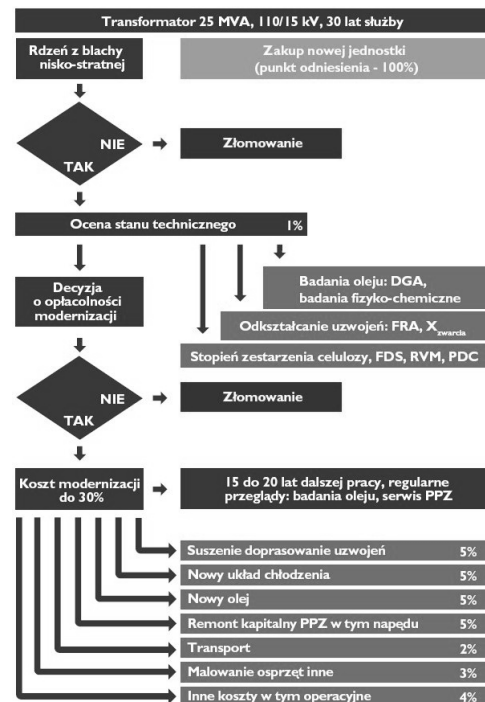
Fig. 8. The operational prognosis: time to oil exchange (a), drying of solid insulation (b), estimated time of operation without repairs (c)

Określona na podstawie wskaźników stanu technicznego perspektywa eksploatacji jest punktem wyjściowym dla przeprowadzenia analizy ekonomicznej. W przypadku złego stanu technicznego jednostki o dużym znaczeniu konieczne jest przeprowadzenie prac remontowych lub jej wymiana. Sposób postępowania przy podejmowaniu decyzji o modernizacji transformatora można zaprezentować na przykładzie typowego transformatora o mocy 25 MVA, 110/15 kV, który pracował przez 30 lat w sieci przy niewielkim obciążeniu i nie ulegał poważniejszym awariom. Kolejność czynności decyzyjnych oraz szacunkowy koszt modernizacji przedstawiono w postaci algorytmu na rysunku 9.

#### 5. Podsumowanie

Prezentowany system TrafoGrade jest nowoczesnym narzędziem stosowanym w diagnostyce i zarządzaniu transformatorami. Kompleksowa ocena stanu technicznego dostarcza wiele cennych informacji przydatnych w działaniach logistycznych oraz polityce finansowej przedsiębiorstw eksploatujących transformatory średnich i dużych mocy. Istotną zaletą systemu TrafoGrade jest prosta forma prezentacji wykonanej oceny, która pozwala analizować

wyniki badań zarówno przez kadre inżynierską, jak i nie posiadającym szerokiej wiedzy technicznej służby ekonomiczne.



Rys. 9. Analiza kosztów remontu transformatora [1]

Fig. 9. The analysis of transformer repair costs [1]

Wykonanie indywidualnej analizy perspektywy eksploatacji dla każdej jednostki prowadzi do obniżenia kosztów związanych z diagnostyką a także ułatwia podjęcie decyzji dotyczących wykonania niezbędnych prac remontowych lub wymiany danej jednostki.

Metoda TrafoGrade może być wykorzystana do uogólnionej, ilościowej oceny wpływu obciążenia, czasu i sposobu eksploatacji na jakość stanu technicznego populacji transformatorów.

#### 6. Literatura

- [1] Malewski R., Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Zaleski R.: „Podstawy oceny opłacalności modernizacji transformatorów”, *Energetyka*, 12, (2006), s.884-891
- [2] „Transformatory w eksploatacji”. Praca zbiorowa pod red. J. Subocza, ISBN 978-83-924464-0-8. Energo-Complex, (2007)
- [3] „Analiza awaryjności stacji transformatorowych SN/nn na przykładzie wybranych Spółek Dystrybucyjnych”. Raport PTPiREE, Poznań, (2001,2002)
- [4] Monasturskij A.E.: „Ekonomiczkeskie aspekty eksploatacji transformatorowego oborudowanija.” Metody i sredstva ocenki sostojanija energeticeskogo oborudowanija, red. Tadzhibajewa A.I., wydruk 27, Sankt-Petersburg (2005), s. 7-11
- [5] Gulski E.: „Diagnozowanie wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji”, *Of. Wyd. Politechniki Warszawskiej*, 2003.
- [6] 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*
- [7] CIGRE-WG 12-05: “An international survey on failures in large power transformers in service”, *Electra* No. 88 1983, s. 21-48
- [8] Szrot M., Płowucha J. Borucki S., Cichoń A., Subocz J.: „Ocena stanu technicznego transformatorów energetycznych metodą TrafoGrade”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2008
- [9] Facilities Insrtuctions, Standards, and Techniques, vol. 3-31, *Transformer Diagnostics*, June 2003, US Department of the Interior Bureau of Reclamation