

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

INFORMACJA O RAMOWEJ INSTRUKCJI EKSPLOATACJI TRANSFORMATORÓW

INFORMATION ON THE FRAMEWORK OPERATING INSTRUCTION FOR TRANSFORMERS

Streszczenie: Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów – RIET-2022 jest w polskiej elektroenergetyce Instrukcją podstawową. RIET-2022 uwzględnia aktualne przepisy prawne: Dyrektywy UE, Ustawy i Rozporządzenia obowiązujące w Polsce oraz aktualne normy europejskie. RIET-2022 może być wykorzystywana do opracowania Instrukcji stanowiskowych, do szkolenia pracowników i przez firmy diagnostyczne. Diagnostykę off-line transformatorów olejowych hermetycznych i transformatorów suchych RIET-2022 ogranicza do pomiaru rezystancji izolacji. W artykule badania diagnostyczne, wymienionych transformatorów, rozszerzono o badania polaryzacyjne izolacji, a dla transformatorów przekształtnikowych zaproponowano wzmocnienie izolacji zwojowej.

Abstract: The Framework Operating Instruction for Transformers – ROIT-2022 is the basic instruction in the Polish power industry. FOIT-2022 takes into account current legal regulations: EU Directives, Acts and Regulations in force in Poland and current European standards. FOIT-2022 can be used to develop Workplace Instructions, to train employees and by diagnostic companies. Off-line diagnostics of hermetic oil transformers and dry-type transformers FOIT-2022 is limited to the measurement of insulation resistance. In the article, the diagnostic tests of the mentioned transformers were extended with polarization tests of the insulation, and for the converter transformers it was proposed to strengthen the turn insulation.

Słowa kluczowe: transformatory, instrukcja eksploatacji, diagnostyka, badanie oleju

Keywords: transformers, operation manual, diagnostics, oil testing

1. Wstęp

Transformatory są najważniejszymi urządzeniami w przesyłce i dystrybucji energii elektrycznej i są pod szczególnym nadzorem kierowników firm w których są zainstalowane i pracują. Waldemar Olech, ówczesny kierownik Działu Transformatorów i Izolacji w firmie ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o. był inicjatorem organizowania co dwa lata konferencji pod hasłem Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów ZET. W roku 2022 odbyła się 12. Konferencja. On też był inicjatorem opracowania Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów (RIET), będącej od wielu lat w Polsce Instrukcją podstawowej, w której zapisano jak postępować z transformatorami od ich wyprodukowania do wycofania z eksploatacji. RIET jest akceptowana przez firmy ubezpieczeniowe. Instrukcja ma już kilka wydań [5], a każde jest aktualizowane zgodnie z wiedzą, potrzebami i wnioskami z Konferencji ZET. Zespół autorski RIET tworzą pracownicy: ZPBE Energopomiaru-Elektryka, fabryk produkujących transformatory, energetyki zawodowej i przemysłowej. Zespół autorski Instrukcji wydanej w 2012 roku liczył 26 osób, a przy nowelizacji RIET wydanej w 2022 roku brało udział 44 specjali-

stów. Koordynacja prac i uzyskanie jedności wymaga od Kierownika dużej wiedzy i umiejętności przekonywania. W niektórych punktach Instrukcji interesy producentów i firm eksploatujących transformatory nie są zgodne i uzyskanie konsensusu wymaga szerokiej i merytorycznej dyskusji. Instrukcja jest wykorzystywana w firmach w których pracują transformatory do szkolenia pracowników i opracowania Instrukcji Stanowiskowych Eksploatacji Transformatorów, a także jako poradnik w firmach diagnostycznych [6]. W tym artykule przedstawimy ważniejsze, naszym zdaniem, informacje dotyczące eksploatacji i diagnostyki transformatorów zapisane w RIET wydanej w 2022 r. (Rys. 1).

Waldemar Olech był inicjatorem wprowadzenia, do wykrywania uszkodzeń wewnętrznych transformatorów olejowych, chromatografii gazowej, to jest analizy gazów rozpuszczonych w oleju DGA (Dissolved Gas Analysis), a ZPBE Energopomiar, analizę chromatograficzną gazów w oleju, włączył do programu badań transformatorów już w 1975 roku (pierwszy w Polsce), trzy lata przed ukazaniem się publikacji IEC 599, dotyczącej interpretacji wyników DGA [8]. W roku 1992 z ZPBE Energopomiaru wydzieliła się Spółka ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o.



Rys. 1. Okładka RIET 2022

i Działu Transformatorów i Izolacji wszedł w skład tej Spółki i nadal pracuje nad rozwojem i wdrożeniem nowych metod diagnostyki transformatorów. ZPBE Energopomiar-Elektryka rozwinął kompleksową diagnostykę transformatorów opartą na badaniach oleju DGA. Aktualne osiągnięcia w tym temacie wprowadził do zmodernizowanej RIET 2022.

2. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów-2022

Instrukcja zawiera 8 Rozdziałów (97 str.):

1. Informacje ogólne;
 2. Transport i montaż transformatorów;
 3. Eksploatacja transformatorów;
 4. Obciążenie transformatorów;
 5. Gospodarka i eksploatacja oleju transformatorowego;
 6. Badania techniczne transformatorów;
 7. Postępowanie w czasie zakłóceń w pracy, uszkodzeń i pożaru;
 8. Kierowanie transformatorów do rewizji, remontu, modernizacji lub złomowania;
- oraz 20 Załączników (144 str.).

W rozdziale 1 podzielono transformatory na cztery grupy:

- I – olejowe o górnym napięciu znamionowym 220 kV i wyższym lub o mocy znamionowej 100 MVA i wyższej bez względu na napięcie;
- II – olejowe o mocy większej od 3,15 MVA nie zaliczone do grupy I;
- III – olejowe o mocy do 3,15 MVA włącznie;
- IV – w izolacji suchej i kompozytowej.

W rozdziałach 2 i 3, dla każdej z tych grup transformatorów, podano czynności które należy wykonywać. Na przykład w rozdziale 3 czynności przy włą-

czeniu i wyłączeniu transformatora danej grupy oraz przy obsłudze w czasie jego pracy.

Rozdział 4 koncentruje się na dopuszczalnych wartościach temperatur przy różnego rodzaju obciążeniach transformatorów z izolacją tradycyjną (klasa temperaturowa A), hybrydową mieszaną, półhybrydową i pełnohybrydową (klasa temperaturowa F). W tabelach i na rysunkach podano wyciągi z norm: PN-IEC 60076-7, PN-IEC 60076-14 i PN-IEC 60354:1999 dopuszczalnych obciążeń prądowych i termicznych transformatorów z wymienionymi izolacjami uzwojeń. Podano przykłady obciążeń cyklicznych (normalnych i awaryjnych) i ich wpływ na starzenie się izolacji. Zalecono wykorzystanie systemów monitoringu do pomiaru temperatury najgorętszego miejsca w uzwojeniu.

W rozdziale 5 zamieszczono podstawowe informacje o oleju elektroizolacyjnym i postępowanie z olejem w czasie: magazynowania, pobierania próbek, uzdatniania, badania i wymagania ekologiczne. Opisano alternatywne ciecze dielektryczne do napełniania transformatorów, są to oleje silikonowe, estry syntetyczne i estry naturalne. W tabelach zastawiono porównanie ich parametrów z parametrami oleju mineralnego. Końcowe 4 tabele zawierają wymagania dotyczące oleju do transformatorów grupy I, II i III.

Rozdział 6, w podrozdziale 6.1 wymieniono rodzaje badań technicznych transformatorów: odbiorcze nowych jednostek, po montażowe wykonane po zainstalowaniu, przed końcem gwarancji, w czasie eksploatacji, po awarii i po remoncie. W tabeli 6.1 zestawiono, dla transformatorów grup I do IV, zakresy pomiarów i prób po montażowych. Ważnym punktem 6.1.3 są badania techniczne transformatorów w eksploatacji w tym tabela 6.1 w której zestawiono zakresy badań okresowych transformatorów grup I do IV w której podano rodzaje pomiarów i badań, terminy wykonania i wymagania techniczne. Bardzo szeroki zakres badań dotyczy transformatorów grupy I i II. Badania okresowe transformatorów grupy III ograniczono do pomiaru, raz na 5 lat, rezystancji izolacji i badanie oleju, a transformatory olejowe hermetyczne tylko do pomiaru, raz na 5 lat, rezystancji izolacji. Transformatory suche (grupa IV) tylko do czyszczenia i pomiaru rezystancji izolacji raz na 5 lat. W podrozdziale 6.2 przedstawiono metody badań technicznych transformatorów i kryteria oceny. W badaniach tych najszerszej omówiono badania wskaźników izolacji. W stosunku do RIET-2012 dodano badanie rdzenia.

Ważne informacje dla eksploatacji zawiera rozdział 7, w którym w punkcie 7.1 opisano postępowanie w przypadku sygnalizacji I stopnia czujników pomiarowych nie powodujących samoczynnego wy-

łączenia transformatora, są to czujnik zaworu Buchholza, czujniki oleju oraz prądu i napięcia. W punkcie 7.2 podano postępowanie w przypadku samoczynnego wyłączenia transformatora, to jest w przypadku zadziałania II stopnia przekładników Buchholza, zabezpieczenia różnicowego i czujnika temperatury oleju. W punkcie 7.3 podano postępowanie w przypadku pożaru. W punkcie 7.4 postępowanie po wyłączeniu transformatora z grupy III bądź IV, a w punkcie 7.5 po zadziałaniu zabezpieczenia zintegrowanego.

Rozdział 8 w punkcie 8.1 zalecono aby kwalifikacja transformatora do: rewizji, remontu, modernizacji lub złomowania, bazowała na wynikach badań diagnostycznych. W punkcie 8.1 podano, że nominalny czas życia transformatorów wynosi 30 lat. Podano sposoby jak wydłużyć czas życia transformatorów do 40–50 lat.

3. Załączniki

1. Badania i pomiary off-line transformatorowych izolatorów przepustowych. Jest to instrukcja wykonania badań izolacji: $tg\delta$, pojemności C , rezystancji R_{60} , i oleju.
2. Eksploatacja mis olejowych pod transformatorem. Podano podstawy prawne oraz cechy ekologiczne stanowisk napowietrznych i w pomieszczeniach komór.
3. Praca równoległa transformatorów w tym wymagania dotycząca łączenia transformatorów i uzgadnianie faz.
4. Dobór bezpieczników SN i nN zabezpieczających transformatory grupy III zainstalowanych w stacjach słupowych i wewnętrznych. Opisano warianty zabezpieczeń i zasady doboru bezpieczników.
5. Dobór i eksploatacja ograniczników przepięć: iskiernikowe i beziskiernikowe oraz ich diagnostyka.
6. Pomiary i przegląd podobciążeniowych przełączników zaczepów. Przedstawiono przełączniki zaczepów kilku firm i opisano pomiary parametrów eksploatacyjnych: czasy własne, rezystancje rezystorów, pobór mocy przez układ napędowy, emisję akustyczną, badanie oleju, diagnostykę klatki wybierakowej i analizę przebiegu przełączania.
7. Badania specjalne oleju i izolacji papierowej. Przedstawiono zakresy badań, które można wykonać na próbce oleju pobranego z transformatora. W tabeli Z7.1 podano wytyczne do oceny stopnia zesterzenia się izolacji papierowej na podstawie zawartości wskaźnika 2FAL (aldehid furfurylowy).
8. Wybrane układy pomiarowe transformatorów: wskaźników izolacji, przekładni napięciowej, rezystancji uzwojeń, rezystancji rdzenia i badanie uzwojenia napięciem o zmiennej częstotliwości.
9. System monitoringu on-line stanu technicznego transformatora obejmuje wskaźniki diagnostyczne: zawartość wody i gazów rozpuszczonych w oleju, temperaturę uzwojeń i oleju, poziom wyładowań niepełnych, plus wskaźniki informujące o stanie technicznym izolatorów przepustowych i poprawności działania przełącznika zaczepów.
10. Ocena stanu technicznego transformatorów metodą analizy gazów rozpuszczonych w oleju. W tabelach Z10.1 do Z10.4 podano wartości typowe [ppm]: stężeń gazów, sumy gazów palnych i dopuszczalna dynamika przyrostów sumy gazów palnych oraz stosunek stężeń węglowodorów.
11. Postępowanie z transformatorami nieczynnymi obejmują: wskazówki ogólne magazynowania, części zapasowe oraz zabiegi konserwacyjne i pomiary kontrolne.
12. Uzdatnianie izolacji transformatorów i rewizje wewnętrzne w miejscu zainstalowania, w tym: regeneracja oleju, wymiana oleju, uzdatnianie izolacji stałej i rewizja wewnętrzna. Pomiary przed przekazaniem transformatora do eksploatacji.
13. Eksploatacja urządzeń kompensacji ziemnozwarciowej, są to dławiki, transformatory uzmiatające i rezystory. Podano czynności związane z załączaniem i wyłączaniem tych urządzeń, oraz zwrócono uwagę na badanie dławików.
14. Wymagania eksploatacyjne dotyczące przekładników Buchholza gazowo-przepływowych i przepływowych. Przedstawiono rysunek montażu przekładnika oraz wymieniono jakie czynności sprawdzające działanie przekładnika należy wykonać.
15. Pobieranie gazów z przekładnika Buchholza gazowo-przepływowego. Przedstawiono rysunek urządzenia do pobierania próbek gazów, których palność należy sprawdzić.
16. Ocena przeciwpożarowa transformatorów. Omówiono zabezpieczenie ppoż. transformatorów wewnętrznych i napowietrznych.
17. Transformatory suche są wykonane w klasach; A środowiskowej (E0 do E4), B klimatycznej (C0 do C4) i C palności (F1 i F2). Dla transformatorów suchych podano zasady: instalowania, uruchomienia, eksploatacji i konserwacji.
18. Wytyczne zamawiania transformatorów grupy I, grupy II, grupy III i grupy IV.

19. Transformatory przekształtnikowe. Wykazano, że wyższe harmoniczne napięcia i prądu generowane przez urządzenia energoelektroniczne podwyższają napięcie na układzie izolacyjnym uzwojeń i dodatkowo nagrzewają uzwojenia. Przytoczono wzory z normy PN-EN 50464-3 obliczania współczynnika K podwyższającego moc znamionową transformatora. Proponuje się także podwyższenie poziomu napięcia izolacji od strony DN.
20. Bibliografia (15 str.), która obejmuje:
- Ustawy i Rozporządzenia (18 pozycji),
 - Publikacje książkowe i artykuły (4 pozycje),
 - Broszury Techniczne (BT) CIGRE (18 pozycji),
 - Zestawienie wybranych norm związanych z tematyką Instrukcji (158 pozycji).

4. Komentarz do RIET-2022

RIET-2022 została opracowana z uwzględnieniem aktualnych przepisów prawnych: Dyrektyw UE i polskich Ustaw i Rozporządzeń. RIET-2022 uwzględnia również aktualne normy europejskie. Osoby zainteresowane oraz producenci i użytkownicy transformatorów, poszukując odpowiedzi na interesujące ich problemy, nie muszą szperać po wymienionych w Załączniku 20 dokumentach, aby znaleźć odpowiedź, gdyż jest ona w RIET-2022. Dlatego RIET-2022 jest cennym opracowaniem dotyczącym transformatorów energetycznych.

Transformatory olejowe hermetyczne (grupa III) i transformatory suche (grupa IV) w RIET-2022, w programie badań diagnostycznych (tabela 6.2, str. 81), naszym zdaniem, zajmują mało miejsca, a liczba tych transformatorów w układach przetwarzania energii jest dominująca, gdyż są to transformatory dystrybucyjne, a RIET-22 przewiduje tylko pomiar rezystancji izolacji raz na 5 lat. Naszym zdaniem dla wymienionych transformatorów należy mierzyć on-line temperaturę, a co 5 lat off-line:

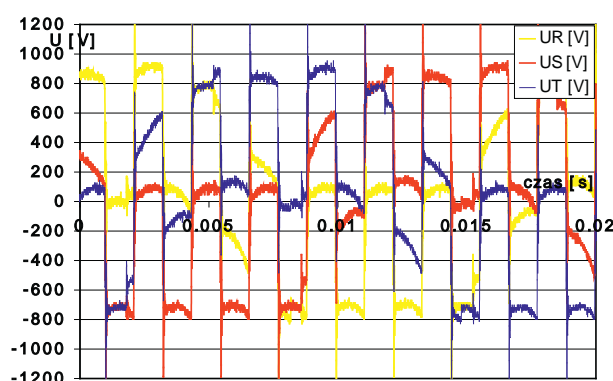
- rezystancję uzwojeń, gdyż wewnętrzne połączenia mogły ulec utlenieniu w skutek przegrzania;
- badania polaryzacyjne izolacji głównej i badanie izolacji zwojowej metodą wyłączenia prądu stałego w uzwojeniu [1].

Jeśli któryś z parametrów zmieni się więcej niż 10%, to pomiary należy powtórzyć za rok.

5. Transformatory przekształtnikowe

Osobnego omówienia wymagają transformatory przekształtnikowe. W Załączniku 19 podano przyczyny awaryjności transformatorów i propozycje wzmocnienia izolacji głównej, która naszym zda-

niem, nie rozwiązuje tego problemu. Według naszego doświadczenia przyspieszone starzenie izolacji w transformatorach przekształtnikowych powodują pochodne napięcia du/dt na układzie izolacyjnym. Komutacja prądu w zaworach energoelektronicznych powoduje skokowe zmiany prądu w zaworach, które na indukcyjnościach generują napięciowe impulsy Diraca. Konstruktorzy falowników stosują coraz wyższe częstotliwości impulsowania, gdyż im większa jest częstotliwość impulsowania tym zawartość wyższych harmonicznych w napięciu i prądzie jest łatwiejsza do odfiltrowania i filtry są mniejsze. Częstotliwość impulsowania przy tranzystorach tradycyjnych wynosi kilka kHz, a przy tranzystorach SiC nawet kilkadziesiąt kHz. Liczba impulsów napięcia przypadająca na jeden okres (20 ms) i stromość zmiany napięcia w czasie impulsu du/dt są proporcjonalna do częstotliwości przełączania tranzystorów. Dla układu izolacyjnego uzwojeń transformatora każda zmiana prądu tranzystora generuje dwa udary napięciowe. Na rysunku 2 przedstawiono wykres napięcia na układzie izolacyjnym transformator 670 kVA, 6/0,59 kV. Transformator zasila piec w odlewni poprzez falownik (3DC/1AC) o napięciu i częstotliwości regulowanej w przedziale $70 \div 9600$ Hz [2].



Rys. 2. Przebieg napięcia między fazami uzwojenia 590 V i kładź transformatora olejowego hermetycznego 670 kVA, 6/0,59 kV w czasie jednego okresu (20 ms)

Właściwości materiałów izolacyjnych: przenikalność magnetyczna względna ϵ_r , $\text{tg}\delta$ i wytrzymałość dielektryczna na przebicie elektryczne, są funkcją temperatury, napięcia i częstotliwości oraz zmiany natężenia pola elektrycznego. Izolacja zwojowa uzwojeń transformatorów energetycznych standardowo jest papierowa, a uzwojenie jest w oleju. Włókna celulozy są w oleju. Mikrostruktura układu izolacyjnego jest szeregowo-równoległa. Parametry dielektryczne celulozy i oleju są różne, np. celuloza na $\text{tg}\delta = 0,03$, a olej transformatorowy ma $\text{tg}\delta = 0,001 \div 0,002$. Współczynnik strat dielektrycznych ($\text{tg}\delta$) papieru jest około 20 razy większy od ($\text{tg}\delta$) ole-

ju mineralnego. Względna przenikalność elektryczna ϵ_r oleju mineralnego wynosi 2,2, a względna przenikalność elektryczna papieru około 4. Im większa jest różnica względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r , tym większa jest nierównomierność rozkładu natężenia pola elektrycznego w mikrostrukturze wewnętrznej izolacji. Energia ΔW pików napięciowego o wartości maksymalnej ΔU wynosi

$$\Delta W = \Delta U Q = (\Delta U)^2 C$$

Q – jest ładunkiem elektrycznym pików napięciowego w mikrostrukturze izolacyjnej.

Pojemność C jest proporcjonalna do ϵ_r . Mikro pojemność włókien celulozy jest dwa razy większa od pojemności oleju o tych samych wymiarach. W układzie równoległym energia ΔW przechodząca przez włókna celulozy jest dwa razy większa od energii przechodzącej przez olej. Parametry ϵ_r i $\text{tg}\delta$ oraz duża częstotliwość pików napięcia w układzie izolacyjnym wpływają na temperaturę włókien celulozy, a proces starzeniowy papieru w głównym stopniu zależy od temperatury. Wygrzanie nowego papieru w temperaturze 150°C przez 24 h powoduje utratę stopnia polimeryzacji ok. 50% w stosunku do wartości początkowej. Ma to negatywny wpływ na trwałość izolacji transformatora.

Drugim czynnikiem niszczącym izolację zwojową są wyładowania koronowe występujące w czasie pików napięcia. W konstrukcji uzwojeń maszyn elektrycznych izolacja zwojowa musi stanowić barierę do wystąpienia wyładowań koronowych przy $du/dt \leq 1600 \text{ V}/\mu\text{s}$). Naszym zdaniem w transformatorach przekształtnikowych należy wzmocnić izolację zwojową, aby także spełniała ten warunek.

6. Podsumowanie

Cały system elektroenergetyczny bazuje na transformatorach. Energia elektryczna od elektrowni do użytkownika jest transformowana co najmniej trzy razy. Transformatory pracujące w systemie elektroenergetycznym mają moc znamionową od kilkuset MVA do około 0,1 MVA (skala mocy $1 \div 10^4$). Dominującymi w tym systemie są transformatory olejowe. Nowe wydanie znowelizowanej Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów – 2022 dotyczy głównie transformatorów olejowych grupy I i II. Transformatory olejowe hermetyczne (grupa III) i transformatory suche (grupy IV) są ujęte marginesowo.

RIET-2022 jest cenną pozycją bibliograficzną, gdyż uwzględnia aktualne przepisy prawne: Dyrektywy UE, Ustawy i Rozporządzenia obowiązujące w Polsce oraz aktualne normy europejskie. RIET-2022. RIET jest adresowana do firm w których są zainstalowane i pracują transformatory, w których może być wykorzystana do opracowania Instrukcji stanowiskowych i do szkolenia pracowników. Firmy parające się pomiarami i diagnostyką transformatorów w RIET-2022 znajdują wytyczne jakie parametry transformatora należy mierzyć on-line i off-line, a także schematy układów pomiarowych i np. w badaniach układów izolacyjnych wartości kryterialne.

W artykule wskazano, że korzystnie byłoby aby następne wydanie RIET uzupełnić:

- rozszerzyć zakres badań off-line transformatorów olejowych hermetyczny i transformatorów suchych;
- w transformatorach dedykowanych do przekształtników zwrócić uwagę na możliwość występowania w izolacji zwojowej wyładowań koronowych i z tego względu izolacja zwojowa uzwojeń wymaga wzmocnienia.

Literatura

- [1] J. Bernatt, S. Gawron, T. Glinka, A. Polak: *Diagnostyka transformatorów olejowych hermetycznych i suchych*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 1/2022, s. 21-27, ISSN 0239-3646.
- [2] J. Bernatt, S. Gawron, T. Glinka, A. Polak: *Ochrona układu izolacyjnego transformatora współpracującego z falownikiem*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 1/2022, s. 41-44, ISSN 0239-3646.
- [3] *Instrukcja organizacji bezpiecznej pracy przy urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych*, Instytut Energetyki, Warszawa 1999.
- [4] *Ochrona sieci elektroenergetycznych od przepięć. Wskazówki wykonawcze do przepisów budowy urządzeń elektrycznych*, Instytut Energetyki, Warszawa 1999.
- [5] *Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów*, ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o. Gliwice, Kolejne wydania: 2001, 2006, 2012, 2022, ISBN 83-916040-4-5.
- [6] *Ramowa instrukcja eksploatacji transformatorów zainstalowanych w elektrowniach/elektrociepłowniach PKE SA*, Południowy Koncern Energetyczny SA, wersja 01.
- [7] *Advances in DGA Interpretation*, Broszura Techniczna CICRE, 771, 2019.
- [8] *Wytyczne do pobierania próbek gazu i oleju z elektrycznych olejowych oraz do analizy gazów wolnych i rozpuszczonych*, PN-EN 60567:2006.

Autorzy

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec