

doi:10.15199/48.2015.10.07

Badanie izolacji zwojowej transformatorów prądem stałym

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję badań diagnostycznych izolacji zwojowej transformatorów i maszyn elektrycznych. Metoda ta polega na zasilaniu uzwojenia prądem stałym, następnie wyłączenie prądu i rejestrację indukowanego na uzwojeniu napięcia. Przebieg napięcia, w zależności od parametrów izolacji zwojowej, może być aperiodyczny lub periodyczny. Przedstawiono schematy ideowe wyłączników elektronicznych jednostopniowego i wielostopniowych oraz przykładowe przebiegi zarejestrowanego napięcia, po wyłączeniu prądu stałego, na transformatorze olejowym o mocy 400 kVA i transformatorze suchym 800 kVA.

Abstract. The article presents the idea of diagnostic tests of winding-isolation in transformers and in electrical machines. In this method a direct current is feeding the winding, next the current is switched off and the voltage induced in the winding is being recorded. The Oscillations/wave of voltage - depending on the parameters of the winding insulation - can be aperiodic or periodic. Schematic diagrams of electronic switches both single-speed and multi-speed are presented in this article, as well as sample Oscillations/wave of voltage, recorded - after the current is switched off - on oil-transformer with a capacity of 400 kVA and on 800 kVA dry-transformer. (Examination of winding-isolation of transformers with the use of direct current).

Słowa kluczowe: Transformatory, uzwojenia, izolacja zwojowa, diagnostyka.

Keywords: Transformers, windings, winding-isolation, diagnostics

Wstęp

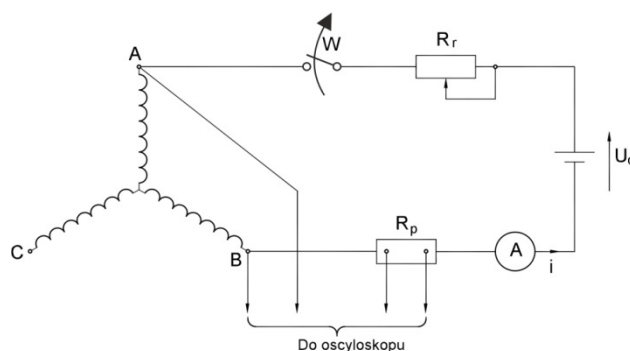
Badanie izolacji zwojowej jest prowadzone off-line i można je realizować przez:

- załączenie na uzwojenie impulsu napięcia, tzw. test Surge [3],
- wyłączenie prądu stałego i rejestrację fali napięciowej indukowanej w uzwojeniu [1, 2].

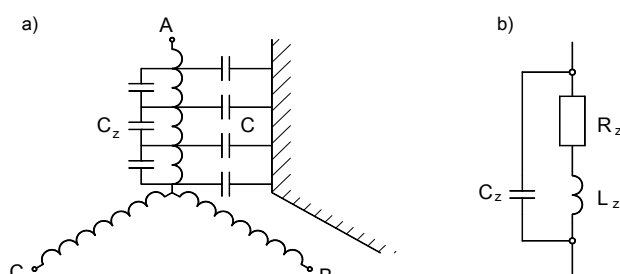
Metoda testu Surge jest propagowana przez firmy produkujące aparaturę do pomiarów diagnostycznych izolacji w tym generatory impulsów napięciowych. Metoda ta polega na załączeniu na uzwojenie naładowanego, do napięcia U_0 , kondensatora i rejestrację zanikania napięcia na uzwojeniu bądź prądu rozładowania. Wykonując rejestrację wymienionych przebiegów na trzech kolejnych fazach uzwojenia, porównuje się ich identyczność; to jest częstotliwość oscylacji i współczynnik tłumienia amplitudy. Zwarcie zwojowe, bądź znaczący spadek rezystancji izolacji zwojowej, zwykle nie występuje równocześnie na wszystkich fazach uzwojenia. Firmy produkujące aparaturę do badań diagnostycznych izolacji oferują aparaturę pomiarową do tych badań. Jednak metoda załączenia impulsu napięcia nie wydaje się być dobra. Załączenie skokowe naładowanego kondensatora na uzwojenie powoduje wzbudzenie zanikającej fali napięciowej. Uzwojenie dla fali napięciowej ma parametry (R , L , C) rozłożone, co powoduje, że napięcie nie rozkłada się równomiernie na poszczególne zwoje. Zwoje początkowe mają napięcie zwiększone, a zwoje końcowe mają napięcie zmniejszone. Izolacja zwojów początkowych jest narażona na większe napięcie i w czasie testu osłabia się, a może się także uszkodzić. Ponadto przebieg fali napięciowej jest zależny od pojemności kondensatora zasilacza, trudno jest zatem porównywać wyniki badań robione różnymi przyrządami pomiarowymi.

Metoda wyłączenie prądu stałego

Metoda wyłączenia prądu stałego bazuje na generacji napięcia probierczego w samym uzwojeniu. Uzwojenie zasila się prądem stałym, o znacznie mniejszej wartości od prądu stanu jałowego transformatora bądź prądu biegu jałowego maszyny elektrycznej i wyłącznikiem W przerywa się jego przepływ – (rys.1). W uzwojeniu dobrym pochodna zanikającego prądu generuje napięcie identyczne we wszystkich zwojach. Przebieg generowanego napięcia zależy wyłącznie od rezystancji i indukcyjności uzwojenia oraz pojemności izolacji zwojowej (R_z , L_z , C_z) – rysunek 2.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do diagnostyki izolacji zwojowej



Rys. 2. Pojemności izolacji głównej C i izolacji zwojowej C_z fazy A - a) oraz schemat zastępczy zwojowy fazy A - b)

Realizacja badań polega na zasileniu badanego uzwojenia prądem stałym o wartości znacznie mniejszej od wartości prądu stanu jałowego badanego uzwojenia. Wyłączenie prądu stałego wymusza przebieg nieustalony napięcia na uzwojeniu. W zależności od parametrów obwodu przebieg może być:

- aperiodyczny, gdy

$$\sqrt{\frac{L_z}{C_z}} < \frac{R_z}{2}$$

to

$$(1) \quad U(t) = L_z I_0 (\beta \sinh at + \alpha \cosh \beta t) e^{-at}$$

gdzie

$$\alpha = \frac{R_z}{2L_z}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{R_z^2}{4L_z^2} - \frac{1}{L_z C_z}}$$

I_0 – wartość początkowa prądu,
pozostałe oznaczenia jak na rysunku 2;

- periodyczny, gdy

$$\sqrt{\frac{L_z}{C_z}} > \frac{R_z}{2}$$

to

$$(1) \quad U(t) = U_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t)$$

gdzie

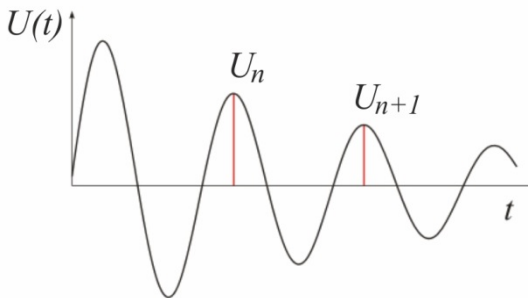
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_z C_z} - \frac{R_z^2}{4L_z^2}}$$

Pomiary wykonuje się oddzielnie dla każdej fazy uzwojenia. Gdy nie ma dostępu do punktu zerowego, bądź przy uzwojeniu połączonym w trójkąt bez możliwości jego rozłączenia. Pomiar przebiegu napięcia, po wyłączeniu prądu pobierczego, wykonuje się kolejno na fazach (AB, BC, CA). Ocenę stanu technicznego izolacji zwojowej można przeprowadzać na podstawie oceny następujących wielkości:

- wartości maksymalnej napięcia U_0 ,
- stałych czasowych narastania napięcia T_2 i zanikania napięcia T_1 ,
- częstotliwości napięcia indukowanego – f ,
- logarytmicznego dekrementu tłumienia indukowanego napięcia – Λ

$$(2) \quad \Lambda = \ln \frac{U_n}{U_{n+1}}$$

gdzie U_n i U_{n+1} oznaczają kolejne amplitudy rejestrowanego napięcia, jak to pokazano na rysunku 3.



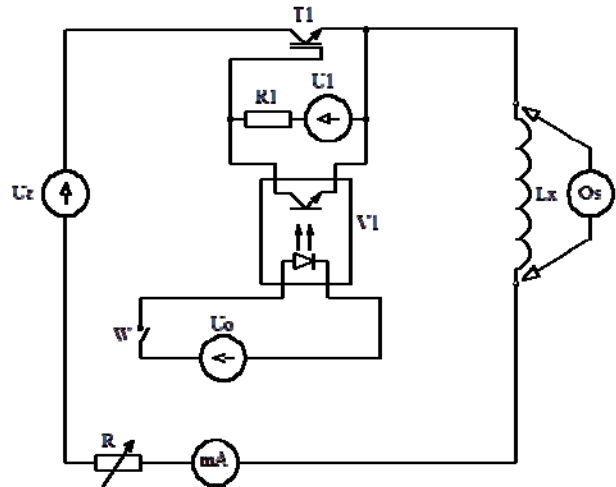
Rys.3. Definicja dekrementu tłumienia

Metodyka realizacji pomiarów

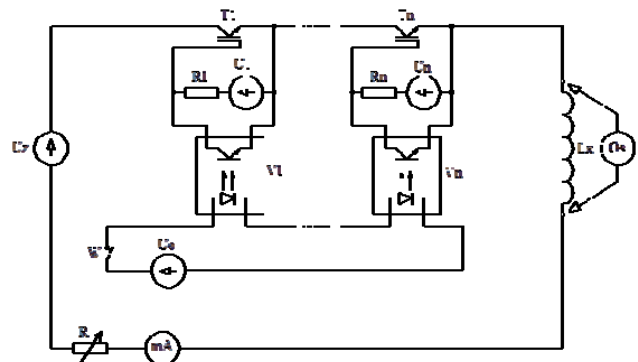
Podstawowym problemem przerywania prądu jest aby wyłączenie było: bezłukowe, możliwie szybkie i powtarzalne. Warunków tych nie spełniają wyłączniki elektromechaniczne. Energia zgromadzona w indukcyjności uzwojenia ($0,5L_z I^2$) w czasie rozwierania obwodu, stykami mechanicznymi, zawsze wzbudza łuk bądź iskrę. Łuk powoduje, że przebieg prądu wyłączenia jest za każdym razem inny, a przebiegi napięcia są niepowtarzalne. Aby wyłączenie prądu było bezłukowe należy stosować wyłączniki elektroniczne.

Układ pomiarowy zawiera trzy podstawowe urządzenia: zasilacz napięcia stałego U_z , wyłącznik elektroniczny T1 i oscyloskop pomiarowy Os. Zasilacz prądu stałego powinien mieć napięcie regulowane o wartości prądu dopasowanej do potrzeb pomiarowych. Na rysunku 4 pokazano

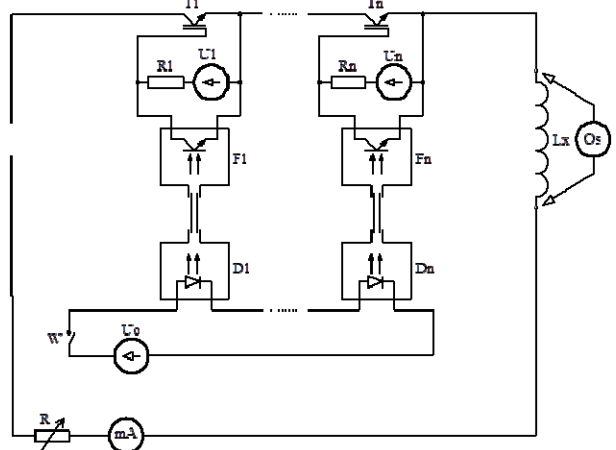
rozwiązania wyłącznika elektronicznego jednostopniowego. Zastosowany tranzystor T1 wyłączający nie może mieć diody ochraniającej. Całe napięcie indukowane na uzwojeniu, po wyłączeniu prądu, jest na tranzystorze T1. Maksymalnie dopuszczalną wartość napięcia wyłączenia determinuje zatem tranzystor. Z obecnie dostępnych na rynku tranzystorach, przydatnych do tego celu, można dobrać tranzystor na napięcie 1800 V.



Rys.4. Układ pomiarowy przebiegu napięcia na uzwojeniu, po wyłączeniu prądu stałego, z wyłącznikiem T1 jednostopniowym



Rys.5. Układ pomiarowy przebiegu napięcia na uzwojeniu, po wyłączeniu prądu stałego, z wyłącznikiem (T1 ÷ Tn) wielostopniowym sterowanym tranzystorami (V1 ÷ Vn)



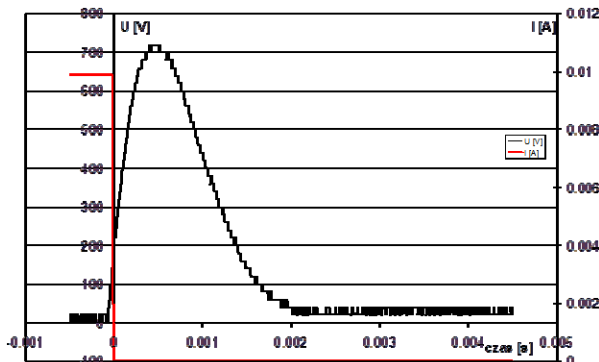
Rys.6. Układ pomiarowy przebiegu napięcia na uzwojeniu, po wyłączeniu prądu stałego z wyłącznikiem (T1 ÷ Tn) wielostopniowym sterowanym niskim napięciem z wykorzystaniem fotodiod (D1 ÷ Dn), światłowodów i fototranzystorów (f1 ÷ fn)

Dla badanych uzwojeń niskonapięciowych wyłącznik T1 spełnia swoją funkcję. Dla uzwojeń o napięciu znamionowym 6 kV, jeśli badania izolacji zwojowej chcemy robić napięciem zbliżonym do znamionowego, to należy zbudować wyłącznik wielostopniowy T1 ÷ Tn sterowany transoptorami V1 ÷ Vn, jak to pokazano na rysunku 5. Transoptory V1 ÷ Vn determinują maksymalną wartość napięcia probierczego do około 6 kV, gdyż na rynku są dostępne transoptory o maksymalnym napięciu izolacji do 6 kV. Dla napięć wyższych od 6 kV można zbudować układ z wyłącznikiem T1 ÷ Tn wielostopniowym sterowanym niskim napięciem z wykorzystaniem światłowodów, jak na rys. 6.

Do pomiaru prądu wykorzystuje się amperomierz bądź miliamperomierz mA lub przetworniki pomiaru prądu. Pomiar napięcia na uzwojeniu rejestruje się, poprzez sondę, oscyloskopem cyfrowym Os.

Badania eksperymentalne na transformatorach

Badania eksperymentalne wykonano na uzwojeniach transformatora olejowego i transformatora suchego. Na rysunkach 7 ÷ 9 przedstawiono przebiegi zarejestrowanego napięcia na transformatorze olejowym o parametrach: 400 kVA, 6,3 kV/400 V, 36,7 A/577 A, Dy₀, po wyłączeniu prądu stałego. Na rysunku 7 przedstawiono przebieg napięcia na uzwojeniu AB transformatora po wyłączeniu prądu stałego o wartości 9,9 mA. Przebieg napięcia jest aperiodyczny, opisany równaniem (1). Wartość maksymalna napięcia wynosi 720 V, stała czasowa narastania napięcia $T_2 \approx 10^{-4} s$, a opadania napięcia $T_1 \approx 8 \cdot 10^{-4} s$.



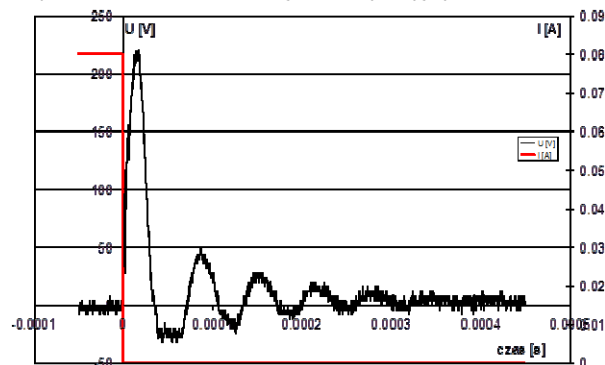
Rys.7. Przebieg napięcia na uzwojeniu AB po wyłączeniu prądu stałego o wartości $I = 9,9 \text{ mA}$

Transformator olejowy jest zamknięty, nie ma możliwości symulowania zwarcia zwojowego na jednym z uzwojeń, zatem pomiar przeprowadzono zasilając uzwojenie AB przy zwarcie uzwojenia wtórnego ax. Dla tego przypadku zarejestrowany przebieg napięcia jest oscylacyjny - rys.8. Częstotliwość oscylacji wynosi około 12 kHz.

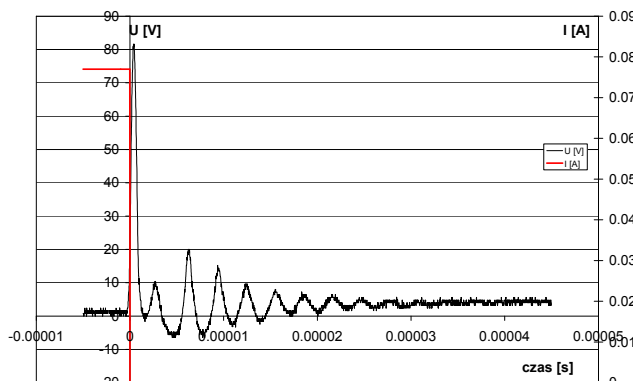
Kolejnym pomiarem było sprawdzenie izolacji zwojowej uzwojenia dolnego napięcia. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg napięcia na uzwojeniu ax po wyłączeniu prądu stałego o wartości 77 mA. W tym przypadku przebieg napięcia jest także oscylacyjny o częstotliwości oscylacji około 330 kHz.

Z przebiegów prądów i napięć na rysunkach 7 i 8 widać, że przy zwarcie uzwojenia ax prąd wyłączenia był 8,1 razy większy, a wartość maksymalna napięcia jest trzy razy mniejsza od wartości napięcia z rysunku 7. Jeśli wartości maksymalne napięcia odnieść do tej samej wartości prądu wyłączenia, to przy zwarcie uzwojenia ax, wartość maksymalna napięcia będzie wynosić 0,041 wartości maksymalnej napięcia z rysunku 7. Widać zatem jak wielką czułością, w identyfikowaniu zwarcia, charakteryzuje się ten

sposób pomiaru. Ponadto, z przebiegów napięć przedstawionych na rysunkach 7 i 8 widać, że przy zwarcie uzwojenia dolnego napięcia, na jednej z kolumn, przebieg napięcia zmienia charakter, jest oscylacyjny.

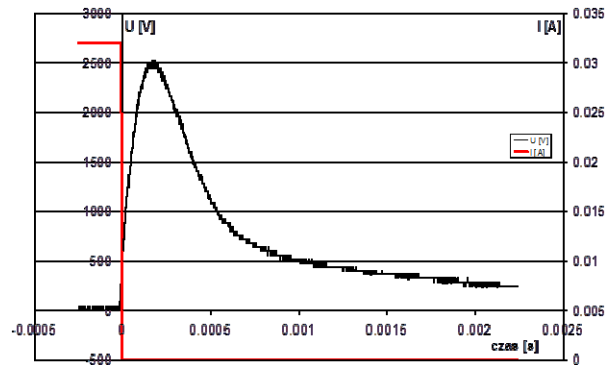


Rys.8. Przebieg napięcia na uzwojeniu AB po wyłączeniu prądu stałego o wartości $I = 80 \text{ mA}$, przy zwartym uzwojeniu ax



Rys.9. Przebieg napięcia na uzwojeniu ax po wyłączeniu prądu stałego o wartości $I = 77 \text{ mA}$,

Na rysunkach 10 ÷ 11 przedstawiono podobne przebiegi napięcia na transformatorze suchym o danych znamionowych; 800 kVA, 6,3 kV/400V, 73,4 A/1154 A, Dy₀.

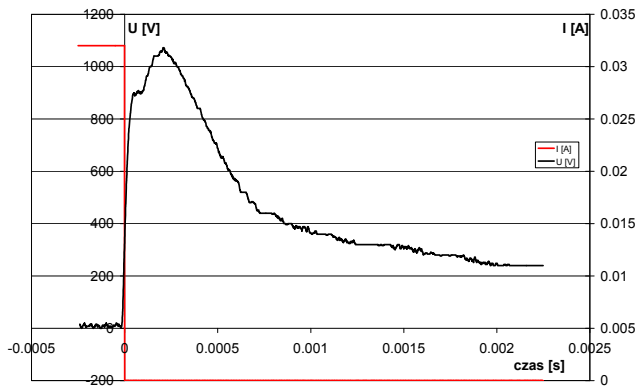


Rys.10. Przebieg napięcia na uzwojeniu AC po wyłączeniu prądu stałego o wartości $I = 32 \text{ mA}$

Na rysunku 10 przedstawiono przebieg napięcia na uzwojeniu AC transformatora po wyłączeniu prądu stałego o wartości 32 mA. Przebieg napięcia jest aperiodyczny, opisany równaniem (1). Wartość maksymalna napięcia wynosi 2500 V, a stałe czasowe: $T_2 \approx 5 \cdot 10^{-5} s$, $T_1 \approx 4 \cdot 10^{-4} s$, są zatem mniejsze niż w transformatorze olejowym.

Transformator suchy był otwarty i można było symulować zwarcie zwojowe przy pomocy dodatkowego zwartego zwoju założonego na kolumnie A. Przebieg napięcia po wyłączeniu prądu stałego, o wartości 32 mA, przedstawiono na rysunku 11. Wartość maksymalna

napięcia wynosi 1080 V, a stałe czasowe: $T_2 = 10^{-5}$ s, $T_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ s.



Rys.11. Przebieg napięcia na uzwojeniu AC po wyłączeniu prądu stałego o wartości $I = 32$ mA, przy dodatkowym zwoju zwartym na kolumnie A

Z porównania przebiegów napięcia, przedstawionych na rysunkach 10 i 11, widać, że przy zwoju zwartym (rys. 11) wartość maksymalna napięcia jest w przybliżeniu równa 0,43 wartości maksymalnej napięcia z rysunku 10. Obydwa przebiegi są aperiodyczne lecz stała czasowa narastania T_2 , jest wyraźnie mniejsza, a stała czasowa opadania T_1 , jest wyraźnie większa. Obydwa przebiegi napięcia są aperiodyczne.

Jak dotychczas nie przeprowadzono badań, tą metodą, na transformatorach energetycznych, np. na uzwojeniu transformatora wyeksploatowanego przed remontem oraz transformatora po wymianie uzwojenia. Jednak przedstawione wyniki badań, symulujących pogorszenie się stanu technicznego izolacji zwojowej poprzez zwarcia, pozwalają sądzić, że metoda ta może stać się obiektywną metodą diagnostyki izolacji zwojowej.

Przedstawiana metoda diagnostyczna izolacji zwojowej jest naturalnym rozszerzeniem metody oceny stanu technicznego izolacji napięciem stałym [2], stosowanej w diagnostyce maszyn elektrycznych, a także kabli.

Podsumowanie

Większość awarii uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych ma swój początek w zwarcich zwojowych. Stosowane metody diagnostyczne izolacji uzwojeń oceniają izolację główną. Jak dotychczas nie ma jednoznacznych metod diagnostyki izolacji zwojowej. Przedstawiona w artykule metoda badania izolacji zwojowej, poprzez rejestrację napięcia, po wyłączeniu prądu stałego, stwarza nadzieję, że metoda ta może stać się obiektywną metodą diagnostyki izolacji zwojowej transformatorów i maszyn elektrycznych.

Metoda jest prosta w realizacji, jednak warunkiem wykonana obiektywnych pomiarów jest poprawnie działający wyłącznik elektroniczny, przerywający prąd skokowo bez wyładowań łukowych.

LITERATURA

- [1] Glinka T., Polak A., Decner A.: Sposób badania diagnostycznego izolacji zwojowej. Patent RP Nr 210409. 31.01.2012 r.
- [2] Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka. Wydawnictwo Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. 2015 r. stron 287. ISBN 978-83- 931909-1-1.
- [3] SCHLEICH Advanced Test Technologies. Podręcznik diagnostyki uzwojeń.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice. E-mail: glinka.tadeusz@gmail.com, dr hab. inż. prof. Jakub Bernatt, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice. E-mail: jakub.bernatt@komet.katowice.pl. Dr inż. Artur Polak, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice. E-mail: labor@komet.katowice.pl. Dr inż. Andrzej Sikora, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki. Ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice. E-mail: Andrzej.Sikora@polsl.pl.