

Samochód pomiarowy do badań stanu technicznego transformatorów.

D. Denisov^{1*}, A. P. Aleev²
¹Megger GmbH, Baunach, Niemcy
²Megger, Moskwa, Rosja
*E-mail: denis.denisov@megger.com

Streszczenie— opracowanie stanowi opis autorskiej koncepcji zabudowy sprzętu do pomiarów i diagnostyki transformatorów na samochodzie w celu realizacji założenia mobilnego narzędzia do kompleksowej oceny stanu badanego obiektu w miejscu jego instalacji. Fundamentem systemu są podstawowe urządzenia diagnostyczne służące do pomiaru rezystancji izolacji, rezystancji uzwojeń, przekładni oraz zintegrowane we wspólnej zabudowie i sterowane za pomocą jednego stanowiska operatorskiego za pomocą którego można przeprowadzić pomiar oraz bezpośrednio wygenerować jednolity protokół z pomiarów. Okablowanie urządzeń pomiarowych jest tak skonstruowane aby jedno połączenie z badanym obiektem mogło obsłużyć kilka różnych testów bez konieczności zmiany układu połączeniowego. Jest to rozwiązanie znacznie skracające czas samych pomiarów. Opcjonalnie samochód pomiarowy może być wyposażony w kilka zaawansowanych narzędzi diagnostycznych takich jak analiza odpowiedzi częstotliwościowej FRA, ocena zawilgocenia izolacji papierowej DFR, pomiaru strat mocy czy źródło wysokiego napięcia HV do badań napięcia przebicia oleju transformatorowego.

Słowa kluczowe — samochód transformatorowy, rutynowe badania testowe, zaawansowana diagnostyka.

I. WSTĘP

Możliwość przeprowadzenia testów i kontroli okresowych w miejscu zainstalowania transformatorów to kluczowa i często jedyna możliwość wczesnego wykrycia poważnych wad prowadzących do awarii w sieciach elektroenergetycznych. Połączenie rutynowych badań elektrycznych i zaawansowanych technik diagnostycznych, zgodnie z IEC 60060-3, IEC 60076, IEEE Std. oraz normy GOST 11677-85 C57.12.00 można teraz wykonać za pomocą specjalnego systemu testowego. System ten zawiera niezbędne narzędzia diagnostyczne kluczowe do określenia zakresu problemu w zabudowie samochodu diagnostycznego Megger. Pogorszenie izolacji elektrycznej może być zidentyfikowane z badaniem izolacyjnym wysokiego napięcia (rezystancja izolacji, współczynnik rozproszenia i pomiaru pojemności, dielektryka czy odpowiedź częstotliwościowa). Uszkodzenia mechaniczne spowodowane transportem lub zużyciem materiału oraz uszkodzenia uzwojeń zidentyfikować można zazwyczaj się za pomocą pomiarów analizy odpowiedzi częstotliwościowej, pomiarów rezystancji uzwojeń i testów przełącznika zaczepek pod obciążeniem. Kontrola uchybu kąтового po naprawie lub instalacji w miejscu pracy transformatora daje możliwość weryfikacji jakości energii dostarczanej odbiorcom w sieci. Rutynowy test oleju

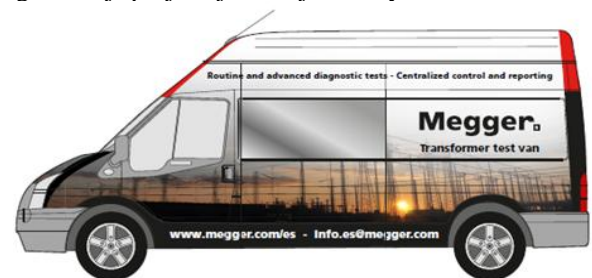
transformatorowego pomaga określić zawartość określonych gazów w oleju świadczących o istnieniu niekorzystnych zjawisk wewnątrz badanego obiektu. Aby wykonać te wszystkie badania potrzebne są różne zaawansowane urządzenia pomiarowe z własnymi przewodami pomiarowymi. Pomiary te są czasochłonne i skomplikowane a częste przełączanie instrumentów pomiarowych wymaga wspinania się operatora na obiekt co może prowadzić do wypadków. Koncepcja samochodu z zabudową do diagnostyki transformatorów rozwiązuje wszystkie te problemy. Przedstawione rozwiązanie składa się z scentralizowanego układu pomiarowego zbudowanego na bazie wieloletnich doświadczeń światowego lidera w produkcji urządzeń pomiarowych - firmy Megger. Jedno połączenie do badanego obiektu, automatyczne przełączanie między pomiarami, jedno stanowisko operatorskie z oprogramowaniem do przeprowadzania pomiarów a także analizy porównawczej wyników pomiarów i generowania sprawozdań powoduje że rozwiązanie to jest optymalnym wtedy, gdy szukamy uniwersalnego scalonego narzędzia do profesjonalnej diagnostyki transformatorów. W opracowaniu tym zawarto metody badań, strukturę raportów i niektóre wybrane przypadki pomiarów obiektu w miejscu zainstalowania aby zobrazować korzyści płynące z wyboru takiego rozwiązania.

II. ELEMENTY ZABUDOWY SAMOCHODU

Podstawą systemu są cztery zintegrowane systemy:

- Tester izolacji (5 kV megaomierz, np. S1-568),
- Tangens delta i pojemność (Delta4110),
- Rezystancja uzwojeń i przekładnia transformatora (MTO300 & TTR300).

Sprzęt pomiarowy jest zabudowany na samochodzie w zintegrowanej specjalnej szafie jak na Rys 1.





Rys 1. Zintegrowana zabudowa samochodu pomiarowego.

Standardowa zabudowa przewiduje umieszczenie w tylnej części pojazdu konstrukcji utrzymującej bębny kablowe wraz z kablami pomiarowymi o długości 30m.

Opcjonalnie możliwa jest rozbudowa systemu o:

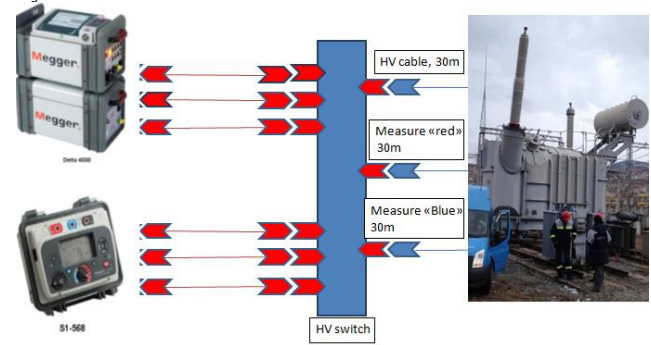
- Pomiar rezystancji uzwojeń i prądu nasycenia,
- Pomiar strat jałowych i strat obciążeniowych,
- Analiza odpowiedzi częstotliwościowej FDS,
- Badanie zawartości wody w izolacji (DFR),
- Jednofazowe źródło HV do 100 kV AC i 70 kV DC do prób napięciowych,
- Badanie oleju transformatorowego,

III. POMIAR REZYSTANCJI IZOLACJI

Badanie izolacji jest podstawowym elementem oceny stanu urządzeń elektrycznych. Na jakość i stan izolacji wpływ mają liczne czynniki termiczne, mechaniczne, elektryczne i środowiskowe. Silny wpływ tych czynników prowadzi do przyspieszenia procesów chemicznych (utleniania), zmian w strukturze materiału, zmniejszenie naprężeń mechanicznych, a czasami nawet rozwarstwienia izolacji. Wilgoć i zanieczyszczenia powierzchni są szczególnie szkodliwe dla izolacji transformatorów mocy. Wnikanie wilgoci ma szkodliwy wpływ i ostatecznie może doprowadzić do awarii. W trudnych warunkach pracy izolacja jest narażona na przyspieszone starzenie, pewne ogólne osłabienie parametrów (rozłożone równomiernie), a lokalnie mogą się pojawić defekty (przebiecia). Analiza gazu rozpuszczonego w oleju (DGA) jest bardzo dokładnym narzędziem oceny stanu izolacji, ale nawet wyniki DGA nie zawsze skutecznie potrafią zidentyfikować wszystkie możliwe wady w izolacji. Istnieje zatem zapotrzebowanie na badania diagnostyczne izolacji w miejscu zainstalowania transformatora.

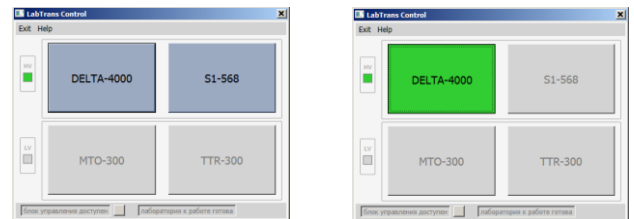
Najczęściej pomiary parametrów izolacji transformatorów i przepustów są prowadzone za pomocą megaomierza (Megger S1-568) i zestawu do badań współczynnika rozproszenia (tangensa delta) za pomocą zestawu testowego (Megger DELTA 4110). Wyniki tych badań stanowią integralną wartość warunku izolacyjnego i mogą wskazywać na obecność istotnych wad, a w niektórych przypadkach nawet zlokalizowania źródła defektów. Do pomiaru rezystancji izolacji transformatora stosuje się napięcie stałe o wartości kilku kV. Pomiar pojemności i współczynnika rozproszenia na izolacji uzwojeń jest prowadzony napięciem probierczym do 10 kV z wykorzystaniem podobnych rozwiązań jak

w przypadku pomiaru rezystancji izolacji. Pozwoliło to wykorzystać rozwiązania techniczne z obu urządzeń i zintegrować oba pomiary. Strukturę połączeń pokazano na Rys.2.



Rys 2. Przeliczanie pomiędzy testami izolacji DC i AC.

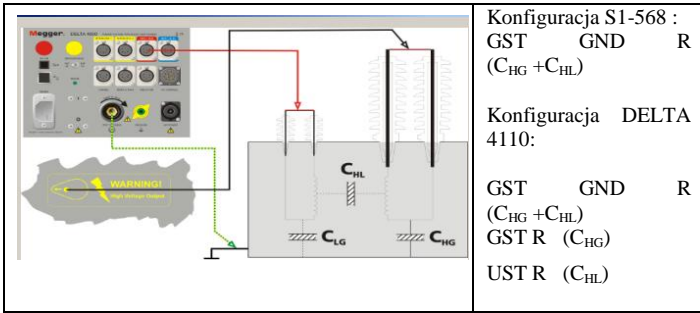
Oprogramowanie pomocnicze, które kontroluje poszczególne pomiary przedstawiono na Rys.3. Użytkownik pracuje z dwoma zestawami przewodów pomiarowych (HV oraz LV). Gdy określony zestaw przewodów pomiarowych jest połączony do badanego obiektu, urządzenie może być wybrane (włączone). Przykładowy schemat połączeń pokazano na Rys 5. Następnie urządzenie jest sterowane przez PowerDB czyli dedykowaną platformę oprogramowania do przeprowadzania testów, gromadzenia wyników i zarządzania nimi w bazie danych. Przykład programu pokazano na Rys.4.



Rys 3 Oprogramowanie wyboru testu diagnostycznego.

	Voltage (kV)	kVA	Rated I	# Taps	Nominal	Changer	Tap Setting
Primary				5	3	Off Load	
Secondary				1			

Rys 4. Przykładowy formularz raportów z pomiarów PowerDB.



Rys 5. Przykładowy schemat pomiaru przy jednokrotnym podłączeniu przewód pomiarowych do uzwojeń HV i LV badanego transformatora.

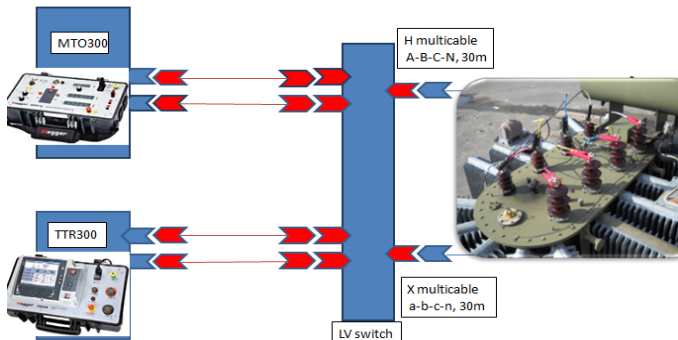
IV. WYZNACZENIE PRZEKŁADNI ORAZ UCHYBU KĄTOWEGO W TRANSFORMATORACH TRÓJFAZOWYCH

Do wykonania pomiarów przekładni transformatora oraz wyznaczenia uchybu kąтового przesunięcia godzinowego uzwojeń transformatora użyć można modułu urządzenia TTR. Pomiaru rezystancji uzwojeń dokonamy za pomocą wbudowanego omomierza transformatorowego MTO. Urządzenia te używają tego samego rodzaju kabli pomiarowych. Oznacza to że oba rodzaje pomiarów można wykonać jeden pod drugim bez konieczności zmiany podłączeń do poszczególnych uzwojeń badanego obiektu. Schemat podłączeń pokazuje rys 6. Zastosowane kable pomiarowe mają długość 30 m i zaopatrzone są na końcach w solidne zaciski Kelvina.



Rys 6. Schemat połączeń kabli urządzeń TTR i MTO do transformatora.

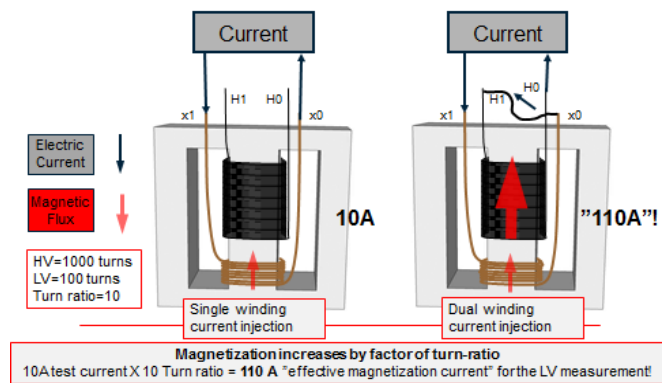
Taki układ połączeniowy pozwala na jednoczesny pomiar przekładni uzwojeń w trzech fazach. Pomiar powinien być przeprowadzony na wszystkich pozycjach przełącznika zaczeów niezależnie od tego czy jest to przełącznik podobciążeniowy OLTC czy bezobciążeniowy DETC. Dodatkowo moduł TTR wyznacza uchyb kątowy przesunięcia godzinowego w transformatorze.



Rys 6. Schemat przełącznika pomiędzy modułami TTR i MTO.

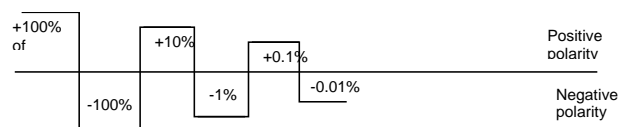
V. POMIAR REZYSTANCJI UZWOJEŃ

Pomiar rezystancji uzwojeń transformatora przeprowadza się w celu wykrycia uszkodzeń mechanicznych uzwojeń w transformatorze. Wszelkiego rodzaju zwarcia pomiędzy poszczególnymi zwojami oraz wady połączeń spawanych uzwojeń powinny zostać wykryte wskutek wyznaczenia różnic w rezystancji uzwojeń w poszczególnych fazach. Pomiar dokonywany jest jednocześnie w trzech fazach (6 uzwojeń) w uzwojeniach pierwotnych i wtórnych. Dodatkowo urządzenie pozwala diagnozować nieprawidłowe działanie podobciążeniowego przełącznika zaczeów OLTC mierząc czas pomiędzy przełączeniami poszczególnych styków przełącznika. Wszelkiego rodzaju anomalia są rejestrowane a skrajne przypadki uszkodzeń przełącznika zatrzymują automatycznie pomiar. W urządzeniu MTO zastosowano metodę jednoczesnego magnesowania wszystkich uzwojeń nawet w układach pomiarowych połączeń uzwojeń dolnego napięcia połączonych w trójkąt. Ideę zastosowania jednoczesnego magnesowania przedstawia Rys 7.



Rys 7. Zastosowanie metody jednoczesnego magnesowania.

Typowy zakres prądu pomiarowego zawiera się przedziale od 0,1% do 5% prądu znamionowego uzwojenia. Wyższy poziom prądu pomiarowego może powodować nagrzewanie się materiału uzwojenia i wprowadzanie dodatkowego błędu w układzie pomiarowym. W celu porównania wartości znamionowej rezystancji do wartości zmierzonej przyrząd może automatycznie dokonać korekcji temperaturowej o wskaźnik wyznaczony na podstawie odczytu rzeczywistej temperatury mierzonego obiektu. Różnice wyznaczonej rezystancji uzwojeń poszczególnych faz nie powinny być większe od 1%, a bezwzględne wskazanie po korekcie temperaturowej nie powinno przekroczyć 5% względem danych producenta transformatora. Po zakończeniu cyklu pomiarowego zaleca się przeprowadzenie procesu demagnetyzacji obwodów indukcyjnych. Proces ten odbywa się automatycznie poprzez cykliczną zmianę polaryzacji napięcia DC zmniejszając stopniowo jego wartość aż do całkowitego zaniku jak na Rys 8.



Rys 8. Cykl demagnetyzacji.

VI. POMIARY STRAT W TRANSFORMATORACH

A. Straty jałowe

Niektóre normy [5] określają układ testowy do badań strat jałowych przy niskim napięciu, jako główną metodę pomiaru prądu wzbudzenia i strat jałowych transformatora. Pomiar strat jałowych są zwykle wykonywane przy uruchomieniu i po remoncie transformatorów w celu identyfikacji zwarcia między zwojowego lub mechanicznego uszkodzenia rdzenia. Układ testu bez obciążenia jest zasilany napięciem 380/220 V. Napięcie testu przykłada się do uzwojenia wtórnego LV przy czym pozostałe uzwojenia pozostają otwarte. Korzystnym jest aby wzbudzić uzwojenia napięciem faza-faza 380 V. Jest to spowodowane tym, że napięcia między fazą a ziemią mogą być poddane wpływom harmonicznym i odkształcenia sinusoidy będą prowadziły do niedokładności w wynikach pomiarów. Dopuszczalne jest przeprowadzanie pomiarów strat jałowych napięciem o częstotliwości zbliżonej do wartości znamionowej 50 Hz +/- 3%. Dla transformatorów mocy wartości strat jałowych nie są określone normami, a więc w przypadku pomiaru częstotliwości z różnicą $\pm 3\%$ w zakresie tolerancji nie ma potrzeby wprowadzania korekt. Dla transformatorów trójfazowych straty jałowe są mierzone na zasadzie pomiaru między poszczególnymi fazami. Pozwala to nie tylko na porównanie strat między fazami i łatwą dyskryminację uszkodzonej fazy, ale również na porównanie ich z danymi dostarczonymi przez producenta. Dla przykładu uzwojenie fazy a jest uszkodzone, uzwojenia b i c są sprawne. Prąd I_{bc} oraz moc P_{bc} są mierzone (gdzie a, b, c - fazy LV, A, B, C - fazy HV). W sprawnym transformatorze trójfazowym wyznaczone straty P_{bc} i P_{ab} są prawie równe z dopuszczalną tolerancją $\pm 5\%$. Przy uszkodzonym uzwojeniu a, moc P_{ac} będzie wyższa na poziomie 20-25% (w zależności od rodzaju i ilości cewek) niż P_{bc} i P_{ab} . Nie ma potrzeby aby w celu uzyskania pomiaru strat jałowych odnosić napięcie testu do napięcia znamionowego transformatora. Wynik pomiaru jest raczej stosunkiem zmierzonej wartości strat jałowych do danych katalogowych dostarczonych przez producenta transformatora w miejscu instalacji, przy czym pomiary powinny odbywać się w takich samych warunkach (niskie napięcie). Producenci transformatorów zwykle mierzą straty jałowe niskim napięciem pomiarowym (380 V). Różnice w stosunku do wartości podanych przez producenta powinna być niższa niż 10% dla pojedynczej fazy i poniżej 5% dla transformatorów trójfazowych. Straty powinny być mierzone przed pomiarem rezystancji uzwojeń aby uniknąć nagrzewania się uzwojeń i wprowadzania dodatkowego błędu. Należy podkreślić, że transformatory o podobnej budowie i napięciu testu wykazują podobne wartości strat jałowych między fazami, bez względu na to, czy mierzone napięciem przyłożonym do strony wtórnej czy też znamionowym do strony pierwotnej badanego transformatora.

B. Straty obciążeniowe

Złożona impedancja zwarcia (Z_k) transformatorów o mocach 125 MVA i większych, ustalana jest w celu wykrycia ewentualnych uszkodzeń uzwojeń i odkształceń będących

skutkiem wystąpienia prądów zwarciovych w trakcie pracy transformatora [5]. Informacja ta wynika z porównania do początkowej Z_k zmierzonej przez producenta. W dokumentacji producenta początkowe wartości podano jako średnia z trzech faz, jednak użycie wymienionych danych jako parametru odniesienia nie jest zalecane, ponieważ odkształcenie w jednym z uzwojeń może zostać pominięte lub ukryte w średniej dla trzech faz. Zaleca się porównanie wartości fazowych dla Z_k , a jako punkt odniesienia należy przyjąć wartości mierzone przed uruchomieniem. Do kontroli impedancji zwarcia uzwojenia w transformatorze jednofazowym można skorzystać z danych dostarczonych przez producenta. Napięcie i prąd w stanie zwarcia są określone przy niskim napięciu testowym (380, 220 V). Układ testowy do wyznaczania Z_k w stanie zwarcia transformatora tworzą zasilone uzwojenia pierwotne i zwarte uzwojenia na zaciskach po stronie niskiego napięcia, jak pokazano na Rys 9. Transformator trójfazowy zasilony jest napięciem trójfazowym, ale prąd i napięcie jest mierzone w poszczególnych fazach kolejno. Woltomierz i amperomierz są odczytywane w tym samym czasie wraz z częstotliwością. Zmierzona wartość impedancji zwarcia w Omach powinna być uzyskana w warunkach testowych 50 Hz. Ocena stanu odbywa się na podstawie porównania ΔZ_k do maksymalnej impedancji dopuszczalnej zgodnie z normami. Transformatory i autotransformatory wyposażone w OLTC kontrolowane powinny być poprzez pomiar prądu i napięcia przy nastawie znamionowym odczepu oraz w dwóch skrajnych położeniach podobciążeniowego przełącznika zaczełów OLTC.

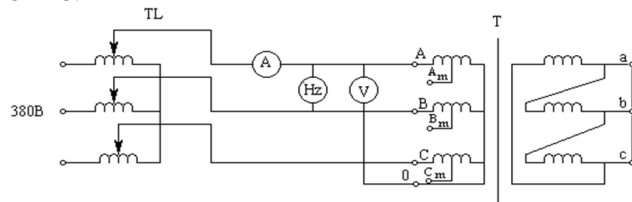


Fig. 1. Układ pomiarowy do wyznaczania Z_k

Przeprowadzenie odrębnych testów w takich położeniach przełącznika odczepów pozwala kompleksowo sprawdzić stan uzwojenia w każdej jego konfiguracji połączeniowej. Podczas testów zaleca się unikać częstych przełączeń kabli pomiarowych. Dla transformatorów 3-fazowych Procedura pomiarowa powinna odbywać się w sekwencji: HV-LV, MV-LV, HV-MV. Do pomiaru powinny być użyte maksymalnie najkrótsze przewody o przekroju żyły nie mniejszym niż 30% wymiaru przewodów uzwojenia wtórnego badanego transformatora.

PODSUMOWANIE

Koncepcja samochodu transformatorowego łączy rutynowe testy elektryczne, zaawansowane techniki diagnostyczne oraz umożliwia pełną kontrolę stanu transformatora w miejscu jego zainstalowania. Doświadczenia pomiarowe w terenie wykazały, że zautomatyzowany wybór instrumentu i przejście przez wszystkie niezbędne procedury przygotowania do badań wprowadzają znaczną oszczędność czasu pracy szacowaną na ponad 70% względem tradycyjnych

rozwiązań. Centralny komputer zbiera wszystkie wyniki pomiarów a zintegrowana baza danych umożliwia dostęp do zgromadzonych danych oraz porównanie danych z poprzednich badań i ewentualną ocenę tendencji zmian stanu transformatora w miarę upływu czasu. Wielokrotne badania wykazały, że dokładność pomiaru pozostaje zgodna ze specyfikacją pojedynczego instrumentu.

LITERATURA

- [1] IEEE C57.12.90-2006, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [2] IEEE C62-1995, IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors (to be replaced by C57.152)
- [3] IEC 60076-1, Power transformers – Part 1: General
- [4] GOST 11677-85, Power Transformers (in Russian)
- [5] CIGRE TB 445, Guide for Transformer Maintenance
- [6] B. Hembroff, M. Ohlen, P. Werelius, A Guide to Transformer Winding Resistance, Application Notes, April 2010