



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA: NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych

Autor: mgr inż. Bartłomiej Adamczyk

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Marek Florkowski

Praca wykonana: Centrum Technologiczne ABB w Krakowie
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Kraków, 2023

STRESZCZENIE

Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych

Transformatory energetyczne są narażone na oddziaływanie szybkozmiennych przepięć w warunkach eksploatacji oraz w czasie prób odbiorczych. Ich przebiegi stanowią źródło przepięć wewnętrznych w uzwojeniach oraz narażają układy izolacyjne transformatorów. Ze względu na budowę i wynikający z niej schemat zastępczy RLC uzwojenia, przepięcia wewnętrzne mogą mieć odmienny charakter niż napięcie wymuszające, a w pewnych przypadkach mogą być wzmacniane w wyniku zjawiska rezonansu. Odpowiedź uzwojenia na pojawiające się przepięcie jest uzależniona od sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych jego części składowych, zatem uzwojenia o różnej konstrukcji zachowują się odmiennie w czasie oddziaływania przepięć. Narażenia przepięciowe izolacji uzwojeń są w uzależnione od nieliniowości początkowego rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia, który wynika ze stosunku pojemności doziemnych i szeregowych uzwojenia. W praktyce poprawę tego rozkładu uzyskuje się stosując przeplatanie zwojów w cewkach, stosowanie ekranów elektrostatycznych lub wplatanie specjalnych zwojów ekranujących pomiędzy zwoje robocze uzwojenia. Metody te mają różną skuteczność w poprawie odporności uzwojenia na pojawiające się przepięcia, zatem wybór odpowiedniego sposobu poprawy początkowego rozkładu napięcia powinien być poprzedzony wnikliwą analizą w przypadku każdego transformatora.

Problematyka niniejszej pracy doktorskiej dotyczy analizy zjawisk przepięciowych w różnych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych. Zakres pracy obejmował badania eksperymentalne rozkładów przepięć prowadzone na rzeczywistych uzwojeniach transformatorów oraz symulacje numeryczne rozkładu pola elektrostatycznego w modelach uzwojeń o konstrukcji warstwowej oraz cewkowej. Analizy wyników badań eksperymentalnych obejmowały pomiary rozkładów przepięć w uzwojeniach przy wymuszeniach szybkozmiennych oraz wyznaczenie pseudo-początkowych rozkładów napięcia w uzwojeniach i rozkładów przepięć maksymalnych. W przypadku uzwojenia warstwowego badano m.in. wpływ obecności lub braku ekranów oraz ich polaryzacji względem uzwojenia na rozkłady przepięć maksymalnych. Analiza symulacyjna dotyczyła wpływu konstrukcji uzwojeń na kształty początkowych rozkładów potencjału elektrostatycznego oraz wynikających z nich narażeń izolacji. Analizowano zmianę tych narażeń wynikającą ze zmian konstrukcyjnych w uzwojeniu, polegających na zastosowaniu ekranów, pierścieni ekwipotencjalnych oraz różnych metod przeplatania zwojów w cewkach.

Przeprowadzone badania eksperymentalne, symulacje numeryczne i analizy pozwoliły na wyciągnięcie praktycznych wniosków oraz sformułowanie zaleceń konstrukcyjnych, które mogą być użyteczne w procesie projektowania i obliczania transformatorów energetycznych oraz w celu doskonalenia konstrukcji transformatora pod kątem poprawy odporności przepięciowej.

Spis treści

1	Wstęp i motywacja.....	4
2	Wprowadzenie, cel i teza pracy	5
3	Struktura i zakres rozprawy doktorskiej	6
4	Podsumowanie i ważniejsze wyniki oraz wnioski	7
5	Literatura	15

1 Wstęp i motywacja

Transformatory to kluczowe elementy układów elektroenergetycznych. Ich niezawodność w dużej mierze decyduje o niezawodności całego systemu elektroenergetycznego. Z tego względu prowadzone są ciągłe prace mające na celu lepsze zrozumienie zjawisk fizycznych zachodzących w uzwojeniach, układach izolacyjnych, czy też obwodach magnetycznych transformatora. Celem tych prac jest doskonalenie i optymalizacja techniczno-ekonomiczna konstrukcji transformatorów. Dodatkowo, stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną wymusza na producentach transformatorów opracowywanie rozwiązań o coraz wyższych parametrach znamionowych z zachowaniem możliwie kompaktowych rozmiarów. Wszystkie te aspekty stawiają przed konstruktorami transformatorów nowe wyzwania w obszarze badań i rozwoju, projektowania, technologii produkcji, testowania oraz badań diagnostycznych i kontrolnych. Konieczne staje się opracowywanie nowych oraz doskonalenie już istniejących metod i analiz badawczych oraz rozwijanie rozwiązań monitorujących w sposób ciągły stan techniczny transformatora i alarmujących w przypadku przekroczenia jego krytycznych parametrów. W ostatniej dekadzie coraz większe zainteresowanie wzbudzają układy i urządzenia analizujące stopień zużycia elementów transformatora oraz „przewidujące” pozostały czas życia i informujące o koniecznym serwisie. Takie rozwiązania pozwalają na lepsze planowanie remontów i renowacji transformatorów oraz pomagają uniknąć awarii w czasie eksploatacji.

Jeden z bardzo ważnych obszarów, dotyczy badań i analizy odporności transformatorów na narażenia powstające w czasie eksploatacji oraz w czasie prób odbiorczych. Wśród tych narażeń należy wymienić narażenia elektryczne, cieplne oraz mechaniczne. Aby transformator pracował bezawaryjnie, musi spełniać odpowiednie wymagania i normy dotyczące wszystkich tych aspektów jednocześnie. Istotny wpływ na niezawodność transformatora mają narażenia przepięciowe powstające w czasie prób odbiorczych oraz w czasie normalnej pracy urządzenia. Tematyka narażeń przepięciowych transformatorów jest bardzo obszerna i obejmuje zarówno problematykę wewnętrznego układu izolacyjnego transformatora, jak i jego izolacji zewnętrznej. Problematyka zjawisk zachodzących w samych uzwojeniach oraz izolacji transformatora jest kluczowa od samego początku procesu projektowania transformatora, aż do końca jego eksploatacji. Ograniczenie skutków zjawisk przepięciowych przez ciągłe doskonalenie konstrukcji transformatora, na podstawie badań i analiz, w znaczący sposób przekłada się na poprawę niezawodności transformatora, a co za tym idzie, całego systemu elektroenergetycznego, dlatego problematyka ta jest bardzo aktualna.

W pracy doktorskiej podjęto tematykę analizy zjawisk przepięciowych w różnych topologiach uzwojeń transformatorów elektroenergetycznych co stanowi kontynuację badań w omawianej dziedzinie nauki.

2 Wprowadzenie, cel i teza pracy

Niezawodność pracy całego systemu elektroenergetycznego jest w znacznym stopniu uzależniona od niezawodności transformatorów, które są jego kluczowymi elementami. Oddziaływanie przepięć różnego pochodzenia stanowi jeden z najistotniejszych problemów i zagrożeń izolacji transformatorów i może prowadzić do awarii, pomimo zastosowanej ochrony przeciwprzebieciowej. Pośród różnych rodzajów przepięć, na szczególną uwagę zasługują przepięcia piorunowe (pochodzenia atmosferycznego oraz probiercze) ze względu na ich duże wartości maksymalne oraz stromości narastania.

Ze względu na specyfikę konstrukcji transformatorów, narażenia przebieciowe izolacji wewnętrznej oraz zewnętrznej stanowią odrębne zagadnienia. Zagrożenie izolacji zewnętrznej wynika z kształtu, czasu oddziaływania i wartości maksymalnej przepięcia, jakie dociera do zacisków transformatora, natomiast przepięcia wewnątrz uzwojeń są uzależnione dodatkowo od reakcji uzwojenia na pojawiającą się falę uderową. Przepięcia wewnętrzne mogą znacząco różnić się od tych pojawiających się na zaciskach transformatora, ze względu na oddziaływanie pojemnościowych i indukcyjnych sprzężeń wewnątrz uzwojeń. Każda zmiana w geometrii transformatora, jego wymiarach, sposobie ułożenia zwojów, czy też zastosowanych materiałach, ma odzwierciedlenie w wartościach pojemności szeregowych oraz doziemnych uzwojenia. To z kolei ma wpływ na rozkład początkowy napięcia w uzwojeniu. Z tego względu, różne topologie uzwojeń zachowują się odmiennie przy doprowadzeniu strömej fali uderowej do ich zacisków [1-6, 8-11].

W praktyce, powszechnie stosowane są różne metody ograniczania narażeń izolacji uzwojeń transformatorów od przepięć. Należą do nich: przeplatanie zwojów w cewkach, stosowanie specjalnych zwojów ekranujących oraz ekranów elektrostatycznych. Wspomniane metody bazują na koncepcji konstrukcyjnego zwiększenia pojemności szeregowej lub zmniejszenia pojemności doziemnej, w celu poprawy początkowego rozkładu napięcia w uzwojeniu i ograniczenia wartości maksymalnych przepięć wewnętrznych [8,12-14]. W celu ochrony uzwojeń od przepięć stosowane są również beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali [9], ale ich problematyka nie jest przedmiotem niniejszej pracy.

W rozprawie doktorskiej podjęto problematykę narażeń przebieciowych układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów pochodzących od szybkozmiennych zjawisk przejściowych. Analizę przeprowadzono na podstawie eksperymentalnych badań rozkładów przepięć w rzeczywistych modelach uzwojeń transformatorów o konstrukcji wielowarstwowej i cewkowej oraz symulacji rozkładów potencjału oraz natężenia pola elektrostatycznego w komputerowych modelach rzeczywistych obiektów. **Celem** prac przeprowadzonych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej było zbadanie wpływu różnych zmian konstrukcyjnych (celowych lub mogących wystąpić w przypadku awarii bądź błędnego montażu na etapie produkcji) na narażenia przebieciowe w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów. Autor pracy posiadał unikalną możliwość prowadzenia badań na rzeczywistych, pełnowymiarowych obiektach, w szczególności na uzwojeniu warstwowym wysokiego napięcia, które nie jest powszechną konstrukcją stosowaną w transformatorach energetycznych wysokiego napięcia. Dodatkową wartością była możliwość wprowadzania

zmian konstrukcyjnych w postaci podłączania, odłączania lub demontażu ekranów, co miało wpływ na zmianę narażeń przepięciowych.

Teza niniejszej rozprawy doktorskiej jest następująca:

- badania eksperymentalne rozkładów przepięć w uzwojeniach o różnych topologiach, wzbogacone o wyznaczenie rozkładu pseudo-początkowego napięcia oraz symulacje rozkładów pola elektrycznego w uzwojeniach, umożliwiają rozszerzenie analiz mających na celu ocenę skutków narażeń izolacji uzwojeń transformatorów od przepięć i pozwalają na doskonalenie ich konstrukcji w celu poprawy odporności na działanie przepięć.

W celu potwierdzenia tezy rozprawy doktorskiej wykonano eksperymentalne badania przepięć w rzeczywistych uzwojeniach transformatorów o różnej budowie, wyznaczono rozkłady pseudo-początkowe, chwilowe i rozkłady maksymalnych wartości napięcia udarowego wzdłuż uzwojeń oraz przeprowadzono symulacje rozkładów pola elektrostatycznego w modelach uzwojeń. Analizowano wpływ różnych czynników na zmianę narażeń przepięciowych uzwojeń wielowarstwowych oraz cewkowych. Szczególną uwagę poświęcono roli ekranów elektrostatycznych i ich polaryzacji względem uzwojenia o konstrukcji wielowarstwowej oraz stosowaniu przepleceń zwojów i pierścieni ekwipotencjalnych w uzwojeniach cewkowych.

3 Struktura i zakres rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska zawiera 10 rozdziałów i składa się z 3 zasadniczych części:

- wstęp i wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz podstawienie tezy pracy,
- analiza stanu techniki dotycząca transformatorów energetycznych, konstrukcji ich uzwojeń oraz narażeń przepięciowych występujących w ich układach izolacyjnych,
- przedstawienie wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych oraz dyskusja uzyskanych wyników wraz z podsumowaniem.

Zakres rozprawy doktorskiej obejmuje:

- wprowadzenie do tematyki pracy, uzasadnienie motywacji podjęcia tematyki pracy oraz postawienie tezy (Rozdział 1 i 2),
- przedstawienie historii rozwoju transformatorów energetycznych od momentu ich wynalezienia, obecnego stanu techniki oraz przewidywanych kierunków dalszego rozwoju (Rozdział 3),
- charakterystykę podstawowych konstrukcji uzwojeń transformatorów energetycznych wysokich napięć (Rozdział 4),
- charakterystykę narażeń izolacji transformatorów od szybkozmiennych przepięć (Rozdział 5) oraz charakterystykę metod służących do modelowania i analizy zjawisk przejściowych w transformatorach (Rozdział 6),
- badania rozkładów przepięć piorunowych narażających izolację uzwojeń o konstrukcji wielowarstwowej, a także wyznaczenie rozkładu pseudo-

początkowego oraz chwilowych rozkładów napięcia wzdłuż uzwojenia (Rozdział 7),

- badania wpływu polaryzacji (podłączenia, odłączenia, braku) ekranów elektrostatycznych względem uzwojenia wielowarstwowego na narażenia przepięciowe izolacji (Rozdział 7),
- symulacje rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w uzwojeniu wielowarstwowym dla różnych konfiguracji połączenia uzwojenia i ekranów (Rozdział 7),
- analizę porównawczą rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu wielowarstwowym, otrzymanych w badaniach eksperymentalnych i symulacjach komputerowych oraz ocenę „skuteczności” ekranowania (Rozdział 7),
- analizę wyników badań eksperymentalnych rozkładów przepięć w uzwojeniu cewkowym transformatora energetycznego, przy wymuszeniu udarem piorunowym oraz prostokątnym (Rozdział 8),
- wyznaczenie rozkładów pseudo-początkowych oraz chwilowych napięcia w uzwojeniu cewkowym przy oddziaływaniu udaru piorunowego oraz prostokątnego (Rozdział 8),
- symulacje rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w uzwojeniu cewkowym dla różnych metod splatania zwojów (analizowano uzwojenie zbudowane z dwucevek nawijanych metodą Chadwicka-Stearna, Kratochwila oraz van Nuysa, a także z czterocevek opartych na przepłotach Chadwicka-Stearna) oraz z zastosowaniem pierścienia ekwipotencjalnego; analizowano również koncepcję uzwojenia częściowo splatanego oraz uzwojeń o końcu izolowanym od ziemi (Rozdział 8),
- analizę porównawczą rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu cewkowym otrzymanych w badaniach eksperymentalnych i symulacjach (Rozdział 8),
- podsumowanie pracy i zestawienie najważniejszych wniosków i rekomendacji konstrukcyjnych (Rozdział 9),
- spis literatury (Rozdział 10).

Wyniki prac przeprowadzonych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej mogą mieć istotne znaczenie praktyczne dla projektantów i konstruktorów transformatorów. Efektem przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych są użyteczne wnioski oraz zalecenia i rekomendacje konstrukcyjne, które mogą być użyteczne dla doskonalenia konstrukcji uzwojeń pod kątem ograniczania narażeń przepięciowych i poprawnej koordynacji izolacji uzwojeń.

4 Podsumowanie i ważniejsze wyniki oraz wnioski

W celu zapewnienia niezawodnej pracy systemów elektroenergetycznych niezbędna jest szczegółowa analiza narażeń eksploatacyjnych ich poszczególnych elementów składowych. Spośród nich, na szczególną uwagę zasługują transformatory energetyczne ze względu na funkcję jaką pełnią w sieciach elektroenergetycznych. Kluczowy wpływ na bezpieczną i niezawodną pracę transformatorów mają narażenia przepięciowe jakim

poddawana jest ich izolacja w czasie eksploatacji oraz w czasie prób odbiorczych. Tematyka oddziaływania przebiegów na transformatory jest ciągle bardzo aktualna.

Rozprawa doktorska obejmuje swym zakresem problematykę narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych. Praca jest poświęcona w szczególności analizie narażeń transformatorów w czasie działania szybkozmiennych przebiegów powstających w warunkach eksploatacji i podczas prób napięciowych. Praca bazuje na wynikach badań eksperymentalnych przeprowadzonych na unikatowych, pełnowymiarowych uzwojeniach transformatorów energetycznych wysokiego napięcia oraz na analizach teoretycznych wyników symulacji komputerowych na modelach uzwojeń o różnych topologiach.

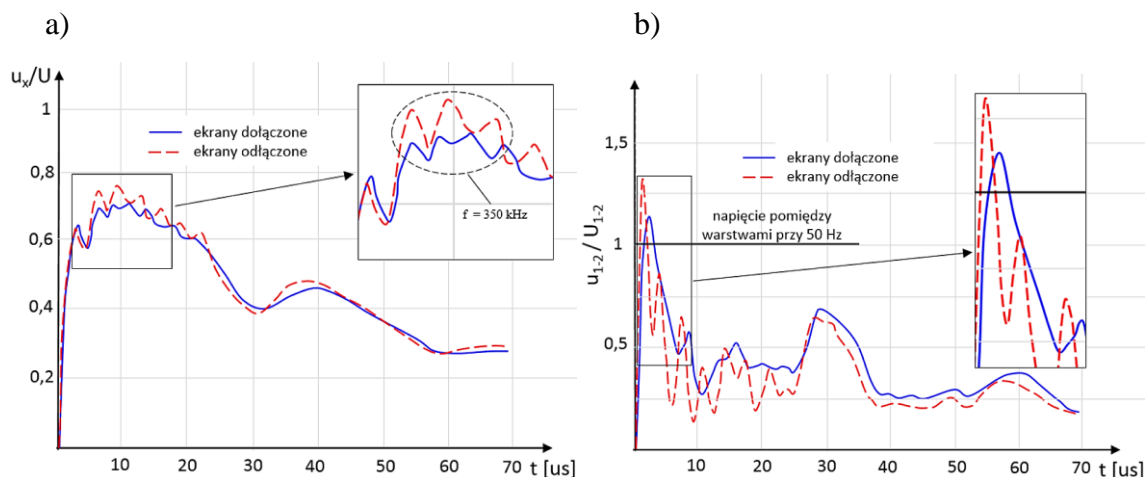
Efektom rozprawy jest:

- wykonanie badań przebiegów narażających układy izolacyjne uzwojeń transformatorów w warunkach eksploatacji podczas wyładowań piorunowych i w warunkach prób napięciem udarowym,
- opracowanie polowych modeli uzwojeń transformatorów do analizy rozkładów potencjału i pola elektrostatycznego w różnych topologiach i konfiguracjach uzwojeń,
- eksperymentalna analiza narażeń przepięciowych wewnętrznych układów izolacyjnych różnego typu uzwojeń transformatorów oraz ocena wpływu różnych czynników na zmianę tych narażeń; dla uzwojenia wielowarstwowego zaproponowano również parametr określający skuteczność ekranów w ograniczaniu narażeń przepięciowych w celu porównania różnych konfiguracji: uzwojenie-ekrany,
- symulacyjna analiza narażeń przepięciowych uzwojeń transformatorów o różnych konstrukcjach i konfiguracjach, dla celów oceny wpływu zmian konstrukcyjnych na poziomy narażeń przepięciowych,
- eksperymentalne wyznaczenie rozkładów pseudo-początkowych i rozkładów wartości maksymalnych napięcia dla uzwojeń o konstrukcji cewkowej i warstwowej (o różnych konfiguracjach ekranów elektrostatycznych) przy udarze napięciowym piorunowym; dla uzwojenia cewkowego również przy udarze prostokątnym,
- symulacyjne wyznaczenie pojemnościowych rozkładów potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach o konstrukcji warstwowej (dla różnych konfiguracji i polaryzacji ekranów) i cewkowej (dla różnych rodzajów przeplatania zwojów, z zastosowaniem ekranu ekwipotencjalnego, dla uzwojeń częściowo splatanych oraz uzwojeń z końcem izolowanym od ziemi),
- analiza porównawcza narażeń przepięciowych uzwojeń warstwowych i cewkowych uzyskanych w badaniach eksperymentalnych i symulacjach komputerowych,
- ocena wpływu różnych zmian konstrukcyjnych oraz konfiguracji uzwojeń na zmianę poziomów narażeń przepięciowych izolacji uzwojeń,
- określenie charakterystycznych cech rozkładów początkowych potencjału w uzwojeniach warstwowych ekranowanych i nieekranowanych,
- określenie charakterystycznych cech rozkładów potencjału i natężenia pola elektrycznego w uzwojeniu cewkowym o różnych topologiach.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych narażeń przepięciowych układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów o różnych konstrukcjach oraz na podstawie symulacji komputerowych rozkładów pola elektrostatycznego, odzwierciedlających warunki panujące w uzwojeniu w początkowej chwili oddziaływania udarów szybkozmiennych, stwierdzono co następuje:

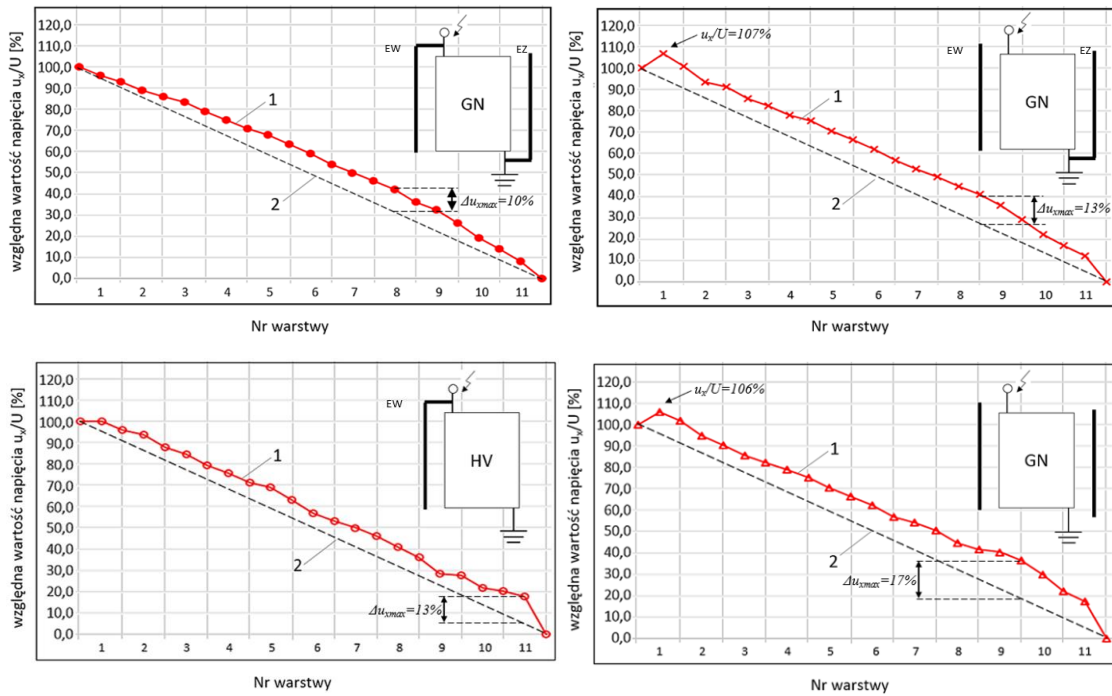
- dla uzwojenia warstwowego:

- podczas oddziaływania na uzwojenia transformatorów udarów piorunowych oraz prostokątnych, ich układy izolacyjne poddawane są narażeniom odmiennym niż te panujące na zacisku wejściowym uzwojenia, co wynika ze sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych w uzwojeniu,
- wykazano, że reakcja uzwojeń na pojawiające się przepięcia jest uzależniona od ich konstrukcji, topologii i specyficznej konfiguracji zastosowanej w danym typie uzwojeń:
 - podłączenie, odłączenie lub usunięcie ekranów elektrostatycznych w uzwojeniu warstwowym wpływa na zmianę narażeń przepięciowych, w tym na częstotliwość drgań wysokoczęstotliwościowych występujących w początkowych chwilach oddziaływania udarów (Rys. 1);



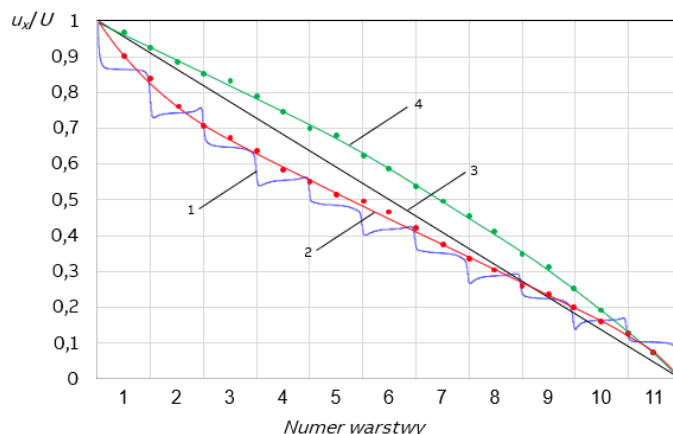
Rys. 1 Przebiegi czasowe przepięć: a) doziemnych w warstwie nr 4 uzwojenia; b) międzywarstwowych - pomiędzy warstwami nr 1 i 2 uzwojenia; linia ciągła – ekrany dołączone do uzwojenia; linia przerywana – ekrany odłączone od uzwojenia

- podłączenie, odłączenie lub usunięcie ekranów elektrostatycznych w uzwojeniu warstwowym wpływa na wartości maksymalne przepięć wewnętrznych w taki sposób, że odłączenie ekranu liniowego zwiększa poziom przepięć w całym uzwojeniu, a odłączenie lub usunięcie ekranu od strony punktu gwiazdowego, zwiększa poziom przepięć jedynie w obszarach końcowych warstw uzwojenia (Rys. 2);
- wpływ ekranów na przepięcia w środkowej strefie uzwojenia warstwowego jest niewielki, w porównaniu z wpływem na przepięcia w pobliskich ekranom warstwach;



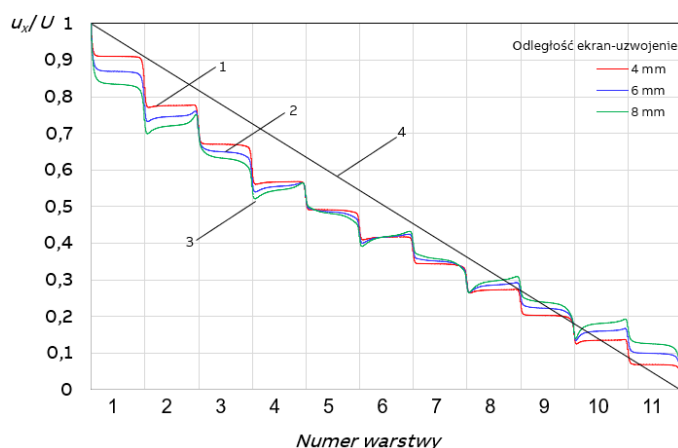
Rys. 2 Rozkład maksymalnych wartości napięć doziemnych (1) oraz rozkład końcowy (2) w uzwojeniu wielowarstwowym transformatora dla różnych konfiguracji ekranów (podłączone, odłączone, brak) wg schematów na rysunkach; EW - ekran wewnętrzny; EZ - ekran zewnętrzny

- najbardziej korzystną, z punktu widzenia odporności na działanie szybkozmiennych napięć, konfiguracją jest uzwojenie w pełni ekranowane, z ekranami podłączonymi do obu końców; najbardziej niekorzystna konfiguracja dotyczy uzwojenia z odłączonym ekranem wewnętrznym, podczas gdy ekran zewnętrzny był odłączony lub fizycznie zdemontowany z uzwojenia;
- wykazano, że podłączenie ekranu wewnętrznego do początku uzwojenia jest kluczowe dla zapewnienia jego wysokiej odporności na napięcia; rola ekranu zewnętrznego (uziemionego) jest mniej istotna, ale jego obecność daje znaczne korzyści z punktu widzenia wartości maksymalnych napięć;
- rozkład pseudo-początkowy napięcia w uzwojeniu warstwowym w pełni ekranowanym jest bardzo korzystny i równomierny - odpowiada parametrowi $\alpha=1,2-2$; świadczy to o bardzo dobrej odporności uzwojenia na napięcia szybkozmiennych (Rys. 3);
- wykazano, że rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu warstwowym dla różnych konfiguracji i polaryzacji ekranów znacząco się różnią, co wynika ze wzmocnienia lub osłabienia sprzężenia pojemnościowego do ekranów, w zależności od rozpatrywanej konfiguracji;
- określono charakterystyczne cechy rozkładów potencjału w uzwojeniach warstwowym z ekranami i nieekranowanymi; rozkład początkowy w uzwojeniu ekranowanym jest bliski liniowemu, a w uzwojeniach bez ekranów oraz z jednym lub dwoma ekranami na pływającym potencjale, rozkłady te są silnie nieliniowe;



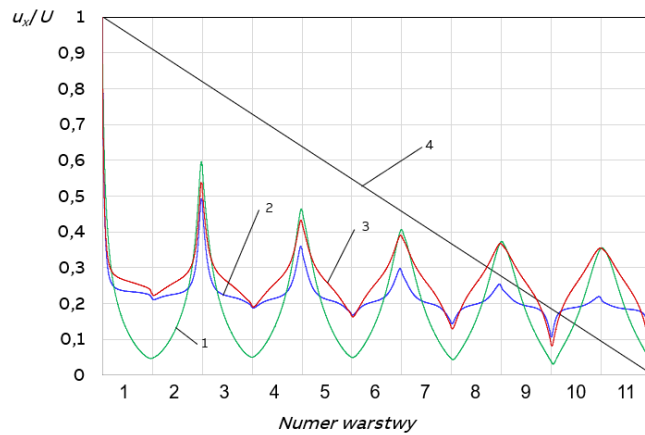
Rys. 3 Zestawienie wyników otrzymanych eksperymentalnie i symulacyjnie dla uzwojenia warstwowego ekranowanego (ekran wewnętrzny – wysoki potencjał, ekran zewnętrzny – uziemiony); 1 – początkowy rozkład potencjału elektrostatycznego (symulacja), 2 – pseudo-początkowy rozkład napięcia (pomiar), 3 – rozkład końcowy, 4 – obwiednia maksymalnych wartości przepięć (pomiar)

- wykazano, że odległość ekranów do uzwojenia warstwowego wpływa na poziom sprężenia pojemnościowego i może prowadzić do poprawy lub pogorszenia rozkładu początkowego (Rys. 4); udowodniono, że rozkład w środkowej strefie uzwojenia jest praktycznie niezależny od odległości ekranów (w rozważanych granicach odległości),



Rys. 4 Rozkład potencjału elektrycznego wzdłuż uzwojenia warstwowego ekranowanego dla różnych odległości pomiędzy ekranem wewnętrznym i zewnętrznym i przyległymi do niego warstwami uzwojenia: 1 – 4/4 mm, 2 – 6/6 mm, 3 – 8/8 mm, 4 – rozkład końcowy

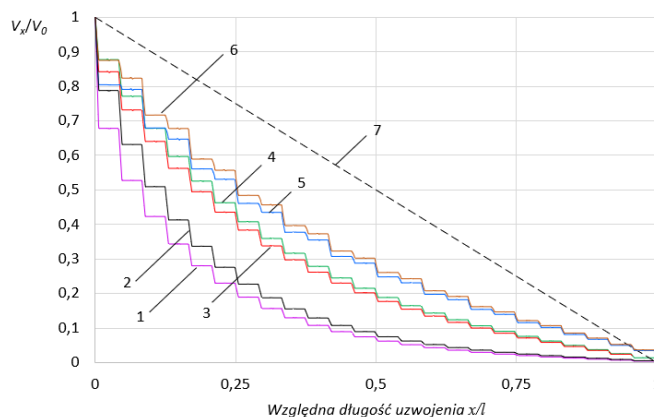
- wykazano, że rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu z ekranami i bez są odmienne, a rozkłady pośrednie (np. tylko z jednym ekranem) posiadają charakterystyczne cechy rozkładów panujących w uzwojeniach ekranowanych i nieekranowanych – przejście pomiędzy rozkładami zachodzi w sposób płynny (Rys. 5);
- symulacje numeryczne potwierdziły wnioski wynikające z badań eksperymentalnych i pozwoliły rozszerzyć analizę i zrozumienie zjawisk przepięciowych zachodzących w uzwojeniach warstwowo ekranowanych i nieekranowanych;



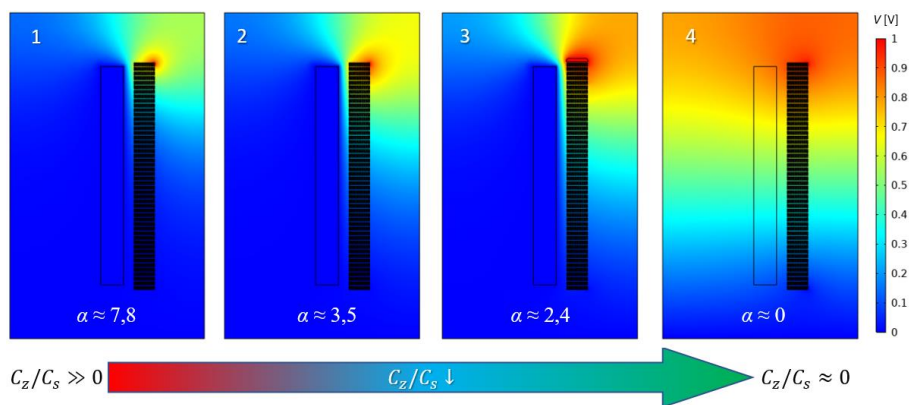
Rys. 5 Zmiana charakteru rozkładu początkowego potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu w zależności od konfiguracji połączenia uzwojenia z ekranami; 1 – rozkład początkowy w uzwojeniu nieekranowanym, 2 – rozkład początkowy w uzwojeniu z dwoma ekranami na pływającym potencjale, 3 – rozkład początkowy w uzwojeniu z ekranem wewnętrznym na pływającym potencjale, przy braku ekranu zewnętrznego, 4 – rozkład końcowy

- dla uzwojenia cewkowego:

- analiza narażeń układu izolacyjnego uzwojeń cewkowych od udaru prostokątnego i piorunowego pozwoliła na wyciągnięcia analogicznych wniosków,
- wykazano, że najbardziej narażoną przepięciowo częścią uzwojenia cewkowego są jego początkowe cewki – w tym obszarze występują oscylacje wysokoczęstotliwościowe o znacznych amplitudach;
- potwierdzono, że rozkład pseudo-początkowy przy oddziaływaniu udarów prostokątnych i piorunowych jest nierównomierny;
- wyznaczono rozkłady początkowe potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach cewkowych wywrotkowych oraz zbudowanych z dwucewek o różnych schematach splatania oraz z czterocewek splatanych; wykazano, że wszystkie te rozkłady są nieliniowe; najbardziej niekorzystny jest rozkład w uzwojeniu wywrotkowym; zastosowanie dwucewek poprawia sytuację, a w przypadku czterocewek rozkład jest jeszcze bardziej korzystny (Rys. 6 i Rys. 7);

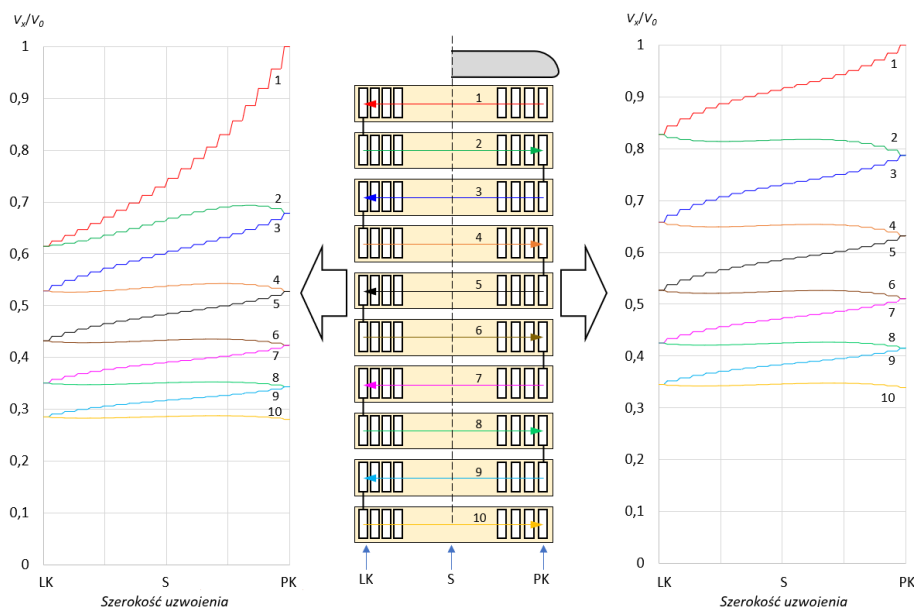


Rys. 6 Zestawienie zmian rozkładu potencjału elektrostatycznego wzdłuż uzwojenia cewkowego: 1 - wywrotkowego, 2 – wywrotkowego z pierścieniem, 3 - zbudowanego z dwucewek z przeplotami Chadwicka-Stearna, 4 - zbudowanego z dwucewek Chadwicka-Stearna z ekranem ekwipotencjalnym, 5 – zbudowanego z czterocewek Chadwicka-Stearna, 6 - zbudowanego z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem, 7 – rozkład końcowy; $x/l=0$ – początek uzwojenia, $x/l=1$ – koniec uzwojenia



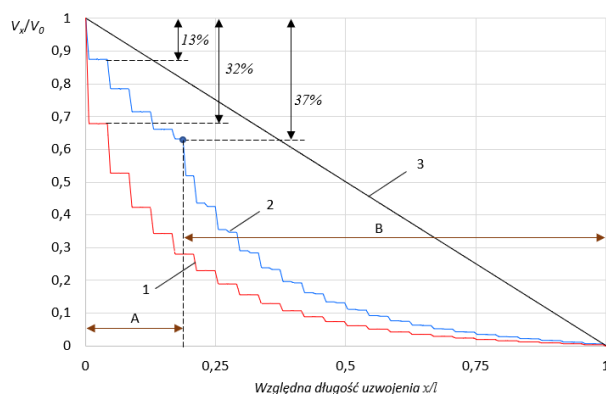
Rys. 7 Wpływ zmiany stosunku pojemności doziemnej C_z do pojemności wzdłużnej C_s uzwojenia na zmianę rozkładu potencjału w uzwojeniu: 1 – uzwojenie wywrotkowe, 2 – uzwojenie z dwucewek Chadwicka-Stearna, 3 – uzwojenie z czterocewek Chadwicka-Stearna z pierścieniem ekwipotencjalnym, 4 – uzwojenie wywrotkowe samotne (brak uziemionego uzwojenia DN)

- zbadano wpływ zastosowania pierścienia ekwipotencjalnego na narażenia przepięciowe w uzwojeniu cewkowym o różnych topologiach i wykazano, że ekran ekwipotencjalny znacząco poprawia początkowy rozkład potencjału w uzwojeniach wywrotkowych oraz splatanych (Rys. 6 i Rys. 8);



Rys. 8 Porównanie rozkładów potencjału elektrostatycznego w obrębie pierwszych dziesięciu cewek uzwojenia wywrotkowego bez (z lewej) oraz z pierścieniem ekwipotencjalnym (z prawej); LK – lewa krawędź uzwojenia, S – środek uzwojenia, PK – prawa krawędź uzwojenia

- wyznaczono rozkład początkowy potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu częściowo splatonym i zaobserwowano zmianę nachylenia krzywej rozkładu początkowego w miejscu przejścia ze strefy splatanej do niesplataney (Rys. 9); wykazano, że w części splatanej najbardziej naprężona jest izolacja zwojowa, a w części niesplataney izolacja międzycewkowa;



Rys. 9 Rozkłady potencjału elektrostatycznego w uzwojeniu: 1- wywrotkowym, 2 - częściowo spletanym (strefa A – część z przepłotami Kratochwila, strefa B – część niesplekana), 3 – rozkład końcowy; $x/l=0$ – początek uzwojenia, $x/l=1$ – koniec uzwojenia

Na podstawie przeprowadzonych badań i symulacji wykazano, że do skutecznej oceny narażeń przepięciowych uzwojeń transformatora, konieczna jest nie tylko znajomość wartości szczytowej i kształtu udaru doprowadzonego do uzwojenia, ale również wiedza o odpowiedzi uzwojenia na pojawiające się przepięcie. Na podstawie analizy narażeń przepięciowych określono charakterystyczne cechy rozkładów początkowych i pseudo-początkowych napięcia w uzwojeniach warstwowych i cewkowych oraz przedstawiono wnioski o istotnym znaczeniu praktycznym dla projektantów i konstruktorów transformatorów, dotyczące narażeń przepięciowych uzwojeń. Wnikliwie przeanalizowano różne topologie konstrukcji warstwowych i cewkowych. Zaobserwowane charakterystyczne cechy rozkładów początkowych oraz wpływ zmian konstrukcyjnych na zmianę narażeń przepięciowych uzwojeń pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w tych uzwojeniach w czasie oddziaływania przepięć szybkozmiennych. Wykazano, że zastosowanie modeli elektrostatycznych rozkładów pola w uzwojeniach jest bardzo istotne dla rozszerzenia analiz narażeń przepięciowych uzwojeń o różnych konstrukcjach. Konieczne są jednak dalsze prace nad doskonaleniem modeli oraz narzędzi obliczeniowych w celu poprawienia analizy ilościowej oraz lepszej korelacji z wynikami badań eksperymentalnych.

Na podstawie przeprowadzonych w pracy wnikliwych badań eksperymentalnych, symulacji komputerowych oraz analiz, potwierdzono tezę rozprawy. Szczególnie wykazano, że opracowanie rozkładów pseudo-początkowych napięcia w uzwojeniach (na podstawie badań eksperymentalnych) oraz teoretyczne symulacje rozkładów potencjału elektrostatycznego w uzwojeniach o różnych topologiach, istotnie rozszerzają możliwości analizy skutków narażeń układów izolacyjnych uzwojeń transformatorów od przepięć i pozwalają na doskonalenie ich konstrukcji w celu poprawy odporności na działanie przepięć.

5 Literatura

- [1] Adamczyk B., Florkowski M., Świątkowski M., Maliszewski A., Ketner A.: Analiza przepięć w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego; X Konferencja Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów, Wisła, 11-13 maja 2016.
- [2] 7 Adamczyk B., Florkowski M., Świątkowski M.: Effect of Shielding on Surge Overvoltages in Multilayer type Windings of Power Transformer, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 23, No. 3, 2016.
- [3] Adamczyk B., Florkowski M.: Analiza rozkładu przepięć piorunowych w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 92, Nr 10/2016.
- [4] Adamczyk B., Florkowski M.: Simulation of initial voltage distribution in layer type transformer winding; Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2015, Pilsen, Czech Republic, 23-28 August 2015.
- [5] Adamczyk B., Furgał J., Kuniewski M.: Analiza przepięć w uzwojeniach transformatorów; Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 91, Nr 7/2015.
- [6] Adamczyk B., Furgał J.: Analiza przepięć w transformatorach energetycznych; Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 36, Gdańsk, 2013.
- [7] Adamczyk B.: Analiza techniczno-ekonomiczna uzwojeń wielowarstwowych do transformatorów mocy, ABB Forum Transformatory Energetyczne 2014, ISBN 978-83-924841-0-3, 2014, s. 77-95.
- [8] 78 Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines; Wydawnictwa AGH, Kraków 2013, ISBN 978-83-7464-614-7.
- [9] 82 Furgał J.: Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć; Rozpr. i Monogr.; AGH, Kraków, ISSN 0867-6631, 2003.
- [10] 164 Okabe S., Koto M., Ueta G., Saida T., Yamada S.: Development of High Frequency Circuit Model for Oil-immersed Power Transformers and its Application for Lightning Surge Analysis; IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 2, pp. 541-552, 2011.
- [11] 204 Soloot A.H., Høidalen H., Gustavsen B.: Influence of the winding design of wind turbine transformers for resonant overvoltage vulnerability, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 2, pp.1250-1257, 2015.
- [12] 95 Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A.: Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa, 1983.
- [13] 105 Jezierski E.: Transformatory; WNT, Warszawa 1983 (rozdziały 12 i 13 opracowane przez Zygmunta Hastermana).
- [14] 137 Maliszewski A.: Zjawiska zachodzące w uzwojeniach splatanych i w uzwojeniach z ekranującymi zwojami wplatanymi; ABB Forum Transformatory Energetyczne, ISBN 978-83-924841-9-6, 2007, s. 79-96.