

Łódź, 07.09.2023 r.

dr hab. inż. Paweł Rózga, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki
pawel.rozga@p.lodz.pl

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

14. 09. 2023

Wpłynęło dnia

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Bartłomieja Adamczyka

pt. „*Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach
uzwojeń transformatorów energetycznych*”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, powołującego się na uchwałę w/w Rady z dnia 06 lipca 2023 roku.

2. Ocena tematyki i tez rozprawy

Modelowanie, symulacja i badania eksperymentalne zjawisk przepięciowych zachodzących w uzwojeniach transformatorów energetycznych to kluczowe aspekty w zakresie analizy odporności transformatora na narażenia powstające w czasie prób odbiorczych transformatora czy podczas jego eksploatacji. Aspekty te są szczególnie ważne w odniesieniu do transformatorów o dużych mocach i najwyższych napięciach, które są jednostkami produkowanymi pod indywidualne zamówienia klienta i rozwiązania ich uzwojeń są często specyficznymi rozwiązaniami o cechach charakterystycznych tylko dla danego przypadku.

Z teorii przepięć wiadomo, że jeżeli uzwojenie transformatora zostanie zaatakowane falą napięciową o określonym kształcie, to w sąsiadujących z nim uzwojeniach mogą zostać zaindukowane napięcia, o wartościach, które są niebezpieczne dla ich izolacji. Rozstrzygnięcie, czy napięcia te są w rzeczywistości groźne dla izolacji uzwojenia musi bazować na znajomości ich wartości oraz znajomości wytrzymałości elektrycznej tych fragmentów izolacji, których one dotyczą.

Problem przepięć przenoszonych na uzwojenia sąsiednie dotyczy, jak zaznaczono to wyżej, zarówno przepięć powstających podczas prób napięciowych w laboratorium wysokich napięć jak i przepięć powstających w eksploatacji. Próby napięciowe są tak pomyślane, aby reprezentować w sposób możliwie pełny zagrożenia jakie mogą wystąpić w eksploatacji. Dlatego w większości



przypadków problem przebieg, które przenoszą się do sąsiednich uzwojeń odnoszą się do warunków probierczych. Przy przebiegach związanych z napięciem przemiennym czy łączeniowym, o których rozkładzie decyduje strumień główny w rdzeniu, wartość napięć przenoszonych na kolejne części uzwojenia może być obliczona z przekładni zwojowej, z uwzględnieniem specyfiki układu połączeń, w którym wykonywana jest próba. Uwzględnia się w takim przypadku stosunek napięcia probierczego U_{AC} do najwyższego napięcia roboczego sieci U_m i kiedy stosunek ten jest większy, przy mniejszych wartościach napięć, to napięcie indukowane w uzwojeniu o niższym napięciu roboczym jest niemal proporcjonalne do U_m i jest mniejsze od przypisanej mu wartości U_{AC} . Zatem przebiegi indukowane w uzwojeniach niższego napięcia są niższe od jego poziomu izolacji.

Przy przebiegach piorunowych, wynikających, w warunkach eksperymentalnych, z przyłożenia do uzwojeń napięcia udarowego piorunowego, o przekazywaniu napięcia nie decyduje strumień główny, lecz złożony układ sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami, w szczególności sprzężeń o charakterze pojemnościowym. W takim przypadku, przebiegi przenoszone, a nie przebiegi wywołane przez przypisane temu uzwojeniu piorunowe napięcia probiercze, decydują o zagrożeniu izolacji. Poziom tych przebiegów może być wyznaczany drogą obliczeń komputerowych, ale pod warunkiem dobrego odwzorowania sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych pomiędzy uzwojeniami. Drogą równie efektywną w tym zakresie są także pomiary rozkładu przebiegów wykonywane bezpośrednio na uzwojeniu lub jego modelu. Pomiary takie pozwalają na analizę samego zjawiska przenoszenia przebiegów jak i określenia roli, jaką odgrywają poszczególne czynniki w zakresie otrzymanych relacji.

Ponieważ konstrukcje transformatorów wysokich i najwyższych napięć ewoluują, głównie w kierunku optymalizacji materiałów użytych do ich produkcji (także materiałów izolacyjnych), wydaje się niezbędnym weryfikacja wpływu wprowadzanych zmian konstrukcyjnych na wyżej wspomniany rozkład przebiegów przenoszonych wzdłuż uzwojeń. Taka weryfikacja byłaby najkorzystniejsza, gdyby badania mogły zostać przeprowadzone na układach rzeczywistych, a nie tylko na modelach symulowanych w warunkach laboratoryjnych. Niestety nie jest to z reguły możliwe, stąd badania modeli uzwojeń stały się drogą powszechnie stosowaną w tym zakresie. Niemniej, wykonanie modelu rzeczywistego nie jest proste i najczęściej wymaga zaangażowania w to wykonanie producenta transformatorów.

Wobec powyższego, zaproponowany przez autora rozprawy zakres tematyczny obejmujący zbadanie wpływu wytypowanych zmian konstrukcyjnych układów uzwojeń transformatorów energetycznych na rozkład przebiegów, przy uwzględnieniu zarówno podejścia czysto eksperymentalnego jak i badań wykonanych na modelach, wpisuje się doskonale w realne potrzeby prowadzenia badań z obszaru szeroko pojętej Inżynierii Wysokich Napięć, a

więc obszaru badawczego wchodzącego w skład dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Ważnym jest w tym miejscu także zaznaczenie, że przyjęta tematyka pracy ma nie tylko aspekt poznawczy, ale posiada niezwykle bliskie odniesienie do praktyki, łącząc zagadnienia badawcze z realnymi problemami projektowania nowych konstrukcji transformatorów energetycznych wysokich napięć.

Realizacja pracy doktorskiej zmierzała do udowodnienia następującej tezy:

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

Teza, mimo, że rozbudowana, jest w pełni zrozumiała i jasno wskazuje kierunek prac, jakie doktorant zamierzał zrealizować w ramach przedmiotowej pracy doktorskiej.

Aby udowodnić tezę doktorant zaplanował wykonanie szerokiego spektrum eksperymentalnych prac badawczych uzupełnionych analizami numerycznymi, łącząc ze sobą wyniki obu typów prac w celu sformułowania spójnych wniosków.

Prace badawcze doktoranta zawierały w szczególności:

- analizę teoretyczną w zakresie problematyki pracy,
- wyznaczenie, na podstawie eksperymentalnych badań laboratoryjnych wykonanych na rzeczywistych obiektach, rozkładów pseudo-początkowych, chwilowych i tzw. obwiedni przepięć dla różnych rozwiązań uzwojeń (warstwowe i cewkowe) i różnych sposobów ich ekranowania;
- zamodelowanie rozkładu pola elektrycznego w analizowanych przypadkach uzwojeń jako uzupełnienie badań eksperymentalnych;
- dyskusję wyników z uwzględnieniem rekomendacji dla projektantów i konstruktorów transformatorów z punktu widzenia możliwości optymalizacji konstrukcji uzwojeń transformatorów w tym ograniczenia narażenia przepięciowych i poprawy w zakresie koordynacji izolacji uzwojeń.

Uwzględniając powyższe, podjęta przez doktoranta tematyka, przyjęta teza rozprawy, a także ambitny charakter prac zaplanowanych do realizacji, które w sposób spójny łączy ze sobą badania laboratoryjne z symulacyjnymi, posiadają bezsprzecznie walory pracy naukowej. Doktorant zaproponował w pracy przeprowadzenie oryginalnych analiz o szerokim zakresie mających na celu zbadanie wpływu zmian konstrukcyjnych uzwojeń transformatora na rozkład przepięć w jego uzwojeniach. Jest to tematyka aktualna wobec działań optymalizacyjnych w zakresie nowych konstrukcji transformatorów wysokich napięć i należy stwierdzić, że praca doktorska mgr Bartłomieja Adamczyka wpisuje się w zakres

obecnie panujących światowych trendów badawczych z obszaru szeroko pojętej Elektrotechniki, a więc obszaru dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Ponadto, praca posiada wyraźne walory praktyczne dla obszaru nauk inżyniersko-technicznych.

3. Charakterystyka i ocena zawartości merytorycznej rozprawy

Recenzowana rozprawa jest obszerna i liczy 217 stron. Podzielona jest na 10 numerowanych rozdziałów, a poprzedzona stosownymi streszczeniami w języku polskim i angielskim. Literatura, stanowiąca rozdział 10 obejmuje 257 pozycji o zróżnicowanym charakterze. Dyplomant cytuje w pracy pozycje polsko- i angielskojęzyczne, pochodzące zarówno z czasopism jak i materiałów konferencyjnych. W literaturze uwzględnione są także pozycje książkowe. Całość stanowi kompleksowy zbiór pozycji, w większości stricte związanych z tematyką rozprawy. Spośród wymienionej całkowitej liczby cytowanych pozycji literaturowych 13 to publikacje z udziałem doktoranta.

Pierwszy i drugi rozdział rozprawy stanowi rutynowy wstęp do tematyki i zawiera prezentację struktury rozprawy wraz z celem, zakresem i tezą.

Kolejne rozdziały można pogrupować w trzy części.

Pierwsza część (rozd. 3, 4, 5 i 6) to teoretyczne wprowadzenie w tematykę rozprawy. Zdaniem recenzenta, rozdz. 3 zawiera zbyt podstawowe informacje związane z budową transformatorów energetycznych i mógłby, po znacznym skróceniu, stać się wstępem do rozdz. 4, w którym doktorant dokładnie przedstawia budowę i rodzaje uzwojeń wysokonapięciowych stosowanych w transformatorach olejowych. Rozdz. 5 to z kolei ogólne, również natury akademickiej, rozważania na temat przebiegów w uzwojeniach transformatora, w którym zawarte zostały także informacje o układzie izolacyjnym transformatora. Nasuwa się tu znów pytanie, czy ten zakres (omówienie układu izolacyjnego) nie powinien jednak znaleźć się w rozdz. 4. Ponadto, rozdz. 5 zawiera podstawowe definicje związane ze stosowaną, w aspekcie analizy przebiegów w transformatorze, nomenklaturą, a rozdz. 6 ogólny przegląd metod stosowanych w projektowaniu transformatorów, a ściślej różnego ich stanu. Generalnie rozdziały 3-6 są opracowane starannie i rzeczowo i na ich podstawie można stwierdzić, że doktorant **posiada ugruntowaną wiedzę teoretyczną z zakresu tematyki rozprawy i jest przygotowany do realizacji części praktycznej.**

Druga część rozprawy, znacznie obszerniejsza od części teoretycznej, to część badawcza obejmująca rozdz. 7, 8 i 9. Jest to, niewątpliwie, główna część rozprawy, stanowiąca o jej wartości naukowej. W rozdz. 7 i 8 doktorant charakteryzuje odpowiednio, w obu przypadkach z dużą dozą szczegółowości, obiekty badań. W pierwszym przypadku jest to pełnowymiarowy model uzwojenia jednej fazy transformatora energetycznego o mocy 63 MVA i przekładni napięciowej 147 kV / 10,5

kV, który ma charakter uzwojenia typu warstwowego, ekranowanego. W drugim przypadku analizowanym obiektem był z kolei model uzwojenia typu cewkowego transformatora o mocy 25 MVA i przekładni napięciowej 110 kV / 15 kV. Należy od razu nadmienić, że w przypadku pierwszego typu konstrukcji pomiary wykonane zostały przez doktoranta osobiście, zaś w przypadku drugiego modelu doktorant posiłkował się wynikami zaczerpniętymi z innej pracy doktorskiej realizowanej na AGH. W obu przypadkach natomiast, doktorant przeprowadził symulacje numeryczne wyznaczając odpowiednio rozkład potencjału elektrycznego oraz rozkład natężenia pola elektrycznego w wybranych obszarach badanych modeli uzwojeń. W analizie modelu uzwojenia warstwowego doktorant uwzględnił różne warianty ekranowania, zaś w przypadku modelu uzwojenia cewkowego różne sposoby przepleceń. Obszerne wyniki otrzymane dla obu analizowanych wariantów uzwojeń zostały każdorazowo kompletnie omówione w podrozdziałach o tytułach „Dyskusja wyników”.

Trzecia część pracy to zamieszczone w rozdz. 9 podsumowanie. Ma ono charakter swoistego kompendium wiedzy uzyskanej na bazie przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej rozważań. Doktorant wypunktował w sposób klarowny swoje osiągnięcia, osobno dla każdego typu rozpatrywanych uzwojeń, wskazując w końcowej części na te elementy pracy, które przyczyniły się do udowodnienia tezy. Autor prezentuje także krótko rekomendacje do dalszych prac.

Z rozdz. 7-9 wynikają najważniejsze osiągnięcia doktoranta, które przyczyniły się do osiągnięcia celu rozprawy, rozwiązania postawionego problemu badawczego i zweryfikowania tezy. **Stanowią one jednocześnie oryginalny wkład doktoranta w rozwój dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne:**

Do osiągnięć tych należą:

- przeprowadzenie oryginalnych badań na modelu rzeczywistym uzwojenia transformatora energetycznego wysokiego napięcia o uzwojeniu warstwowym;
- wykonanie badań symulacyjnych rozkładu potencjału elektrycznego i natężenia pola elektrycznego w uzwojeniach różnego typu, dla wcześniej opracowanych przez doktoranta modelach polowych tych uzwojeń;
- przeprowadzenie oceny, na bazie otrzymanych wyników symulacji i pomiarów, wpływu zmian konstrukcyjnych uzwojenia na rozkład przepięć w uzwojeniach;
- skuteczne połączenie wyników badań symulacyjnych z laboratoryjnymi badaniami eksperymentalnymi, które, jako spójna całość, umożliwiają, w ocenianym przypadku, wnioskowanie o zjawiskach przepięciowych w różnego typu uzwojeniach transformatorów energetycznych;

- umiejętne połączenie wiedzy z zakresu prac eksperymentalnych z obszaru inżynierii wysokich napięć z modelowaniem numerycznym rozkładu potencjału elektrycznego i natężenia pola elektrycznego w układach o względnie skomplikowanej strukturze;

- określenie cech charakterystycznych rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniach warstwowych przy różnym sposobie ekranowania uzwojeń;

- określenie cech charakterystycznych rozkładów potencjału elektrycznego i natężenia pola elektrycznego w uzwojeniach cewkowych przy różnym sposobie splatania tych uzwojeń.

Osiągnięcia te świadczą o umiejętności doktoranta w zakresie definiowania i rozwiązywania zagadnienia naukowego i samodzielnego prowadzenia badań. Zdaniem recenzenta praca jest kompletna i nie wymaga poprawek, mimo wyszczególnionych w kolejnym punkcie recenzji uwag i pytań dyskusyjnych.

4. Pytania i zagadnienia dyskusyjne

Praca zawiera niewielką liczbę błędów natury edytorsko-stylistycznej, jest napisana poprawną polszczyzną, a jej edytorska strona jest na dobrym poziomie. Stąd pominięto wskazywanie uchybień w tym zakresie.

W kontekście zagadnień merytorycznych, uwagi i pytania dyskusyjne przedstawione zostały zbiorczo, ale ich celem jest raczej uściślenie pewnych aspektów, a także uzupełnienie pewnych obszarów, które nie do końca, zdaniem recenzenta, zostały w tekście pracy wystarczająco wyjaśnione.

- 1) W przypadku pojedynczych rysunków ich jakość, przez to, że zaczerpnięte są z literatury, nie jest najlepsza. W przyszłości sugerowałbym przerysowanie takich rysunków samodzielnie i opatrzenie np. podpisane „na podstawie [xx]”. Przykładami takich rysunków są: 4.12, 4.13 czy 4.16.
- 2) Na str. 65 doktorant definiuje rozkład początkowy i pseudo-początkowy. W odniesieniu do tych definicji chciałbym prosić o ewentualne wyjaśnienie czy przy narażeniu uzwojeń falą idealnie prostokątną o nieskończonej długości otrzymać możemy rzeczywisty rozkład początkowy?
- 3) Tabela 5.1 moim zdaniem mogłaby być uzupełniona wartościami współczynnika k mówiącego o tym jaka jest krotkość wartości maksymalnej przepięcia do amplitudy napięcia odpowiadającego najwyższemu napięciu roboczemu.
- 4) Nazewnictwo użyte przez doktoranta nie zawsze jest spójne. Do nazywania tych samych zjawisk doktorant używa różnych sformułowań, np. „rozkład napięć/napięcia wzdłuż uzwojenia transformatora”, „rozkład przepięć udarowych”, „rejestracja przebiegów napięć” czy „rejestracja przebiegów przepięć”. Utrudnia to czasem podążanie za myślą autora,

ponieważ nie zawsze wiadomo czy doktorant mówi o tym samym zjawisku/wielkości czy o różnych.

- 5) Na str. 73 doktorant użył sformułowania „... obliczania transformatorów...”. Rozumiem, że jest to element skrótu myślowego stosowanego w przemyśle transformatorowym? Niemniej prosiłbym o wyjaśnienie co dokładnie doktorant miał na myśli.
- 6) Na rys. 7.1 doktorant powinien oznaczyć poszczególne elementy. Dla mniej zorientowanego czytelnika opis w postaci „po kolei od wewnątrz” nie jest czytelny.
- 7) Czy rzeczywiście w kontekście ekranowania uzwojeń używamy sformułowania polaryzacja? W elektrotechnice polaryzacja odnosi się bowiem raczej do biegunowości napięcia (dodatnia/ujemna)?
- 8) Czy doktorant mógłby podać więcej szczegółów na temat generatora użytego w badaniach opisanych w p. 7.2? I dodatkowo, choć oczywiście dla samych wyników nie ma to większego znaczenia, jakiej wartości napięcie (wartość szczytowa udaru) przykładano do uzwojenia celem rejestracji zawartych w tym rozdziale przebiegów?
- 9) Rys. 7.4 przedstawia schemat układu do rejestracji przepięć metodą RSO. Czy na jego podstawie autor mógłby opisać bliżej sposób rejestracji przepięć międzywarstwowych i międzyzwojowych. Wydaje mi się, że zaprezentowany schemat dotyczy rejestracji tylko przepięć doziemnych, a dla przepięć międzycewkowych zastosowany powinien być układ z dwoma sondami? A może się mylę?
- 10) Czy w rozdziale 7.2.2 można było rozpatrzyć jeszcze inne rozwiązania konfiguracji ekranowania? Czy przyjęte konfiguracje wynikały z doświadczenia doktoranta czy podyktowane były innymi czynnikami jak np. sugestiami z fabryki?
- 11) W moim odczuciu współczynnik skuteczności ekranowania przedstawiony w Tabeli 7.5 jest mało intuicyjny. Mówi on bowiem, że skuteczność ekranowania 131% jest lepsza niż ekranowanie na poziomie 257%. Jakie jest jego źródło?
- 12) Analizy numeryczne rozkładu potencjału elektrycznego i odpowiadające mu natężenia pola elektrycznego wykonane zostały dla jednostkowego wymuszenia potencjałem równym 1 V. Szkoda, że autor od razu nie wskazał w opisie, że z punktu widzenia symulacji nie ma większego znaczenia wartość napięcia i natężenia pola elektrycznego, a relacje pomiędzy wartościami odpowiednich wielkości dla danych części uzwojenia. Wzmianka w tym zakresie pojawia się dopiero w dyskusji wyników.
- 13) W tekście pojawiają się od czasu do czasu niefortunne i mało techniczne sformułowania jak np. „kształt rozkładów napięcia” (str. 188).
- 14) Czy wnioski otrzymane z pracy można bezpośrednio zaaplikować do analizy rozwiązań konstrukcyjnych uzwojeń transformatorów wyższych napięć niż te uwzględniane w pracy

czy też należałoby wprowadzić jakieś współczynniki korekcyjne odnośnie wyników czy może jeszcze innego typu założenia? Innymi słowy, czy zdaniem doktoranta relacje w zakresie otrzymanych rozkładów początkowych i pseudo-początkowych napięcia wzdłuż uzwojeń warstwowych i cewkowych otrzymane dla dówch analizowanych konfiguracji są ważne dla rozwiązań konstrukcyjnych transformatorów o wyższych napięciach jak np. 400 kV?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam jak najbardziej pozytywnie. Założenia pracy zostały zrealizowane, a jej cel osiągnięty. Autor rozwiązał sformułowany przez siebie problem badawczy i udowodnił tezę naukową sformułowaną w rozdz.2 rozprawy. Doktorant wypracował oryginalne wnioski, które, co należy podkreślić, mają także charakter praktyczny. Wskazane powyżej uwagi i pytania dyskusyjne w żadnym stopniu nie umniejszają wartości dysertacji, a są jedynie przyczynkiem do głębszej dyskusji na temat wybranych aspektów poruszonych w pracy.

Praca bez wątpienie wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Bartłomieja Adamczyka pt. „*Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych*” **może być dopuszczona do dalszego procedowania, w tym do publicznej obrony.**

