

Gdańsk, 14.09.2023 r.

dr hab. inż. Marek Olesz, prof. uczelni
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Politechnika Gdańska

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

Wpłynęło dnia **21. 09. 2023**

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Adamczyka

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

Wstęp

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne podjętej w dniu 6 lipca 2023 roku.

Niniejsza recenzja została opracowana w oparciu o nadesłany egzemplarz rozprawy doktorskiej przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, Pana dr. hab. inż. Ryszarda SROKA, prof. AGH. Podstawą do jej opracowania jest uchwała Rady Dyscypliny: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, o której poinformowano recenzenta pismem przyjętym na Politechnikę Gdańską w dniu 12.07.2023. Przewód doktorski wszczęto dnia 24 maja 2012r. Opinię wykonano w oparciu o art.13 ust.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz. U. z 2017r. poz. 1789 w związku z art. 179 ust.1 i ust.2 ustawy z dnia 3 lipca 2018r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r. poz. 1669 z późn. zm.).

Przedstawiona recenzja składa się z następujących części:

1. Ogólna charakterystyka rozprawy
2. Charakterystyka tematu oraz tez rozprawy
3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego
4. Uwagi i kwestie dyskusyjne
5. Ocena rozprawy doktorskiej
6. Wniosek końcowy

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt.: „**Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych**” zawiera 217 stron podzielonych na 10 rozdziałów, dwa streszczenia (w języku polskim i angielskim), spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz bibliografię (10

rozdział pracy). Spis literatury zawiera 257 pozycji krajowych i międzynarodowych zestawionych alfabetycznie według nazwiska pierwszego autora. W spisie literatury doktorant jest autorem lub współautorem w 13 pozycjach (w tym posiada 2 patenty o zasięgu europejskim). Prace te doktorant w większości opublikował w renomowanych czasopismach z listy JCR lub w materiałach konferencyjnych, również międzynarodowych.

Spis literatury zawiera tylko część dorobku publikacyjnego, który w całości obejmuje 27 pozycji z liczbą cytowań 35 (Google Scholar). Poziom cytowania uzyskany przez kandydata ubiegającego się o tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne świadczy o jego uznaniu i rozpoznawalności w działalności naukowej związanej z zagadnieniami inżynierii wysokich napięć.

W przedstawionej do oceny pracy można wyróżnić 4 zasadnicze części zestawione w 10 rozdziałach:

- wstęp (rozdział 1) oraz wprowadzenie w temat rozprawy na podstawie którego autor zaproponował tezę pracy i sposób jej udowodnienia; dodatkowo opisano zakres treści poszczególnych rozdziałów (rozdział 2),
- analiza stanu techniki w odniesieniu do transformatorów energetycznych (rozdział 3) oraz konstrukcji ich uzwojeń (rozdział 4),
- opis narażeń przebiegowych występujących w izolacji transformatorów i sposobów ich ograniczania (rozdział 5) z uwzględnieniem metody modelowania i obliczania stanów przejściowych (rozdział 6)
- przedstawienie wyników badań eksperymentalnych i analiz potencjału i rozkładu pola elektrycznego – omówienie wyników pomiarów rozkładów napięć wzdłuż uzwojenia w różnych konfiguracjach ekranów przekładających się na wytyczne w kierunku uzyskania optymalnego rozwiązania izolacyjnego (rozdział 7 – uzwojenia warstwowe i rozdział 8 – uzwojenia cewkowe) oraz uogólnionych wniosków zawartych w podsumowaniu (rozdział 9).

2. Charakterystyka tematu oraz tezy rozprawy

Autor na podstawie doświadczeń zawodowych w firmie ABB w rozprawie doktorskiej podjął zagadnienie określenia wpływu zmian w konstrukcji uzwojeń transformatorów na poziom narażenia przebiegowego dla izolacji. Analizował zmiany konstrukcyjne w budowie ekranowanych cewek warstwowych i zwojowych, zarówno o charakterze celowym jak i przypadkowym wynikającym z błędów na etapie produkcji. Teza zawiera stwierdzenie, że badania eksperymentalne rozkładów przebiegów dla różnych topologii uzwojeń analizowanych za pomocą rozkładu pseudo – początkowego napięcia wraz z dodatkowymi wynikami symulacji rozkładów potencjału i pola elektrycznego umożliwiają ocenę skutków narażenia udarowego i pozwalają udoskonalić konstrukcję układu izolacyjnego transformatora zapewniając wystarczającą ochronę podczas oddziaływania przebiegów. Teza nawiązuje do tytułu pracy - **Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych.**

Zarówno wybrany temat jak i sformułowanie tezy są ważne z technicznego punktu widzenia. Transformator jako istotny element systemu elektroenergetycznego jest narażony

w eksploatacji nie tylko napięciem przemiennym, ale także przepięciami pochodzenia łączeniowego i udarowego. Szczególnie te ostatnie z uwagi na znaczną stromość i amplitudę powodują silne narażenie początkowych części uzwojenia od strony zacisku liniowego. Ciągły rozwój konstrukcji i poszukiwanie nowych rozwiązań technicznych uzwojeń wymusza konieczność analiz odpowiedzi transformatora na napięcie piorunowe tak, aby izolacja transformatora wytrzymała próby typu w odniesieniu do narażeń przepięciowych. Potwierdza ten fakt analiza literaturowa doktoranta – bibliografia zawiera około 20-tu stosunkowo aktualnych pozycji z lat 2020 – 2023, co potwierdza wagę tematu i aktualność rozprawy. Również wyszukiwanie słów zawartych w tytule pracy w popularnej bazie IEEE Explore w podobnym jak poprzednio okresie pozwala znaleźć około 150 pozycji, co świadczy o aktualności analizowanego zagadnienia w kontekście konstrukcji, modelowania i eksploatacji transformatorów.

W rozprawie doktorant skupił się badaniu uzwojeń transformatorów energetycznych w rozwiązaniu cewkowym i warstwowym w różnych konfiguracjach i wykonanych odmiennymi technologiami. Obszerna objętościowo praca przedstawia duży materiał badawczy pozyskany w czasie prób laboratoryjnych. W tym celu doktorant zbudował w Fabryce Transformatorów ABB w Łodzi model uzwojenia warstwowego na którym wykonał pomiary rozkładu napięcia przy oddziaływaniu napięcia udarowego o kształcie $1,2/50 \mu\text{s}/\mu\text{s}$. Badania te istotnie rozszerzono o analizy polowe umożliwiające uzyskanie wiedzy w zakresie poziomu narażeń w początkowej fazie oddziaływania napięcia o znacznej stromości, kiedy rozkład napięcia w układzie izolacyjnym ma charakter pojemnościowy.

Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem szczególnie w zakresie rozdziałów 4 – 8 w których doktorant konsekwentnie analizował i dowodził zaproponowaną tezę. Rozdział 4 zawiera szczegółowe przedstawienie stosowanych konstrukcji cewkowych (cewka odwrócona i nieodwrócona, wywrotkowa, dwucewki przeplatane – Chadwicka- Stearna, Kratochwila i van Nysa rozszerzone o zwoje ekranujące) oraz warstwowych zasilanych od strony zewnętrznej i wewnętrznej. Treści tej części zawierają duży zasób wiedzy praktycznej, konstruktorskiej rozszerzonej o analizy potencjału i natężenia pola elektrycznego co pozwala zrozumieć wywody autora przedstawione w dalszych częściach rozprawy.

Kolejny rozdział 5 przedstawia zjawiska przepięciowe w transformatorach, które będą celem badawczym opisanym w kolejnych rozdziałach. W rozdziale 6 autor słusznie zauważa konieczność stosowania co najmniej dwóch metod w analizie wpływu przepięć na układ izolacyjny - jedną do obliczenia rozkładu napięcia na wejściu transformatora i drugą do obliczenia propagacji napięcia wewnątrz uzwojenia. Połączenie tych obu metod zawarto w rozdziałach 7 i 8 (około 60% objętości pracy) odpowiednio dla uzwojeń warstwowych i cewkowych w różnych opisanych wcześniej w rozdziale 5 realizacjach.

Rozprawa doktorska na potrzeby udowodnienia postawionej tezy po koniecznych wprowadzeniach teoretycznych opisuje prawidłowo przeprowadzony eksperyment oraz badania symulacyjne. Struktura pracy jest przejrzysta i logiczna. Poszczególne rozdziały zachowują układ przyczynowo-skutkowy i odzwierciedlają przyjętą metodykę badań, którą doktorant w moim odczuciu powinien opisać bardziej wyczerpująco (występują pewne niedomówienia w opisie stanowiska pomiarowego (przedstawione w p.4 recenzji) oraz brak

programu badań, który dopiero wynika z prezentowanych wyników eksperymentalnych i symulacyjnych.

3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego

Autor w celu rozwiązania problemu naukowego postawił sobie szereg szczegółowych zadań:

- omówienie etapów rozwoju transformatorów energetycznych z opisem obecnych rozwiązań i kierunków ich dalszego rozwoju,
- szczegółowe przedstawienie stosowanych w praktyce rozwiązań uzwojeń warstwowych i cewkowych,
- opisanie rodzajów występujących w układach energetycznych przepięć z uwzględnieniem ich modelowania na potrzeby określania rozkładów napięcia wzdłuż długości uzwojenia,
- wykonanie rozkładów napięcia w uzwojeniach wielowarstwowych w 6 konfiguracjach i ich analiza przez wyznaczenie rozkładu pseudo początkowego oraz rozkładów napięcia wzdłuż uzwojenia dla różnych czasów po doprowadzeniu udaru – prace te rozszerzono o pomiar i analizę wpływu ekranów elektrostatycznych,
- porównanie wyników eksperymentalnych rozkładów napięcia z wynikami symulacyjnymi,
- powtórzenie obu ostatnich punktów dla uzwojeń cewkowych, które wykonano dla różnego sposobu wykonania dwucewek i czterocewek z zastosowaniem lub bez pierścieni ekwipotencjalnych.

Wymienione prace wykonano i opisano w p. 3 – 9, z których najważniejsze dla udowodnienia tezy są punkty 7 i 8. Zawierają one wyniki doświadczalne przeprowadzone na przygotowanych modelach cewek rozszerzone o analizę pola elektrycznego dla różnych konfiguracji połączenia uzwojeń i ekranów. Z zasady przeprowadzony eksperyment nie może być wykonywany przy oddziaływaniu napięcia probierczego stosowanego w próbach typu. Wprowadzenie niższych wartości napięcia udarowego powoduje występowanie większych wartości rezystancji w układzie izolacyjnym, co niewątpliwie zmienia rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia.

Autor w zasadzie osobno opisuje wyniki eksperymentalne i symulacyjne poprzez zamieszczenie rozkładów potencjału wzdłuż długości uzwojenia, co nie pozwala na stwierdzenie komplementarności obu stosowanych sposobów analizy. Wyjątkiem jest rys.7.52 na którym pokazano zgodność wyników eksperymentalnych i obliczeń potencjału elektrostatycznego. Szkoda, że tego rodzaju porównania nie wykonano dla uzwojenia cewkowego.

Mimo przedstawionych zastrzeżeń, co do rozwiązania problemu Wyniki zrealizowanych prac pozwalających określić strefy narażenia w układach izolacyjnych różnych typów uzwojeń są oryginalne i ważne dla projektantów oraz służb eksploatujących transformatory energetyczne.

4. Uwagi i kwestie dyskusyjne

Część eksperymentalna stanowi zasadniczą część pracy (50% objętości pracy), podczas której pokazano rozkłady początkowe napięcia odpowiednio dla uzwojeń warstwowych, a następnie cewkowych znajdujących się w różnych konfiguracjach.

Na podstawie wykonanych rozkładów początkowych i obliczeń potencjału elektrostatycznego i natężenia pola elektrycznego autor podał szereg wniosków pomocnych w projektowaniu i konstruowaniu transformatorów charakteryzujących się poprawną wytrzymałością udarową. Podjęty wysiłek eksperymentalny pozwolił również określić wpływ ekranów elektrostatycznych – ich połączenia z uzwojeniem wielowarstwowym na poziom przepięć wzdłuż uzwojenia.

W analizie treści rozdziału 7 nasunęły się następujące uwagi:

4.1. Do celów pracy zbudowano pełnowymiarowy model uzwojenia jednej fazy transformatora o mocy 63 MVA i przekładni 147/10,5 kV stosując 11 - warstwowe uzwojenie WN z nawinięciem przewodem o ciągłej transpozycji żył, uzwojenie miało 2 ekrany – wewnętrzny podłączony do zacisku liniowego, a zewnętrzny do uziemionego punktu gwiazdowego. Zaproponowany układ uzwojeń autor pokazał na rys. 4.15 pracy i zakwalifikował jako uzwojenie wielowarstwowe zasilane od strony wewnętrznej, które w praktyce rzadko występuje. Nasuwa się tu pytanie – dlaczego praca analizuje właśnie podany rodzaj uzwojenia i na ile wyniki obliczeń mogą być transponowane na inne układy wielowarstwowe z uziemionym punktem gwiazdowym od strony wewnętrznej? Czy autor podejmował takie analizy? Jakie powody ostatecznie skłoniły autora do wybrania obiektu opisanego w pracy?

4.2. Podczas wykonywania badań eksperymentalnych uzwojeń warstwowych autor stosował programowalny generator napięcia. Z kolei przy analizie uzwojenia cewkowego wykorzystał wyniki badań z innej pracy doktorskiej za zgodą jej autora, który korzystał z generatora udarów piorunowych o amplitudzie 300 V i sygnału prostokątnego o napięciu 20 V. Parametry rezystancyjne układu izolacyjnego istotnie zależą od poziomu napięcia – czy autor porównywał otrzymane wyniki z przebiegami otrzymanymi przy wyższych napięciach udarowych, które można otrzymać z generatora napięć piorunowych? Pojawiające się wówczas upływności o charakterze doziemnym i między cewkowym mogą łagodzić przepięcia w analizowanym układzie.

4.3. Zastosowane wyprowadzenia przylegając do konstrukcji uzwojenia wprowadzają dodatkowe parametry R, L, C w układzie izolacyjnym. Czy doktorant analizował np. wpływ długości wyprowadzeń na otrzymane wyniki badań eksperymentalnych?

4.4. W treści pracy brakuje również opisu układu pomiarowego (długości przewodów, rodzaj sondy, sposób podłączenia oscyloskopu i akwizycji danych). Czy autor analizował ewentualne występowanie zjawisk falowych powodujących wzrost mierzonego napięcia na wejściu oscyloskopu na skutek niedopasowania jego impedancji do impedancji falowej wyprowadzeń z uzwojeń? Wiele szczegółów dotyczących układu zastosowanego w części eksperymentalnej ma wpływ na wynik pomiaru – częstotliwość próbkowania, tryb detekcji wartości maksymalnej, kompensacja sondy pomiarowej, sposób uziemienia wejścia oscyloskopu - to niektóre zagadnienia wymagające dodatkowych wyjaśnień doktoranta, szczególnie z uwagi na realizację pomiaru napięć szybkozmiennych pojawiających się izolacji doziemnej jak i międzywarstwowej.

4.5. Doktorant pisze o stosowaniu oscyloskopu z 1 aktywnym wejściem, do którego dołączono sondę napięciową. Dlaczego nie stosowano akwizycji w 2 lub więcej kanałach?

W jaki sposób doktorant przynosił z oscyloskopu dane, które ostatecznie prezentował na wykresach $u(t)$ – czy stosował podczas tej operacji np. filtrację danych?

4.6. Udar w chwili $t=1,2 \mu\text{s}$ niekoniecznie przechodzi przez wartość szczytową z uwagi na tzw. umowny czas początku udaru.

4.7. Jak oceniano skuteczność ekranowania uzwojeń i ograniczanie różnicy napięć pomiędzy stanem początkowym, a końcowym. Autor w p. 7.2.4 zaproponował właściwą ocenę skuteczności ekranowania na podstawie ograniczonej liczby punktów pomiarowych. Dodatkowo w innych częściach pracy zestawiał największe odchylenia rozkładu pseudo – początkowego od rozkładu liniowego, a następnie porównał obliczenia symulacyjne z badaniami eksperymentalnymi uzyskując jakościowo zgodność wyników. Wynika z tego, że badania symulacyjne prowadzą do poprawnego wyznaczenia maksymalnych różnic potencjału elektrostatycznego między cewkami na podstawie zasad elektrostatyki. Dla lepszej oceny dokładności skuteczności ekranowania brakuje jednak zestawienia sugerowanych przez autora wskaźników tłumienia otrzymanych z badań eksperymentalnych i wskaźników charakteryzujących wyniki obliczeń polowych.

Autor odnosi wyniki pomiarów i analiz wyłącznie do opracowania Saied M. M. – The time and Frequency Response of Shielded Transformer Windings opublikowanej w 2014 w Journal of Power Electronics & Power Systems [195], podczas gdy podobnych prac jest znacznie więcej. Czy wyniki dostępne w innych pracach potwierdzają jakościowo i/lub ilościowo rezultaty uzyskane przez doktoranta?

Pomimo podanych wyżej uwag niewątpliwie należy stwierdzić, że doktorant wykonał szeroki zakres prac konstrukcyjnych i pomiarowych zmierzających do określenia skuteczności działania ekranów oraz wpływu parametrów konstrukcji uzwojeń. Wyniki uzyskane przez doktoranta są oryginalne w świetle aktualnego stanu wiedzy i mogą być wykorzystane przede wszystkim przez projektantów transformatorów energetycznych.

5. Ocena rozprawy doktorskiej

Analizując szczegółowo zawartość pracy stwierdzam, że autor w sposób jednoznaczny sformułował problem naukowy, a następnie przez zastosowanie metod eksperymentalnych i analitycznych właściwie go rozwiązał. Udowodnienie tezy jest jednoznaczne, a sposób zastosowany przez doktoranta świadczy pozytywnie o Jego wysokich umiejętnościach nie tylko badawczych, lecz również wykonywania obliczeń polowych układów o umiarkowanej złożoności. Tezę pracy udowodniono na podstawie zestawienia wyników dwóch metod – eksperymentalnej i analitycznej. Każda z nich tworzy odmienny zbiór wyników, które wzajemnie się uzupełniają.

Rozprawę doktorską oceniam wysoko z uwagi na duży zakres oryginalnych prac eksperymentalnych i zoptymalizowany program badań i analiz. Na ich podstawie autor podał szereg ogólnych wytycznych dla rozwiązań cewkowych i warstwowych prowadzących do wyrównania rozkładów potencjału wzdłuż uzwojenia cewkowego, o czym świadczy współczynnik α zmniejszający swoją wartość od 7,8 (uzwojenie wywrotkowe) do 2,4 – uzwojenie z czterocewek Chadwicka – Sterna z pierścieniem ekwipotencjalnym oraz relatywnie niskie poziomy dla uzwojenia warstwowego z pełnym ekranem z zakresu $\alpha=1,2 \div 2$.

Podsumowanie pracy dotyczy wykonanych modeli uzwojeń charakteryzujących się określonymi wartościami pojemności wewnętrznych. Rozszerzenie analizy o obliczenia rozkładu pola elektrycznego pozwala na wstępną analizę innych rozwiązań projektowych. W tym przypadku brakuje jednak metody sprawdzania parametrów uzwojenia pod kątem rozkładów napięcia na podstawie obliczenia konkretnych wielkości, które pozwoliłyby zaakceptować lub odrzucić zaproponowane przez projektanta rozwiązanie. Przedstawiona przez doktoranta obszerna rozprawa podsumowuje niewątpliwie pracowity etap badań, który zasługuje na uznanie z uwagi na podjęcie analizy różnych konstrukcji uzwojeń pod kątem odpowiedzi na przepięcie udarowe.

Sformułowanie tezy pracy i jej udowodnienie wskazuje na dużą wiedzę autora i jego znajomość zagadnień modelowania matematycznego, wykonywania badań eksperymentalnych i ich analizy. Autor bardzo dobrze opanował technikę pisania prac naukowych, o czym świadczy stosunkowo niewielka liczba błędów stylistycznych i interpunkcyjnych.

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona recenzja rozprawy doktorskiej Bartłomieja Adamczyka pt. **Analiza szybkich zjawisk przejściowych w wybranych topologiach uzwojeń transformatorów energetycznych** pozwala na stwierdzenie, że autor w sposób prawidłowy i oryginalny rozwiązał przedstawione zagadnienie naukowe. Uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich zawarte w obowiązujących przepisach, a w szczególności w art. 13 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2004 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami).

Przedstawiona do oceny pracy potwierdza umiejętność rozwiązywania problemów naukowych oraz opanowania przez autora wiedzy w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (wg Rozporządzenia MNiSW z 2018 r.) i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Adamczyka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Doktorant jest współautorem i głównym autorem pozycji „Effect of shielding on surge overvoltages in multilayer type windings of power transformer opublikowanej w IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, w roku 2016 (Volume: 23, Issue: 3) oraz współautorem trzech pozycji w Przeglądzie Elektrotechnicznym. Z uwagi na fakt znacznego dorobku publikacyjnego i patentowego doktoranta oraz opracowania oryginalnych zasad oceny konstrukcji uzwojeń umożliwiających uzyskanie największej odporności izolacji w stanach oddziaływania napięcia udarowego wnioskuje o wyróżnienie pracy.



dr hab. inż. Marek Olesz, prof. uczelni
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Politechnika Gdańska

