

Dr hab. inż. Waldemar Dołęga
Katedra Energoelektryki
Wydział Elektryczny



Wrocław, 2016.11.20

Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. (71) 3203465
fax (71) 3202656
e-mail: Waldemar.dolega@pwr.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Książkiewicza
pt. „Procesy elektrodowe w niskonapięciowych przekąźnikach prądu
przemiennego”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego prof. PP, przekazane pismem DE-589/2016 z dnia 28. 09.2016 wraz z egzemplarzem rozprawy doktorskiej, a otrzymanym w dniu 30.09.2016.

1. Przedmiot rozprawy

Przekąźniki prądu przemiennego niskiego napięcia stosuje się powszechnie m.in. w układach automatyki i sterowania. Szybki postęp techniczny i informatyczny powoduje, że układy te przeżywają okres dynamicznego i intensywnego rozwoju, są coraz częściej stosowane i obejmują coraz więcej obszarów. Przynosi to ogromne korzyści zarówno społeczeństwu jak i całej gospodarce. Wraz z poszerzaniem zakresu stosowania wspomnianych układów zwiększa się zakres stosowania przekąźników prądu przemiennego i ich rola w instalacjach. Stanowią one ważne elementy składowe większości urządzeń, aparatów i układów elektrycznych.

Jednym z bardzo ważnych obszarów rozwijanych w ostatnim okresie jest obszar inteligentnych instalacji elektrycznych i tzw. automatyki budynkowej gdzie przekąźniki są wykorzystywane w urządzeniach (elementach) wykonawczych tzw. aktorach. Powszechne stosowanie takiej automatyki zwielokrotni zarówno ich liczbę jak i zakres ich wykorzystania. Konieczne jest w związku z tym wszechstronne zbadanie zjawisk, które występują w takich przekąźnikach. W czasie swojej pracy przekąźniki narażone są bowiem na wiele procesów (cieplne działanie prądów roboczych i zwarciovych, elektrodynamiczne oddziaływanie prądów zwarciovych, palenie się łuku elektrycznego itp.) które mogą niekorzystnie oddziaływać na ich układ stykowy, prowadząc do erozji powierzchni stykowej. Pogarsza to parametry eksploatacyjne takiego przekąźnika, a w skrajnym przypadku prowadzi nawet do jego uszkodzenia. Taki stan przenosi się na urządzenie, którego elementem jest wspomniany przekąźnik. W przypadku, gdy jest to urządzenie wykonawcze automatyki budynkowej uszkodzenie takie może być kosztowne.

Problematyka niekorzystnych oddziaływań jest znana od dawna i dobrze przebadana, ale w odniesieniu do urządzeń i aparatów elektroenergetycznych. Szczególnie dobrze przebadane są te zjawiska w stosunku do łączników. Nie dotyczy to jednak przekaźników prądu przemiennego niskiego napięcia. Ten obszar był traktowany przez naukowców po „macoszemu”. Jeśli badano wspomniane zjawiska to głównie w odniesieniu do przekaźników prądu stałego, rzędu kilku, kilkunastu woltów stosowanych w układach sterowania. Dlatego podjęcie tematu w ramach rozprawy doktorskiej przez Doktoranta było w pełni uzasadnione i właściwe, świadczy o bardzo dużym rozeznaniu w problematyce dotyczącej urządzeń i aparatów elektrycznych. Doktorant znalazł „niszę” we wspomnianym obszarze naukowo-badawczym i zapełnił ją realizując swój ciekawy i oryginalny program badawczy.

2. Przegląd treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy łącznie 197 stron, 49 tabel, 126 rysunków i 102 pozycje literaturowe. Składa się z 9-ciu rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, listą najważniejszych symboli i definicji oraz uzupełnionych załącznikiem i zestawieniem bibliografii, tablic i rysunków.

W rozdziale 1 (Wprowadzenie) przedstawiono przekrojowo problematykę wpływu wybranych procesów elektrodowych na układy stykowe przekaźników elektromagnetycznych, która bezpośrednio związana jest z tematyką rozprawy.

W rozdziale 2 (Przekaźniki elektromagnetyczne prądu przemiennego) omówiono dokładnie przekaźniki elektromagnetyczne prądu przemiennego. Przedstawiono stosowane w literaturze klasyfikacje łączników elektroenergetycznych wraz z umiejscowieniem w niej przekaźników. Omówiono parametry, budowę i zasady działania przekaźników elektromagnetycznych niskiego napięcia. Ponadto przedstawiono kryteria doboru zabezpieczeń nadmiarowo-prądowych do ochrony przekaźników.

W rozdziale 3 (Materiały stykowe) przedstawiono zagadnienia dotyczące materiałów stykowych. Omówiono podstawowe parametry i właściwości materiałów stykowych zwracając szczególną uwagę na te które, wykorzystywane są na styki przekaźników niskiego napięcia.

W rozdziale 4 (Rezystancja zestykowa) przedstawiono zagadnienie rezystancji zestykowej. Przedstawiono ujęcie teoretyczne rezystancji zestykowej, w tym podstawowy, stosowany powszechnie model jej analizy. Omówiono analityczne sposoby wyznaczania wartości rezystancji zestykowej oraz dokonano przeglądu stosowanych metod jej pomiaru.

W rozdziale 5 (Procesy elektrodowe w niskonapięciowych przekaźnikach prądu przemiennego) przedstawiono szczegółowo wybrane procesy elektrodowe które występują w przekaźnikach niskiego napięcia. Omówiono zagadnienie erozji mechanicznej powstałej na skutek wzajemnego bezprądowego oddziaływania styków przekaźnika oraz proces erozji powierzchni elektrod wynikający z łączenia prądów roboczych i zwarciovych. Przedstawiono zjawiska towarzyszące nagrzewaniu elektrod przekaźników przy przepływie prądów roboczych i zwarciovych oraz oddziaływania elektrodynamiczne występujące podczas przepływu prądów zwarciovych.

W rozdziale 6 (Cel, teza i zakres pracy) przedstawiono cel i tezę rozprawy doktorskiej oraz obszerny obejmujący 11 punktów zakres wykonywanych w ramach niej badań i analiz.

W rozdziale 7 (Układy i aparatura pomiarowa) omówiono układy pomiarowe oraz aparaturę wykorzystywaną do badań realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej. Przedstawiono oryginalny autorski układ do wykonywania prób łączeniowych zwracając szczególną uwagę na zasadę jego działania, schemat elektryczny i analizę błędów w zakresie wykonywanych pomiarów wartości rezystancji przejścia wraz z poglądowym przykładem obliczeniowym.

W rozdziale 8 (Wyniki badań) najważniejszym w pracy obejmującym 87 stron (44 % pracy) przedstawiono dokładny opis otrzymanych wyników badań eksperymentalnych, obliczeń i analiz. Przedstawiono parametry techniczne badanych przełączników. Dokonano oceny skutków wzajemnego mechanicznego oddziaływania styków przełącznika. Przedstawiono ewaluację erozji powierzchni elektrod spowodowanej łączeniem prądów roboczych i zwarciovych. Scharakteryzowano stan cieplny zestyków przy przepływie prądów roboczych i zwarciovych w oparciu o wyniki obliczeń nagrzewania się styków. Scharakteryzowano elektrodynamikę styków przy przepływie prądów przetężeniowych w oparciu o wyniki obliczeń i badań oddziaływań elektrodynamicznych. Dokonano analizy występowania szepień w układzie stykowym. Przedstawiono analizę działania zabezpieczeń przy przepływie prądów zwarciovych.

W rozdziale 9 (Podsumowanie i wnioski końcowe) przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonych badań procesów elektrodowych oraz zalecenia w zakresie projektowania i eksploatacji przełączników elektromagnetycznych niskiego napięcia.

W załączniku A (Wyznaczanie współczynnika oddawania ciepła) przedstawiono sposób wyznaczenia współczynnika oddawania ciepła przez promieniowanie oraz konwencję oraz arkusz kalkulacyjny umożliwiający jego wyliczenie.

Bibliografia obejmuje 102 pozycje literaturowe. Znajdują się wśród nich: podręczniki, akademickie, monografie, artykuły, referaty, normy, opracowania, katalogi oraz wybrane regulacje krajowe i unijne związane z przedmiotem badań realizowanych przez Doktoranta.

3. Ocena merytoryczna treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest bardzo wartościowym i oryginalnym opracowaniem naukowym zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym, zawierającym obszerne i ciekawe wyniki badań eksperymentalnych, analitycznych i symulacyjnych.

Prawidłowo uzasadniono cel badań polegający na ustaleniu czynników mających istotny wpływ na wybrane procesy elektrodowe występujące podczas operacji łączeniowych w przełącznikach elektromagnetycznych niskiego napięcia.

Właściwie sformułowano tezę rozprawy w brzmieniu *„Procesy elektrodowe wpływają na stan powierzchni stykowej ulegającej erozji oraz na wartość rezystancji przejścia zestyków. Stosowane powszechnie zabezpieczenia przetężeniowe nie chronią w sposób wystarczający zestyków przełączników przed destrukcyjnymi skutkami załączania i przepływu prądów zwarciovych występujących w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia.”* którą udowodniono.

Bardzo cenne jest prezentowane w pracy spojrzenie na procesy elektrodowe z punktu widzenia ich wpływu na techniczne i eksploatacyjne warunki pracy przełączników elektromagnetycznych niskiego napięcia. Pozwala to na pełne praktyczne przełożenie poruszanych zagadnień na instalacje elektryczne niskiego napięcia w których funkcjonują takie przełączniki jako elementy składowe urządzeń i aparatów elektrycznych.

Problem naukowy przedstawiony przez Doktoranta został rozwiązany w najobszerniejszym rozdziale rozprawy – rozdziale 8 (Wyniki badań) z wykorzystaniem układów i aparatury pomiarowej przedstawionej w rozdziale 7 (Układy i aparatura pomiarowa). Doktorant przeprowadził wiele serii badań eksperymentalnych, analitycznych i symulacyjnych w zakresie dotyczącym: oceny skutków wzajemnego mechanicznego oddziaływania styków przełącznika, ewaluacji erozji powierzchni elektrod spowodowanej łączeniem prądów roboczych, ewaluacji erozji powierzchni elektrod spowodowanej łączeniem prądów zwarciovych, stanu cieplnego zestyków przy przepływie prądów roboczych i zwarciovych, elektrodynamiki styków przy przepływie prądów przetężeniowych

i działania zabezpieczeń przy przepływie prądów zwarciovych. Warta podkreślenia jest duża liczba badań eksperymentalnych wykonanych przez Doktoranta na opracowanych przez siebie stanowiskach laboratoryjnych.

Badania miały charakter wielowariantowy, zostały wszechstronnie zweryfikowane przy czym weryfikacja badań była realizowana zarówno na bazie analizy literaturowej jak i przy wykorzystaniu innej procedury badawczej.

Wyniki badań mają dużą wartość nie tylko poznawczą, ale i praktyczną, gdyż zalecenia konstruktorskie, projektowe i eksploatacyjne mogą być wykorzystane do opracowania lepszych rozwiązań przekładników elektromagnetycznych niskiego napięcia i do właściwego ich zabezpieczania w instalacjach niskiego napięcia.

4. Ocena struktury rozprawy doktorskiej, podziału treści i poprawności językowej

Praca napisana jest w sposób staranny, jasny i zrozumiały przy użyciu bardzo dobrego języka naukowo-technicznego. Autor używa właściwej terminologii i zrozumiałych zwrotów technicznych. Przedstawia problematykę płynnie. Liczba błędów gramatycznych i edycyjnych (literówek) jest stosunkowo niewielka. Szata graficzna pracy jest właściwa. Praca jest wszechstronnie zilustrowana, zawiera 49 tabel i 126 rysunków.

Struktura pracy oraz podział treści na rozdziały jest właściwa. Rozdziały 2, 3, 4, 5 mają walor poznawczy i stanowią podbudowę teoretyczną dla realizowanych badań nakreślając problematykę: przekładników elektromagnetycznych prądu przemiennego, materiałów stykowych, rezystancji zestykowej i procesów elektrodowych w niskonapięciowych przekładnikach prądu przemiennego.

W rozdziale 6 przedstawiono cel, tezę i zakres pracy. Stanowi to naturalne umiejscowienie własnych zamierzeń Doktoranta na tle istniejącego stanu wiedzy w tym obszarze.

Rozdziały 7, 8 i 9 dotyczą bezpośrednio przeprowadzonych badań przez Doktoranta. W rozdziale 7 przedstawiono w sposób wyczerpujący opis układów i aparatury pomiarowej wykorzystywanej w procesie badawczym. Doktorant realizował badania na dwóch opracowanych przez siebie stanowiskach badawczych: stanowisku do badań przekładników umożliwiającym wykonywanie prób łączeniowych (załączania oraz wyłączania prądu roboczego lub przetężeniowego w sposób kontrolowany) oraz wykonywanie pomiarów odskoków styków przy ich bezprądowym załączaniu i stanowisku do badań odskoków elektrodynamicznych styków przekładników. Doktorant wykorzystywał dodatkowo nowoczesną aparaturę pomiarową: mikroomierz MI3252, mikroskop skaningowy S-3000N, aparat cyfrowy Nikon I J5, mikroskop cyfrowy DigiMicro Lab 5.0, dynamometr cyfrowy FS-2 i kamerę termowizyjną Fluke Ti-20.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania dotyczyły: oceny skutków wzajemnego mechanicznego oddziaływania styków przekładnika, ewaluacji erozji powierzchni elektrod spowodowanej łączeniem prądów roboczych i zwarciovych, stanu cieplnego zestyków przy przepływie prądów roboczych i zwarciovych, elektrodynamiki styków przy przepływie prądów przetężeniowych i działania zabezpieczeń przy przepływie prądów zwarciovych. Przedstawiono je w rozdziale 8. Zastosowane przez Doktoranta opisy i prezentacje wyników badań są usystematyzowane i właściwe. Materiał badawczy jest dobrze zilustrowany w postaci tabel, wykresów i zdjęć. Doktorant przeprowadził usystematyzowaną wnikliwą dyskusję i wszechstronną analizę uzyskanych wyników. Bardzo dobrym rozwiązaniem jest zastosowane przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej podsumowanie każdej części badań.

Praca została zakończona (rozdział 9) ciekawym podsumowaniem i interesującymi wnioskami końcowymi wynikającymi z przeprowadzonych badań procesów elektrodowych.

Spis literatury dołączony do pracy zawiera 102 pozycje, które są dobrze dobrane i właściwe dla tematyki rozprawy. Obejmują one podręczniki, akademickie, monografie,

artykuły, referaty, normy, opracowania, katalogi oraz wybrane regulacje krajowe i unijne. Są to w zdecydowanej większości aktualne publikacje opracowane po 2000 r. Zamieszczone są w kolejności cytowania w tekście rozprawy. W tekście znajdują się odwołania do wszystkich publikacji, a Doktorant cytuje je obszernie, prawidłowo i we właściwych miejscach swojej rozprawy. Świadczy to o bardzo dobrej znajomości przez Doktoranta wspomnianych publikacji.

Rozprawa doktorska opracowana przez Doktoranta jednoznacznie wskazuje, że Doktorant w bardzo dobrym stopniu opanował umiejętność redagowania rozpraw i tekstów naukowych, raportów technicznych i tekstów o charakterze dydaktycznym. Lektura rozprawy jest ciekawa i interesująca i można ją polecać nie tylko specjalistom, co jest postrzegane przez Recenzenta jako jej dodatkowa zaleta. Doktorant świetnie się czuje w tematyce dotyczącej przekąźników prądu przemiennego niskiego napięcia, ma bardzo dużą wiedzę w tym obszarze i potrafi to przedstawić w sposób jasny i zrozumiały w tekście. Od początku do końca w pełni „panuje” nad tekstem rozprawy doktorskiej, realizując jej cel i udowadniając postawioną tezę.

5. Główne osiągnięcia Doktoranta

Lista istotnych osiągnięć Doktoranta uzyskanych w ramach rozprawy doktorskiej zawiera elementy wymienione w rozdziale 9 (Podsumowanie i wnioski końcowe) na stronach 177-178, a sformułowane w postaci wniosków końcowych. Recenzent uważa, że lista ta powinna być znacznie poszerzona. Osiągnięciem Doktoranta jest kompleksowe opanowanie i przedstawienie problematyki związanej z procesami elektrodowymi występującymi w przekąźnikach prądu przemiennego niskiego napięcia oraz wszechstronne ich przebadanie w zakresie dotyczącym: oceny skutków wzajemnego mechanicznego oddziaływania styków przekąźnika, ewaluacji erozji powierzchni elektrod spowodowanej łączeniem prądów roboczych i zwarciovych, stanu cieplnego zestyków przy przepływie prądów roboczych i zwarciovych, elektrodynamiki styków przy przepływie prądów przetężeniowych oraz działania zabezpieczeń przy przepływie prądów zwarciovych.

6. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

1. Str. 26 - W tablicy 3.2 Doktorant przedstawił zestawienie właściwości fizycznych wybranych proszkowych materiałów stosowanych na styczki. Określono w niej m.in. procentową przewodność elektryczną tych materiałów w stosunku do miedzi. Proszę o podanie jakiego rodzaju miedzi to dotyczy, czy jest to miedź elektrolityczna ?
2. Str. 28 – Przy analizie styków wykonanych z AgCdO Doktorant stwierdza, że wspomniane styki charakteryzują się wzrostem efektywności gaszenia łuku elektrycznego. Proszę o wyjaśnienie tego pojęcia przez Doktoranta, bowiem przedstawiony mechanizm rozpadu CdO i uwolnienia tlenu w temperaturze ok. 900°C może co najwyżej ułatwiać zgaszenie łuku elektrycznego w ograniczonym stopniu ?
3. Str. 31 – Doktorant stwierdza, że w przypadku zestyku nie można ustalić powierzchni przekroju zestyku na podstawie jego wymiarów geometrycznych bowiem rzeczywista powierzchnia styczności jest znacznie mniejsza niż nominalna (pozorna) powierzchnia styczności i podaje, że rzeczywista powierzchnia styczności może stanowić ok. 5% powierzchni pozornej styku, powołując się na publikację: Kulas S., Tory prądowe i układy zestykowe, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008. Proszę o wyjaśnienie czy określona w taki sposób wielkość rzeczywistej powierzchni styczności w stosunku do powierzchni pozornej styku wynika z badań prof. Kulasa przedstawionych we wspomnianej publikacji i czy są znane Doktorantowi inne badania w tym zakresie ?

4. Str. 45 - Porównując wartość początkową i końcową rezystancji przejścia w trakcie realizowanych cykli łączeniowych, Doktorant stwierdził, że zmniejszenie tej rezystancji nastąpiło dla każdego z badanych przełączników, a rezystancja ustaliła się po ok. 1300-1500 cyklach łączeniowych. Proszę o bliższe wyjaśnienie po ilu cyklach łączeniowych ustalała się rezystancja przejścia dla różnych modeli badanych przełączników wyposażonych w styki wykonane z różnych materiałów stykowych (AgNi, AgSnO₂, AgSnO₂ P, AgCdO) ?
5. Str. 62 - Proszę o wyjaśnienie na jakiej podstawie Doktorant przyjął, że dopuszczalna temperatura styków nie może przekroczyć 105°C ?. Nie wynika to bowiem bezpośrednio z komentarza Doktoranta „Porównując dane z przedstawionymi w tablicy 3.5 dla rozpatrywanych materiałów stykowych AgNi, AgSnO₂, AgCdO ich temperatury mięknięcia oraz topnienia pokrywają się z wartościami przedstawionymi w tablicy 5.3 dla czystego srebra. Można przyjąć, że dopuszczalna temperatura styków nie może przekroczyć 105°C.” który jest niejasny w tym względzie.
6. Str. 64 – Doktorant stwierdza, że dla styków wykonanych z materiałów o dużej przewodności cieplnej i przy małych promieniach mikroplaszczysz styczości, temperatury w miejscach styczości praktycznie nadążają za chwilowymi wartościami prądów o częstotliwości przemysłowej. Proszę o wyjaśnienie pojęcia „częstotliwość przemysłowa” używanego przez Doktoranta ?
7. Str. 67 - Proszę o wyjaśnienie skąd wynikają tak duże rozbieżności w szacowaniu współczynnika k zależnego od materiału i kształtu zestyków określonego wzorem 5.28.?. Współczynnik ten przyjmuje wartości wg prof. Maksymiuka (publikacja: Maksymiuk J., Aparaty elektryczne: podstawy doboru i eksploatacji, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1977) od 1300 do 1800 $[A/N^{-0.5}]$ natomiast wg prof. Kulasa (publikacja: Kulas S., Tory prądowe i układy zestykowe, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008) od 1200 do 2850 $[A/N^{-0.5}]$.
8. Str. 88 - Proszę o wyjaśnienie w kontekście skutków wzajemnego mechanicznego oddziaływania styków przełącznika, dlaczego nie ma możliwości jednoznacznego potwierdzenia związku odskoków z twardością materiału stykowego ?
9. Str. 90 – Doktorant przeprowadził 2000 bezobciążeniowych operacji przełączeń przełączników i co każdą setną operację dokonywał pomiaru rezystancji przejścia zestyku. Proszę o wyjaśnienie dlaczego pomiar rezystancji przejścia zestyku był dokonywany raz na sto operacji łączeniowych, a nie częściej ?
10. Str. 93 - Podsumowując, Doktorant stwierdził, że proces bezprądowego zamykania styków charakteryzuje się znaczną liczbą odskoków, w przedziale od pojedynczych odskoków do nawet ponad trzydziestu, z dominującą liczbą dziesięciu odskoków. Proszę o wyjaśnienie dla jakich spośród badanych styków przełączników (AgNi, AgSnO₂, AgSnO₂ P, AgCdO) liczba ta była największa, a dla jakich najmniejsza ?
11. Str. 98 – W tablicach 8.3, 8.5, 8.7, 8.10, 8.11, 8.16, 8.18 i 8.25 Doktorant podał wielkość zerodowanej powierzchni stykowej dla badanych styków przełączników (AgNi, AgSnO₂, AgSnO₂ P, AgCdO) przy realizacji różnych badań eksperymentalnych. Proszę o wyjaśnienie jak określano wielkość zerodowanej powierzchni stykowej ?. Powierzchnie te miały często nieregularny kształt i formę.
12. Str. 107 – Doktorant stwierdza, że tylko w przypadku styków wykonanych z AgSnO₂ P widać wzrost (o ok. 50 %) wartości rezystancji w stosunku do wartości przed próbami i dodaje, że pomimo znikomej jej zmienności to właśnie dla AgSnO₂ P osiągana jest największa wartość odchylenia standardowego przy czym uważa przy tym, że nie jest to istotne zróżnicowanie wartości. Proszę o wyjaśnienie dlaczego nie jest to istotne zróżnicowanie wartości wg Doktoranta ?
13. Str. 112 – W tablicy 8.8 Doktorant przedstawił zmianę wartości rezystancji przejścia zestyków przełączników, przy załączaniu prądu znamionowego 16A w losowej fazie napięcia,

dla różnych materiałów stykowych. Zabrakło jednak komentarza Doktoranta w tym względzie. Proszę o wyjaśnienie jak kształtuje się rezystancja zestykowa (AgNi , AgSnO_2 , $\text{AgSnO}_2 \text{ P}$, AgCdO) w zależności od liczby załączeń i dlaczego jej wartości są tak zróżnicowane dla tego samego materiału stykowego ?

14. Str. 113 – Doktorant stwierdził, że wielkość zerodowanej powierzchni określona w tablicy 8.10 jest podobna do tej zaobserwowanej przy załączaniu w maksimum napięcia, którą przedstawiono w tablicy 8.7. Ponadto stwierdził, że wielkość ta jest również większa niż wyznaczona na stykach dla prób przy załączaniu w zerze napięcia, którą przedstawiono w tablicy 8.5. Proszę o bliższe wyjaśnienie, bowiem nie dostrzegam tu podobieństwa, może za wyjątkiem styku wykonanego z AgCdO ?

15. Str. 115 - Doktorant stwierdził, że styki wykonane z AgSnO_2 są bardziej podatne na topnienie niż z AgNi i ma to związek z mniejszą przewodnością cieplną materiału. Jednak nie jest to możliwe do potwierdzenia bez znajomości konkretnych wartości współczynnika przewodnictwa cieplnego AgSnO_2 którego producent nie podaje. Proszę o wyjaśnienie czy Doktorant podjął działania w celu uzyskania informacji o wartości współczynnika przewodnictwa cieplnego AgSnO_2 z innych źródeł ?

16. Str. 123 – Doktorant stwierdził, że rozmiar powierzchni zerodowanej jest uzależniony również od rodzaju materiału stykowego. Przy czym największe zmiany obserwowane są dla styczek wykonanych z AgNi oraz AgCdO . Sugeruje to ich mniejszą łukoodporność i nie jest to w pełni zgodne z danymi literaturowymi wynikającymi z publikacji Morina, Jemaa i Jeannota (publikacja Morin L., Jemaa N. B. i Jeannot D., Make arc erosion and welding in the automotive area, tom 23, czer. 2000, strony 240–246.). Proszę o wyjaśnienie na czym polega niezgodność w stosunku do badań Morina, Jemaa i Jeannota – przedstawionych we wspomnianej publikacji ?

17. Str. 124 – Doktorant przeprowadził m.in. serie badań dla każdego materiału stykowego w których dokonywał prób załączania obwodu zwartego, przy założonym spodziewanym prądzie zwarciovym wynoszącym 320A. Proszę o wyjaśnienie czym Doktorant kierował się przy ustaleniu wartości prądu zwarciovego na takim poziomie ?. Niewątpliwie prąd o takiej wartości gwarantował bezzwłoczne zadziałanie zastosowanych na stanowisku badawczym, zabezpieczeń i pozwolił ocenić wpływ załączania prądu zwarciovego na styki przekaźników wykonanych z badanych przez Doktoranta materiałów (AgNi , AgSnO_2 , $\text{AgSnO}_2 \text{ P}$, AgCdO), ale nie może to być jedyna przesłanka takiego wyboru.

18. Str. 130 – Doktorant wykazał, że przy występujących w eksploatacji niekorzystnych warunkach łączeniowych, jakimi są załączenia uszkodzonych obwodów, styki wykonane z AgNi i AgCdO charakteryzują się niewielką odpornością na proces szczepiania. Proszę o określenie jakie w związku z tym będą reperkusje tego wniosku w obszarze dotyczącym rozwiązań konstrukcyjnych oraz w zasadach doboru przekaźników elektromagnetycznych niskiego napięcia w świetle faktu, że do tej pory powszechnie przyjmowano, że wspomniane materiały odznaczają się stosunkowo małą skłonnością do występowania szczepień, a więc dobrą odpornością na ich występowanie ?

19. Str. 130 – Proszę o bliższe wyjaśnienie przyczyn odmiennego zachowania się tych samych przekaźników przy tych samych wartościach spodziewanego prądu zwarciovego ale dla różnych faz załączania spodziewanego prądu zwarciovego ?. Czy ma to związek jedynie z siłami elektrodynamicznymi oddziaływującymi przy przepływie tych prądów i odskokiem styczek ?

20. Str. 137 - Doktorant stwierdził, że przy załączaniu przekaźnika w maksimum napięcia znaczna część materiału stykowego ulega nadtopieniu i może być wyrzucana poza obszar styczności, przy czym kierunek wyrzucenia tego materiału jest promienisty od miejsca styczności i może sięgać nawet 300 μm . Ponadto zauważył, że dla materiałów stykowych AgCdO i AgNi ilość stopionego metalu jest wyraźnie większa niż dla AgSnO_2 i $\text{AgSnO}_2 \text{ P}$.

Proszę o określenie jakie w związku z tym są negatywne skutki zaobserwowanego przez Doktoranta zjawiska dla przekładników elektromagnetycznych niskiego napięcia oraz jak należy temu przeciwdziałać ?

21. Str. 143 – Doktorant w tablicy 8.23 przedstawił zestawienie przyrostów temperatur, dla stanu ustalonego, w punkcie styczności, dla różnych materiałów stykowych obliczanych wg wzorów analitycznych 5.17, 5.21 oraz na podstawie symulacji komputerowej. Proszę o wyjaśnienie różnicy w wartościach tych przyrostów ?

22. Str. 144 – Jednym z założeń do symulacji nagrzewania się styczeki przeprowadzonej przez Doktoranta było przyjęcie, że powierzchnia boczna ma temperaturę początkową, wynoszącą $\Theta_m = 303,15^\circ\text{K}$ ($\Theta_m = 30^\circ\text{C}$). Proszę o wyjaśnienie czym Doktorant się kierował przyjmując taką, a nie inną temperaturę początkową ?

23. Str. 146 – Doktorant w tablicy 8.24 przedstawił wyniki obliczeń temperatury maksymalnej w punkcie styku, w czasie przepływu prądu zwarcowego $I = 320\text{ A}$, dla różnych materiałów stykowych, wg wzoru 5.26 oraz na podstawie symulacji komputerowej. Dla materiału AgSnO₂ P uzyskano wartości odpowiednio: $202,1^\circ\text{C}$ i $426,1^\circ\text{C}$. Proszę o wyjaśnienie czym Doktorant tłumaczy wystąpienie tak znacznej różnicy w wartościach temperatury maksymalnej akurat dla tego materiału ?

24. Str. 152 – Doktorant odnosząc się do wzoru 5.31 pozwalającego na wyznaczenie dopuszczalnej wartości prądu szepiania w zależności od rezystancji zestykowej, temperatury topnienia materiału styku i temperatury otoczenia stwierdza, że zastosowany wzór dla materiału stykowego AgSnO₂ nie w pełni opisuje poprawnie zjawisko szepiania dla tego przypadku. Proszę o wyjaśnienie na czym ta rozbieżność polega i jak to jest uzależnione w kontekście nagrzewania od czasu i wartości przepływającego prądu ?

25. Str. 166 – Proszę o wyjaśnienie czy w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.) jest nakaz czy zalecenie stosowania wyłączników instalacyjnych w instalacjach elektrycznych ?

26. Str. 175 – Doktorant stwierdza, że stosowane zabezpieczenia, w postaci wyłączników nadmiarowo-prądowych, charakteryzują się ograniczaniem wartości całki Joule'a wyłączania, ale nie ograniczają wartości szczytowego prądu zwarcia. W związku z tym nie są zdolne zredukować możliwości wystąpienia odskoku elektrodynamicznego, a skutki łukowe takiego odskoku prowadzą do znacznej erozji obszaru styczności i w konsekwencji do trwałego i nieodwracalnego zniszczenia styków przekładnika. Proszę o wyjaśnienie jakie zabezpieczenie należy zastosować w stosunku do przekładników elektromagnetycznych niskiego napięcia, aby uchronić je lub przynajmniej znacznie ograniczyć w nich możliwość wystąpienia odskoku elektrodynamicznego ?

27. Str. 176 - Doktorant stwierdza, że z uwagi na znaczny koszt nowoczesnych elementów automatyki z przekładnikowymi obwodami wykonawczymi warto rozważyć możliwość ich lokalnego, indywidualnego dobezpieczania przeciwzwarcowego. Proszę o jednoznaczną deklarację Doktoranta jakie rozwiązania należy zastosować dla przekładników elektromagnetycznych niskiego napięcia i dlaczego ?. Czy zastosowanie miniaturowych bezpieczników topikowych jest tutaj jedyną opcją ?

Przedstawione powyżej uwagi szczegółowe i dyskusyjne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta.

7. Uwagi redakcyjne

Usterki redakcyjne w rozprawie doktorskiej dotyczą niewłaściwych określeń i sformułowań zawartych w tekście; braku opisu, wyjaśnień, informacji we wzorach i na

rysunkach oraz błędów gramatycznych i edycyjnych (literówek). Liczba tych usterek jest niewielka.

Błędy dotyczące niewłaściwych określeń i sformułowań dotyczą:

- str. 24 – zastosowanie określenia „przeważnie nie powinny” w zdaniu „Podczas łączenia obwodów czysto-rezystancyjnych, takich jak ogrzewanie elektryczne czy lampy żarowe, narażenia łączeniowe przeważnie nie powinny być groźne w skutkach.” świadczy o nadmiernej nieuzasadnionej asekuracji Doktoranta. Zdanie to powinno być sformułowane w bardziej zdecydowanej formie „Podczas łączenia obwodów czysto-rezystancyjnych, takich jak ogrzewanie elektryczne czy lampy żarowe, narażenia łączeniowe zasadniczo nie są groźne w skutkach.”;
- str. 24 – zastosowanie określenia „niski” w zdaniu „Obwód elektryczny z niskim współczynnikiem mocy..” jest niewłaściwe ze względów stylistycznych i językowych. Zdanie to powinno być sformułowane w formie „Obwód elektryczny charakteryzujący się małym współczynnikiem mocy (ewentualnie małą wartością współczynnika mocy)”;
- str. 25 – niewłaściwe sformułowanie zdania dotyczącego wykorzystania miedzi „Jest ona używana na przykład wyłącznikach wysokiego napięcia czy też wyłącznikach olejowych.”. Wyłączniki olejowe są wyłącznikami wysokiego napięcia. Przy czym w elektroenergetyce są stosowane tylko wyłączniki małoolejowe. Wyłączniki pełnoolejowe (drugi rodzaj wyłączników olejowych) są od bardzo dawna nie tylko nie produkowane ale i nie stosowane. Zdanie to powinno być sformułowane w formie „Jest ona używana na przykład wyłącznikach wysokiego napięcia”. Jeśli Doktorant pragnął z siebie wiadomych względów wyróżnić „wyłączniki olejowe” to powinien stosować określenie „wyłączniki małoolejowe”;
- str. 37 – niewłaściwe sformułowanie dotyczące iloczynu dwóch wielkości c_q zawarte w zdaniu „Przykładowe wartości współczynnika c_q przedstawiono w tablicy 4.1” i w tytule tablicy 4.1 „Wartości współczynnika c_q do wzoru 4.14 na rezystancję kształtu [24, 8, 5]”. Wielkość c_q nie jest żadnym współczynnikiem. Stanowi bowiem iloczyn dwóch wielkości: stałej zależnej od stanu powierzchni styków c i rezystywności materiału styków q . Zamiast pojęcia „współczynnika” przy opisie wielkości c_q należy zastosować pojęcie iloczynu;
- str. 84 – zastosowanie określenia „potężne” w zdaniu „Zapewnia potężne środowisko komputerowe do zastosowań inżynierskich i naukowych.” jest niewłaściwe stylistycznie i mocno dyskusyjne w rozprawie doktorskiej. Rozprawa nie jest tekstem reklamowym, gdzie tego typu określenia znajdują uznanie.

Błędy dotyczące braków opisu, wyjaśnień, informacji dotyczą:

- str. 25 – brak wyjaśnienia bardzo istotnego w kontekście problematyki rozprawy doktorskiej pojęcia „wędrówki materiału stykowego”;
- str. 35 – brak jednostek na osiach wykresów zamieszczonych na rys 4.4. „Narastanie grubości warstwy tlenkowej s_n na stykach z różnych metali w temperaturze pokojowej, w powietrzu suchym [8]”;
- str. 55 – brak informacji na rys 5.8 dotyczącego typu połączeń sieci niskiego napięcia. Przedstawiony na rys 5.8. schemat zastępczy obwodu zwarciovego w instalacji elektrycznej niskiego napięcia dotyczy sieci typu TN-S. Wewnętrzna linia zasilająca realizowana jest w układzie pięcioprzewodowym z trzema przewodami fazowymi, przewodem ochronnym PE i neutralnym N. W sytuacji często stosowanego układu sieci TN-C-S, schemat i oznaczenia wymagają korekty bowiem linia WLZ realizowana jest w układzie czteroprzewodowym z trzema przewodami fazowymi, przewodem ochronno-neutralnym PEN.;
- str. 80 – brak opisu i wyjaśnienia symbolu Δ_d użytego we wzorze 7.3.

Błędy gramatyczne i edycyjne (literówki) dotyczą:

- str. 25 – zamiast fragmentu „Wymagane jest aby mechanizm łącznik wywierał duże siły nacisku na styki miedziane.” powinno być „Wymagane jest aby mechanizm łącznika wywierał duże siły nacisku na styki miedziane.”;
- str. 29 – zamiast fragmentu „...w nowy sprzęcie elektrycznym i elektronicznym wprowadzonym do obrotu..” powinno być „...w nowym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym wprowadzonym do obrotu..”;
- str. 49 – zamiast fragmentu „Największą zmianą masy charakteryzują styki wykonane z czystego srebra...” powinno być „Największą zmianą masy charakteryzują się styki wykonane z czystego srebra.”;
- str. 59 - zamiast fragmentu „Krótsze czasy trwania odskoków styków prowadzą do postania szczytów o większej sile...” powinno być „Krótsze czasy trwania odskoków styków prowadzą do powstania szczytów o większej sile..”;
- str. 64 – zamiast fragmentu „Dla styków wykonanych z materiałów o dużej przewodności cieplnej i przy małych promieniach mikroplaszczysz styczości, temperatura w miejscach styczości praktycznie nadążają za chwilowymi wartościami prądów...” powinno być „Dla styków wykonanych z materiałów o dużej przewodności cieplnej i przy małych promieniach mikroplaszczysz styczości, temperatury w miejscach styczości praktycznie nadążają za chwilowymi wartościami prądów...”;
- str. 85 – zamiast fragmentu „Wybrane informacje technicznoeksploatacyjne przedstawiono w tablicy 2.3...” powinno być „Wybrane informacje techniczno-eksploatacyjne przedstawiono w tablicy 2.3...”;
- str. 87 - zamiast fragmentu „Przy otwieraniu styków, czyli przejściu ze stanu wysokiego do stany niskiego widoczny jest przebieg...” powinno być „Przy otwieraniu styków, czyli przejściu ze stanu wysokiego do stanu niskiego widoczny jest przebieg...”;
- str. 90 - zamiast fragmentu „W przedstawionej pracy kondycjonowaniem jest procesem mechanicznej obróbki styków, polegający na wielokrotnym wykonywaniu cykli zamknij-otwórz przy braku obciążenia elektrycznego...” powinno być „W przedstawionej pracy kondycjonowaniem jest proces mechanicznej obróbki styków, polegający na wielokrotnym wykonywaniu cykli zamknij-otwórz przy braku obciążenia elektrycznego...”;
- str. 100 - zamiast fragmentu „Można zauważyć, że cykliczny proces załączania i wyłączania prądu znamionowego roboczego w losowej fazie napięcia zasilającego prowadzi do...” powinno być „Można zauważyć, że cykliczny proces załączania i wyłączania prądu znamionowego roboczego w losowej fazie napięcia zasilającego prowadzi do...”;
- str. 111 – zamiast fragmentu „W rezultacie takiego sposób pracy układu przekaźnik poddawany próbom tylko załączał prąd roboczy...” powinno być „W rezultacie takiego sposobu pracy układu przekaźnik poddawany próbom tylko załączał prąd roboczy..”;
- str. 122 – zamiast fragmentu „Podczas wyłączania pomiędzy stykami zapala się łuk elektryczny, który eroduje ich powierzchnię...” powinno być „Podczas wyłączania pomiędzy stykami zapala się łuk elektryczny, który eroduje ich powierzchnię...”;
- str. 133 – zamiast fragmentu „Zasięg wyrzutu stopionego materiału sięga, w skrajnym przypadku, dla AgNi nawet 300 μm licząc od granicy obrzeża obszaru styczości w kształcie okręgu...” powinno być „Zasięg wyrzutu stopionego materiału sięga, w skrajnym przypadku, dla AgNi nawet 300 μm licząc od granicy obrzeża obszaru styczości w kształcie okręgu...”;
- Str. 145 – zamiast fragmentu „Przykładowo dla styków wykonanych z AgCdO...” powinno być „Przykładowo dla styków wykonanych z AgCdO...”;

- str. 153 – zamiast fragmentu „Obszar styczności przyjmuje, w większości przypadków, kształt koła i jest umiejscowiona centralnie na styczce, promień miejsca styczności wynosi...” powinno być „Obszar styczności przyjmuje, w większości przypadków, kształt koła i jest umiejscowiony centralnie na styczce, promień miejsca styczności wynosi...”;
- str. 154 – zdanie „Przyjęta w obliczeniach długość sprężyn stykowych różni się od ich rzeczywistych wymiarów ze względu na przesunięcie styczki względem końca sprężyny stykowej (uwzględnia to rzeczywisty odcinek toru przez który.” wymaga dokończenia;
- str. 173 – zamiast fragmentu „Pozwoli to na prawidłowe wyznaczenie ilość generowanego ciepła...” powinno być „Pozwoli to na prawidłowe wyznaczenie ilości generowanego ciepła...”;
- str. 179 - zamiast fragmentu „czeń warunków konwekcji torów prądowych aparatów...” powinno być „Do obliczeń warunków konwekcji torów prądowych aparatów....”.

Przedstawione powyżej uwagi redakcyjne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta.

8. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Książkiewicza stanowi bardzo wartościowe i oryginalne opracowanie, które przedstawia rozwiązania interesującego, aktualnego i ważnego dla praktyki problemu naukowego dotyczącego przebiegu procesów elektrodowych zachodzących w przekąźnikach prądu przemiennego niskiego napięcia.

Przedstawione przez Doktoranta rezultaty badań eksperymentalnych, analitycznych i symulacyjnych w zakresie dotyczącym: oceny skutków wzajemnego mechanicznego oddziaływania styków przekąźnika, ewaluacji erozji powierzchni elektrod spowodowanejłączeniem prądów roboczych, ewaluacji erozji powierzchni elektrod spowodowanejłączeniem prądów zwarciovych, stanu cieplnego zestyków przy przepływie prądów roboczych i zwarciovych, elektrodynamiki styków przy przepływie prądów przetężeniowych i działania zabezpieczeń przy przepływie prądów zwarciovych są bardzo interesujące, a wnioski przedstawione przez Doktoranta z nich wynikające są spójne i logiczne. Mają nie tylko dużą wartość poznawczą, ale i praktyczną, bowiem zalecenia konstruktorskie, projektowe i eksploatacyjne z nich wynikające mogą być wykorzystane do opracowania lepszych rozwiązań przekąźników elektromagnetycznych niskiego napięcia i do właściwego ich zabezpieczania w instalacjach niskiego napięcia.

Recenzowana rozprawa wykazuje ponadto bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego tworzenia stanowisk badawczych i metodyki badań oraz prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że rozprawa opracowana przez mgr inż. Andrzeja Książkiewicza spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 r. wraz z jej późniejszymi nowelizacjami (Dz.U. z 2003 r. Nr 65 poz. 595 z późn.zm.).

W związku z tym wnioskuję do Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w Poznaniu o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom merytoryczny opracowania i osiągnięte wyniki stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.


Waldemar DOŁĘGA