



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI



SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

23. 06. 2023

Wpłynęło dnia

Zarejestrowano pod nr

Podpis

dr hab. inż. Jacek Klucznik, prof. uczelni
Katedra Elektroenergetyki

20.06.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Szymona Gajdzicy
pt.: „Analiza czynników determinujących rozptyw prądu zwarcia dla oceny bezpieczeństwa
porażeniowego w stacji elektroenergetycznej”**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Szymona Gajdzicy zatytułowanej „Analiza czynników determinujących rozptyw prądu zwarcia dla oceny bezpieczeństwa porażeniowego w stacji elektroenergetycznej”, została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 27 kwietnia 2023 r. (sygn. RPW/17417/2023), zgodnie z Uchwałą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej z dnia 27 kwietnia 2023 roku.

I Ocena ogólna pracy

1. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

- W ogólnym ujęciu, recenzowana praca dotyczy trzech zagadnień elektrotechniki, którymi są:
- modelowanie i analiza pracy elementów systemu elektroenergetycznego w stanach ustalonych,
 - obliczenia zwarciove ze szczególnym uwzględnieniem rozptywu prądu zwarciowego,
 - obliczanie rozkładu potencjału wokół uziomu.

Tematyka w jakiej porusza się Doktorant jest nie jest nowa. Od początku rozwoju systemów elektroenergetycznych zwarcia i towarzyszący im wzrost zagrożenia porażeniowego były tematem badań i analiz. W ich efekcie powstały normy i zbiory wytycznych dla projektantów urządzeń i stacji elektroenergetycznych. Doktorant słusznie zauważa, że obecne możliwości analizy pracy systemów elektroenergetycznych są większe dzięki wykorzystaniu symulacji komputerowej. W związku z powyższym Doktorant chce poszukiwać nowych metod analizy rozptywu prądów zwarciowych, a jednocześnie dokonać ewaluacji obecnych normatywnych metod oceny zagrożenia przeciwporażeniowego.

Doktorant postawił w pracy następującą tezę” *„Poprawna ocena bezpieczeństwa porażeniowego w stacjach elektro-energetycznych uwarunkowana jest zastosowaniem zaawansowanych modeli elementów układu elektroenergetycznego determinujących rozptyw prądu zwarcia jednofazowego oraz metod jego wyznaczania”.*

Tak postawiona teza wskazuje, że obecnie stosowane metody obliczeniowe, w tym metody normatywne nie dają (lub potencjalnie mogą nie dawać) właściwej oceny zagrożenia porażeniowego, wyrażanej jako wartość napięcia uziomowego przy zwarciu jednofazowym.

Celem Doktoranta jest zatem opracowanie modeli i metod obliczeniowych pozwalających na wyznaczenie wartości prądu uziomowego, napięcia uziomowego, a także rezystancji układu uziomowego wiążącej obie te wielkości.

Uważam postawiony w rozprawie problem za bardzo istotny, zwłaszcza obecnie, gdzie coraz częściej mamy do czynienia ze złożonymi układami sieci, zawierającymi linie napowietrzne z przewodami odgromowymi, linie kablowe o różnych konfiguracjach połączeń żył powrotnych i stacje o rozbudowanych układach uziomowych. Warto podkreślić jeszcze przed analizą i oceną całej pracy, że potencjalne wyniki i metody prezentowane w rozprawie mogą mieć charakter aplikacyjny i niewątpliwie mogą wzbudzić zainteresowane środowiska projektowego i operatorów sieci, którzy odpowiedzialni są za bezpieczną pracę swoich instalacji.

Stwierdzam, że sformułowany przez Doktoranta problem naukowy został trafnie i jasno zaprezentowany i uznaję tematykę rozprawy za ważną, aktualną oraz wybraną prawidłowo, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.

Literatura wymieniona w spisie jest bardzo rozbudowana, ponieważ obejmuje 190 pozycji, w tym publikacje naukowe polsko, angielsko, niemieckojęzyczne, normy oraz zalecenia dla projektantów. Uważam, że literatura prezentowana w wykazie została dobrana właściwie. W kwestii aktualności literatury można zauważyć, że Doktorant prezentuje literaturę z bardzo szerokiego zakresu czasu, obejmującego ostatnie 120 lat (najstarsza publikacja 1903 r., najnowsza 2023 r.). To świadczy jak ważny dla elektrotechniki problem podjęty jest w rozprawie, skoro jest on niezmiennie podnoszony w pracach badawczych. Analiza źródeł przeprowadzona przed Doktorantem wskazuje jakie trendy obserwuje się w dziedzinie obliczeń rozptyłu prądów zwarć jednofazowych, jak ewoluuje i poszerza się wiedza w tym zakresie. Dyplomant słusznie dostrzegł trend obchodzenia od metod zakładających uproszczone modelowanie elementów sieci elektroenergetycznej, od metod wykorzystujących składowe symetryczne, na rzecz modeli wielofazowych.

Doktorant nie opisuje szczegółowo ewolucji metod obliczeniowych w pracy, ale uważam to za zaletę, a nie za wadę pracy. Podane skrótowo w rozdziale 2 pracy postawy obliczeń są wystarczające, a sama praca jest na tyle rozbudowana, że dodatkowe opisy istniejących metod, jakie można znaleźć w materiałach źródłowych są zbędne.

3. Ocena układu rozprawy

Treść pracy zawarto w ośmiu rozdziałach oznaczonych numerami 2+9. W rozdziale 2 przedstawiono problematykę oddziaływania prądu elektrycznego na ciało człowieka, omówiono normatywną metodykę wyznaczania rozptyłu prądu zwarciovego oraz przedstawiono historyczny rozwój metod wyznaczania rozptyłu prądu zwarcia w elementach sieci elektroenergetycznej. W rozdziale 3 zaprezentowano uogólniony model stacji elektroenergetycznej, wraz z grupami elementów do niego przyłączonych (modele uziomu stacji, modele transformatorów oraz modele linii napowietrznych i kablowych). W kolejnych rozdziałach 4 – 7 przedstawiono sposoby odwzorowania poszczególnych elementów stacji elektroenergetycznej, takich jak uziom stacji, transformatory, napowietrzne i kablowe linie elektroenergetyczne. Modele te porównano z

modelami dostępnymi w stosowanym przez autora programie symulacyjnym EMTP-ATP. W rozdziale poświęconym modelom linii Autor przedstawił również algorytm tworzenia rozbudowanych struktur wielofazowych linii napowietrznych oraz kablowych z wykorzystaniem modeli dostępnych w programie EMTP-ATP. W przypadku linii kablowych Autor zaprezentował również jak uwzględnić sposób pracy żył powrotnych kabli. Rozdziały dotyczące modelowania linii napowietrznych i kablowych zawierają także przykłady analiz z użyciem wielofazowych modeli kablowych linii elektroenergetycznych.

W rozdziale 8 przedstawiono wykorzystanie opracowanej przez Autora metody symulacyjnej wyznaczania rozptyłu prądu zwarcia, do analizy skutków zwarcia w rzeczywistej sieci. Model sieci zawierał linie napowietrzne i linię kablową WN, rozbudowany model sieci kablowej SN oraz szczegółowy model stacji elektroenergetycznej WN/SN. Przedstawiono rozptył prądu zwarcia jednofazowego, zarówno w badanej stacji, jak również w przyłączonych do niej napowietrznych liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. W oparciu o szczegółowy model układu uziomowego stacji wyznaczono rozkłady napięć dotykowych na jej terenie. Metoda symulacyjna umożliwiła także zbadanie skutków rozptyłu prądu zwarcia w zasilanej z tej stacji sieci średniego napięcia. Wyniki otrzymanych analiz zwarciovych porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą obliczeń wykonanych zgodnie z obowiązującymi normami.

Podsumowanie rozprawy zawarto w rozdziale 9.

Zasadnicza część pracy (bez wykazu oznaczeń, bez wykazu literatury i bez załączników) obejmuje 140 stron.

4. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione.

Autor osiągnął postawiony cel pracy. Uważam, że zastosowanie modeli proponowanych przez Doktoranta oraz metody obliczeniowej wykorzystującej środowisko EMTP-ATP jest właściwą drogą do rozwiązywania problemu. Doktorant zauważa słusznie, że połączenie modeli „składowych” tj.: źródeł prądu zwarciovego, modeli linii napowietrznych uwzględniających przewody odgromowe i uziemienia słupów, modeli linii kablowych uwzględniających sposób pracy żył powrotnych, modeli transformatorów i systemów uziemień w jednym środowisku (tutaj EMTP-ATP) pozwala na dokładne odzwierciedlenie praktycznie dowolnego układu sieci, a tym samym dokładną ocenę zagrożenia porażeniowego.

Drugim podnoszonym w pracy tematem są analizy o charakterze bardziej teoretycznym odnoszącym się do modelu linii napowietrznej, kablowej i transformatora. Tutaj Doktorant na drodze analitycznej wyznacza wartości impedancji drogi ziemnopowrotnej oraz współczynników rozptylowych. Uważam te rozważania za interesujące i przeprowadzone właściwie, jednak brakuje próby połączenia tych wyników z metodą analizy opartą o program EMTP-ATP.

Z kolei przeprowadzona przez Autora analiza teoretyczna modelowania układów uziomowych, wsparta autorskim programem obliczeniowym w środowisku Matlab, wykonana została bez zarzutu, a jej wyniki wykorzystywane są później w połączeniu ze środowiskiem badawczym ATP-EMTP.

Uważam, że wszystkie zastosowane w pracy metody badawcze są właściwe do rozwiązywanego problemu.

Dodatkowe uwagi związane ze sposobem prowadzenia analiz zawarto w rozdziale recenzji II Szczegółowa ocena pracy.

5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową.

W mojej opinii samodzielnym i oryginalnym osiągnięciem Doktoranta są:

1. Analiza literatury związanej obliczeniami rozptywu prądu zwarciovego w rozbudowanych układach sieciowych;
2. Opracowanie narzędzia do analizy rozptywu prądu zwarciovego w uziemiu stacji w środowisku Matlab;
3. Rozbudowana analiza teoretyczna przepływu prądów ziemnozwarciowych w transformatorach dwu i trójzwojonych;
4. Opracowanie w środowisku Matlab narzędzia do wyznaczania parametrów schematów zastępczych transformatorów;
5. Rozbudowana analiza teoretyczna przepływu prądów ziemnozwarciowych w liniach napowietrznych i kablowych z uwzględnieniem przewodów odgromowych i rezystancji uziemień słupów oraz sposobu pracy żył powrotnych;
6. Opracowanie metody zautomatyzowanego tworzenia modeli wielofazowych dla programu EMTP-ATP z wykorzystaniem skryptów;
7. Szczegółowa analiza rozptywu prądów zwarciovych i rozkładu potencjałów w układzie uziomowym w rozbudowanym modelu stacji elektroenergetycznej;
8. Krytyczna ocena obowiązujących norm w zakresie oceny ochrony przeciwporażeniowej i wykazanie, że wartości napięć uziomowych uzyskiwane metodą normatywną, przy szeregu uproszczeń mogą istotnie odbiegać od wartości obliczanych w sposób opisany w rozprawie.

Komentując osiągnięcia Doktoranta osiągnięcia można zauważyć dużą wiedzę w zakresie tematyki modelowania, doświadczenie w pracy w środowisku Matlab oraz EMTP-ATP, ale przede wszystkim dociekliwość naukową objawiającą się w bardzo starannym i szczegółowym analizowaniu określonego problemu. Jest to ważna i pożądana cecha dla naukowca. Dzięki temu praca w mojej opinii jest kompletna i praktycznie pozbawiona niedomówień.

Recenzowana praca nie odbiega od standardów w literaturze światowej pod względem stosowanych metod i technik obliczeniowych.

6. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników(zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna)?

Praca napisana jest na bardzo dobrym poziomie językowym. Zachowane są zasady ortografii, gramatyki i interpunkcji. W pracy zdarzają się co prawda zdania, lub sformułowania, które można by skonstruować inaczej, aby polepszyć jakość przekazu, ale nie utrudniają one istotnie odbioru pracy.

Prezentowane w pracy wzory i zależności są dobrze opisane, a kolejne przekształcenia wzorów i wyprowadzenia zależności są prowadzone w sposób przykładowy, bez luk, przeskoków i niedopowiedzeń.

Strona graficzna pracy jest wykonana wzorowo. Prezentowane rysunki, schematy są bardzo czytelne i dobrze opisane. Wszelkie wykresy są wykonane bardzo starannie i są dobrze przemyślane, dlatego czytający pracę nie ma żadnych problemów z ich interpretacją.

Odwołania do rysunków i tabel w tekście pracy zrobione są prawidłowo. Również odwołania do literatury i jej spis zrobione są właściwie.

Zauważone, najistotniejsze uchybienia w zakresie języka i strony edycyjnej pracy zawarto w rozdziale II recenzji. Są one jak na tak rozbudowaną pracę bardzo ograniczone, co świadczy o jej wysokim poziomie redakcyjnym.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych

Zaproponowany przez Doktoranta sposób obliczeń rozptywu prądu zwarciovego jest bardzo interesujący. Bez wątpienia upowszechnienie wiedzy jak należy dokonywać analizy rozptywu prądu zwarciovego i jak obliczać napięcia dotykowe w rozbudowanych układach sieciowych jest bardzo wartościowe zarówno dla środowiska naukowego jak i szeroko rozumianej branży projektowo-eksploatacyjnej.

II Szczegółowa ocena pracy

1. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

1.1. Jak wskazano wcześniej czytający pracę może czuć pewien niedosyt po przeczytaniu rozdziałów 5, 6 i 7 i zastanawiać się czy czegoś nie przeoczył. Zabrakło bowiem jakiegoś podsumowania, jasnej deklaracji, do czego i jak wykorzystywać wyznaczone impedancje ziemnopowrotne dla transformatorów i linii elektroenergetycznych. Zamiast podsumowania mamy lukę i przeskok do analizy rozbudowanej sieci, w której zasadniczo opisywane wcześniej impedancje ziemnopowrotne nie są wykorzystywane.

1.2 Doktorant podaje, że model XFMR pozwala na uwzględnienie liczby kolumn w budowie transformatora. Czy model opracowany przez Doktoranta w środowisku Matlab ma taką możliwość?

1.3 Rys. 8.13 przedstawia rozkład prądów w uziomach słupów linii LA, LB, LC. Zgodnie ze wcześniejszym opisem (rys. 8.1) linia LB przebiega od słupa 20 do 91. Jak to się ma do numeracji słupów na rys 8.13.b i czym są spowodowane wyraźnie wyższe prądy obserwowane dla słupa 22, 24 i 26?

1.4 Analiza porównawcza pozostawia otwarte pytanie o powód różnic w uzyskanych wartościach napięć uziomowych dla metody proponowanej i symulacyjnej. Przyjmując, że modele symulacyjne i stosowana metoda są właściwe, co jest powodem, że wyniki uzyskiwane w metodzie normatywnej inne. Który element obliczeń normatywnych, w ocenie Doktoranta, obarczony jest największym stopniem niepewności?

2. Uwagi o charakterze redakcyjnym

2.1. Zdanie ze Streszczenia „Ze względu na połączenie punktu neutralnego sieci wysokiego napięcia z ziemią występujące podczas zwarć doziemnych w sieci prądy, mogą osiągać znaczne wartości.” wskazuje jak brak jednego przecinka może bardzo istotnie zmienić sens zdania. Połączenie punktu neutralnego sieci wysokiego napięcia z ziemią nie wstępuje oczywiście tylko podczas zwarć doziemnych jak wynika z powyższego zapisu. Jest to w zasadzie jedyny poważniejszy, zauważony przeze mnie, bład interpunkcyjny w pracy.

2.2 W spisie oznaczeń zamieniono opisy polskojęzyczne dla skrótów BEB i SPB.

2.3 Powszechnym sposobem oznaczania w elektrotechnice wielkości wyrażanej w postaci zespolonej, w Polsce, jest podkreślenie symbolu oznaczającego daną wielkość. Doktorant

konsekwentnie nie oznacza wartości zespolonych w pracy, a czytelnik musi się domyślać z kontekstu zdania czy wyrażenia czym jest dana wielkość.

2.3 Poznając strukturę zapisu danych linii w macierzy w programie EMTP-ATP czytelnik natrafia na rys. 6.14, skąd może odczytać wartości impedancji własnych i wzajemnych dla przykładowej linii. Część tych wartości można odnaleźć w opisie analitycznego wyznaczania parametrów linii na stronie 67, a ich wartości są zgodne (np. Z_{00}). Z kolei impedancje wzajemne $Z_{1(l)}$ i $Z_{2(l)}$ odbiegają od prezentowanych na rys. 6.14. Nie wiem, czy jest to błąd redakcyjny czy drobne uchybienie merytoryczne.

III Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z recenzowaną rozprawą, z pełnym przekonaniem, mogę stwierdzić, że:

- przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Gajdzicy podejmuje ważny i aktualny temat badawczy,
- praca jest wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny i spełnia w nadmiarze wymagania, wynikające z Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) dotyczące rozpraw doktorskich.

W związku z powyższymi stwierdzeniami:

- wnioskuję o wyróżnienie rozprawy Pana mgr. inż. Jakuba Gajdzicy,
- wnoszę o dopuszczenie rozprawy do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

