

Opole, 18 sierpnia 2025

Dr hab. inż. Stefan Wolny
prof. ucz. Politechniki Opolskiej

Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Aleksandry Schött-Szymczak

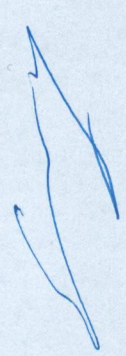
pt.: „Zjawiska przebiegiowe w elektroenergetycznych kablach SN ze szczególnym uwzględnieniem sposobu pracy ich żył powrotnych”

1. Formalna podstawa opracowania recenzji

Recenzja opracowana w związku z postępowaniem w sprawie nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych - zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki z dnia 17 czerwca 2025 r.

2. Ogólna charakterystyka tematu i przedłożonej rozprawy

Temat rozprawy jest związany z bardzo aktualną problematyką racjonalnej eksploatacji nowoczesnych linii kablowych średniego napięcia, powszechnie wykorzystywanych jako alternatywa dla tradycyjnych linii napowietrznych. Podczas eksploatacji tych linii niestety pojawia się problem strat energii elektrycznej, których powodem jest indukowanie się prądów w żyłach powrotnych dwustronnie uziemionych. Poruszany sposób uziemienia jest najczęściej spotykanym i stosowanym głównie z powodu minimalizacji przepięć ziemnozwarciowych, które mogłyby zagrażać izolacji kabla. Analizowana w rozprawie konfiguracja pracy trójfazowej linii kablowej w układzie potrójnym, tj. trzech kabli jednofazowych średniego napięcia jako wyprowadzenia mocy ze stacji rozdzielczej wysokiego napięcia (WN/SN) oraz przejście opisywanej linii do linii napowietrznej zasilającej końcową stację rozdzielczą, transformującą poziom napięcia średniego na niski (SN/nn), jest bardzo często wykorzystywanym układem



pracy linii kablowej SN. Zważywszy, że poziom strat energii elektrycznej w uziemionych dwustronnie żyłach powrotnych kabli może być porównywalny ze stratami przewodnościowymi żył roboczych tych kabli, tematykę podjętą w pracy uważam za aktualną o bardzo dużym potencjale aplikacyjnym. Analizowany w pracy obiekt w postaci opisanego wyżej układu linii kablowej i napowietrznej jest w moim przekonaniu dobrany poprawnie i może stanowić dobrą podstawę dla dalszych analiz pracy linii kablowych średniego napięcia w innych konfiguracjach.

Doktorantka w swojej pracy skoncentrowała się na problematyce ograniczenia strat przesyłowych wynikających z przepływu prądu przez żyły powrotne poprzez jednostronne nieuziemienie jednej, bądź dwóch żył powrotnych analizowanej linii kablowej średniego napięcia. Wykorzystane metody badawcze podyktowane były analizą zjawiska indukowania się w nieuziemionych żyłach powrotnych napięć, których powodem był stan pracy awaryjnej linii napowietrznej, polegającym na zwarciu doziemnym jednej z faz linii, w pobliżu przejścia linii napowietrznej w linię kablową. Niezbędne analizy wykonano na podstawie wstępnych badań symulacyjnych, badań eksperymentalnych przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie w terenie oraz dodatkowych badań symulacyjnych, uwzględniających przypadki niemożliwe do odwzorowania na obiekcie rzeczywistym, które niewątpliwie wprowadziły pożądaną w badaniach naukowych aspekt obiektywizmu oraz uniwersalności w formułowaniu wniosków końcowych. Doktorantka przyjęła w swojej dysertacji (rozdz. 3, str. 61) następujące dwie tezy główne, cyt.:

Częściowe, jednostronne nieuziemienie jednej lub dwóch faz żył powrotnych jednożyłowych kabli elektroenergetycznych pracujących w układzie trójfazowym mające na celu ograniczenie strat w dystrybucji energii elektrycznej może generować niebezpieczne zjawiska przepięciowe.

Znajomość skali zjawisk przepięciowych powstających w częściowo nieuziemionych żyłach powrotnych trójfazowego układu kabla elektroenergetycznego średniego napięcia pozwala na dobór odpowiednich zabezpieczeń w celu uniknięcia jego uszkodzenia i wywołania zagrożenia przepięciowego.

Uważam, że są to niewątpliwie interesujące naukowo tezy, których dowód wymaga przeprowadzenia szeregu badań symulacyjnych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi informatycznych oraz ich weryfikacji eksperymentalnej, przeprowadzonych najlepiej na przykładowym obiekcie rzeczywistym w warunkach pracy terenowej. Jednakże dodam, że w moim odczuciu pierwsza z tez ma charakter nieco zbyt ogólny i wymagałaby doprecyzowania o analizowane w pracy doktorskiej trzy proponowane warianty uziemień. Jest to jednak uwaga



dyskusyjna, która nie wpływa znacząco na całokształt poprawności formułowanych tez recenzowanej dysertacji. Doktorantka w swojej pracy doktorskiej wprowadziła również tezę pomocniczą (rozdz. 3, str. 62), cyt.:

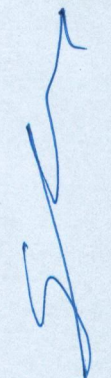
Istnieje możliwość zamodelowania żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego średniego napięcia w celu oceny zjawisk przepięciowych zachodzących w różnych konfiguracjach sieci elektroenergetycznej.

Moim zdaniem, nieco rozbudowując tą tezę można byłoby traktować ją jako tezę główną, znów wprowadzając jej doszczegółowienie o zakres analizowanych w rozprawie przypadków. Podsumowując stwierdzam, że zarówno tematyka (niewątpliwie związana z dyscypliną naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne), jak i tezy pracy dotyczą aktualnych i ważnych zagadnień badawczych, z pewnością naukowo dostatecznie nierozeznaczonych, mających jednocześnie duże znaczenie praktyczne. Oceniam je zatem bardzo pozytywnie.

Recenzowana praca doktorska mgr. inż. Aleksandry Schött-Szymczak ma charakter obliczeniowo-symulacyjny oraz eksperymentalny. Rozprawa liczy 185 stron, składa się z 8 rozdziałów, streszczenia (w j. polskim i angielskim) oraz bibliografii obejmującej spis 139 pozycji literaturowych. Oceniając rozprawę na wstępie dodam, że z uwagi na dość licznie stosowane w tekście pracy skróty literowe, dla potencjalnych czytelników dysertacji niekoniecznie będących ekspertami w opisywanej dziedzinie, wartym rozważenia byłoby wprowadzenia tabelarycznego wykazu stosowanych oznaczeń. Poniżej zamieszczam analizę charakterystyki recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Rozdział 1 (9 str.) stanowi dobre i wystarczająco szczegółowe wprowadzenie do tematyki rozprawy.

Rozdział 2 (43 str.) prezentuje wiadomości teoretyczne dotyczące elektroenergetycznych linii kablowych, ze szczególnym uwzględnieniem budowy jednożyłowych kabli średniego napięcia. W rozdziale opisano charakterystykę ich powłok oraz matematyczne zależności pozwalające wyznaczać parametry wzdlużne i poprzeczne kabli. Ponieważ w pracy głównie analizowana jest żyła powrotna kabla, przedstawiono warunki jakie musi ona spełniać w linii kablowej, najpowszechniej stosowane metody uziemiania oraz dodatkowe wyzwania związane z jej pracą. Rozdział zawiera także analizę sposobów ograniczania strat w żyłach powrotnych, w tym proponowane zmiany konfiguracji sposobu uziemienia żył powrotnych (rozdz. 2.4), co stanowi podstawę teoretyczną związaną już bezpośrednio z tematyką poruszaną w dysertacji. Podobnie rozdz. 2.5, który opisuje



zagadnienia przebiegów ziemnozwarciowych w liniach kablowych średnich napięć, ich przyczynę oraz niezbędne analizy potencjalnych skutków. Uważam, że w ujęciu całościowym rozdział 2 pracy doktorskiej jest oczywiście niezbędny i bardzo cenny, jednakże z uwagi na mnogość poruszanych w nim zagadnień jest również bardzo obszerny i mógłby być podzielony na dwa odrębne rozdziały, co w moim odczuciu poprawiłoby przejrzystość pracy.

W rozdziale 3 autorka przedstawia cel rozprawy, dwie tezy główne, tezę pomocniczą oraz zakres prac badawczych zrealizowanych na potrzeby udowodnienia postawionych w rozprawie tez.

Rozdział 4 (47 str.) rozpoczyna właściwą część badawczą rozprawy, która stanowi podstawę oceny zrealizowanych prac badawczych związanych z wnioskiem o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. W rozdziale tym Doktorantka prezentuje przyjętą metodologię badawczą, opisuje zastosowane narzędzia, wyniki wstępnych badań symulacyjnych z wykorzystaniem oprogramowania DigSILENT Power Factory dla trzech alternatywnych wariantów uziemienia żył powrotnych linii kablowej średniego napięcia, wyniki terenowych badań eksperymentalnych analizujących rzeczywiste wartości przebiegów ziemnozwarciowych będących wynikiem doziemienia jednej fazy linii napowietrznej, będącej składową badanego ciągu kablowo napowietrznego dla trzech alternatywnych wariantów uziemienia żył powrotnych. Ponadto, w oparciu o wyniki rzeczywiste Doktorantka przeprowadza uzupełniające analizy symulacyjne zjawisk przebiegowych z wykorzystaniem ww. oprogramowania oraz dokonuje podsumowania tego etapu zrealizowanych prac badawczych.

Rozdział 5 (59 str.) prezentuje dodatkowe wyniki badań symulacyjnych, które uwzględniają cały szereg parametrów, potencjalnie mogących mieć wpływ na wartości przebiegów ziemnozwarciowych analizowanej linii kablowej, a z różnych przyczyn (ekonomicznych, logistycznych jak również prawnych) niemożliwych do zrealizowania w opisanych wcześniej eksperymentach badaniach terenowych. Dokonano analizy takich parametrów jak: wartość obciążenia prądem roboczym, rodzaj ułożenia linii, sposób pracy punktu neutralnego sieci średniego napięcia, pole przekroju poprzecznego żyły roboczej i powrotnej kabla, długość linii kablowej, rezystancja przejścia w miejscu zwarcia. Oceniono również rodzaj zakłócenia (zwarcia) na wartość rejestrowanych przebiegów oraz zagrożenie porażeniowe wynikające z częściowego odziemienia żyły powrotnej i metody jego minimalizacji.

Rozdział 6 (5 str.) opisuje wytyczne dotyczące ochrony linii kablowej średniego napięcia przed skutkami przebiegów mogących wystąpić w żyłach powrotnych, a będących skutkiem analizowanych alternatywnych wariantów zmiany konfiguracji ich uziemienia.



W rozdziale 7 (4 str.), który stanowi podsumowanie recenzowanej rozprawy doktorskiej, Doktorantka prezentuje wnioski końcowe dowodzące słuszności postawionych wcześniej tez oraz opisuje problemy otwarte, mogące stanowić podstawę przyszłych kierunków badań.

Rozdział 8 zawiera wykaz literatury. W tym miejscu dodam, że zamieszczanie w rozprawie doktorskiej pozycji, których daty publikacji oscylują ok. 100 lat wstecz, nie jest do końca właściwe z uwagi na ich aktualność naukową. Na szczęście jest ich niewiele – łącznie 4 pozycje.

Na podstawie analizy ww. rozdziałów recenzowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorantka uzyskała następujące istotne osiągnięcia naukowe:

- zaproponowanie trzech alternatywnych wariantów uziemienia żył powrotnych linii kablowej średniego napięcia, celem ograniczenia strat przesyłowych;
- wyznaczenie wartości spodziewanych przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych analizowanej linii kablowej dla wszystkich wariantów uziemień skutkiem doziemienia jednej fazy linii napowietrznej na drodze symulacji komputerowej;
- weryfikacja wartości ww. przepięć ziemnozwarciowych na drodze eksperymentu przeprowadzonego w warunkach terenowych;
- zaprojektowanie i wykonanie rezystancyjnego dzielnika napięcia na potrzeby wykonania pomiarów przepięć w warunkach terenowych;
- wykonanie dodatkowych analiz symulacyjnych w oparciu o wyniki i wnioski uzyskane z badań eksperymentalnych;
- wykonanie dodatkowych analiz symulacyjnych uwzględniających szereg czynników, potencjalnie mogących mieć wpływ na wartości przepięć ziemnozwarciowych analizowanej linii kablowej, a z różnych przyczyn niemożliwych do zrealizowania w eksperymentach badaniach terenowych;
- wykonanie analizy zagrożenia porażeniowego wynikającego z częściowego odziemienia żyły powrotnej i zaproponowanie metod jego minimalizacji;
- sformułowanie wytycznych dotyczących ochrony linii kablowej średniego napięcia przed skutkami przepięć mogących wystąpić w żyłach powrotnych, a będących skutkiem analizowanych alternatywnych wariantów zmiany konfiguracji ich uziemienia.

Oceniając całokształt rozprawy doktorskiej stwierdzam, że jest ona poprawnie przemyślana, treść prezentująca wyniki badań własnych Doktorantki (w mojej ocenie ok. 123 str.) zdecydowanie przekracza 50% całości pracy, układ rozdziałów nie budzi większych zastrzeżeń, praca napisana jest dobrym językiem z naukowego punktu widzenia oraz posiada staranną szatę graficzną. Usterki redakcyjne oraz drobne błędy są nieliczne zważywszy na całokształt pracy. Na niektóre z nich zwracam uwagę w punkcie 4 recenzji. Podsumowując, wysoko oceniam zastosowane techniki badawcze oraz organizację i sposób przeprowadzenia eksperymentów. Wskazują one na duże umiejętności badawcze Doktorantki. Osiągnięte wyniki prezentują dobry poziom naukowy pracy, co stanowi jeden z ważniejszych elementów wniosku końcowego niniejszej recenzji.

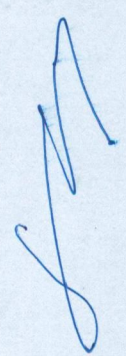
3. Uwagi i pytania dyskusyjne

- 3.1 Str. 64 – Cyt.: *Badania terenowe przeprowadzono we współpracy ze spółką dystrybucyjną energii elektrycznej Enea Operator Sp. z o.o. jako etap pracy zleconej pt. „Ograniczenie strat przesyłowych w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia bez narażania izolacji powłoki na uszkodzenia elektryczne”*. Ponieważ jest to niezwykle ważny oraz jedyny etap badań eksperymentalnych doktoratu, z uwagi na informację iż był to *etap pracy zleconej*, proszę o informację o zakresie prac badawczych prowadzonych bezpośrednio przez Doktorantkę oraz jej ew. udziale procentowym w innych etapach ww. pracy zleconej. Niestety brak jest tych informacji w dysertacji. Na str. 65 pojawia się jedynie zdawkowa adnotacja o cyt., ... *wykorzystując wiedzę grupy badawczej*, tzn. jakiej?
- 3.2 Str. 65 – Cyt.: *Spośród szerokiego wyboru programów komputerowych pozwalających na odwzorowanie elementów systemu elektroenergetycznego zdecydowano o wyborze programu firmy DiGSILENT PowerFactory*. Jakie inne programy komputerowe były analizowane w zakresie realizacji badań symulacyjnych i jakie konkretne kryteria spowodowały, że dokonano wyboru oprogramowania firmy DiGSILENT PowerFactory?
- 3.3 Str. 66 – Cyt.: *W przypadku wykonywanych na potrzeby rozprawy badań wykorzystujących symulacje komputerowe wykorzystano model ULM*. Proszę o informację powodu wyboru modelu ULM do badań symulacyjnych, a nie modelu FDCM?
- 3.4 Rys. 4.18–4.21 – Podczas realizacji badań eksperymentalnych czas rejestracji napięcia wynosił 1 ms. Jaki był tego powód? Czy po 1 ms następowało wyłączenie układu przez
- 

automatykę ziemnozwarciową? W trakcie wstępnych badań symulacyjnych (str. 76) przyjęto: czas rejestracji wartości chwilowych napięcia 5 s, zwarcie doziemne po 0,5 s, wyłączenie zwarcia po 3 s, krok iteracji obliczeń 0,01 ms. Proszę o wyjaśnienie doboru ww. parametrów symulacji w stosunku do spodziewanych wartości rzeczywistych eksperymentu. Ponieważ na ww. rysunkach prezentowany jest precyzyjnie przebieg czasowy przebiegu rejestrowany podczas badań eksperymentalnych, dlaczego na rys. 4.8–4.10 nie zastosowano również podobnej skali precyzji pomimo dokładności obliczeń z iteracją 0,1 ms?

- 3.5 Str. 151 – Cyt.: *Wyniki przedstawione poniżej w postaci przebiegów napięć indukowanych w żyłach powrotnych linii kablowej zostały ograniczone do symulacji układu o konfiguracjach uziemienia żył powrotnych zaproponowanych jako warianty a i b. Dlaczego nie analizowano wpływu rodzajów zwarć na wartości przebiegów dla wariantu c? Tym bardziej, że w podsumowaniu na str. 169 Doktorantka stwierdza, cyt. ... możliwość wystąpienia zwarcia innego rodzaju w sieci, w której zastosowany zostanie dowolny z wariantów konfiguracji uziemienia żył powrotnych nie będzie miał istotnego wpływu na bezpieczeństwo izolacji zewnętrznej rozpatrywanego kabla.*
- 3.6 Str. 172–173 – Cyt.: *Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami oraz sugerowanymi wartościami strat energii elektrycznej obliczonymi we wstępie do rozdziału 5. można wnioskować, że najbardziej skutecznym rozwiązaniem będzie wybór wariantu c, który w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych wykazuje najmniejsze wartości przebiegów ziemnozwarciowych, oraz cytata z kolejnej strony: Zastosowanie tego wariantu wymaga rozważenie z punktu widzenia opłacalności ekonomicznej i powinno bazować na znajomości odbioru, który zasila linia kablowa. Proszę o rozwinięcie/doprecyzowanie co należy dokładnie rozumieć w związku z pojęciem znajomość odbioru.*

4. Uwagi redakcyjne

- 4.1 Uwaga ogólna dotycząca całości rozprawy – Ułożenie kolejności numeracji cytowanych pozycji literaturowych w spisie (rozdz. 8), moim zdaniem powinno być zgodne z kolejnością tych cytowań występujących w samym tekście pracy. Taki sposób ułatwia odnajdowanie pozycji ze spisu podczas czytania dysertacji i jest preferowany w większości publikacji naukowych.
- 4.2 Uwaga ogólna dotycząca całości rozprawy – Brak tabelarycznego wykazu stosowanych w pracy oznaczeń.
- 

- 4.3 Str. 25 – Błąd w opisie wzoru (2.2), powinno być ρ_p – *rezystancja jednostkowa żyły powrotnej* (patrz str. 31).
- 4.4 Rys. 2.7, 2.8 – Może lepiej na schemacie używać symbolu warystora, jako zabezpieczenia przeciwprzepięciowego (element SVL – np. patrz rys. 2.9).
- 4.5 Str. 45 – Prawidłowa nazwa parametru $tg\delta$ to *współczynnik strat*, a nie stratności.
- 4.6 Tabela 4.3, 4.4 – W opisie tabeli powinno być raczej ... *symulacji uzupełniających* ..., a nie wstępnych.
- 4.7 Str. 128, 129, 149 – Co oznaczają pozycje literaturowe: [D, E], [F], [G, H]?
- 4.8 Tabela 5.8 – Opis tabeli sugeruje dane dla kabli firmy Telefonika, podczas gdy są dane tylko dla firmy NKT.
- 4.9 Str. 171 – Błędna numeracja rysunku, powinno być Rys. 6.1 zamiast Rys. 5.42.

5. Wniosek końcowy

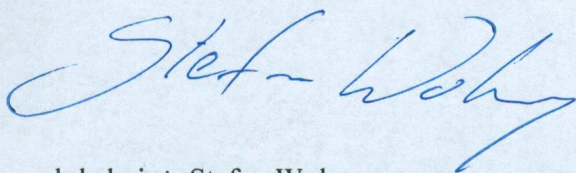
Pracę doktorską mgr. inż. Aleksandry Schött-Szymczak pt. „Zjawiska przepięciowe w elektroenergetycznych kablach SN ze szczególnym uwzględnieniem sposobu pracy ich żył powrotnych” oceniam **pozytywnie**. Na ocenę tę składają się przede wszystkim:

- tematyka pracy, która wynika z praktycznych problemów eksploatacji linii kablowych średniego napięcia oraz związana jest z bardzo aktualną problematyką badawczą w dziedzinie wysokonapięciowych systemów dystrybucji energii elektrycznej;
- oryginalne i interesujące naukowo tezy rozprawy, mające charakter badań obliczeniowo-symulacyjnych oraz eksperymentalnych, z wyraźnymi możliwościami aplikacyjnymi;
- dobre opracowanie literaturowe wprowadzające w badawczą część pracy, szczególnie pod kątem możliwości stosowania w elektroenergetycznych kablowo-napowietrznych systemach dystrybucji;
- szeroki i spójny program badań eksperymentalnych wykonanych na obiekcie rzeczywistym;
- poprawna realizacja badań pod kątem metodologicznym oraz właściwe opracowane wyniki eksperymentów;
- osiągnięte istotne wyniki mające zarówno charakter praktyczny jak i naukowy.

Recenzowana rozprawa należy do grupy prac z zakresu optymalizacji pracy kablowych systemów dystrybucji energii elektrycznej. Ma niewątpliwie cechy badań symulacyjnych oraz

eksperymentalnych z silnym uzasadnieniem ich praktycznej potrzeby. Nie do pominięcia jest również możliwy do uzyskania aspekt ekonomiczny, który jednak w chwili obecnej wymaga jeszcze kilku dodatkowych badań. W mojej ocenie, główny cel rozprawy był konsekwentnie realizowany i w wyznaczonych ramach został osiągnięty. Doktorantka wykazała się dobrym opanowaniem niezbędnej wiedzy teoretycznej, umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania oryginalnego zagadnienia naukowego, którego realizację oparła o poprawnie zaplanowany i wykonany program badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Zamieszczone w recenzji w p. 3 uwagi mają w większości charakter dyskusyjny, natomiast dostrzeżone i wymienione w p. 4 błędy są głównie natury redakcyjnej.

Na podstawie przedstawionych w recenzji argumentów stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668, z późn. zm.). Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Aleksandry Schött-Szymczak do publicznej obrony. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



dr hab. inż. Stefan Wolny
prof. ucz. Politechniki Opolskiej