

Szczecin, 4 września 2025 r.

dr hab. inż. **Szymon Banaszak**, prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki

ul. Sikorskiego 37; 70-313 Szczecin

e-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. **Aleksandry Schött-Szymczak**

pod tytułem: **“Zjawiska przepięciowe w elektroenergetycznych kablach sn ze szczególnym uwzględnieniem sposobu pracy ich żył powrotnych”**

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. **Krzysztof Walczak**, prof. PP

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii i Energetyki Politechniki Poznańskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Nadolnego oraz uchwała Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 17 czerwca 2025 r.

1. Ocena układu, tematyki i celu rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska składa się z siedmiu rozdziałów, które można podzielić na część wprowadzającą do tematyki (rozdziały 1 i 2), rozdział 3 zawierający tezy i cele pracy oraz część badawczą, symulacyjno-praktyczną (rozdziały 4-6). Dodatkowo zawarto w niej podsumowanie (rozdział 7) i bibliografię. Spis literatury liczy 139 pozycji. Za wyjątkiem jednej pozycji (numer 50) wszystkie z nich zostały w pracy zacytowane. Objętość pracy wynosi 185 stron.

Tematyka rozprawy dotyczy zbadania wpływu sposobu uziemienia ekranów kabli elektroenergetycznych na ograniczenie start przesyłowych, przy jednoczesnym określeniu wartości indukowanych przepięć w tych ekranach w warunkach zwarciovych. W pracy zawarto zarówno badania symulacyjne, jak i badania przeprowadzone na rzeczywistych obiektach elektroenergetycznych. Badania opisane w pracy zrealizowano we współpracy z firmą Enea Operator Sp. z o.o.

We wstępie pracy (rozdział 1) przedstawiono wprowadzenie do poruszanej tematyki, z naciskiem na zjawiska strat i sposoby uziemiania żył powrotnych kabli i wskazano na możliwość zastosowania zmiany konfiguracji uziemienia w układach trójfazowych. Wskazano także na ryzyko wystąpienia przepięć związane z częściowym nieuziemieniem ekranów kabli w przypadku wystąpienia zakłóceń, takich jak zwarcia doziemne. Wskazano na istotność tematyki, której podjęła się Autorka pracy w odniesieniu do praktycznych

zastosowań w układach elektroenergetycznych dla średnich napięć. Zgodnie z wnioskami wyciągniętymi z przeglądu literatury, podobne badania realizowane były szerzej dla napięć wysokich (WN) i najwyższych (NN), a w piśmiennictwie krajowym i światowym nie ma wielu doniesień dotyczących właśnie zakresu napięć średnich (SN). Autorka w kolejnych akapitach opisała zawartość kolejnych rozdziałów pracy. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż operator sieci dystrybucyjnej udostępnił na potrzeby badań fragment istniejącej sieci, pozwalając na przeprowadzenie prób zwarciovych dla wcześniej ustalonych wariantów uziemienia kabli. Dzięki takiej współpracy jednostki naukowej z przemysłem możliwe jest przeprowadzenie eksperymentów w warunkach zbliżonych do warunków eksploatacyjnych. Autorka wprowadziła czytelnika także do tematyki modelowania w środowisku DIGSILENT Power Factory.

Rozdział drugi opisuje konstrukcje elektroenergetycznych linii kablowych, przede wszystkim budowę jednożyłowych kabli elektroenergetycznych. Przedstawiono charakterystyki ich powłok oraz podstawy teoretyczne pozwalające obliczyć parametry wzdłużne i poprzeczne kabli. Zaprezentowane zostały zależności fizyczne dotyczące jednożyłowych kabli elektroenergetycznych pracujących w układzie trójfazowym. Szczególna uwaga poświęcona została żyłce powrotnej, której konfiguracja względem uziemienia jest głównym przedmiotem badań w rozprawie. Opisano warunki jakie musi ona spełniać w linii kablowej, najpowszechniej wykorzystywane sposoby jej uziemienia oraz wyzwania jakie są z tym związane. Przedstawiono sposoby ograniczenia strat w żyłce powrotnej i sposób ich obliczania, a także proponowane zmiany konfiguracji sposobu uziemienia żył powrotnych. Autorka wskazuje na współpracę Politechniki Poznańskiej z Enea Operator Sp. z o.o. w zakresie badań na tematykę pracy doktorskiej, nie podając jednak jednoznacznie własnego wkładu w prezentowane treści. Stwierdzenie „Rozwiązanie proponowane w rozprawie jest efektem współpracy naukowców Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej z firmą Enea Operator Spółka z o.o. i zostało szczegółowo przedstawione w artykule [1].” wskazuje na udział – poza partnerem przemysłowym – zespołu naukowców z PP. W dalszej części rozdziału zawarto informacje na temat klasyfikacji przepięć i zjawisk im towarzyszących. Dokonano także analizy wpływu przepięcia na wartości napięć indukowanych w zależności od uziemienia elementów układu elektroenergetycznego oraz zawarto metody ochrony linii kablowych od skutków przepięć. W mojej ocenie wprowadzenie wyczerpuje tematykę i jest wystarczające realizacji dalszych badań i eksperymentów zawartych w kolejnych rozdziałach.

Rozdział trzeci zawiera cel rozprawy, tezy główne i tezę pomocniczą oraz zakres prac, które zostały przedsięwzięte na potrzeby udowodnienia postawionych tez. W mojej ocenie tezy główne można było połączyć, gdyż druga z nich jest dość oczywista i w zasadzie zawiera w sobie dowód na swoją prawdziwość. Za to teza pomocnicza sformułowana jest najlepiej z nich, wskazując na zakres badań, dzięki którym powstanie nowa wiedza, a jednocześnie wprost nawiązuje do tematyki doktoratu.

Rozdział czwarty rozpoczyna część badawczą rozprawy. Zawarto w nim opis przyjętej metodologii badawczej wraz z opisem narzędzi. Wskazano na zaplanowany eksperyment naukowy. Po raz kolejny wskazano na współpracę przy realizacji badań terenowych z operatorem sieci dystrybucyjnej Enea Operator Sp. z o.o. w ramach pracy zleconej. Pojawia się pytanie o prawa do wyników takich badań, gdyż w praktyce przy współpracy nauki z

przemysłem w polskich realiach to zleceniodawca przejmuje prawa autorskie do uzyskanych wyników. W rozdziale zamieszczono założenia i wyniki badań symulacyjnych w programie DIgSILENT Power Factory oraz badań eksperymentalnych terenowych dotyczących wpływu zmiany sposobu uziemienia żył powrotnych elektroenergetycznej linii kablowej SN na przebiegi ziemnozwarciowe mogące pojawić się w tych żyłach w wyniku wystąpienia jednofazowego zwarcia doziemnego w linii kablowo-napowietrznej. Omówiono warianty konfiguracji uziemienia ekranów kabli, które zostały przebadane w pracy. Przedstawione przebiegi oraz wartości maksymalne napięć otrzymanych w wyniku badań stanowią podstawę do przeprowadzenia symulacji komputerowych. Wyniki symulacji uzyskane w tym rozdziale posłużyły do zaprojektowania przez Autorkę dzielnika napięciowego, który posłużył do badań terenowych. Przedstawiono metodologię wykonania prób eksperymentalnych oraz opisano fragment sieci elektroenergetycznej, na którym te próby wykonano. Uważam to za bardzo cenny aspekt pracy, umożliwiający bezpośrednie porównanie wyników uzyskanych z narzędzi symulacyjnych z rzeczywistymi zjawiskami występującymi w obiektach elektroenergetycznych. W wyniku tego porównania uzyskano dobrą zgodność dla wariantów a i b, a mniejszą dla wariantu c. Rozdział zamykają wnioski i podsumowanie.

Rozdział piąty zawiera analizę zjawisk przebiegiowych generowanych w żyłach powrotnych w zależności od konfiguracji i parametrów linii elektroenergetycznej. Opisano w nim założenia do modelowania zjawisk i ogólny schemat modelu wraz z parametrami modelowanego fragmentu sieci. Przedstawiono przebiegi i wykresy pozwalające na ocenę zależności poziomu napięcia ziemnozwarciowych powstających w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego w wyniku pojawienia się w sieci zwarcia doziemnego od parametrów linii kablowych w powiązaniu ze zmianami sposobu uziemienia tych żył. Autorka określiła wpływ rodzaju zakłócenia na przebieg napięcia indukowanego w nieuziemionych żyłach powrotnych linii kablowej i określenie maksymalnego napięcia pojawiającego się w trakcie ich trwania. Przeanalizowany został wpływ zmiany parametrów na poziom napięcia ziemnozwarciowych, takich jak obciążenie kabla prądem roboczym, sposób ułożenia linii kablowej, sposób pracy punktu neutralnego sieci średniego napięcia, pole przekroju żyły roboczej kabla i jego żyły powrotnej oraz wpływ długości kabla, a także wpływ parametrów zwarcia, tj. wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia i rodzaj zakłócenia zwarciego. Są to bardzo istotne analizy wskazujące na znajomość tematyki przez Autorkę. Dzięki nim możliwe jest uniknięcie błędu pominięcia kluczowego czynnika mogącego znacząco wpłynąć na analizowane zjawiska. W końcowych podrozdziałach przedstawiono ocenę zagrożenia porażeniowego, która jest następstwem częściowego nieuziemienia żył powrotnych. Rozdział zamyka podsumowanie otrzymanych wyników.

W **rozdziale szóstym** zamieszczono wytyczne dotyczące ochrony linii kablowej przed skutkami napięć mogących wystąpić w żyłach powrotnych w rezultacie zmiany konfiguracji ich uziemienia. Wskazano na kluczowe czynniki wpływające na poziom napięcia ziemnozwarciowych, tj. długość linii kablowej oraz rezystancję przejścia w miejscu zwarcia. Autorka zaproponowała schemat blokowy wskazujący na sposób ochrony napięciowej żył powrotnych kabla w zależności od sposobu uziemienia tych żył. Zaproponowano rozwiązania pozwalające na zastosowanie układów pracy żył powrotnych ograniczających straty energii elektrycznej przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa.

Podsumowanie rozprawy doktorskiej zawarto w **rozdziale siódmym**. Autorka przedstawiła wnioski końcowe w oparciu o przeprowadzone badania i określiła dalsze kierunki badań, które można podjąć w ramach przedmiotu rozprawy.

Pracę zamyka **bibliografia**. Jak wspomniano na wstępie tej recenzji, nie zacytowano w tekście pracy jednej pozycji, zapewne przez przeoczenie lub błąd edytorski (pozycja nr 50). Kolejności umieszczenia cytowań w tekście jest alfabetyczna. Spis zawiera zarówno pozycje starsze, jak i z ostatnich lat. Na uwagę zasługuje zacytowanie raportów CIGRE i IEEE, co jest bardzo ważne przypadku pracy doktorskiej praktycznej, opartej na eksperymentach realizowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Świadczy to o dobrym przygotowaniu autorki do ich przeprowadzenia. W spisie literatury znajduje się także pięć pozycji, których jedyną autorką lub współautorką z promotorem, jest doktorantka.

2. Uwagi ogólne

Praca doktorska p. Aleksandry Schött-Szymczak zawiera opis dobrze zaplanowanych badań naukowych o charakterze praktycznym. Doktorantka wykonała analizy teoretyczne, wybrała i przygotowała narzędzia symulacyjne, dokonała stosownych obliczeń i przeprowadziła eksperymenty we współpracy z operatorem sieci dystrybucyjnej. Tym samym doktorantka wykazała umiejętność samodzielnej pracy naukowej.

Zaprezentowane w pracy modele, eksperymenty i przedstawione wnioski są oryginalnym osiągnięciem autorki. Pracę oceniam jednoznacznie pozytywnie, choć pojawiło się według mnie kilka wątpliwości o których wyjaśnienie poproszę autorkę w odpowiedzi na recenzję, a podczas obrony poproszę o publiczne odniesienie się do wybranych odpowiedzi. Moje uwagi przedstawiam w poniższych punktach.

- 2.1. W mojej ocenie wyjaśnienia wymaga zakres współpracy z Enea Operator Sp. z o.o. Autorka w kilku miejscach pracy wskazuje, że część badań zrealizowanych zostało w ramach pracy zleconej. Czy to autorka wykonywała te badania? W jakim zakresie wyniki badań przedstawione w pracy realizowane były w ramach pracy zleconej i kto ma prawa autorskie do tych wyników?
- 2.2. W pracy nie podano odniesień do literatury dla przedstawionych wzorów. Część z nich opisuje podstawowe zjawiska i jest powszechnie znana, inne służą do obliczeń specjalistycznych wartości. Nie jest jasne, które z nich autorka pozyskała z literatury, a które są wynikiem własnych przekształceń lub obliczeń.
- 2.3. Wzory 2.1 i 2.2 opisują rezystancję jednostkową powłok kabla. Czym różnią się wartości ρ_L i ρ_P ? Opis dla obu wzorów jest identyczny.
- 2.4. W opisie algorytmu z rys. 5.42 Autorka wskazuje na str. 172, że „najbardziej skutecznym rozwiązaniem będzie wybór wariantu c”, a poniżej zauważa, że „zastosowanie tego wariantu wymaga rozważenie z punktu widzenia opłacalności ekonomicznej i powinno bazować na znajomości odbioru, który zasila linia kablowa”. Jak bardzo, zdaniem Autorki, zmiany odbiorów zasilanych przez daną linię wpłyną na możliwość zastosowania tego wariantu? Czy chodzi tylko o zmiany polegające np. na przyłączeniu nowego odbiorcy, czy też może o dzienne lub sezonowe wahania parametrów zasilania odbiorców?

2.5. W pracy analizowane są wartości przepięć na jakie narażona będzie powłoka zewnętrzna kabla elektroenergetycznego w wyniku zmiany sposobu uziemienia żyły powrotnej w przypadku wystąpienia przepięć ziemnozwarciowych. Czy Autorka jest w stanie ocenić zagrożenie powłoki od innych przepięć, np. piorunowych lub łączeniowych? Jak zastosowane rozwiązania uziemienia żyły powrotnej kabla będą wpływać na zagrożenie przy wystąpieniu takich przepięć?

Powyższe uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę pracy doktorskiej przeze mnie. Mogą za to wskazać dalsze kierunki badań i analiz.

3. Uwagi szczegółowe

Poziom edytorski pracy jest generalnie dobry. Występują nieliczne literówki i błędy edytorskie czy też błędy interpunkcyjne. Poniżej przedstawię najważniejsze ich przykłady:

- str. 14: jest „tę” zamiast „tą”,
- str. 15: „porcji energii a także”, brak przecinka,
- str. 17: jest „ocenę zagrożenie porażeniowego, która jest” zamiast „ocenę zagrożenia porażeniowego, które jest”,
- str. 23: „ekranem metalicznym to warstwa”, brak przecinka,
- str. 25: jest „zakłada się pominięcie prądów” zamiast „zakłada się pominięcie prądów”,
- str. 26, wzory 2.3-2.5 oraz rys. 2.4. Odległość raz opisano jako D , a raz jako m ,
- str. 36: jest „a przekrojem poprzeczny kabla” zamiast „a przekrojem poprzecznym kabla”,
- str. 42: jest „ilość urządzeń” zamiast „liczbę urządzeń”,
- str. 44: jest dwa razy „konduktancja i-te gałęzi” zamiast „konduktancja i-tej gałęzi”,
- str. 46: „a po stronie nieuziemionej powłoki są połączone”, brak kropki,
- str. 47: jest „Napięci fazy P2 obliczyć” zamiast „Napięcie fazy P2 obliczyć”,
- str. 48: jest „ułożenia jej w układzie płaskich lub” zamiast „ułożenia jej w układzie płaskim lub”,
- str. 50: jest „powrotnymi uwzględniał określenie wielkości” zamiast „powrotnymi uwzględniały określenie wielkości”,
- str. 59: wiersz 2 i 3, U_S oraz T powinny być pisane kursywą oraz brak indeksu dolnego,
- str. 62: jest „w żyłę powrotnej w różnej konfiguracji i przy różnych”, a lepiej brzmi „w żyłę powrotnej dla różnej konfiguracji i przy różnych”,
- str. 62: jest „elektroenergetycznym liniom kablowych” zamiast „elektroenergetycznym liniom kablowym”,
- str. 63: jest „występowania zagrożenie przepięciowego” zamiast „występowania zagrożenia przepięciowego”,
- str. 67, wzory 4.1 i 4.2, brak opisu dla X ,
- str. 73-75, rys. 4.4-4.7, ten sam podpis rysunków, brakuje dopisku o wariancie,
- str. 87: jest „Wiedząc, że ilość przeprowadzonych” zamiast „Wiedząc, że liczba przeprowadzonych”,
- str. 88: jest „Zwiększenie ilości wykorzystywanych” zamiast „Zwiększenie liczby wykorzystywanych”,

- str. 113: jest „podrozdziale 2.3, dotyczącym sposobu” zamiast „podrozdziale 2.3, dotyczących sposobu”,
- str. 173: „charakteru odbioru, których wyindukuje” – niejasne.

Powyższe uwagi natury redakcyjnej nie obniżają poziomu merytorycznego pracy, stronę edytorską pracy niezmiennie oceniam dobrze.

4. Podsumowanie

Praca doktorska stanowi ważne oryginalne osiągnięcie naukowe Autorki. W mojej ocenie cele naukowe oraz badawcze zostały zrealizowane, a uzyskane wyniki posłużyły do wyciągnięcia wartościowych wniosków, które mogą znaleźć znaczenie w praktyce przemysłowej. Uważam, że jednoznacznie wykazano w pracy udowodnienie postawionych tezy. Przeprowadzenie badań (i ich wcześniejsze przygotowanie) wymagało od Autorki dużego nakładu pracy i staranności badawczej. Pani Aleksandra Schött-Szymczak wykazała się umiejętnościami planowania i przeprowadzania eksperymentów i analizy uzyskanych wyników oraz rozwiązywania problemów naukowo-technicznych w swojej dyscyplinie naukowej. Pomimo zgłoszonych przeze mnie uwag o charakterze dyskusyjnym, praca mgr inż. Aleksandry Schött-Szymczak jednoznacznie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenia doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.