

Gdańsk, 30.08.2021

Dr hab. inż. Stanisław Czapp, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Szeląg
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Krzysztofa Szuchnika**

**pt. *Analiza przepięć w powłokach kabli 110 kV w liniach ze specjalnym
uziemieniem żył powrotnych i określenie zasad doboru ograniczników przepięć***

Recenzję wykonano zgodnie ze schematem przyjętym na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej

1. Jakie zagadnienie naukowe rozpatrzono w rozprawie i czy jest ono jasno sformułowane?

Dostarczanie energii elektrycznej do odbiorców na terenach silnie zurbanizowanych realizuje się zazwyczaj z wykorzystaniem linii kablowych. Znaczne zapotrzebowanie na moc w centrach dużych miast wymusza stosowanie linii kablowych o stosunkowo wysokim napięciu nominalnym, np. 110 kV. Długie odcinki tych linii stwarzają szereg problemów, z których bardzo istotnym jest indukowanie się napięć w żyłach powrotnych kabli. Napięcia te mogą stwarzać zagrożenie porażeniowe lub narażenia napięciowe zewnętrznej osłony kabla, skutkujące jej uszkodzeniem. Napięcia indukowane mogą też być źródłem znacznych strat mocy w żyłach powrotnych, co ogranicza obciążalność długotrwałą linii kablowej.

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy analizy napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli dla różnych sposobów ich połączeń, a także opracowania szczegółowych zasad doboru ograniczników przepięć mających zmniejszyć negatywne skutki tych przepięć w stanach zakłóceń. Zagadnienie naukowe sformułowane dość przejrzysto w rozdziale „1. Wprowadzenie” w działach PROBLEM BADAWCZY oraz GENEZA I UZASADNIENIE TEMATU ROZPRAWY.

2. Czy rozprawa zawiera poprawnie sformułowaną i udowodnioną tezę?

Teza rozprawy jest sformułowana poprawnie. Bezpośrednio pod tezą wyszczególniono działania, które przeprowadzono, aby tę tezę udowodnić. Takie przejrzyste wyszczególnienie ułatwia ocenę, czy teza została udowodniona.

Po szczegółowym zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej można uznać, że teza została udowodniona.

3. Czy zagadnienie naukowe rozpatrzone w rozprawie jest aktualne i ważne z naukowego punktu widzenia? Dlaczego?

Analiza napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli wysokiego napięcia jest zadaniem złożonym i dość trudnym. Mimo wielu publikacji naukowych i opracowań technicznych specjalistycznych międzynarodowych zespołów, mnogość czynników wpływających na wartości napięć indukowanych, a także niedoskonałość modeli obliczeniowych powoduje, że badania w tej tematyce powinny być kontynuowane. Zagadnienie naukowe rozpatrzone w rozprawie z pewnością jest aktualne i ważne z punktu widzenia rozwoju dyscypliny naukowej *elektrotechnika (automatyka, elektronika i elektrotechnika wg aktualnych przepisów)*. Wyniki uzyskane w ramach realizacji rozprawy doktorskiej stanowią nie tylko wkład w rozwój tej dyscypliny, ale mają również walory aplikacyjne. Propozycje przedstawione przez Autora rozprawy mogą być wdrożone w procesie projektowania elektroenergetycznych linii kablowych. Są one uzupełnieniem dotychczasowych rozwiązań stosowanych na świecie.

4. Czy rozprawa ma charakter pracy projektowej, konstrukcyjnej lub technologicznej? Jeżeli tak, to czy odpowiada ona ustawowym warunkom stawianym rozprawom doktorskim?

Recenzowana rozprawa doktorska jest obszerną pracą analityczną. Zawiera dogłębną analizę teoretyczną zjawisk związanych z napięciami indukowanymi w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych oraz propozycję algorytmów obliczeniowych. Jej charakter jest teoretyczny, ale ma ściśle odniesienia do praktyki, co jest istotną zaletą rozprawy. Oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej – odpowiada ona ustawowym warunkom stawianym rozprawom doktorskim.

5. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczącej o ogólnej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano jasno i przekonująco? Dlaczego?

Do mocnych stron ocenianej rozprawy z pewnością należy zaliczyć analizę i krytyczną ocenę literatury. Wykaz literatury jest obszerny – zawiera 201 pozycji. Wykaz ten zawiera artykuły naukowe o światowej renomie, referaty z konferencji międzynarodowych, książki, normy i wytyczne (m.in. IEEE, CIGRE) oraz specyfikacje techniczne. Liczne odwołania do literatury i odnoszące się do niej komentarze świadczą o dobrym rozpoznaniu aktualnego stanu wiedzy. Wnioski z przeglądu tego stanu są jasno sformułowane. Na tej podstawie można stwierdzić, że ogólna wiedza Autora w podejmowanej tematyce jest na bardzo wysokim poziomie.

6. Czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez autora zagadnienia naukowego? Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Autor rozprawy przedstawił i ocenił aktualny stan wiedzy odnoszący się do modelowania i obliczania napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli wysokiego napięcia, a także doboru ograniczników przepięć przyłączanych do tych żył, wskazał luki w stanie wiedzy i na tym tle zaproponował pewne autorskie uzupełnienia. Do samodzielnego i oryginalnego dorobku Autora rozprawy należy zaliczyć w szczególności:

- dokonanie analizy właściwości różnych konfiguracji połączenia żył powrotnych kabli wysokiego napięcia i zbadanie ich wpływu na pracę ograniczników przepięć chroniących osłony kabli,
- zaproponowanie postępowania w procesie doboru parametrów ograniczników przepięć chroniących osłony kabli,
- przeprowadzenie szczegółowej analizy przepięć dla przykładowych linii kablowych; analiza ta może stanowić podstawę dla rozwiązań w innych liniach.

Zawarte w pracy analizy teoretyczne, modele obliczeniowe oraz propozycje poprawy dokładności obliczeń napięć indukowanych i doboru ograniczników przepięć są oryginalne i stanowią wkład do stanu wiedzy w kraju i na świecie.

7. Czy rozprawa doktorska wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną autora w dyscyplinie naukowej? Co za tym przemawia?

Obszerna analiza i ocena stanu wiedzy, w szczególności najważniejszych światowych opracowań związanych z tematem napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli, oraz propozycja własnych rozwiązań/uzupełnienie rozwiązań aktualnie stosowanych są podstawą do stwierdzenia, że Autor rozprawy doktorskiej wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej *elektrotechnika (automatyka, elektronika i elektrotechnika wg aktualnych przepisów)*. Analiza treści rozprawy wskazuje, że jej Autor swobodnie porusza się po tematyce projektowania linii kablowych wysokiego napięcia, zarówno w odniesieniu do zjawisk fizycznych, jak i metod oraz narzędzi obliczeniowych. Nie bez znaczenia jest fakt, że Autor jest doświadczonym projektantem urządzeń, instalacji i sieci elektroenergetycznych.

8. Czy rozprawa doktorska dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez autora?

Struktura, zawartość merytoryczna oraz opracowanie redakcyjne rozprawy dowodzą, że jej Autor potrafi samodzielnie rozwiązywać zadania naukowe, a tym samym samodzielnie prowadzić prace naukowe.

9. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Poniżej przedstawiono uwagi merytoryczne (UM) do rozprawy.

- UM1 – Brakuje zdefiniowania „specjalnego uziemienia żył powrotnych”. Czytając rozdział „1. Wprowadzenie”, dział PROBLEM BADAWCZY na s. 10 (akapit 2 od góry, zdanie 1), można odnieść wrażenie, że chodzi tylko o uziemienie jednostronne/jednopunktowe (SPB, ang. Single-Point Bonding). Z taką myślą czyta się kolejne zdania rozprawy, tym bardziej, że liczba pojedyncza w tytule rozprawy sugeruje, że rozważany będzie jeden sposób uziemiania/łączenia żył powrotnych. Jednak już w dziale GENEZA I UZASADNIENIE TEMATU ROZPRAWY, na s. 11, jest mowa o krzyżowaniu żył powrotnych (CB, ang. Cross-Bonding). Aby uniknąć wątpliwości, w początkowych fragmentach rozprawy należało przytoczyć definicję specjalnego uziemienia żył powrotnych ze słownika IEV (nr ref 461-14-02) i wskazać, które rozwiązania Autor będzie analizował. Jest to bardzo istotne, m.in. ze względu na fakt, że w praktyce jest wiele odmian tych „specjalnych” sposobów uziemiania.

- UM2 (s. 10, akapit 2, zdanie 1) – Nieprecyzyjny jest zapis dotyczący podwojenia wartości przepięć przy uziemieniu SPB. W stosunku do jakiego przypadku/układu występuje to podwojenie?
- UM3 (s. 21, akapit 2) – Podano, że „w niniejszej pracy zaproponowano możliwe najbardziej aktualne i **zweryfikowane** modele elementów sieci”. Na czym polegała ta weryfikacja? Czy to modele najbardziej popularne i dostępne w literaturze? Czy to była weryfikacja dokonana przez Autora wg wybranych kryteriów? A może była dokonana autorska weryfikacja eksperymentalna?
- UM4 (s. 38, akapit 1) – Autor rozprawy sygnalizuje, że nie ma „obowiązujących standardów” odnoszących się do „dopuszczalnej wartości napięcia, które może trwale utrzymywać się na elementach nie stanowiących toru prądowego” i że „najczęściej w polskiej sieci elektroenergetycznej przyjmuje się wartość 50 V jako maksymalną.” Jacy operatorzy przyjmują taką wartość? Zgodnie z normą PN-EN 50522 odnoszącą się do stacji elektroenergetycznych o napięciu wyższym niż 1 kV oraz normą PN-EN 50341-1 odnoszącą się do elektroenergetycznych linii napowietrznych o napięciu wyższym niż 1 kV, największe dopuszczalne długotrwałe napięcie dotykowe rażeniowe wynosi 80 V. Jeżeli uwzględnić dodatkowe rezystancje w obwodzie rażeniowym (obuwia, wierzchniej warstwy gruntu), to wartość napięcia dotykowego spodziewanego jest wyższa, ale jednoznacznie określona. Na zasady podane we wspomnianych normach powołuje się np. operator TAURON w opracowaniu z roku 2013: „Wytyczne doboru środków ochrony przed porażeniem w urządzeniach WN, SN i nN do stosowania przy projektowaniu sieci elektroenergetycznej na terenie TAURON Dystrybucja S.A.”.
- UM5 (s. 71, rys. 6.1) – Czy autorskie rekomendacje to zapis oznaczony niebieską czcionką (w wersji elektronicznej rozprawy)? Autorska część powinna być jednoznacznie wyróżniona.
- UM6 (s. 73, wiersz 12 od dołu) – Napisano, że na wartość napięć indukowanych wpływ ma „...**szczegółowy** rozptyw prądu zwarciovego”. Zapis jest niezrozumiały. Co to jest szczegółowy rozptyw prądu zwarciovego?
- UM7 (s. 81, wiersz 15 od dołu) – Z zapisu „Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że początkowa chwilowa wartość prądu zwarcia (udarowy prąd zwarcia)...” wynika, że udarowy prąd zwarcia to początkowa chwilowa wartość prądu zwarcia. O jaki parametr w rzeczywistości chodzi? Zgodnie z normą PN-EN 60909-0, prąd zwarciovego udarowy to największa możliwa wartość szczytowa prądu zwarciovego.

- UM8 (s. 95, zależność 6.23) – W wyjaśnieniu tej zależności podano: „gdzie $u(t)$ jest wartością napięcia obniżonego na zaciskach ogranicznika przepięć w **chwili** przepływu prądu $i(t)$ ”. O jaką chwilę przepływu prądu chodzi? Czyżby początkową?
- UM9 (s. 104, ostatni akapit) – Niejasne jest pierwsze zdanie tego akapitu, w szczególności zapis „...gdy napięcie zwartej **fazy A** przechodzi przez zero...”. Na rys. 7.1 fazy oznaczono L1, L2, L3, natomiast z rys. 7.2 wynika, że symbole „A” oraz „B” oznaczają odpowiednie składowe prądu zwarciego wpływające do miejsca zwarcia z obu stron. Zatem co to jest faza A?
- UM10 (s. 106, wiersz 13 od dołu) – Oznaczenie i opis zwarcia dwufazowego z ziemią są niejasne. Czy chodzi o zwarcie:
 - dwufazowe z ziemią (dwie fazy doziemione w jednym punkcie), oznaczone w normie PN-EN 60909-0 jako kE2E, czy
 - dwumiejscowe (dwie fazy doziemione, ale każda w innym punkcie sieci), oznaczone w normie PN-EN 60909-0 jako k2E?

Z punktu widzenia analizy prądów płynących przez ziemię/żyły powrotne ma to istotne znaczenie.
- UM11 (podpisy rys. na s. 111-112) – Co Autor rozumie przez chwilową wartość skuteczną prądu? Prawdopodobnie chodzi o bieżącą wartość skuteczną, o której mowa w artykule *Musiał E.: Prądy zwarciego w niskonapięciowych instalacjach i urządzeniach prądu przemiennego, INPE: „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”, 2001, nr 40*. Jak jest ona liczona? Za jaki przedział czasu? Ma on bardzo istotne znaczenie przy zwiarcach bliskich (zmienia się odległość między obwiedniami składowej okresowej prądu zwarciego) oraz przy przepływie prądu zwarciego o dużym udziale składowej nieokresowej.

10. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych (inżynieryjno-technicznych)? Czy i jaka jest przydatność praktyczna rozprawy dla gospodarki narodowej?

Recenzowana rozprawa jest obszernym opracowaniem analitycznym. Zawiera ocenę obecnego stanu wiedzy oraz propozycję nowych rozwiązań, co sprawia, że jest przydatna dla nauk technicznych (inżynieryjno-technicznych). Na podkreślenie zasługują walory aplikacyjne rozprawy – jej wyniki mogą mieć zastosowanie praktycznie. Wyniki uzyskane przez Autora rozprawy mogą być wykorzystane przy projektowaniu elektroenergetycznych linii kablowych wysokiego napięcia i pozwolą na bardziej precyzyjną ocenę w szczególności narażeń napięciowych osłon kabli oraz dobór ograniczników przepięć do ochrony tych osłon.

Dokładniejsze obliczenia przyczyniają się do bardziej precyzyjnej oceny zagrożenia porażeniowego pochodzącego od napięć indukowanych, zwiększenia niezawodności działania linii kablowych, a także zmniejszenia kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Jest to ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa obsługi i niezawodności dostawy energii elektrycznej.

11. Jaka jest strona redakcyjno-wydawnicza rozprawy? Czy treść rozprawy odpowiada tematowi określönemu w tytule, czy następstwo rozdziałów jest właściwe? Czy rozprawa jest napisana poprawnym językiem?

Rozprawa liczy 160 stron (125 zasadniczego tekstu, 10 wykazu literatury oraz 25 załączników z obliczeniami) i jej treść zasadniczo odpowiada tematowi określönemu w tytule. Struktura pracy jest przemyślana i właściwa. Strona redakcyjno-wydawnicza jest dobra. Tekst jest zrozumiały, stosowana jest poprawna terminologia, a błędów redakcyjnych/interpunkcyjnych jest niewiele i są one raczej drobne. Ważniejsze uwagi redakcyjne (UR) przedstawiono poniżej.

- UR1 – W rozprawie występuje bardzo dużo symboli/oznaczeń. Przy ich dużej liczbie Autorowi umknęło, że dany symbol jest przypisany do więcej niż jednej wielkości – np. jako „ L ” oznaczono zarówno długość linii/sekcji (s. 30, zależność 4.11 lub s. 40, rys. 4.9), jak i indukcyjność (s. 55, rys. 5.2 i tekst nad tym rys.). Podobnie jest z symbolem „ B ” – na s. 28-29 jest to indukcja magnetyczna, na s. 59 w zależności 5.1 u dołu strony jest to współczynnik rozproszenia, a na s. 79 napisano, że w zależności 6.5 „... B jest wektorem wiadomych (napięć i prądów)”. Przydałby się więc wykaz oznaczeń, który uporządkowałby symbolikę, pozwolił uniknąć powtórzeń i ułatwiłby czytelnikowi lekturę rozprawy.
- UR2 – Symbole wielkości fizycznych U (napięcie), I (prąd), T (temperatura) itp. powinny być pisane jako pochyłe. W obecnej formie, pisane prosto, zlewają się z tekstem głównym, co zmniejsza jego czytelność.
- UR3 – W wielu miejscach w tekście podano tylko numery norm (bez tytułu i bez odsyłaczy do literatury). Takie odsyłacze ułatwiłyby odszukanie tytułu normy w wykazie.
- UR4 (s. 23, rys. 4.1) – Przydałby się odnośniki do poszczególnych elementów kabli i ich opis.
- UR5 (s. 27, akapit tuż nad rys. 4.2) – Niewłaściwy zapis „...dwa układy ułożenia kabli **jednofazowych**”. Kable są jednożyłowe, a nie jednofazowe.

- UR6 (s. 27, rys. 4.2) – Rysunek i opis powinny być bardziej precyzyjne. Powinny być wyróżnione/oznaczone następujące części rysunku: „a) układ płaski” oraz „b) układ trójkątny”.
- UR7 (s. 29, rys. 4.3) – Podpis jest nieadekwatny do tego, co przedstawiono na rysunku. Na rysunku nie ma „rozwoju prądów”; jest to schemat ogólny/uproszczony analizowanego układu.
- UR8 (s. 32, rozdz. 4.4, wiersz 7) – Sformułowanie „...zmniejszenie **dopuszczalnej obciążalności** długotrwałej” to pleonazm. Obciążalność to największe dopuszczalne obciążenie. Podobnie jest ze sformułowaniem „...ekonomicznie **najbardziej optymalnym** rozwiązaniem...” (s. 40, wiersz 7 od dołu; również s. 115 wiersz 9 od dołu). Optymalny to najlepszy z możliwych w jakichś warunkach.
- UR9 (s. 46, rys. 4.12) – W podpisie rysunku czegoś brakuje. Napisano: „Rys. 4.12. Sposób prowadzenia i **łączenia** przewodów połączeniowych ekranów, układ SPB – oznaczone na zielono [161]”. Łączenia przewodów z czym? Ze sobą? Łączenia przewodów z ekranami i z SVL? Podobnie jest z rys. 4.13.
- UR10 (s. 59) – Obie zależności na tej stronie mają numer (5.1).
- UR11 – Należy unikać żargonowych sformułowań, np. „bez **wypinania** ograniczników z zacisków” (s. 64), „**skablowanie** odcinka linii” (s. 97 i inne), „do **wpięcia** w istniejącą linię napowietrzną” (s. 104), „Przewody połączeniowe **spięte** są parami” (s. 113).
- UR12 (s. 102, rys. 7.1) – W fazie L1 oznaczono napięcie U_{p3} , natomiast w fazie L3 napięcie U_{p1} . Czy to prawidłowe oznaczenia?
- UR13 (s. 104, akapit 1 oraz s. 106, akapit 1) – podano parametry linki odgromowej: „linka odgromowa – 2 x OPGW o średnicy 15 mm²” (w innym miejscu: „linka odgromowa typu OPGW o średnicy 12.6 mm²”). Średnica w mm²?
- UR14 (s. 111-112, numeracja rysunków) – numer rysunku 7.6 występuje dwa razy na s. 111 i jeden raz na s. 112.
- UR15 (rys. na s. 117-119) – Podpisy rysunków są nieprecyzyjne (nie ma jednoznacznych symboli ani odniesienia do kolorów). Z podpisu powinno wyraźnie wynikać, który przebieg co przedstawia.
- UR16 (s. 125, akapit 1) – Zdanie „Wiele opisanych w rozprawie obszarów...” jest niezrozumiałe. Wydaje się, że brakuje w nim części tekstu.
- UR17 – Zdarza się błąd typowy dla prac dyplomowych/rozpraw naukowych; w odniesieniu do rzeczowników policzalnych w niektórych miejscach zapisano „ilość” zamiast „liczba”.

- UR18 (s. 139-140) – W dziale DANE ZWARCOWE I OBCIĄŻENIOWE zasygnalizowano analizy „Zwarcie **jednofazowe** na słupie kablowym L/Zwarcie **jednofazowe** na słupie kablowym R”, natomiast w szóstym wierszu tych analiz jest zapis „prąd zwarcia **trójfazowego (A)**”. Zatem jakiego rodzaju zwarcia dotyczy ta analiza? Ta sama nieścisłość występuje w analizie „Zwarcie jednofazowe na słupie kablowym R” (s. 153).
- UR19 (wykaz literatury) – Pozycje [124] i [194] mają niekompletne dane bibliograficzne.

12. Opinia ogólna, czy rozprawa odpowiada warunkom określonym w ustawie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej *elektrotechnika* (dyscyplinie *automatyka, elektronika i elektrotechnika* wg aktualnych przepisów), a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki – stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stanisław Czopp