

dr hab. inż. Paweł Rózga, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki
pawel.rozga@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Łukasza Grąkowskiego

pt. „*Determinanty oraz modelowanie czasów trwania przerw w zasilaniu odbiorców wynikających z
zawodności sieci dystrybucyjnych energii elektrycznej*”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dr hab. inż. Pawła Sitka, prof. PŚk zgodnie z Uchwałą nr 37/23 z dnia 17 maja 2023 roku.

2. Tematyka i tezy rozprawy

Każdy odbiorca energii elektrycznej, niezależnie od charakteru potrzeb, oczekuje pewnych dostaw energii elektrycznej. Dla odbiorcy, każda przerwa w zasilaniu to potencjalne straty finansowe oraz dyskomfort wynikający z braku energii, a więc niemożności korzystania z podstawowych potrzeb życiowych. Operatorzy sieci dystrybucyjnych niskiego i średniego napięcia, zdając sobie sprawę z niedogodności związanych z przerwami w zasilaniu dla odbiorcy, coraz większą uwagę zwracają na zagwarantowanie odbiorcom energii elektrycznej ciągłości zasilania. Przerwy w zasilaniu wynikają zazwyczaj z awaryjności elementów sieci, ale mogą także wystąpić z powodu przeprowadzanych cyklicznie prac remontowo-konserwatorskich. W Polsce, od wielu lat prowadzona jest rejestracja awaryjności elementów sieci elektroenergetycznych, czy to poprzez analizę wartości wskaźników charakteryzujących tę awaryjność, czy też poprzez analizę liczby i częstości uszkodzeń poszczególnych elementów. Podobne działania prowadzone są także globalnie, a przykładem tego może być seria wydanych w 2012 roku broszur CIGRE (od 509 do 514) opisująca dane zebrane na podstawie ankiet od firm zajmujących się przesyłem energii elektrycznej w kontekście niezawodności elementów infrastruktury energetycznej wykorzystującej gaz izolacyjny SF₆.

Równocześnie z działaniami jak powyżej, określa się odpowiednie wskaźniki dotyczące czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców, takie jak:

- wskaźnik przeciętnego systemowego czasu trwania przerwy długiej i bardzo długiej (SAIDI),

- wskaźnik przeciętnej systemowej częstości przerw długich i bardzo długich (SAIFI), które są wyznaczone oddzielnie dla przerw planowanych i nieplanowanych z uwzględnieniem przerw katastrofalnych oraz bez uwzględnienia tych przerw;

- wskaźnik przeciętnej częstości przerw krótkich (MAIFI).

Zapewnienie ciągłości zasilania jest więc elementem bezspornie związanym z pojęciem niezawodności sieci elektroenergetycznych. W teorii niezawodności, jako odrębnej gałęzi wiedzy, niezawodność techniczna odnosi się do struktury, obiektu czy urządzenia i oznacza zdolność do wykonania przez strukturę, obiekt czy urządzenie postawionego zadania w określonych warunkach eksploatacyjnych i w określonym czasie. Z innej strony jest to właściwość określona przez wartości istotnych wielkości charakteryzujących zdolność do spełnienia tych wymagań. Można zatem powiedzieć, że niezawodność jest cechą obiektywną i jednocześnie cechą względną, ponieważ zależy od rodzaju postawionego zadania, zbioru warunków eksploatacyjnych czy przewidywanego czasu wykonywania zadania. Wielkością charakteryzującą zdolność do spełnienia wymagań może być prawdopodobieństwo spełnienia przez obiekt stawianych mu wymagań, czyli prawdopodobieństwo, że wartości parametrów określających istotne właściwości struktury, obiektu czy urządzenia nie przekroczą w ciągu okresu czasu $(0, t)$ dopuszczalnych granic, w określonych warunkach życia obiektu.

Na bazie ogólnych definicji niezawodności, w przypadku sieci czy systemu elektroenergetycznego niezawodność określana może być zatem poprzez zdolność sieci czy systemu do zapewnienia zasilania odbiorców energią elektryczną, przy czym energia ta powinna charakteryzować się określonymi parametrami w granicach przyjętych standardów oraz w żądanych ilościach. Wynika zatem z powyższego, że niezawodność stanowi pewien poziom funkcjonowania poszczególnych elementów sieci czy systemu, skutkujący dostarczaniem do odbiorców (klientów) energii elektrycznej w wymaganej ilości i o parametrach mieszczących się w granicach ustalonych standardów (np. spełniających kryteria związane z jakością energii elektrycznej).

Oczywiście, jak w przypadku dowolnej struktury, systemu czy urządzenia, nie istnieje także idealny system dystrybucji energii elektrycznej, którego poziom niezawodności wynosiłby 100% przez cały okres jego eksploatacji. Przerwy w zasilaniu odbiorcy końcowego będą występować, ale istotne jest, aby straty wynikające z tych przerw, zarówno związanych z awariami jak i z planowanymi pracami remontowo-konserwacyjnymi, były racjonalnie ocenione. Aktualnie, jak wzmiankowałem we wstępie swojej pracy doktorant, „spółki dystrybucyjne czas trwania przerw w zasilaniu odbiorców określają w sposób przybliżony, jako pewien procent czasu trwania awarii”, co z punktu widzenia odbiorców nie jest korzystne. Czas trwania awarii nie zawsze jest równy czasowi trwania przerwy w zasilaniu, a często jest czasem krótszym, co powoduje uzasadnione niezadowolenia klienta danej spółki dystrybucyjnej.

Wobec powyższego, w dobie zwiększających się wymagań ze strony odbiorcy energii elektrycznej w stosunku do spółki dystrybucyjnej w zakresie pewności dostaw oraz ze względu na coraz większą świadomość konsumencką klienta w odniesieniu do możliwości ubiegania się o odszkodowania z tytułu niedostarczenia energii elektrycznej zgodnie z umową, **należy tematykę pracy, zmierzającą do określenia stosownych modeli matematycznych opisujących relację pomiędzy czasem trwania awarii a czasem trwania przerwy w zasilaniu, uznać za odpowiadającą zapotrzebowaniu ogólnie pojętej Elektroenergetyki i w pełni wpisującą się w trendy badań naukowych tego obszaru nauki, a więc i dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

Realizacja pracy doktorskiej bazowała na następującej tezie:

Istnieje możliwość stworzenia modelu matematycznego czasu trwania przerwy w zasilaniu odbiorców na podstawie parametrów charakteryzujących uszkodzone urządzenie oraz miejsce jego pracy w sieci elektroenergetycznej, a także ogólnodostępnych danych statystycznych.

Teza, posiadająca zwarty charakter, jest postawiona prawidłowo i wskazujące jasno na kierunek prac, jakie doktorant zamierzał zrealizować w ramach pracy doktorskiej.

Aby udowodnić tezę doktorant przyjął sobie za cel wykorzystanie dostępnego aparatu matematycznego (statystycznego) do opracowania modeli ekonometrycznych czasu trwania przerw w wyniku uszkodzenia poszczególnych elementów sieci elektroenergetycznej dystrybucyjnej średniego i niskiego napięcia. Na podstawie danych dotyczących uszkodzeń linii kablowych SN, linii napowietrznych SN, stacji wewnętrznych SN/nN, stacji napowietrznych SN/nN, linii kablowych nN i linii napowietrznych nN modele jednostkowe połączył w zbiorcze modele ekonometryczne uwzględniające wszystkie powyższe składowe. W swoich rozważaniach wykorzystał odpowiednio dane empiryczne (model bazujący na danych empirycznych), dane statystyczne (model bazujący na danych statystycznych) oraz zaproponował model pełny z uwzględnieniem zarówno danych empirycznych jak i statystycznych.

Podsumowując, podjęta przez doktoranta tematyka, przyjęta teza rozprawy, a także ambitny charakter prac zaplanowanych do realizacji, które posiadają walory zarówno pracy naukowej jak i aplikacyjnej z możliwością wykorzystania ich w praktyce, spełniają bez wątpienia wymagania stawiane pracom doktorskim. Doktorant zaproponował interesujące podejście do rozwiązania zagadnienia, ważnego z punktu widzenia zarządzania niezawodnością sieci elektroenergetycznych średniego i niskiego napięcia. Można więc bez wątpienia stwierdzić, że praca doktorska mgr Grąkowskiego ma charakter pracy naukowej z obszaru dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, z jednoczesnymi odniesieniami do rzeczywistych problemów gospodarki z obszaru Elektroenergetyki.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Rozprawa opracowana została w języku polskim i zawiera łącznie 284 strony. Otwiera ją zestawienie użytych w pracy symboli oraz wstęp nakreślający tematykę doktoratu z tezą i zakresem pracy. Część teoretyczna, stanowiąca rozszerzone wprowadzenie do meritum rozprawy, zawarta została natomiast w rozdziałach 2-5 na stronach od 15 do 122. Zasadnicza, autorska część pracy, obejmuje natomiast rozdział 6 (strony od 123 do 257) zawierający wyniki analiz wykonanych przez doktoranta oraz rozdział 7 (strony 258-263) stanowiący podsumowanie pracy i zawierający wnioski. Całość uzupełnia załącznik zawierający wartości zmiennych objaśniających wykorzystanych w badaniach, obszerny spis pozycji literaturowych (233 pozycje) oraz streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim.

W kontekście części teoretycznej na pierwszy plan wybija się niezwykle wnikliwość w prezentacji poszczególnych zagadnień. Czytając poszczególne rozdziały odnosi się niemal wrażenie, że doktorant przygotował skrypt poświęcony problematyce niezawodności sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia. Poszczególne rozdziały w sposób kompletny przedstawiają zagadnienia związane z tematyką rozprawy. Doktorant rozpoczyna od ogólnego omówienia struktury polskich sieci dystrybucyjnych (rozdział 2) z uwzględnieniem elementów wchodzących w ich skład oraz prezentacją statystyki tych sieci jak np. długość linii kablowych i napowietrznych, odpowiednio średniego i niskiego napięcia. Następnie przechodzi do znacznie szczegółowej przedstawionej charakterystyki zagadnienia niezawodności sieci dystrybucyjnych (rozdział 3), przy czym teoria niezawodności przedstawiona jest najpierw w ujęciu ogólnym, a dopiero w dalszej części rozdziału autor skupia się typowo na problematyce niezawodności sieci elektroenergetycznych w tym parametrach związanych z niezawodnością urządzeń i obiektów zainstalowanych w sieci, niezawodnością w zakresie dostaw energii elektrycznej do odbiorców czy statystyce awaryjności elementów sieci. Rozdział 4 poświęcony jest z kolei kosztom, zarówno u dystrybutorów energii elektrycznej jak i u odbiorców. W tej części na szczególną uwagę zasługuje podrozdział 4.4 obejmujący zagadnienie czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców jako determinanty kosztów strat. Jest to rozdział udowadniający celowość dalszych autorskich rozważań przedstawionych w części praktycznej pracy. W podrozdziale 4.4 doktorant stwierdza bowiem, po przeprowadzonej analizie awarii układów bez zasilania rezerwowego i z rezerwą, że czas trwania awarii i czas trwania przerwy w zasilaniu nie są sobie równe i jak stwierdzono powyżej, założenie takie może mieć odzwierciedlenie w obszarze szacowania strat u odbiorców. Ostatni z rozdziałów teoretycznych jest wprowadzeniem do teorii ekonometrii i uwzględnia wybrane zagadnienia modelowania w odniesieniu do czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców. Rozdziały 2-5 należy uznać za przygotowane w sposób rzetelny i dokładny, a zaprezentowany w nich materiał za precyzyjnie dobrany do tematyki pracy. Mimo obszerności części teoretycznej, nie ma w niej

materiału niepotrzebnego czy sztucznie dodanego w celu zwiększenia objętości pracy. **Rozdziały te zajmują ok. 40% objętości pracy, a ich jakość udowadnia, że doktorant ma bardzo dobrze ugruntowaną wiedzę teoretyczną z zakresu tematyki rozprawy i posiada przygotowanie do realizacji części praktycznej.** W części teoretycznej znaleźć można pojedyncze niedociągnięcia zupełnie nie wpływające na odbiór tej części. Zostaną one przytoczone w części dotyczącej uwag i pytań do doktoranta. Generalnie część teoretyczna, podobnie z resztą jak całość pracy, jest bardzo dobrze zredagowana, trudno znaleźć w niej błędy językowe, zarówno stylistyczne jak i interpunkcyjne.

Autorski wkład doktoranta to wspomniany rozdział 6 oraz podsumowanie i wnioski zawarte w rozdziale 7. Badania autorskie doktoranta dotyczą obszaru niezawodności eksploatacyjnej urządzeń zainstalowanych w sieciach dystrybucyjnych niskiego i średniego napięcia, czyli niezawodności wyznaczonej na podstawie rzeczywistych danych wynikających z warunków pracy urządzenia zainstalowanego w sieci. Pozyskane dane obejmowały informacje o 26236 awariach sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia zebranych za okres 9 lat. Spełniono dzięki temu dwa istotne warunki związane z analizą niezawodnościową tj. odpowiednio dużą licznosc badanej próbki losowej oraz odpowiedni czas, do którego odnoszą się badania. Inne ważne aspekty tj. jednorodność samej próbki, jednorodność warunków eksploatacyjnych oraz sezonowość oddziaływania czynników zewnętrznych zostały odpowiednio skomentowane przez doktoranta, który uzasadnił sposób ich uwzględnienia lub brak konieczności robienia tego (np. uśrednienie wyników dla danego typu elementów sieci czy podział na sieci wiejskie i miejskie). Tak więc przygotowany materiał badawczy, stanowiący podstawę otrzymania wiarygodnych rezultatów analizy, jak również sposób podejścia do samej analizy zebranego materiału oceniam jako jak najbardziej prawidłowy.

W dalszej części pracy doktorant przedstawia opracowane modele, przy czym każdy z głównych elementów, którego awaria/uszkodzenie wpływa na czas trwania przerwy w zasilaniu, uwzględnia bardziej szczegółowe „zmiennie” decydujące o uszkodzeniu danego elementu. Przykładowo, dla uszkodzeń stacji wnetrzowych SN/nN tych zmiennych jest aż 25. We wszystkich przypadkach modele opracowywane są tą samą drogą, co widać także w tekście pracy – zdania są niemal powtarzane w przypadku każdego podrozdziału. Nie jest to jednak uwaga krytyczna – skoro metodologia wyznaczania modelu jest identyczna w każdym przypadku, trudno o inny sposób formułowania myśli przy prezentacji każdego z modeli. Generalnie sposób prezentacji wyników jest spójny z dużą dozą szczegółowości. Dodatkowo doktorant omawia otrzymany w każdym przypadku model z punktu widzenia interpretacji jego parametrów strukturalnych. Finalnie trzy rodzaje modeli dla każdego z przypadków są zebrane w rozdziale 6.10 w modele zbiorcze.

Na podstawie opisu wykonanych analiz, przedstawionych wyników oraz dyskusji materiału badawczego jak również sformułowanych wniosków można przytoczyć najważniejsze osiągnięcia doktoranta:

- zebranie dużej ilości danych na temat rzeczywistej awaryjności elementów sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia, które mogły być następnie wykorzystane w różnego typu analizach niezawodnościowych samych elementów oraz całej sieci;

- udowodnienie, że czas trwania przerw w zasilaniu odbiorców nie jest równy czasowi awarii, co stało się przyczynkiem do sformułowania tezy i realizacji samej pracy;

- wskazanie braku wpływu rozległości sieci na czas trwania przerw w zasilaniu u odbiorcy;

- wskazanie braku związku czasu trwania przerw w zasilaniu z parametrami charakteryzującymi lokalizację miejsca uszkodzenia sieci;

- udowodnienie, że sposób rezerwowania zasilania oraz poziom obsługi odbiorcy przez dystrybutora, w tym liczba brygad pogotowia będących w gotowości w czasie wystąpienia awarii, mają istotny wpływ na czas trwania przerw w zasilaniu u odbiorcy;

- opracowanie oryginalnych, złożonych modeli ekonometrycznych czasu trwania przerw w zasilaniu u odbiorcy mających charakter modeli uniwersalnych i mogących być wykorzystanymi w ocenie np. kosztów zawodności / strat zawodnościowych u tzw. odbiorców komunalno-bytowych, co jest niewątpliwie praktycznym aspektem zrealizowanej pracy doktorskiej.

Podsumowując, przedstawione w dysertacji rozważania wskazują, że **doktorant posiada wiedzę i umiejętności z zakresu poruszanej w pracy tematyki modelowania czasów trwania przerw w zasilaniu odbiorców wynikających z zawodności sieci dystrybucyjnych niskiego i średniego napięcia. Na szczególne podkreślenie zasługują umiejętności doktoranta w zakresie analizy dużej ilości danych oraz wykorzystania narzędzi modelowania matematycznego do określenia relacji pomiędzy poszczególnymi wskaźnikami a czasem trwania przerwy w zasilaniu u odbiorców. Doktorant umiejętnie połączył wiedzę z zakresu niezawodności technicznej z problematyką modelowania ekonometrycznego. Oceniana praca doktorska posiada bez wątpienia walory praktyczne możliwe do zaaplikowania w obszarze szeroko pojętej Elektroenergetyki. Dzięki realizacji założonego zakresu prac umożliwiającej otrzymanie wyników potwierdzających przyjęte założenia doktorant udowodnił postawioną w pracy tezę.**

4. Pytania i zagadnienia dyskusyjne

Praca, jak wspomniano wyżej, jest bardzo dobrze zredagowana, stąd zaniechano w recenzji wskazywania błędów redakcyjnych czy natury stylistyczno-gramatycznej. Jedyne uwagi w tym zakresie to zwrócenie przez doktoranta większej uwagi na stosowanie słów „ilość” i „liczba”, tak

aby używać je zgodnie z zasadami języka polskiego, odpowiednio w odniesieniu do rzeczowników niepoliczalnych i policzalnych. W dalszej części recenzji zamieszczone zostaną więc jedynie pytania dotyczące treści pracy, które wzbudziły pewne wątpliwości u recenzenta w trakcie zapoznawania się jej tekstem. Część ta zawiera także pytania otwarte mające na celu nawiązanie dyskusji nad potencjalnym rozwinięciem tematyki ocenianej pracy doktorskiej. Zagadnienia dyskusyjne podzielono na trzy części, pytania dotyczące części teoretycznej, pytania problematyczne związane z autorską częścią pracy oraz pytania otwarte.

Pytania dotyczące części teoretycznej:

- 1) Na str. 11, bazując na tabeli 1.1 autor podaje, że „modele ekonometryczne wskazują skuteczność dla wszelkiego rodzaju prognoz”, jakkolwiek ich przewaga nie jest jakoś specjalnie uzasadniona w tekście. Czy mógłbym prosić o mocniejsze argumenty przemawiające za użyciem modeli ekonometrycznych w stosunku do innych? Czy badana była w literaturze sposób ilościowy skuteczność poszczególnych modeli?
- 2) Co oznaczają fragmenty przedstawione linią przerywaną na rys. 3.1. Brak jest stosownego wyjaśnienia tego oznaczenia w tekście pracy.
- 3) Dane zawarte w pracy kończą się na roku 2019. Czy oznacza to, że w pracy uwzględniono dane dotyczące awaryjności z lat 2010-2019?

Pytania problematyczne:

- 4) W analizie danych dotyczących czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców t_p w wyniku uszkodzeń poszczególnych elementów sieci dystrybucyjnych doktorant operował wartościami średnimi i odpowiadającymi im odchyleniami standardowymi wraz z podaniem przedziałów ufności. Ponieważ rozważanym parametrem jest czas, to nasuwa się pytanie czy dane nie powinny zostać przeanalizowane np. rozkładem logarytmo-normalnym i parametry tego rozkładu nie powinny zostać uwzględnione w dalszej analizie? Jakie jest zdanie doktoranta w tym zakresie?
- 5) Czy doktorant mógłby krótko przedstawić metodologię wyznaczania wartości zawartych w macierzy korelacji (Tabela 6.3) oraz współczynników korelacji zamieszczonych w Tabeli 6.6.?
- 6) Czy poszczególne obliczenia dotyczące rozdziału 6 zostały wykonane tylko i wyłącznie w oparciu o metodologię z rozdziału 5? Brakuje mi w tekście, lub nie wybrzmiało to na tyle mocno, aby jasno uchwycić, że postępowanie w celu wyznaczania poszczególnych modeli ma swoje podłoże właśnie w zaprezentowanym w rozdziale 5 postępowaniu.
- 7) W wielu z wyznaczonych modeli (chodzi o modele bazujące na pozyskanych danych statystycznych) występuje wyraz wolny (6.4, 6.9, 6.15, 6.21, 6.27 itd.). Czy posiada on jakąś interpretację fizyczną/matematyczną/aplikacyjną?

- 8) Czy podawanie wartości w modelu z 6-ciomą miejscami po przecinku jest matematycznie uzasadnione?

Pytania otwarte:

- 9) Czy po zakończeniu pracy u doktoranta pojawiły się wątpliwości co do przyjętych założeń w kontekście przyjęcia sześciu wybranych czynników wpływających na czas trwania przerwy w zasilaniu odbiorców uwzględnianych w modelach. Mam na myśli uszkodzenia linii kablowych SN i nN, uszkodzenia linii napowietrznych SN i nN oraz uszkodzenia stacji wewnętrznych i napowietrznych SN/nN. Czy doktorant zmieniłby coś w swoim podejściu?
- 10) Czy zdaniem doktoranta zwiększający się udział instalacji prosumenckich (głównie w zakresie fotowoltaiki) dołączanych do sieci dystrybucyjnych niskiego i średniego napięcia może mieć wpływ na niezawodność tych sieci (obniżenie, a może zwiększenie)?
- 11) W ostatnich latach dosyć mocno zauważalne jest zastosowanie sztucznej inteligencji w rozwiązywaniu wielu zagadnień dotyczących predykcji stanów awaryjnych urządzeń czy systemów na bazie dostępnych danych (np. predykcja awarii transformatora energetycznego na bazie danych o gazach rozpuszczonych w oleju tych transformatorów). Czy doktorant widzi możliwość wykorzystania SI w pracach poświęconych niezawodności sieci elektroenergetycznych?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Założenia pracy zostały zrealizowane a jej cel osiągnięty. Doktorant udowodnił postawioną tezę wypracowując oryginalne wnioski, które, co należy podkreślić mają także charakter praktyczny. Praca jest spójna metodologicznie i nie zawiera istotnych błędów w tym zakresie. Wskazane uwagi i pytania dyskusyjne w żadnym stopniu nie umniejszają wartości dysertacji, a są jedynie przyczynkiem do głębszej dyskusji wybranych aspektów poruszonych w pracy. Praca bez wątpienia wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Grąkowskiego pt. „*Determinanty oraz modelowanie czasów trwania przerw w zasilaniu odbiorców wynikających z zawodności sieci dystrybucyjnych energii elektrycznej*” **spełnia wymagania stosownej ustawy i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

