



POLITECHNIKA
LUBELSKA

POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI
KATEDRA ELEKTROENERGETYKI



20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A

tel. (+48 81) 53 84 360, fax (+48 81) 538 43 19

<http://weii.pollub.pl>

e-mail: we.ke@pollub.pl

Lublin, 26.01.2026 r.

dr hab. inż. Paweł Pijarski, prof. uczelni

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Marcina Smółki

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 29.01.26.
nr zał.

**„Optymalizacja pracy sieci rozdzielczej o dużym udziale instalacji
prosumenckich”**

Promotor: dr hab. inż. Roman Korab, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Połomski

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej Pana dr hab. inż. Adama Gałuszki, prof. PŚ, z dnia 01.12.2025 r.

1. Wybór tematu rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy doktorskiej poświęcona została zagadnieniom pracy sieci niskiego napięcia w warunkach dynamicznie rosnącego udziału prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych. Już na etapie wstępu autor uzasadnia wybór problematyki, wskazując na skalę rozwoju tego rodzaju odnawialnych źródeł energii w Polsce w ostatnich latach. Przytoczone dane liczbowe dotyczące liczby oraz mocy zainstalowanych mikroinstalacji PV jednoznacznie potwierdzają, że zjawisko to ma charakter masowy, wpływając na funkcjonowanie nie tylko sieci niskiego napięcia ale również pracę sieci SN. Problemy wynikające ze stosunkowo dużej, okresowej generacji w sieci niskiego napięcia, odczuwalne są praktycznie w całym systemie, stąd konieczność prowadzenia tego typu badań i poszukiwania nowych rozwiązań zaradczych. W tym kontekście wybór tematu rozprawy należy uznać za w pełni zasadny i dobrze osadzony w aktualnych realiach krajowej elektroenergetyki.

Aktualność podjętej problematyki wynika nie tylko z tempa przyrostu liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych, lecz również ze zmiany roli odbiorców energii elektrycznej, którzy coraz częściej funkcjonują jako prosumenci, łącząc funkcje konsumpcji i wytwarzania energii. Sieci niskiego napięcia, projektowane historycznie z myślą o jednokierunkowym przepływie mocy oraz przy założeniu określonych współczynników jednoczesności obciążeń, nie były przygotowane do masowej integracji rozproszonych źródeł wytwórczych o okresowej, wysokiej jednoczesności generacji. Autor trafnie identyfikuje, że skutkiem tego są liczne problemy eksploatacyjne, wśród których kluczowe znaczenie

mają przekroczenia dopuszczalnych poziomów napięć, odwrotne przepływy mocy oraz wzrost strat sieciowych.

Potrzeba zajmowania się rozpatrywaną tematyką wynika także z ograniczeń obecnie stosowanych środków zaradczych. Poszukiwanie alternatywnych metod poprawy warunków napięciowych, niewymagających redukcji generacji, stanowi zatem istotny i aktualny problem badawczy.

Na uwagę zasługuje również fakt, że rozprawa uwzględnia między innymi zmiany regulacyjne dotyczące rozliczeń prosumenckich. Wskazuje na wpływ przejścia z systemu net-metering na net-billing na zachowania użytkowników mikroinstalacji.

Znaczenie naukowe rozprawy związane jest przede wszystkim z podjęciem próby ilościowego opisu i oceny ryzyka przekroczenia dopuszczalnych parametrów pracy sieci niskiego napięcia w zadanym horyzoncie czasowym. Zaproponowane przez autora podejście, oparte na symulacjach czasowych oraz ocenie ryzyka, stanowi uporządkowaną metodę analizy zjawisk, które w praktyce eksploatacyjnej mają charakter zmienny i losowy. Tym samym praca wpisuje się w aktualne kierunki badań nad integracją odnawialnych źródeł energii z sieciami dystrybucyjnymi. Równocześnie rozprawa charakteryzuje się wyraźnym wymiarem praktycznym, co należy uznać za jej istotny atut. Autor nie ogranicza się do analiz prowadzonych na modelach testowych, lecz wykorzystuje opracowaną metodę w analizach dotyczących rzeczywistych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia, korzystając z danych przekazanych przez operatora systemu dystrybucyjnego. Takie podejście umożliwia weryfikację przydatności proponowanych rozwiązań w warunkach rzeczywistych oraz zwiększa wiarygodność formułowanych wniosków. Istotne znaczenie podjętej tematyki przejawia się również w opracowaniu narzędzia umożliwiającego automatyzację procesu wykonywania wielu różnych symulacji pracy sieci. Wyniki części wdrożeniowej pracy doprowadziły do sformułowania konkretnych rekomendacji technicznych, które zostały uwzględnione w planach inwestycyjnych operatora systemu dystrybucyjnego.

Wybór tematu rozprawy doktorskiej jest zatem w pełni zasadny, a sama problematyka aktualna, ważna i uzasadniająca potrzebę prowadzenia pogłębionych badań naukowych. Praca odnosi się do realnych problemów funkcjonowania współczesnych sieci niskiego napięcia, posiada kontekst aplikacyjny oraz wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju elektroenergetyki rozproszonej.

Biorąc powyższe pod uwagę uznaję tematykę rozprawy za istotną, będącą na czasie oraz wybraną prawidłowo, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej wraz z jej częściami składowymi

2.1 Ogólny opis zawartości rozprawy doktorskiej

Recenzowaną rozprawę doktorską stanowi zbiór sześciu tematycznie powiązanych artykułów naukowych, których tematyka została kompleksowo ujęta i opisana w autoreferacie. Autoreferat zawiera również dodatkowe analizy, które są dopełnieniem badań zawartych w publikacjach. Opiniowana rozprawa doktorska składa się ogólnie z dwóch części. Pierwsza część będąca autoreferatem, obejmuje wstęp, tezę, cel, zakres pracy, opis osiągnięć naukowych oraz opis osiągnięć wdrożeniowych, podsumowanie, bibliografię oraz spis dwóch załączników. Ta część pracy doktorskiej składa się z 117 stron tekstu wraz z ilustracjami, wzorami oraz bibliografią obejmującą 82 pozycje. Dodatkowo w rozprawie zawarte zostało streszczenie w języku polskim.

Druga część pracy zawiera dwa załączniki. Załącznik 1 stanowi zbiór powiązanych tematycznie artykułów naukowych stanowiących rozprawę doktorską, które zostały przedstawione poniżej:



Z1.1 Korab R., Połomski M., Smółka M.: Wpływ źródeł fotowoltaicznych na pracę sieci niskiego napięcia. *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, nr 5'2021 (137).

Z1.2 Korab R., Połomski M., Smółka M.: Evaluating the Risk of Exceeding the Normal Operating Conditions of a Low-Voltage Distribution Network due to Photovoltaic Generation. *Energies* 2022, 15, 1969; <https://doi.org/10.3390/en15061969>.

Z1.3 Korab R., Połomski M., Smółka M., Cieślik D.: Wpływ prosumenckich instalacji fotowoltaicznych na pracę sieci rozdzielczej niskiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1/2024; doi:10.15199/48.2024.01.66.

Z1.4 Smółka M., Korab R., Połomski M.: Ryzyko przekroczenia normalnych warunków pracy sieci niskiego napięcia z dużym udziałem prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych. *Rynek Energii*, Nr 1 (170) – 2024.

Z1.5 Korab R., Smółka M.: Wpływ prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych na pracę sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia. Monografia Senatu RP po konferencji naukowej „Polska energetyka w drodze do neutralności klimatycznej”.

Z1.6 Smółka M., Korab R., Połomski M.: Minimalizacja wpływu prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych na pracę sieci niskiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 10/2024; doi:10.15199/48.2024.10.01.

Wymienione artykuły zostały opublikowane w czasopismach *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, *Energies*, *Przegląd Elektrotechniczny*, *Rynek Energii* oraz w monografii Senatu RP.

Załącznik 2 zawiera kopie wystąpień konferencyjnych oraz seminaryjnych, prezentujących wyniki prowadzonych prac naukowo-badawczych, których wykaz przedstawiono poniżej:

Z2.1 Ogólnopolska konferencja naukowo – technicznej „Fotowoltaika dziś i jutro”, 26-27 maja 2021 roku. Tytuł wystąpienia: „Wpływ źródeł fotowoltaicznych na pracę sieci niskiego napięcia”.

Z2.2 Seminarium Naukowego podobszaru POB 6.11: Strategia zrównoważonego rozwoju energetyki i energetyka gazowa, 30 czerwca 2021 roku. Tytuł wystąpienia: „Wpływ źródeł fotowoltaicznych na pracę sieci niskiego napięcia”.

Z2.3 Seminarium Katedry Elektroenergetyki i Sterowania Układów Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z dnia 8 grudnia 2021 roku. Tytuł wystąpienia: „Analiza pracy sieci dystrybucyjnej nN z uwzględnieniem generacji fotowoltaicznej źródeł prosumenckich”.

Z2.4 Konferencja „Przesył, dystrybucja i użytkowanie energii elektrycznej w horyzoncie 2050 roku” organizowana przez Przewodniczącego Komisji Nadzwyczajnej ds. Klimatu Senatu RP, Komitet Problemów Energetyki PAN oraz Komitet Elektrotechniki PAN z dnia 18 kwietnia 2023 roku. Tytuł wystąpienia: „Wpływ prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych na pracę sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia”.

Z2.5 Konferencja Aktualne Problemy w Elektroenergetyce - APE'23 organizowana przez Politechnikę Gdańską w dniach 21-22 czerwca 2023 roku. Tytuł wystąpienia: „Wpływ prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych na pracę sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia”.

Z2.6 I Konferencja Naukowa Energetyki Rozproszonej (KNER'2023) organizowana przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie w dniu 26 września 2023 roku. Udział w sesji posterowej: „Symulacja pracy sieci dystrybucyjnej nN z dużym udziałem instalacji prosumenckich - ryzyko przekroczenia normalnych warunków pracy sieci”.

Z2.7 Seminarium Katedry Elektroenergetyki i Sterowania Układów Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej z dnia 5 czerwca 2024 roku. Tytuł wystąpienia „Wpływ prosumenckich instalacji fotowoltaicznych na pracę rozdzielczej sieci niskiego napięcia”.



Na dołączonej do rozprawy płycie CD można znaleźć rozprawę doktorską oraz streszczenie w języku polskim i angielskim w postaci pliku *.pdf*.

Recenzja została przygotowana w taki sposób, że ocena osiągnięć Doktoranta odnosi się w pierwszej kolejności do opisu zamieszczonego w autoreferacie, który stanowi spójne zestawienie badań, dyskusji wyników oraz wniosków zawartych w poszczególnych pracach wchodzących w skład cyklu publikacji, a także dodatkowych analiz wraz z tezą, celem i zakresem pracy oraz wyszczególnieniem oryginalnych osiągnięć. W odpowiednich miejscach zamieszczono odniesienia do konkretnych artykułów naukowych stanowiących cykl publikacji, jak również do wystąpień konferencyjnych i seminaryjnych. Takie podejście umożliwiło powiązanie obu części pracy w sposób zapewniający zachowanie spójności i logiki rozumowania.

2.2 Charakterystyka i opis części składowych rozprawy doktorskiej

Doktorant, w poszczególnych rozdziałach autoreferatu, przedstawił i opisał badania wykonane w ramach publikacji wchodzących w skład cyklu oraz je rozszerzył. Autoreferat został podzielony na 6 rozdziałów. Część główna (badawcza) składa się z 2 rozdziałów (3, 4). Pozostałe rozdziały zawierają tezę, cel i zakres pracy (rozdział 2), wstęp (rozdział 1) oraz podsumowanie (rozdział 5) i bibliografię (rozdział 6).

Tak jak wspomniano wcześniej, autoreferat rozpoczyna streszczenie oraz rozdział 1, stanowiący wstęp. Nakreślono w nich tematykę pracy oraz ogólną zasadność podjęcia tego zagadnienia. Rozdział 2 obejmuje tezę, cel i zakres pracy.

W rozdziale trzecim, składającym się z czterech podpunktów, Doktorant przedstawił osiągnięcia naukowe. W podpunkcie 3.1 opisane zostały trzy zagadnienia. W pierwszej kolejności scharakteryzowana została sieć niskiego napięcia w Polsce pod kątem budowy, przeznaczenia i układu pracy. Następnie przeprowadzona została dyskusja na temat odpowiedniego wyboru sieci testowej, będącej obiektem analiz. Na podstawie wykonanego przeglądu literatury wybrane zostały trzy sieci, które poddano analizie. Spośród nich zdecydowano się na jedną, niezbyt rozbudowaną czteroprzewodową sieć kablową, zasilającą odbiorców komunalno-bytowych. Nasuwa się tutaj pytanie o powody wyboru niewielkiej sieci i agregacji mocy odbiorców oraz źródeł PV. W trzecim kroku dokonano wyboru odpowiedniego narzędzia do analizy różnych stanów pracy sieci nN. Wybrano oprogramowanie OpenDSS. W podpunkcie 3.2 zbadano wpływ prosumenckich instalacji fotowoltaicznych na pracę wybranej wcześniej sieci testowej nN. W tym celu zamodelowano dokładnie zagregowane źródła PV w każdym węźle odbiorczym. Analizy wykonano w cyklu 24-godzinnym. Założono odpowiednie profile obciążenia i generacji. Wyciągnięto wnioski w zakresie okresowych problemów wynikających z pracy źródeł PV. Badania te są zawarte w artykule [Z1.1], stanowiącym pierwszą pracę w cyklu publikacji. Wyniki badań w rozszerzonej wersji zostały także przedstawione na konferencji [Z2.1] i seminariach [Z2.2] oraz [Z2.3]. Podpunkt 3.3 jest kontynuacją dalszych, pogłębionych działań mających na celu przewidywanie wpływu mikroinstalacji fotowoltaicznych na pracę sieci. W tym celu wypracowana została odpowiednia metoda szacowania ryzyka przekroczenia dopuszczalnych parametrów pracy sieci nN. Ryzyka te dotyczą określania liczby godzin w ciągu roku, w których mogą wystąpić różne zagrożenia. Analizy wykonano dla symetrycznego i asymetrycznego profilu obciążenia. Szczegółowe założenia, wyniki i wnioski przedstawiono w pracy [Z1.2], będącej drugą pozycją wskazaną w cyklu. Zwrócono również uwagę na wpływ niewielkiej rozmiarowo sieci testowej na występowanie zagrożeń. W podpunkcie 3.4 przedstawiono poszerzone badania nad wpływem źródeł PV na pracę sieci nN. Zbadano wpływ wybranych czynników na ryzyko przekroczenia dopuszczalnych warunków pracy sieci testowej niskiego napięcia z przyłączonymi mikroinstalacjami

fotowoltaicznymi. Analizy wykonano w cyklu rocznym. Były one przedmiotem pracy [Z1.3], stanowiącej trzecią pozycję cyklu publikacji. Podsumowując układ rozdziału 3 można powiedzieć, że stanowi on spójną całość pod względem rozpatrywanej tematyki. Opisane w nim zagadnienia prowadzą do określonych wniosków. Wypracowana metodyka badawcza jest podstawą do dalszych działań, związanych z jej zastosowaniem w sieciach rzeczywistych.

W rozdziale 4, składającym się z czterech podpunktów, przedstawiono opis osiągnięć wdrożeniowych. Na początku wybrane zostały trzy sieci rzeczywiste do dalszych analiz, o różnej budowie i rodzaju (napowietrzna, napowietrzno-kablowa i kablowa). Były to sieci nN udostępnione do badań przez jednego Operatora Systemu Dystrybucyjnego, Tauron Dystrybucja S.A. W podpunkcie 4.2 opisano specjalnie opracowane narzędzie na potrzeby wykonywania różnych obliczeń, pozwalające na automatyzację wielu symulacji. Pokazano przykładowe wyniki obliczeń dla wybranych sieci. Stwierdzono, że w sieci napowietrznej skala problemów jest największa, dlatego ten obiekt został wybrany do dalszych badań. Szczegółowe analizy, obrazujące wpływ źródeł PV na pracę rzeczywistej sieci napowietrznej zawarte zostały w pracy [Z1.4], stanowiącą czwartą pozycję cyklu publikacji. Podpunkt 4.3 poświęcono analizie dotyczącej minimalizacji negatywnego wpływu źródeł PV na pracę wybranej sieci rzeczywistej. Wykonane obliczenia udowodniły okresowe występowanie problemów. Tematyka ta została również przedstawiona w publikacji [Z1.5], jako piątej pracy cyklu. W następnym kroku przeanalizowano prace sieci nN po zastosowaniu 10 wybranych środków technicznych, mających na celu obniżenie poziomów napięć w warunkach pracy mikroinstalacji fotowoltaicznych. Jeden ze środków, w postaci budowy nowej stacji SN/nN oraz skróceniu długości obwodów, został zarekomendowany OSD. Wykorzystanie rozproszonych magazynów energii okazało się być najlepszym sposobem na obniżenie napięcia w sieci istniejącej. Wyniki przeprowadzonych badań są przedmiotem pracy [Z1.6], stanowiącej szóstą publikację wskazanego cyklu. W ostatnim podpunkcie (4.4), przedstawiono analizy wpływu prosumenckich magazynów energii na pracę rzeczywistej sieci nN. Obliczenia wykonano w cyklu dobowym i rocznym. Wskazano na ich pozytywne oddziaływanie w postaci redukcji zagrożeń.

Podsumowując układ rozdziału 4 można stwierdzić, że jest on spójny i uporządkowany w taki sposób aby kolejne analizy wynikały z wcześniejszych rozważań. Wykorzystanie wyników prac z rozdziału 3 pozwoliło na wyciągnięcie odpowiednich wniosków z badań dotyczących pracy sieci rzeczywistej. Badania te zostały poszerzone i uszczegółowione co umożliwiło wybrać właściwy środek minimalizacji problemów wynikających z pracy źródeł PV.

Ostatni rozdział autoreferatu to podsumowanie. Wnioski natomiast stanowią opis tego, co jest najbardziej istotne w treści rozprawy.

W ocenie Recenzenta w autoreferacie i poszczególnych publikacjach w cyklu zabrakło bardziej szczegółowej dyskusji na temat kierunku przyszłych badań. Moim zdaniem jest to istotne ze względu na to, że zazwyczaj w trakcie badań pojawiają się pewne kwestie, które warto rozpatrzyć w późniejszych analizach.

Integralną częścią pracy są również wspomniane wcześniej załączniki, zawierające kopie prac stanowiących cykl publikacji oraz wystąpień konferencyjnych i seminaryjnych.

Moja ogólna ocena rozprawy, jej struktury oraz merytorycznej zawartości jest pozytywna.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Tak jak wspomniano wcześniej, bibliografia w autoreferacie zawiera 82 pozycje. Liczba pozycji literatury w poszczególnych publikacjach w cyklu wynosi od 12 do 33 (w sumie 109, bez sprawdzania pozycji powtórzonych). Liczba cytowanych prac świadczy o szczegółowym przeglądzie literatury oraz solidności i wnikliwości Doktoranta w analizowaną tematykę.

Przegląd literatury obejmuje pozycje poruszające zagadnienia związane głównie z pracą źródeł odnawialnych i magazynów energii przyłączonych do sieci elektroenergetycznej, modelami sieci nN. Doktorant cytuje również strony internetowe operatorów, towarzystw oraz różnych serwisów internetowych udostępniających np. dane pogodowe, statystyczne itp.

Wykaz cytowanych prac jest odpowiedni zarówno pod względem liczbowym jak i tematycznym. Literatura swoim zasięgiem obejmuje prace krajowe i zagraniczne, zatem w pełni spełnia wymogi stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim. Przegląd literatury został przeprowadzony rzetelnie. Najstarsza pozycja w wykazie literatury datowana jest na rok 1980, najnowsza natomiast pochodzi z roku 2025, co świadczy o bieżącym stanie wiedzy Doktoranta na temat rozpatrywanej tematyki. Są również cytowane prace, które powstały przy udziale Autora rozprawy.

4. Ocena celu i tezy rozprawy doktorskiej

Cel, teza i zakres pracy zostały przez Doktoranta przedstawione w rozdziale 2 autoreferatu. Głównym celem pracy jest zbadanie wybranych sposobów sterowania prosumenckimi magazynami energii w rzeczywistej sieci nN o dużym udziale mikroinstalacji PV, pozwalającymi na minimalizację negatywnego wpływu tych źródeł na pracę sieci. W autoreferacie nie zabrakło również stwierdzenia, że cel został osiągnięty poprzez realizację założonych prac badawczych.

Recenzent uważa, że cel został sformułowany jasno i przejrzysto.

Teza rozprawy brzmi następująco: *„Zastosowanie odpowiedniego sterowania prosumenckimi magazynami energii elektrycznej umożliwia poprawę warunków pracy sieci rozdzielczej niskiego napięcia o dużym udziale mikroinstalacji fotowoltaicznych, prowadząc m.in. do obniżenia poziomów napięć”*.

Sposób sformułowania tezy uważam za prawidłowy.

Zakres pracy został wyszczególniony na str. 15. Obejmuje punkty dotyczące części naukowej i wdrożeniowej. Uważam, że Doktorant w sposób wyczerpujący opisał założenia i problematykę swoich analiz.

5. Ocena zastosowanych narzędzi i metod badawczych

Wybór stosowanych narzędzi i metod badawczych opisany został w różnych podpunktach autoreferatu oraz pracach stanowiących cykl publikacji. Podpunkt 3.1.3 zawiera dywagacje na temat wyboru narzędzia do analizy różnych stanów pracy sieci nN. Spośród różnych programów wybrano oprogramowanie OpenDSS, umożliwiające symulację n-fazowych sieci z przyłączonymi źródłami rozproszonymi oraz magazynami energii w różnych horyzontach czasowych. W podpunkcie 3.2 oraz publikacji [Z1.1] przedstawiono własną metodykę badań wpływu źródeł PV na pracę wybranej sieci testowej. W podpunkcie 3.3 oraz pracy [Z1.2] opisana została własna metoda określania ryzyka przekroczenia dopuszczalnych parametrów pracy sieci nN. Pozwala ona na ilościowe określanie ryzyka tych przekroczeń oraz wyznaczanie zdolności przyłączeniowych sieci nN przy założonym jego poziomie. Metoda ta wykorzystywana była również w podpunkcie 3.4 oraz pracy [Z1.3] do poszerzonych badań nad wpływem źródeł PV na pracę sieci testowej. Zaproponowana metoda,



umożliwiająca szacowanie ryzyka, może być pomocna przy uwzględnianiu w planach inwestycyjnych OSD zadań poprawiających warunki pracy sieci. W podpunkcie 4.2 autoreferatu opisane zostało własne narzędzie (wykorzystujące środowisko OpenDSS, Python oraz Excel) do automatycznego wykonywania wielu symulacji w ramach obliczeń dotyczących różnych stanów pracy sieci nN. Skrócony został w ten sposób czas uzyskania wyników. Narzędzie to dostarcza zestaw wyników umożliwiających ocenę ilościową ryzyka przekroczeń różnych parametrów pracy sieci. W podpunkcie 4.3.2 autoreferatu oraz pracy [Z1.6] przedstawiono dziesięć różnych metod/środków pozwalających na redukcję zagrożeń w sieci nN wynikających z pracy źródeł PV. W podpunkcie 4.4 autoreferatu opisano własną metodykę/program sterowania prosumenckimi magazynami energii.

Uważam, że wybór narzędzi i metod badawczych jest prawidłowy. Wynika on z wykonanych wielu różnych analiz, będących przedmiotem prac Autora.

6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Omówienie wyników badań stanowi kluczowy element rozprawy doktorskiej, ponieważ pozwala ocenić nie tylko poprawność przeprowadzonych analiz, lecz również dojrzałość naukową Doktoranta, Jego umiejętność zarówno interpretacji uzyskanych rezultatów jak i powiązania ich z postawioną tezą i celami pracy. W ocenianej rozprawie doktorskiej omówienie wyników zostało przeprowadzone w sposób uporządkowany i spójny, zarówno w treści autoreferatu, jak i w cyklu sześciu powiązanych tematycznie publikacji naukowych.

Wyniki badań prezentowane i omawiane są w autoreferacie przede wszystkim w rozdziale trzecim i czwartym, dotyczących odpowiednio osiągnięć naukowych i wdrożeniowych. W każdym z tych rozdziałów Doktorant odnosi się do konkretnych publikacji wchodzących w skład cyklu, w których przedstawiono pełne wyniki badań wraz z ich szczegółową analizą. Takie rozwiązanie należy ocenić pozytywnie, gdyż umożliwia jednoznaczne powiązanie opisu zawartego w autoreferacie z odpowiednimi artykułami naukowymi.

W podpunkcie 3.2 autoreferatu Doktorant omawia wyniki badań dotyczących wpływu prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych na pracę testowej sieci nN. Przedstawione w tym miejscu wnioski stanowią podsumowanie rezultatów szczegółowo zaprezentowanych w publikacji [Z1.1], będącej pierwszą pozycją cyklu publikacji. Autor odnosi się do uzyskanych wyników symulacji dobowych, analizując zmiany poziomów napięć, rozplływów prądów oraz strat energii, a jednocześnie wskazuje na uwarunkowania sieciowe odpowiedzialne za obserwowane zmiany parametrów pracy sieci. Omówienie wyników wykonane jest w sposób treściwy, bez nadmiernych uogólnień, z zachowaniem poprawnego słownictwa.

Kolejnym istotnym etapem omówienia wyników badań jest podpunkt 3.3 autoreferatu, w którym Doktorant prezentuje autorską metodę określania ryzyka przekroczenia dopuszczalnych parametrów pracy sieci nN. Wyniki uzyskane z zastosowania tej metody zostały szczegółowo przedstawione i przeanalizowane w publikacji [Z1.2], w której Doktorant wprowadza ilościową definicję ryzyka. W autoreferacie Autor omawia uzyskane wartości ryzyka, wskazując, w jakich wariantach pracy sieci oraz dla jakich układów pracy źródeł PV pojawiają się przekroczenia dopuszczalnych parametrów. Jednocześnie Doktorant odnosi te wyniki do specyfiki analizowanej sieci testowej, wskazując na ograniczenia wynikające z jej topologii i parametrów technicznych, co świadczy o krytycznym podejściu do uzyskanych rezultatów.

Rozszerzeniem omawianych rozważań są analizy przedstawione w podpunkcie 3.4 autoreferatu, gdzie Doktorant bada wpływ wybranych czynników, takich jak lokalizacja geograficzna sieci oraz stopień jej nasycenia mikroinstalacjami PV, na poziom ryzyka przekroczenia dopuszczalnych



warunków pracy. Wyniki tych badań zostały szczegółowo zaprezentowane w pracy [Z1.3], stanowiącej trzecią publikację cyklu. Zarówno w autoreferacie jak i wymienionej publikacji, Doktorant w sposób przejrzysty omawia zależności pomiędzy poziomem nasłonecznienia a wartościami ryzyka, oraz wpływem stopnia nasycenia sieci źródłami PV na jej pracę i interpretuje je w kontekście możliwości określania zdolności przyłączeniowych sieci nN. Omówienie to prowadzi do jednoznacznych wniosków o istotnym znaczeniu praktycznym.

Wyniki badań o charakterze wdrożeniowym zostały omówione w rozdziale czwartym autoreferatu. W podpunkcie 4.2 Doktorant odnosi się do rezultatów uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego narzędzia do automatyzacji wielu symulacji pracy rzeczywistych sieci nN. Wyniki te, szczegółowo przedstawione w kolejnej publikacji cyklu [Z1.4], zostały w autoreferacie podsumowane w kontekście ich przydatności do ilościowej oceny ryzyka przekroczeń parametrów pracy sieci. Doktorant wskazuje, że zaprezentowane rezultaty stanowią podstawę do porównywania różnych scenariuszy pracy sieci oraz mogą służyć do wspomagania procesów decyzyjnych po stronie operatorów systemów dystrybucyjnych.

Podpunkt 4.3.1 bazuje na analizach zawartych w piątej publikacji cyklu [Z1.5] i zaprezentowanych na konferencji [Z2.4], dotyczących wpływu źródeł PV na pracę sieci rzeczywistej nN. Symulacje wykonane zostały w cyklu dobowym z minutową rozdzielczością. Porównano wyniki pracy sieci ze źródłami PV i bez tych źródeł. W warunkach pracy sieci z przyłączonymi mikroinstalacjami fotowoltaicznymi stwierdzono przekroczenia napięciowe, asymetrię, przepływy mocy w kierunku sieci SN oraz wzrost strat energii. Również w tym przypadku wnioski są szczegółowe, treściwe i przejrzyste.

W podpunkcie 4.3.2 autoreferatu Doktorant omawia wyniki badań dotyczących środków minimalizacji negatywnego wpływu mikroinstalacji PV na pracę wybranej rzeczywistej sieci nN. Szczegółowe rezultaty tych analiz wraz z ich dokładnym omówieniem zostały przedstawione w publikacji [Z1.6] i dodatkowo zaprezentowane na konferencji [Z2.6] oraz seminarium [Z2.7]. W autoreferacie Doktorant porównuje skuteczność dziesięciu rozważanych rozwiązań technicznych z punktu widzenia redukcji przekroczeń napięciowych w węzłach badanej sieci. Omówienie wyników prowadzone jest w sposób porównawczy i jasno wskazuje na przesłanki, które doprowadziły do rekomendacji określonych rozwiązań. Jedno z tych rozwiązań, w postaci budowy nowej stacji i skrócenia istniejących odcinków linii, zostało zarekomendowane operatorowi Tauron Dystrybucja S.A, który uwzględnił je w swoich planach inwestycyjnych.

Ostatnim istotnym miejscem omówienia wyników badań jest podpunkt 4.4 autoreferatu, poświęcony zastosowaniu prosumenckich magazynów energii do regulacji napięcia w sieci nN. Szczegółowo zaprezentowano wyniki symulacji dobowych i rocznych. Następnie zostały one w autoreferacie podsumowane w kontekście wpływu różnych strategii sterowania magazynami energii na warunki pracy sieci. Doktorant w sposób jednoznaczny interpretuje uzyskane rezultaty, wskazując, które strategie sterowania prowadzą do najkorzystniejszych efektów zarówno z punktu widzenia sieci, jak i prosumentów. W mojej opinii podpunkt ten mógłby być uzupełniony o wykonanie i omówienie analiz związanych ze stopniem wykorzystania magazynów prosumenckich w ciągu roku. Co prawda są podane informacje na temat wybranych okresów pracy magazynów ale brakuje szczegółowej oceny ich wykorzystania w skali roku. Ponadto założenia do obliczeń optymalizacyjnych, a także przebieg tych obliczeń mógłby być również szerzej omówiony.

Podsumowując, formę prezentacji i sposób omawiania wyników badań w ocenianej rozprawie doktorskiej, należy ocenić pozytywnie. Trafność i celność spostrzeżeń są na odpowiednim poziomie. Doktorant w sposób konsekwentny wskazuje, w których publikacjach cyklu zawarte są szczegółowe wyniki poszczególnych etapów badań, a autoreferat pełni rolę spójnego i często poszerzonego

komentarza do tych rezultatów. Interpretacja wyników prowadzi do jasno sformułowanych wniosków o charakterze naukowym, aplikacyjnym i wdrożeniowym. Zawarte w pracy wnioski, uwagi i komentarze własne Doktoranta nie są zdawkowe tylko szczegółowe. Autor popiera je odpowiednimi, właściwymi i w większości przekonującymi argumentami, o czym świadczy wysoki poziom merytoryczny oraz wiedza Autora w zakresie rozpatrywanej tematyki.

7. Uwagi i pytania

7.1 Uwagi o charakterze redakcyjnym

Rozprawa doktorska została przygotowana bardzo starannie pod względem redakcyjnym. W niektórych miejscach można dopatrzyć się pewnych drobnych błędów redakcyjnych oraz tzw. literówek.

Poniżej przytaczam niektóre przykłady tych błędów z autoreferatu i prac stanowiących cykl publikacji:

Numer strony w autoreferacie	Lokalizacja	Uwagi
4	4 wiersz od końca strony	Jest słowo „...część...” powinno być „...część....”
13	6 wiersz od końca strony	jest: „Należ jednak zaznaczyć...”, a powinno być „Należy jednak zaznaczyć...”
14	4 wiersz od początku strony	jest: „...dużą liczę...”, a powinno być „...dużą liczbę...”
26, 27	Tabela 3.2 i 3.3	Aby uspójnić z pozostałymi tabelami jednostki można było umieścić w nagłówkach a nie w podpisie tabel
29	Rysunek 3.3	Zamiast obramowania można było zastosować numerację (a) i (b)
54	Tabela 4.1	W pierwszym wierszu, drugiej kolumnie jest „...obwód nr 2...”, a powinno być „...obwód nr 4...”
76	8 wiersz od początku strony	jest: „...o taki właśnie...”, a powinno być „...o takim właśnie ...”
83	1 wiersz od końca strony	jest: „...indywidualnych program pracy...”, a powinno być „...indywidualnych programów pracy ...”
86	Wzory (4.1), (4.2), (4.3)	Oznaczenia w indeksach dolnych, które nie są wyliczaniem zmiennych powinny być pisane antykwą, np. „BESS”, „EX”
106	11 wiersz od początku strony	jest: „Wychodzą naprzeciw problemów...”, a powinno być „Wychodząc naprzeciw problemów...”

Poniżej przytaczam kilka ogólnych uwag redakcyjnych z prac stanowiących cykl publikacji:

- w niektórych wzorach jako symbol mnożenia stosowany jest „*”, „×” lub „·” – moim zdaniem warto zachować spójność, poza tym częściej stosuje się „·”,
- oznaczenia w indeksach, które nie są wyliczaniem zmiennych powinny być pisane antykwą,
- na końcach niektórych wierszy pojawiają się sieroty.

To są tylko przykładowe błędy redakcyjne. Pomimo powyższych uwag chcę podkreślić, że błędy redakcyjne nie mają istotnego wpływu na jakość merytoryczną rozprawy doktorskiej. Odbiór całej pracy jest pod tym względem pozytywny.

7.2 Uwagi i pytania o charakterze ogólnym i dyskusyjnym:

- Jak Autor ocenia wpływ przyjętych kryteriów doboru sieci testowej (podpunkt 3.1.2), w szczególności wyboru modeli niezbyt rozbudowanych i łatwych do zamodelowania, na możliwość uogólniania uzyskanych wyników?
- Jaki był czas wykonania obliczeń, zarówno tych związanych z wyznaczaniem ryzyk jak i dotyczących obliczeń optymalizacyjnych (za pomocą algorytmu PSO)?
- Czy przepływy mocy w kierunku sieci SN, z punktu widzenia OSD, są według Doktoranta negatywnym zjawiskiem w każdych warunkach pracy sieci?
- W podpunkcie 4.2 wykonano szereg symulacji dla losowych danych. W jaki sposób losowano zestawy danych do obliczeń?
- Algorytmy metaheurystyczne nie gwarantują w 100% znalezienie optimum globalnego. Dlatego też obliczenia są zazwyczaj powtarzane, a wyniki porównywane z innymi algorytmami. Jaka była liczebność populacji, liczba iteracji oraz powtórzeń w przypadku algorytmu PSO?
- Wartość napięcia po stronie SN wpływa na warunki napięciowe w sieci nn. Czy rozpatrywano wpływ zmian wartości napięcia w sieci SN na poziom wyznaczanych ryzyk w sieci nn?
- Skąd wynika przyjęta liczba 20 prosumentów wyposażonych w magazyny energii? Dlaczego Doktorant uważa ją za reprezentatywną dla analizowanych scenariuszy pracy sieci?
- W rozprawie rozpatrywano zastosowanie czterech zbiorczych magazynów o mocy 25kW. Skąd wynika ta wartość oraz czy jest ona odpowiednia w stosunku do skali problemu? Czy Doktorant rozważał optymalny dobór mocy i lokalizacji magazynów energii?
- Czy Doktorant analizował stopień wykorzystania magazynów prosumenckich w ciągu roku? Ile godzin w ciągu roku pracują? Ile było cykli ładowania i rozładowania? W rozprawie są podane wybrane okresy pracy magazynów energii natomiast trudno jest dopatrzyć się stopnia ich wykorzystania w ciągu całego roku.
- Czy zaproponowana metodyka badawcza może być zastosowana do eliminowania rozpatrywanych problemów w trybie rzeczywistym? Czy czas uzyskania wyników pozwala je eliminować na bieżąco?
- Jakie są plany badawcze Doktoranta na przyszłość?
- Analizując wkład Doktoranta w powstanie rozprawy doktorskiej stwierdzam, że w odniesieniu do publikacji Z1.1, Z1.2, Z1.4, Z1.5, Z1.6, Jego udział w ich przygotowaniu może być uznany za istotny w kontekście niniejszej rozprawy, biorąc pod uwagę współautorstwo wyłącznie z promotorem i promotorem pomocniczym. Ponadto zakładam, że opisane w autoreferacie osiągnięcia, wynikające z przeprowadzonych badań we wskazanych publikacjach, są Jego udziałem. W publikacji Z1.3 natomiast, w której dodatkowo współautorem jest Pan Dawid Cieślik, w autoreferacie nie wskazano szczegółowo zakresu wkładu poszczególnych autorów, co utrudnia jednoznaczne określenie indywidualnego wkładu Doktoranta w tę pracę. Prosiłbym o wyjaśnienie tej kwestii. Generalna uwaga jest taka aby Doktorant określił swój własny udział.

Powyższe uwagi i pytania traktuję jako dyskusyjne i proszę aby Doktorant się do nich ustosunkował.

8. Uwagi końcowe, podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Opiniowana rozprawa według mnie spełnia to wymaganie. Zgodnie z wymogami ustawy Doktorant, Pan mgr inż. Marcin Smółka, wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną w reprezentowanej dyscyplinie naukowej, umiejętnością prowadzenia pracy naukowej i badań, prezentowania ich wyników, a także formułowania właściwych wniosków. Dodatkowo Doktorant wykorzystał wnioski wynikające z analiz teoretycznych w badaniach dotyczących obiektów rzeczywistych, co w konsekwencji doprowadziło do uwzględnienia rekomendowanego rozwiązania w planach inwestycyjnych OSD.

Uwagi i pytania dyskusyjne przedstawione w niniejszej recenzji nie mają istotnego wpływu na pozytywną ocenę rozprawy. Lista istotnych osiągnięć, które powinny być uznane za oryginalny dorobek Doktoranta zawiera następujące, najistotniejsze elementy:

- opracowanie autorskiej metody określania ryzyka przekroczenia dopuszczalnych warunków pracy sieci nN,
- szczegółowe przeanalizowanie wpływu prosumenckich mikroinstalacji PV na pracę sieci testowej nN w różnych warunkach jej pracy, przy wykorzystaniu własnej oryginalnej metody,
- przeanalizowanie wpływu źródeł PV na pracę rzeczywistych sieci niskiego napięcia przy wykorzystaniu własnej metody i stworzonego na potrzeby obliczeń narzędzia,
- wykazanie wpływu warunków atmosferycznych i lokalizacji geograficznej sieci na poziom ryzyka przekroczenia dopuszczalnych warunków pracy sieci nN,
- analiza i ocena autorskiego podejścia polegającego na zastosowaniu prosumenckich magazynów energii elektrycznej do poprawy warunków napięciowych w sieci niskiego napięcia o dużym udziale mikroinstalacji PV.

Doktorant w rozprawie konsekwentnie zmierza do realizacji jej celu i udowodnienia postawionej na wstępie tezy. Wykład jest jasny i czytelny, praca zawiera wszystkie istotne elementy: genezę, cel pracy, tezę, krytyczny przegląd aktualnego stanu wiedzy, sformułowanie problemu badawczego, jego rozwiązanie, prezentację wyników obliczeń i analiz, podsumowanie oraz wykaz literatury.

Doktorant wykazuje się również interdyscyplinarnością, przejawiającą się znajomością zagadnień nie tylko z zakresu dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, lecz także matematyki i informatyki. Tego rodzaju analizy wymagają umiejętności posługiwania się odpowiednim oprogramowaniem, a nawet tworzenia własnych aplikacji niezbędnych do sprawnego przeprowadzenia licznych symulacji. Należy również podkreślić fakt, że Autor wykonał znaczący nakład pracy przy przygotowaniu niniejszej rozprawy. Uzyskane wyniki oraz sformułowane na ich podstawie wnioski i spostrzeżenia były efektem bardzo dużej liczby różnych symulacji oraz znacznego czasu poświęconego na ich wykonanie.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Smółki stanowi cenny wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz spełnia warunki i wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.