

Załącznik II

AUTOREFERAT

dr inż. Zbigniew Skibko

Białystok 2023

Spis treści

1. Imię i nazwisko.	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne.	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). . .	4
4.1. Wprowadzenie.	4
4.2. Cel i zakres osiągnięcia	6
4.3. Metodologia badań	7
4.4. Syntetyczny opis wyników.	10
4.5. Podsumowanie	21
4.6. Wykorzystana w autoreferacie bibliografia	23
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.	24
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.	27
7. Inne informacje, dotyczące kariery zawodowej.	31

1. Imię i nazwisko.

Zbigniew Skibko

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne.

Uzyskany tytuł: Magister inżynier

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny

Kierunek: Elektrotechnika

Specjalność: Elektroenergetyka

Temat pracy dyplomowej magisterskiej: Metody podziału kosztów wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej w elektrociepłowniach

Promotor: dr inż. Bogusław Malinowski

Rok obrony: 2001.

Uzyskany stopień: Doktor nauk technicznych

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny

Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika

Specjalność: Elektroenergetyka

Temat pracy doktorskiej: Obciążalność prądowa przewodów ułożonych wielowarstwowo

Promotor: Prof. dr hab. inż. Brunon Lejdy

Rok obrony: 2008.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Od 2001 roku do chwili obecnej - Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny (umowa o pracę)

Od 2021 roku do chwili obecnej – Wyższa Szkoła Agrobiznesu w Łomży – obecnie Międzynarodowa Akademia Nauk Stosowanych (umowa zlecenie)

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1. Wprowadzenie

Tematem moich ostatnich prac naukowych było przeprowadzenie badań i analiz dotyczących współpracy biogazowni rolniczych z systemem elektroenergetycznym. Dążenie do jak największej efektywności zastosowanych w biogazowniach turbozespołów nie może się odbywać kosztem jakości energii elektrycznej wprowadzanej do sieci. Brak konkretnych wytycznych dotyczących zarówno procesu budowy, jak i eksploatacji biogazowni rolniczych może powodować pewną dowolność w wyborze zastosowanych technologii, co w konsekwencji może skutkować wprowadzaniem zakłóceń do linii elektroenergetycznych. W 2014 roku na świecie było wybudowanych 17 240 biogazowni, które wyprodukowały łącznie 8 293 MW mocy elektrycznej [EBA 2015]. Rozwój biogazowni na terenie Polski był na początku dynamiczny, jednakże w ostatnich latach przybywa średniorocznie jedynie kilka instalacji biogazowych [bip 2021]. Województwo podlaskie, w porównaniu z pozostałym obszarem kraju, charakteryzuje się wysokim potencjałem produkcji biogazu, co wynika głównie z topologii krajobrazu oraz prowadzonej hodowli zwierząt [Gołasa 2014]. W województwie podlaskim w 2019 roku najwięcej energii odnawialnej pochodziło z elektrowni wiatrowych (około 67%). Z biogazu wytwarza się jedynie 4% energii odnawialnej ogółem, przy czym produkcja ta skupiona jest przede wszystkim w powiatach: Białostok, Suwałki, białostockim, bielskim, hajnowskim, siemiatyckim, sokólskim, łomżyńskim i wysokomazowieckim.

Wraz ze zwiększającym się poziomem wydzielanych do atmosfery gazów cieplarnianych oraz rosnącymi cenami energii, rośnie zainteresowanie społeczeństwa odnawialnymi źródłami energii, w tym biogazowniami rolniczymi. Przewiduje się, że inwestowanie w biogazownie rolnicze przyniesie nie tylko korzyść ekologiczną, ale również przyczyni się do wzrostu bezpieczeństwa energetycznego kraju oraz zasobności portfeli polskich rolników [Mystkowski 2016]. W strukturze biogazowni rolniczych zlokalizowanych na terenie kraju dominują instalacje o mocy od 0,5 do 1,5 MW (łącznie stanowią około 56 % całkowitej liczby biogazowni) [Gostomczyk 2017]. Wielkość biogazowni jest zawsze kompromisem pomiędzy ponoszonymi na początku kosztami inwestycyjnymi, a przyszłymi kosztami eksploatacyjnymi. Koszty te w przeliczeniu na 1 MW maleją, w miarę wzrostu mocy zainstalowanej [Żmuda

2011]. Szacuje się, że inwestycja w biogazownię rolniczą zwraca się po 9-10 latach [Przesmycka i Podstawka 2016].

W związku z dynamicznym rozwojem energetyki odnawialnej poddałem analizie proces wytwarzania energii elektrycznej w biogazowniach rolniczych oraz wpływ biogazowni na pracę sieci elektroenergetycznej, opierając się na własnych badaniach przeprowadzonych na przełomie lat 2020/2021. Analizując literaturę krajową, jak i zagraniczną, nie udało się znaleźć artykułów, które podjęłyby tematykę związaną z oddziaływaniem biogazowni rolniczych na parametry napięcia występującego w sieci. Autorzy skupili się bardziej na energetyce wiatrowej oraz słonecznej, jako źródłach niestabilnych mocy. Podawane są też metody analityczne wykrywania zaburzeń jakości energii elektrycznej w sieciach sprzężonych z elektrownią wiatrową. Jednakże większość prac dotyczy analiz teoretycznych, a ich wyniki nie zostały poparte badaniami terenowymi. Np. Shalukho [Shalukho i inni 2019] przedstawił wyniki badań przeprowadzonych na mikrosieci z generacją rozproszoną. Wykazał, że zamodelowana elektrownia negatywnie wpływa na odkształcenia napięcia zasilającego. Jak wykazały moje wstępne badania, jest to wniosek bardzo dyskusyjny, a w przypadku biogazowni, wręcz niewłaściwy. W związku z powyższym uznałem, że koniecznym wydaje się przeprowadzenie badań i analiz weryfikujących wpływ biogazowni rolniczych na sieć elektroenergetyczną.

Wybór miejsca przyłączenia biogazowni rolniczej do sieci elektroenergetycznej jest bardzo istotny nie tylko ze względu na zapewnienie jej ciągłej pracy, ale również z punktu widzenia pełnego wykorzystania potencjału energetycznego biogazowni. Powszechnie uznaje się, że najlepszym miejscem do przyłączenia elektrowni jest teren położony jak najbliżej głównego punktu zasilającego (GPZ) [Niebrzydowski 2000]. Nie jest to jednak poparte żadnymi badaniami naukowymi i może okazać się, że przyłączenie biogazowni rolniczej w środku obciążenia linii może przynieść znacznie więcej korzyści – w tym środowiskowych – niż przyłączenie jej na początku układu przesyłowego. Dlatego podjąłem się przeprowadzenia dogłębnej analizy wpływu miejsca przyłączenia biogazowni rolniczej na napięcia w sieci oraz na zmianę występującego w niej spadku napięcia, strat mocy i energii.

Właściwy dobór lokalizacji biogazowni przyczynia się również do ograniczenia strat energii występujących w systemie energetycznym kraju, i można domniemywać, że przełoży się to w sposób bezpośredni na redukcję emisji CO₂ do atmosfery. W związku z tym, że w dostępnej literaturze krajowej jak i zagranicznej brakuje analiz dotyczących wpływu miejsca przyłączenia biogazowni rolniczych na ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery, wydawało się

uzasadnionym wykonanie badań symulacyjnych, które wykażą efekt ekologiczny wynikający z pracy biogazowni.

Przepływ energii biernej w sieciach elektroenergetycznych, przynosi wiele negatywnych skutków. Parametrem reprezentującym stosunek mocy biernej do mocy czynnej jest tzw. współczynnik mocy. W literaturze [Hanzelka 2003, Kowalski 2007] oraz aktualnie obowiązujących przepisach [PN-EN 50160:2010, Rozporządzenie 2007] podano, że wszystkie źródła energii powinny pracować ze współczynnikiem mocy jak najbliższym jedności, przy czym dopuszcza się aby $\text{tg}\varphi$ mieścił się w przedziale od 0 do 0,4 przy charakterze indukcyjnym. Ponieważ w literaturze nie opisano dotychczas analiz wpływu zmian współczynnika mocy, istotnym było przeanalizowanie, jak wartość współczynnika mocy generowanej w biogazowniach rolniczych wpływa na przepływy oraz straty występujące w linii elektroenergetycznej, do której przyłączone jest źródło.

W systemie elektroenergetycznym przyłączonych jest obecnie coraz więcej odnawialnych źródeł energii. Najczęściej połączenie źródła z siecią występuje na terenach wiejskich – w pobliżu gospodarstw rolnych, w których zamontowane są często urządzenia wrażliwe na parametry jakościowe dostarczanej energii elektrycznej (np. urządzenia do doju krów i roboty udojowe). Dlatego bardzo istotne jest, aby były one zasilane napięciem o parametrach jak najbardziej zbliżonych do wartości znamionowych. W tym celu niezbędne było przeprowadzenie badań terenowych, na podstawie których określony został wpływ energii wytwarzanej w biogazowni rolniczej na parametry napięcia występującego w sieci. Z punktu widzenia poprawności otrzymanych danych, najlepiej aby biogazownie wyposażone były w generatory o porównywalnych ze sobą parametrach, a przyłączone w różnych punktach systemu elektroenergetycznego (w różnych odległościach od GPZ).

4.2. Cel i zakres osiągnięcia

Głównym celem pracy było określenie wpływu lokalizacji biogazowni rolniczej oraz wpływu generowanej w niej energii elektrycznej na parametry charakteryzujące sieć elektroenergetyczną średniego napięcia (współpracującą z biogazownią), w tym straty mocy oraz energii.

W wyniku analizy dostępnej literatury i wstępnych badań własnych, sformułowano problem badawczy w postaci następujących pytań:

- 1) Czy biogazownia rolnicza generująca energię elektryczną z biogazu może wpływać na poprawę bilansu energetycznego współpracującej z nią sieci elektroenergetycznej?
- 2) Czy wygenerowana w biogazowni rolniczej energia elektryczna wpływa na poprawę jakości energii w sieci średniego napięcia?

W celu uzyskania pełnej odpowiedzi na zadane pytania określony został zakres pracy, obejmujący:

- 1) Wykonanie symulacji komputerowych elektroenergetycznej sieci średniego napięcia, umożliwiających określenie korelacji pomiędzy miejscem przyłączenia biogazowni a parametrami sieci. Badania symulacyjne obejmowały następujące analizy:
 - a) wpływu miejsca przyłączenia biogazowni na straty mocy i energii występujące w sieci średniego napięcia;
 - b) wpływu biogazowni rolniczej na ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery;
 - c) wpływu współczynnika mocy generowanej w biogazowni na napięcie w punkcie przyłączenia;
 - d) wpływu współczynnika mocy generowanej w biogazowni na straty mocy i energii występujących w sieci elektroenergetycznej.
- 2) Wykonanie badań terenowych wykazujących wpływ wytwarzanej energii elektrycznej w biogazowni rolniczej na jakość tej energii przesyłanej siecią średniego napięcia. Badania te obejmowały analizy następujących parametrów opisujących jakość energii:
 - a) napięcie w sieci oraz jego stabilność;
 - b) zmiany częstotliwości napięcia;
 - c) asymetrię napięcia;
 - d) odkształcenie napięcia zasilającego w wyniku generowania prądu odkształconego od przebiegu sinusoidalnego;
 - e) zjawisko migotania światła.
- 3) Analizę otrzymanych wyników i wnioski końcowe.

4.3. Metodologia badań

Analizy oddziaływania biogazowni rolniczych na sieć elektroenergetyczną dokonałem na podstawie własnych badań przeprowadzonych w trzech biogazowniach rolniczych przyłączonych do sieci 15 kV. Badania zostały przeze mnie podzielone na dwa podstawowe typy: badania symulacyjne oraz badania terenowe. Analizy teoretyczne miały na celu

wyznaczenie odpowiedzi badanego układu elektroenergetycznego na różne stany pracy elektrowni, które byłyby trudne do uzyskania w warunkach rzeczywistych (ze względu na złożoność i zmienność w czasie zjawisk zachodzących w pracujących układach elektroenergetycznych). Badania terenowe, przeprowadzone na rzeczywistych obiektach, miały na celu określenie rzeczywistego wpływu biogazowni rolniczych na elektroenergetyczne sieci wiejskie. Dodatkowym atutem takich badań jest możliwość potwierdzenia (lub nie) wyników otrzymanych podczas analiz symulacyjnych. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone na reprezentatywnym przykładzie elektroenergetycznej linii średniego napięcia, zlokalizowanej na terenie wiejskim województwa podlaskiego. Pełny schemat analizowanej linii elektroenergetycznej z zaznaczonymi miejscami przyłączenia biogazowni, dla poszczególnych wariantów, przedstawiono na rysunku 1.

Obliczenia parametrów opisujących analizowaną sieć wiejską wykonane zostały dla następujących wariantów:

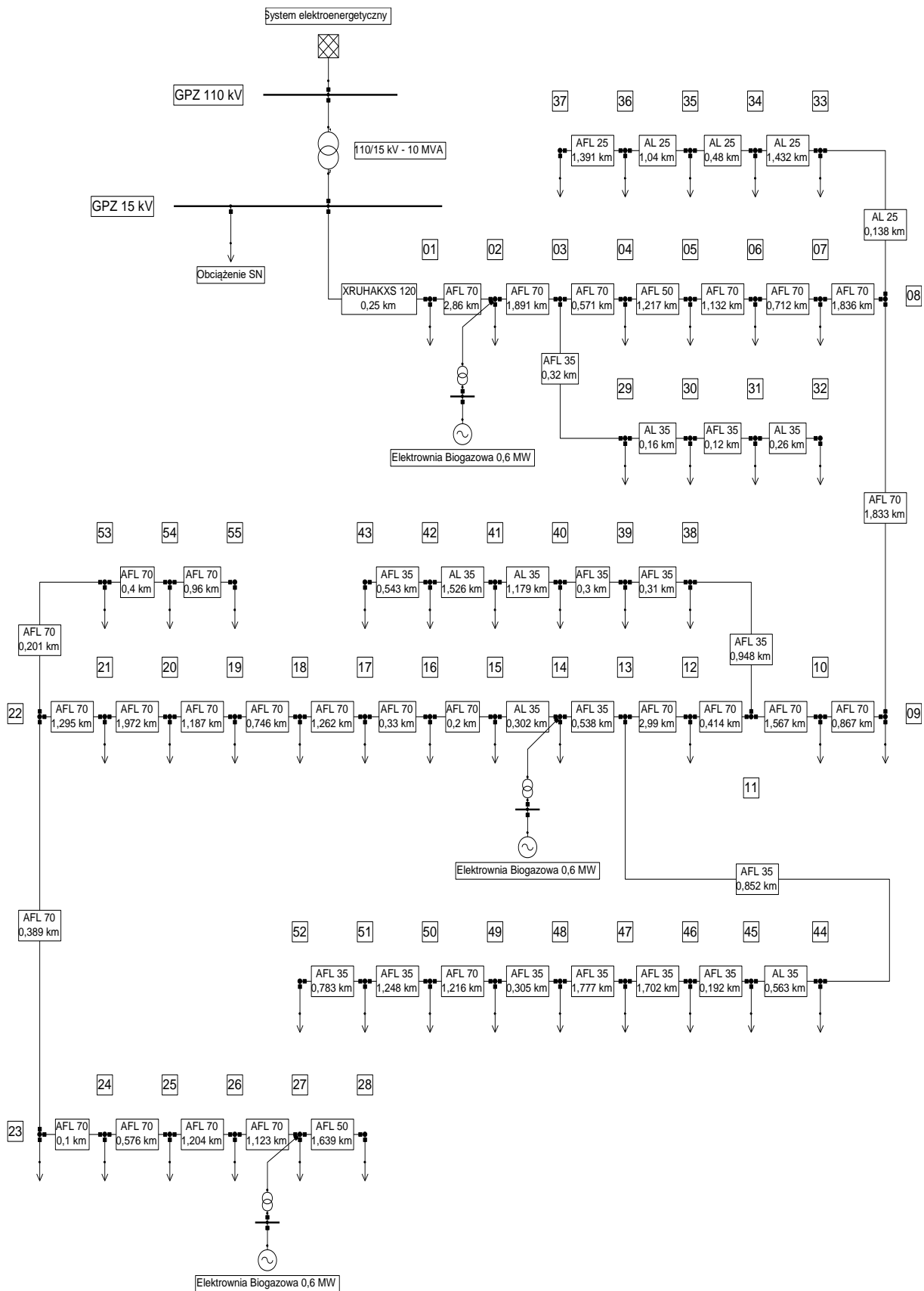
Wariant 1 – układ bez biogazowni.

Wariant 2 – układ z biogazownią przyłączoną do węzła nr 02, przy pełnej generacji w zakresie $\cos\varphi$ od 0,8 indukcyjny do 0,8 pojemnościowy, dla czterech rodzajów obciążeń sieci.

Wariant 3 – układ z biogazownią przyłączoną do węzła nr 14, przy pełnej generacji w zakresie $\cos\varphi$ od 0,8 indukcyjny do 0,8 pojemnościowy, dla czterech rodzajów obciążeń sieci.

Wariant 4 – układ z biogazownią przyłączoną do węzła nr 27, przy pełnej generacji w zakresie $\cos\varphi$ od 0,8 indukcyjny do 0,8 pojemnościowy, dla czterech rodzajów obciążeń sieci.

Do wyznaczenia strat energii występujących w poszczególnych elementach układu przyjęto roczny czas trwania strat maksymalnych dla terenowych sieci wiejskich na poziomie 1700 godzin/rok. Do obliczenia kosztów związanych ze stratami przyjęto cenę energii elektrycznej na poziomie 200 zł/MWh.



Rys. 1. Schemat analizowanej elektroenergetycznej sieci wiejskiej z zaznaczonymi miejscami przyłączeni biogazowni rolniczej, dla poszczególnych wariantów.

Badania terenowe przeprowadziłem w trzech biogazowniach rolniczych zlokalizowanych w województwie podlaskim. Biogazownia nr 1 przyłączona była do linii SN w bezpośrednim sąsiedztwie GPZ. Biogazownia rolnicza nr 2 przyłączona była w okolicy środka ciągu liniowego średniego napięcia. Biogazownia nr 3 przyłączona była w odległości wynoszącej około 2/3 długości linii SN w normalnych warunkach pracy. W każdej z analizowanych biogazowni głównym medium produkowanym była energia elektryczna, wytwarzana w wyniku spalania wytwarzanego w fermentorze biogazu. Uzyskiwane w biogazowni ciepło było produktem ubocznym i wykorzystywane było jedynie do ogrzewania budynków biogazowni (w sezonie zimowym) oraz do utrzymywania stałej wartości temperatury w komorze fermentacyjnej. Wytwarzany biogaz był w całości, po oczyszczeniu, wykorzystywany w procesie produkcji energii elektrycznej. Dla analizowanych biogazowni rolniczych wykonane zostały pomiary parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej wytwarzanej przez każde ze źródeł. Do rejestracji wykorzystano przenośny analizator jakości zasilania SONEL PQM-701, posiadający świadectwo wydane przez Laboratorium Badawczo-Wzorujące w Świdnicy.

4.4. Syntetyczny opis wyników

Z analizy uzyskanych z obliczeń wartości wynika, że nie zawsze, jak powszechnie się przyjmuje, przyłączenie elektrowni wpływa na podwyższenie napięcia w sieci elektroenergetycznej. Okazuje się, że jest to bardzo uzależnione od wartości współczynnika mocy, z jakim pracuje źródło, jak również jakiego charakteru jest moc przesyłana linią. Największe zmiany napięcia występują w układzie, w którym obciążenie charakteryzuje się współczynnikiem mocy równym 0,93 lub 1. Największa wartość napięcia w węzłach występuje, gdy biogazownia wytwarza moc o charakterze pojemnościowym (ujemna wartość współczynnika mocy), bez względu na współczynnik mocy obciążenia linii. Napięcie to zmniejsza się wraz ze wzrostem ilości mocy biernej indukcyjnej. Nie bez znaczenia pozostaje również charakter mocy przesyłanej linią. Jeśli $\cos\phi$ przyjmuje wartości ujemne (charakter pojemnościowy obciążenia), wówczas występuje w części linii znaczący spadek wartości napięcia. Może to być szczególnie ważne dla przyłączonych tam odbiorników wrażliwych (powodując ich nieprawidłową pracę, wyłączenie lub nawet uszkodzenie). Spadek napięcia powiększa się wraz z ilością mocy biernej indukcyjnej produkowanej przez biogazownię rolniczą. Należy przy tym podkreślić, że większość odbiorców przyłączonych obecnie do elektroenergetycznych sieci wiejskich pobiera moc o charakterze pojemnościowym, co jest wynikiem zainstalowanych tam odbiorników (komputerów, oświetlenia LED, silników

sterowanych falownikami). Dodatkowo, pojemność występująca w układzie powiększa jeszcze pojemność własna elektroenergetycznej linii napowietrznej średniego napięcia. Obciążenie rezystancyjno-indukcyjne występuje zazwyczaj w dużych gospodarstwach wiejskich. Aktualnie dąży się do pracy linii elektroenergetycznej ze współczynnikiem mocy równym 1 (poprzez zastosowanie układów kompensacyjnych). W takim przypadku, najmniejsze zmiany napięcia w poszczególnych węzłach sieci, wywołane pracą biogazowni, wystąpią w przypadku, gdy biogazownia pracować będzie z $\cos\varphi = 0,8$.

Analizując uzyskane w wyniku obliczeń przebiegi obciążeń i strat mocy, można zauważyć, że obciążenie procentowe linii zmniejsza się po załączeniu biogazowni, bez względu na miejsce jej przyłączenia oraz charakter mocy przez nią generowanej. W większości przypadków zmniejszenie obciążenia linii występuje, gdy biogazownia pracuje z $\cos\varphi$ od $-0,8$ do 1 – charakter pojemnościowy. Przy wzroście mocy biernej indukcyjnej wytwarzanej w źródle następowało zwiększenie procentowego obciążenia linii (mimo iż cały czas było ono mniejsze od obciążenia bez generacji). W skrajnym przypadku, gdy moc czynna generowana przez biogazownię równała się mocy czynnej obciążenia, wówczas przez linię przesyłana była tylko moc bierna (zależna od wypadkowego charakteru mocy obciążenia i źródła). Obciążenie linii zmaleje do zera, gdy moc oraz współczynnik mocy obciążenia będą równe co do wartości mocy i współczynnikiowi mocy wytwarzanej przez elektrownię.

Charakter mocy generowanej przez biogazownię ma również wpływ na $\cos\varphi$ występujący w układzie zasilającym. Praca elektrowni może równie dobrze doprowadzić do eliminacji mocy biernej w układzie, jak również do znacznego obniżenia wartości współczynnika mocy. W układach z pracującą biogazownią straty mocy są w większości przypadków mniejsze niż w układzie bez generacji. Straty mocy w linii przyjmują najmniejsze wartości, gdy biogazownia pracuje ze współczynnikiem mocy $\cos\varphi$ bliskim jedności. Jeśli obciążenie linii ma charakter indukcyjny, to najlepiej (z punktu widzenia występujących strat w liniach przesyłowych) aby elektrownia wytwarzała moc przy $\cos\varphi$ poniżej $-0,95$. Praca biogazowni rolniczej w pomijalnie małym procencie wpływa na zmiany strat mocy występujących w transformatorze WN/SN, przy czym podobnie jak przy liniach, w większości przypadków powoduje zmniejszenie strat w nich występujących. Dla linii pracującej z niskim współczynnikiem mocy, w skrajnych przypadkach występuje kilkuprocentowy wzrost strat mocy w transformatorze, co jest wynikiem zwiększonego przepływu przez niego zarówno energii czynnej, jak i biernej. W związku z powyższym, błędnym zdaje się rozumowanie, aby elektrownia pracowała zawsze ze współczynniki mocy bliskim jedności.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że optymalnym byłoby dostosowywanie wartości i charakteru mocy biernej wytwarzanej przez biogazownię, do $\cos\varphi$ obciążenia występującego w linii, do której przyłączone jest źródło.

Do negatywnych skutków znacznego przepływu przez linie elektroenergetyczne mocy biernej (pojemnościowej lub indukcyjnej) przez pracujące urządzenia elektryczne należą przede wszystkim: wystąpienie dodatkowych spadków napięcia w układach zasilających, dodatkowe straty mocy czynnej wynikające z przepływu prądów indukcyjnych lub pojemnościowych, a także zmniejszenie przepustowości sieci i zdolności wytwórczych generatorów. Wszystkie te skutki wpływają na zwiększenie kosztów użytkowania danej instalacji, sieci czy urządzeń elektrycznych. Przepływ mocy biernej w torach prądowych powoduje zwiększenie wartości skutecznej prądu, co skutkuje przyrostem strat mocy w urządzeniach elektroenergetycznych (liniach, transformatorach).

Względny przyrost strat mocy czynnej w układzie zasilającym spowodowany przepływem mocy biernej wyraża równanie:

$$\delta\Delta P_Q = 1 + tg^2\varphi = \frac{1}{\cos^2\varphi} \quad (1)$$

Jak wynika z zależności (1) wartość przyrostu strat mocy czynnej jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu współczynnika mocy $\cos\varphi$.

Przepływy mocy biernej w liniach elektroenergetycznych oprócz zwiększania strat transformacji, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, zwiększają także spadki napięcia (pogorszenie warunków pracy odbiorników energii elektrycznej) oraz ograniczają możliwości przesyłu mocy czynnej liniami (przesyłając zamiast niej moc bierną). W przypadku, kiedy elektrownia wykorzystuje do przesyłu (lub odbioru) energii elektrycznej kabel elektroenergetyczny, może wówczas wystąpić oddawanie do sieci mocy biernej pojemnościowej – wówczas $tg\varphi < 0$. Przekompensowanie sieci, oprócz skutków ekonomicznych, może również powodować podwyższenie wartości napięcia występującego w sieci elektroenergetycznej. Dlatego Operator Systemu Dystrybucyjnego żąda, aby wartość współczynnika mocy ($tg\varphi$), osiągniętego podczas normalnej pracy urządzeń wytwórczych, mieściła się w przedziale $0,00 \div 0,40$ i była o charakterze indukcyjnym.

W liniach kablowych SN pracujących przez pewne okresy czasu przy bardzo małych obciążeniach (można przyjąć, że obciążenia nie występują, gdy kogenerator biogazowy nie pracuje) należy przewidzieć kompensację mocy biernej pojemnościowej. Moc urządzeń kompensujących powinna zapewnić pokrycie zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową,

wynikającą z prądu ładowania linii kablowej przy biegu jałowym. Jak wykazały przeprowadzone badania terenowe, moc urządzeń kompensacyjnych powinna być dobierana oddzielnie dla każdej jednostki wytwórczej, ponieważ dobór mocy urządzenia kompensacyjnego, oparty na szacunkach długości oraz danych katalogowych linii może być obarczony znacznym błędem. W celu poprawnego określenia mocy urządzenia kompensującego, należy wykonać zarówno symulacje komputerowe pracy danego fragmentu systemu elektroenergetycznego, jak również pomiary przepływów energii biernej w różnych stanach pracy generatora. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie dławika kompensacyjnego przyłączonego na stałe. Główną zaletą tego rozwiązania jest brak układu sterującego dławikiem w zależności od mocy generowanej przez biogazownię (co znacząco obniża koszt oraz awaryjność układu). Główną wadą tego rozwiązania jest występowanie stałych strat mocy czynnej w dławiku, które trzeba pokryć z energii pobieranej z sieci lub wytworzonej przez generator. Rozbudową tego rozwiązania jest zastosowanie automatycznego odłączania dławika kompensującego podczas pracy biogazowni rolniczej. W ten sposób ograniczone zostają ogólne straty mocy czynnej w dławiku (dławik nie pracuje).

W wyniku przeprowadzonych w programie Neplan badań symulacyjnych uzyskano, że przyłączenie elektrowni biogazowej do sieci średniego napięcia powoduje w większości przypadków zmniejszenie kosztów wynikających z występujących w analizowanym układzie elektroenergetycznym strat energii. Zmiany te zależą w dużym stopniu od charakteru obciążenia linii. Dla linii pracującej ze współczynnikiem mocy $\cos\varphi = 0,8$ zysk z pracy biogazowni jest najmniejszy. Niemniej jednak, przy prawidłowym doborze charakteru mocy źródła może wynosić nawet ponad 6 000 zł/rok. Niestety, jeżeli źródło będzie pracowało z wymaganym przepisami współczynnikiem mocy, ograniczenie kosztów strat wyniesie jedynie około 3 000 zł/rok. Przy mocy odbieranej o współczynniku mocy różnym od 0,8, sumaryczna roczna redukcja kosztów strat energii jest dużo większa i wynosi nawet 30 000 zł/rok. Wartość ta zależy nie tylko od charakteru obciążenia, ale również od miejsca przyłączenia biogazowni i wartości współczynnika mocy w niej wytwarzanej. Jeżeli przyjmie się średnią oszczędność na kosztach strat wynikających z przyłączenia biogazowni rolniczej na poziomie 20 000 zł/rok, to w przypadku, gdy zrealizowano by program „biogazownia w każdej gminie”, to w Podlaskiem dałoby to roczną redukcję kosztów strat energii na poziomie aż 1,8 mln. zł. Analizując koszty związane z występującymi w badanym układzie stratami energii, zgodnie z oczekiwaniami można zauważyć ich proporcjonalność do strat mocy występujących w poszczególnych elementach układu elektroenergetycznego. Warto jednak zwrócić uwagę na ich wysokość. W układzie bez generacji koszty strat energii zależą od

wartości współczynnika mocy i są największe dla $\cos\varphi$ równego 0,8 (wynoszą blisko 75 000 zł/rok). Znaczny ich spadek można zauważyć, gdy obciążenie przyjmuje charakter rezystancyjno-pojemnościowy: $\cos\varphi = -0,9$. Mimo wszystko nadal są one wysokie, i wynoszą blisko 65 000 zł/rok. Jeżeli uświadomimy sobie, że są to koszty występujące tylko w jednej linii elektroenergetycznej, to ukazuje nam się skala strat, jakie występują w całym układzie elektroenergetycznym województwa, czy też kraju. Jeżeli przyjmiemy, że w województwie podlaskim występuje 30 GPZ wiejskich, i z każdego z nich wychodzi po 15 linii SN, to daje nam to łączny koszt strat energii w sieciach wiejskich Podlasia na poziomie około 32 mln. zł na rok. Należy podkreślić, że powyższe wyniki zostały wyznaczone przy średniej cenie energii wynoszącej 200 zł/MWh. Obecnie cena ta jest większa około czterokrotnie, co powoduje, że przedstawione powyżej wartości należy również pomnożyć przez 4. Powstałe w ten sposób kwoty tym bardziej podkreślają, jak ważne z punktu widzenia ekonomicznego jest to zagadnienie.

Ograniczenie strat występujących w analizowanej sieci elektroenergetycznej przekłada się bezpośrednio na ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery (będącej wynikiem braku konieczności produkcji energii niezbędnej na pokrycie tych strat). Redukcja ta może wynosić nawet blisko 120 Mg/rok. Najmniejszą redukcję emisji uzyskuje się (w każdym z analizowanych przypadków) dla obciążenia ze współczynnikiem mocy $\cos\varphi = 0,8$ (jedynie około kilkunastu Mg na rok). Dla biogazowni przyłączonej blisko GPZ, najlepsze wyniki uzyskuje się, gdy obciążenie linii jest o charakterze rezystancyjnym lub rezystancyjno-pojemnościowym, a biogazownia generuje moc przy $\cos\varphi = 1$. Gdy biogazownia rolnicza przyłączona jest w środku linii, najlepsze rezultaty są również dla obciążenia z $\cos\varphi = 1$ oraz $-0,9$ (przy $\cos\varphi$ biogazowni równym 1), jak również dla $\cos\varphi$ obciążenia równym 0,93, z tym, że wówczas biogazownia powinna wytwarzać moc o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym. Przy przyłączeniu źródła na końcu linii, charakter mocy wytwarzanej w biogazowni powinien być odwrotny do charakteru obciążenia. Przy zastosowaniu analogicznego założenia, jak przy określaniu kosztów strat energii oraz średniej redukcji CO₂ na poziomie 100 Mg/a, przyłączenie jednej biogazowni w każdej gminie, spowoduje ograniczenie emisji w Podlaskiem o 9 000 Mg/a. Przy analizie emisji ditlenku węgla związanego z pracą biogazowni należy wziąć pod uwagę redukcję jego transmisji na etapie wytwarzania i przetwarzania biogazu. Na podstawie danych otrzymanych od właścicieli trzech podlaskich biogazowniach (o znamionowej mocy elektrycznej 0,6 MW) znaczną część substratu (około 34 %) stanowiły odzwierzęcy nawóz naturalny (w postaci obornika i

gnojowicy), co dawało ich średnioroczne zużycie na poziomie około 4 152 Mg. Emisja CO₂ z odchodów zachodzi w następstwie rozkładu zawartych w nich związków azotu. Można jej uniknąć, wykorzystując odchody zwierzęce w procesie fermentacji w biogazowniach, a do nawożenia użytków rolnych stosując powstały w biogazowniach poferment.

Kolejnym sposobem ograniczenia emisji CO₂ w biogazowniach rolniczych jest wykorzystanie zawartego w biogazie ditlenku węgla (po jego odseparowaniu) w innych procesach technologicznych (w fazie gazowej lub jako suchy lód). Dla analizowanej biogazowni daje to oszczędność na poziomie ponad 1 600 Mg/a. Ponadto można wówczas przyjąć, że biogazownia rolnicza emituje CO₂ tylko w procesie spalania biogazu. Występuje wówczas ograniczenie transmisji ditlenku węgla równe emisji, jaka nastąpiłaby przy wytwarzaniu analogicznej ilości energii elektrycznej w źródłach konwencjonalnych (napędzanych węglem). Średnioroczna produkcja z analizowanych biogazowni pozwoli ograniczyć emisję ditlenku węgla na poziomie 3 143 Mg/a. Przy założeniu sprawności wytwarzania energii elektrycznej na poziomie 40 %, biogazownia rolnicza będzie emitować 491,4 kg CO₂/MWh, co dla analizowanych elektrowni daje około 2 038 Mg/a emisji powstałej w procesie spalania biogazu. Porównując do siebie ilość CO₂ zredukowaną w OZE oraz ilość wyemitowaną w procesie spalania, otrzymuje się redukcję na poziomie 1 105 Mg/a.

Reasumując powyższe rozważania można zauważyć, że występuje ścisła korelacja pomiędzy pracą biogazowni rolniczych a wartościami napięć i strat mocy oraz energii występującymi w sieci. W celu ich optymalizacji można zastosować jeden układ automatyki, regulujący mocą wytwarzaną w elektrowni biogazowej w zależności od wartości napięcia występującego w sieci, z tym że generacja powinna odbywać się w większości przypadków ze współczynnikiem mocy $\cos\phi$ o charakterze pojemnościowym, w przedziale od 0,9 do 1.

Jak wykazały badania terenowe wykonane dla trzech biogazowni rolniczych o mocy elektrycznej 600 kW, Biogazownia nr 1 pracowała przy współczynniku mocy mniejszym od 0,1, co jest zgodne z obowiązującymi przepisami. W biogazowni tej zarejestrowano okresy bez generacji energii czynnej, w których pobierana była energia bierna. Prowadziło to do sytuacji, w których współczynnik mocy był powyżej 0,7, co wiązało się z niespełnieniem wymogów krajowych i naliczaniem opłat za nadmierny pobór energii biernej. W analizowanej biogazowni nie zaobserwowano znaczących odchyłek częstotliwości od wartości znamionowej zarówno podczas postoju, jak i podczas pracy elektrowni. Wszystkie zarejestrowane wartości mieściły się w granicach wymaganych przepisami krajowymi. Podczas rejestracji parametrów napięcia w biogazowni nr 1 zaobserwowano skokowe zmiany napięcia w sieci, wywołane pracą automatycznego układu regulacji napięcia, zamontowanego w GPZ. Dzięki temu napięcie nie

odbiegało od wartości wymaganej o więcej niż 7,68 % (przy dopuszczalnych 10 %). Praca biogazowni nie wpływała na współczynnik asymetrii napięciowej – zbliżone do siebie wartości k_{U2} zaobserwowano zarówno podczas postoju, jak i pracy elektrowni. Skokowe zmiany napięcia spowodowały skokowe zmiany współczynnika uciążliwości migotania światła (zarówno krótkookresowej, jak i długookresowej). W wyniku tego wartość średnia współczynników była kilkukrotnie mniejsza od kwantylu 95% (około 2x dla P_{st} i blisko 4x dla P_{lt}). Zarejestrowane wartości całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia były zbliżone do siebie w poszczególnych fazach i były ponad czterokrotnie mniejsze od wartości wymaganych w kraju.

W biogazowni nr 2, podobnie jak w biogazowni nr 1, zarejestrowano okresy bez generacji energii. Jednakże w tym przypadku, moc czynna nie spadała do zera, lecz występował pobór blisko 100 kW przez urządzenia wchodzące w skład biogazowni. W biogazowni nr 1 takie zjawisko nie występowało, gdyż elektrownia ta miała dodatkowe (odrębne) przyłącze energetyczne do zasilania urządzeń wchodzących w skład instalacji biogazowej. Zatrzymanie generacji w obu przypadkach powodowało wzrost współczynnika mocy, przy czym w biogazowni nr 2 był on blisko trzykrotnie większy niż w pierwszej z biogazowni. Zarejestrowane odchylenia częstotliwości od wartości znamionowej były pomijalnie małe i nie przekraczały 0,5%. W biogazowni nr 2 zarejestrowano również zmiany napięcia, lecz nie były to zmiany skokowe, tak jak to miało miejsce w przypadku pierwszej z biogazowni. Mieściły się one również w dopuszczalnym przepisami przedziale +/- 10 %. Zarejestrowane wartości maksymalne współczynnika asymetrii napięciowej pokrywały się czasowo z brakiem generacji w elektrowni (z występującymi zakłóceniami w sieci, powodującymi odłączenie generatorów). W pozostałych przypadkach nie przekraczały one 0,5 %. W biogazowni nr 2 zaobserwowano ponad szesnastokrotnie większe wartości współczynnika długookresowej uciążliwości migotania światła (w porównaniu do biogazowni nr 1). Podobnie jak maksymalne wartości asymetrii napięciowej występują one podczas braku generacji w biogazowni. Zarejestrowana maksymalna wartość współczynnika całkowitego odkształcenia napięcia była blisko dwukrotnie mniejsza od wartości wymaganej przepisami krajowymi. Były to jednak wartości chwilowe, a wartość średnia nieznacznie odbiegała od wartości kwantylu 95 %. Największą wartość harmonicznego napięcia zarejestrowano dla harmonicznego nr 5 i 7. Powyżej 0,2 % miały również harmoniczne 3, 11 i 13 rzędu. Harmoniczne parzyste przyjmowały wartości pomijalnie małe.

W biogazowni nr 3, tak jak w pozostałych biogazowniach, zaobserwowano okresy bez generacji, które powodowały kilkukrotny wzrost współczynnika mocy. Sytuacja ta

dotyczyła tylko stanów zakłóceń w pracy biogazowni, które nie występowały w czasie pomiarów często, czego potwierdzeniem może być wartość średnia współczynnika mocy, która była zbliżona do kwantylu 95 %. Podczas pracy biogazowni wartość współczynnika mocy była w przybliżeniu stała i wynosiła około 0,17 o charakterze indukcyjnym. Analogicznie, jak w pozostałych analizowanych przypadkach, biogazownia nr 3 nie wpływała na zwiększenie odchylenia częstotliwości napięcia. Było ono podobne przez cały czas rejestracji i nie przekraczało +/- 0,2 %. W odróżnieniu od pozostałych badanych biogazowni, w biogazowni nr 3 zaobserwowano przekroczenie dopuszczalnego odchylenia napięcia o blisko 1 %. Nie był to odosobniony przypadek, a przekroczenia takie zostały zarejestrowane wielokrotnie w czasie trwania rejestracji. Spowodowało to sytuację, w której kwantyl 95 % miał wartość zbliżoną do dopuszczalnych przepisami 10 %. Asymetria napięciowa oscylowała około wartości 0,33 %, mieszcząc się w większości w przedziale 0,2 - 0,5 %. Zaobserwowano wzrost asymetrii napięciowej w ostatnich dwóch dniach rejestracji. Może to być skutkiem wystąpienia niesymetrycznego obciążenia w linii elektroenergetycznej. W okresie rejestracji zaobserwowano krótkotrwałe wzrosty wskaźników uciążliwości migotania światła, szczególnie w ostatnich dwóch dniach pomiarów. Skutkiem tego było widoczne przekroczenia dopuszczalnej wartości współczynnika długookresowej uciążliwości migotania światła. Wartość współczynnika całkowitego odkształcenia napięcia w okresie rejestracji oscylowała wokół 1,5 % i nie przekraczała (poza dwoma wyjątkami) 2,5 %. Są to wartości około czterokrotnie mniejsze od wartości wymaganych przepisami. Największy udział (ponad 1 %) w napięciu generowanym w biogazowni nr 3 miały harmoniczne 5 i 7 rzędu. Pozostałe harmoniczne nie przekraczały 0,3 %. Harmoniczne parzyste były pomijalnie małe, gdyż ich wartość nie przekraczała 0,03 %.

Reasumując, określając możliwości zwiększenia potencjału energetycznego biogazowni rolniczych oraz ich wpływu na elektroenergetyczne sieci wiejskie należy uwzględnić przede wszystkim:

- zmianę wartości napięcia wynikającą z pracy biogazowni,
- straty mocy i energii występujące w sieci elektroenergetycznej,
- redukcję emisji CO₂,
- jakość energii elektrycznej.

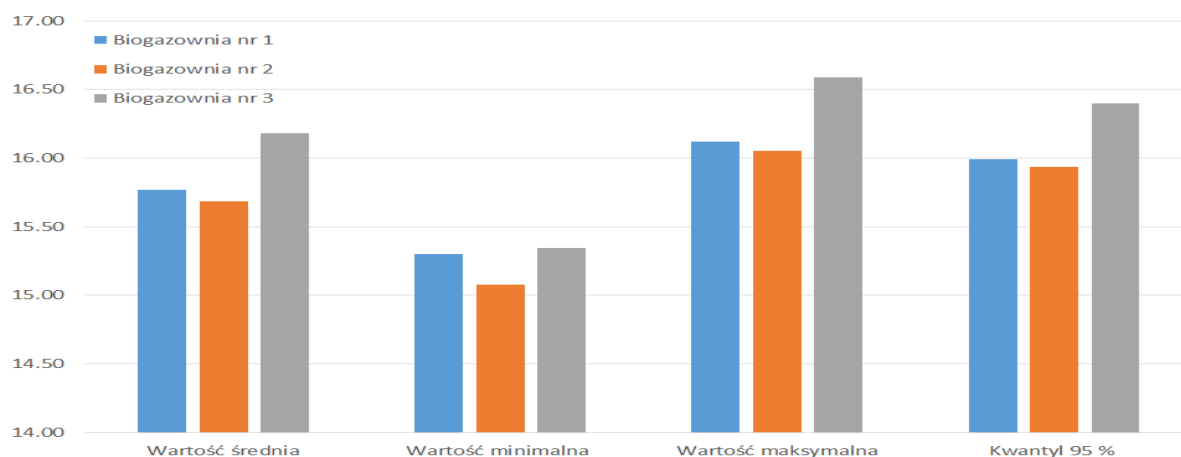
Zwiększenie potencjału energetycznego biogazowni rolniczej można dokonać poprzez zwiększenie sprawności biogazowni, poprzez zastosowanie układu kogeneracyjnego, wytwarzającego oprócz energii elektrycznej również energię cieplną, a nawet chłód. Działania

te wymagają jednak ingerencji w występujące tam procesy technologiczne. Jak wykazały przeprowadzone badania, generatory w biogazowniach rolniczych nie pracują z mocą znamionową. Może to być przyczyną niewystarczającej ilości biogazu (gwarantującej znamionową generację przez długi okres czasu) lub występującej w sieci wysokiej wartości napięcia zasilającego (badania wykazały, że napięcie w punktach przyłączenia biogazowni przyjmowało wartości zbliżone do maksymalnych wartości dopuszczalnych). Przy aktualnie rosnących dynamicznie cenach gazu ekonomicznie uzasadniona może być również produkcja i sprzedaż biogazu jako np. paliwa opałowego. Wymagałoby to jednak budowy systemu oczyszczania biogazu, co również wiązałoby się ze zmianą technologii wykorzystywanej w biogazowni.

Ustalając charakter mocy wytwarzanej w biogazowni rolniczej, w celu stabilizacji wartości napięcia w sieci, należy najpierw ustalić jego wartość w punkcie przyłączenia biogazowni. Jeżeli jego wartość jest wyższa od znamionowej (dzieje się to w przypadku występowania obciążenia o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym), należy – w celu obniżenia wartości napięcia – generować energię o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym. Najlepiej, jakby następowało to przy współczynniku mocy $\cos\varphi$ bliskim 0,93. Jeżeli wartość napięcia w węźle jest mniejsza od wartości znamionowej linii, najlepiej, gdy w elektrowni generowana jest moc o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym. W pozostałych przypadkach ilość mocy biernej (indukcyjnej lub pojemnościowej) wytwarzanej w biogazowni rolniczej należy dostosowywać do poziomu napięcia występującego w punkcie przyłączenia elektrowni. Aby podnieść wartość napięcia powinna być generowana moc pojemnościowa, aby obniżyć – moc indukcyjna. Można to osiągnąć stosując automatyczny regulator, zmieniający ilość i charakter mocy wytwarzanej w elektrowni, w zależności od wartości napięcia występującego w sieci elektroenergetycznej.

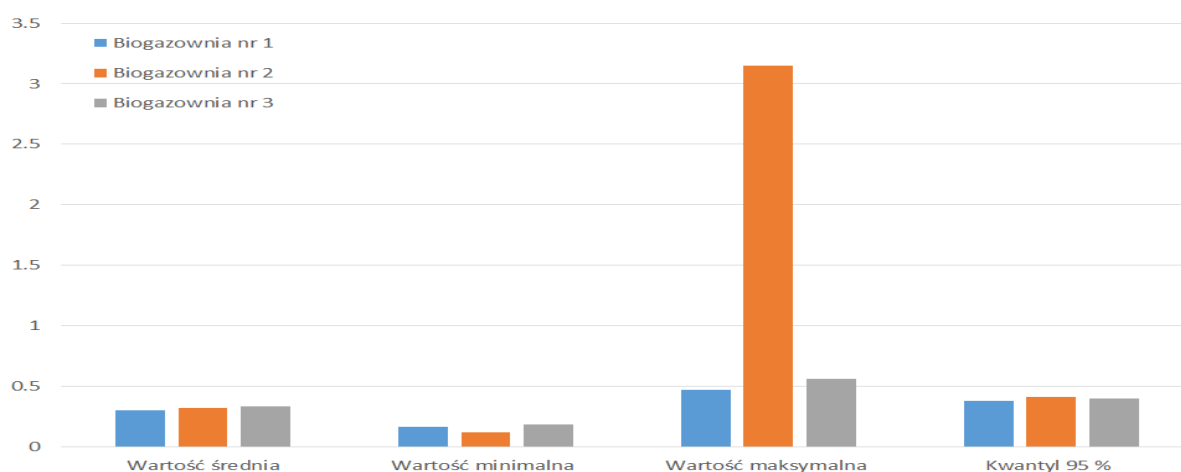
Jak wykazały badania terenowe, elektrownie biogazowe są bardzo stabilnymi – z punktu widzenia zmienności mocy wytwarzanej – źródłami energii elektrycznej. Moc przez nie wytwarzana jest z reguły na stałym poziomie, przy współczynniku mocy $\cos\varphi = 0,99$ o charakterze indukcyjnym. Warto zauważyć, że napięcie w sieci SN jest utrzymywane w każdej z badanych biogazowni na bardzo wysokim poziomie (blisko górnego progu wartości dopuszczalnej) – rysunek 2. Przewrótka wówczas generacji na charakter rezystancyjno-pojemnościowy mogłoby doprowadzić do przekroczenia wartości dopuszczalnych. Rozwiązaniem tego problemu byłoby zmniejszenie napięcia w GPZ (poprzez wykorzystanie dostępnej tam regulacji napięcia). Nie byłoby to szkodliwe dla przyłączonych do sieci innych

urządzeń, gdyż minimalna zarejestrowana wartość napięcia i tak jest większa od wartości znamionowej.



Rys. 2. Porównanie napięć międzyfazowych zarejestrowanych w poszczególnych biogazowniach.

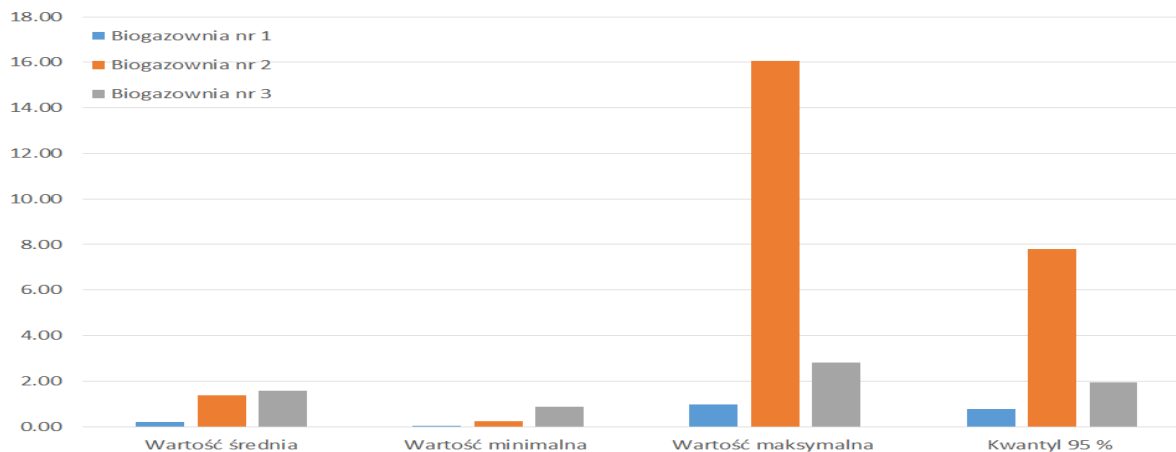
Asymetria napięcia w badanych biogazowniach utrzymywała się na podobnym poziomie i nie przekraczała w większości przypadków 0,5 % - rysunek 3. Wyjątkiem jest zakłócenie zarejestrowane w biogazowni nr 2, gdzie wartość maksymalna przekroczyła 3 %. Z korelacji mocy generowanej w biogazowni ze współczynnikiem asymetrii wynika, że jest to zakłócenie, które powstało poza instalacją biogazowni rolniczej.



Rys. 3. Porównanie asymetrii napięć zarejestrowanych w poszczególnych biogazowniach.

Analogiczną sytuację zaobserwowano podczas rejestracji współczynnika długookresowej uciążliwości migotania światła – rysunek 4. W tym przypadku również zarejestrowano zakłócenie w biogazowni nr 2. Niemniej jednak tylko w biogazowni nr 1 wartość P_{It} spełniła

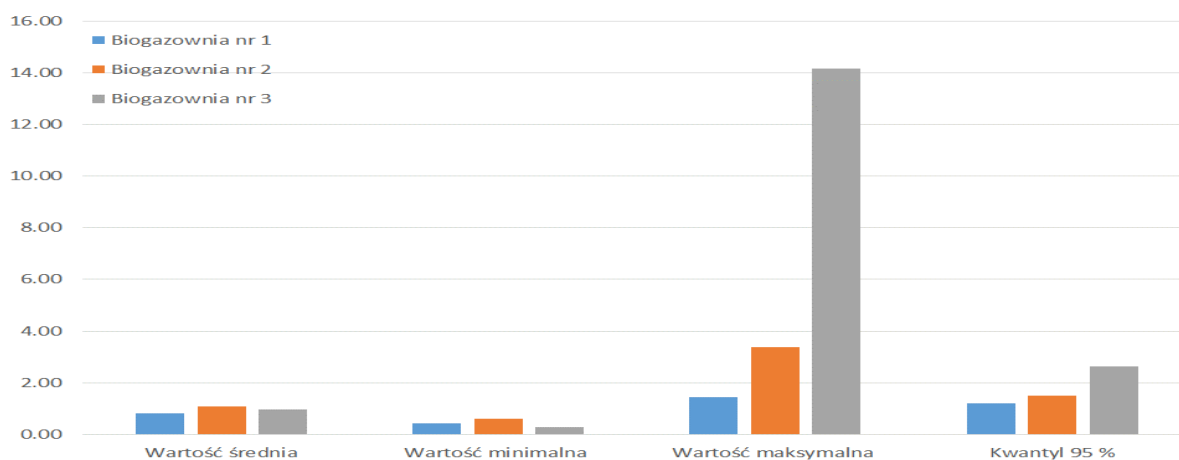
wymagania aktualnych przepisów. Jednakże, tak jak przy asymetrii, przekroczenia te nie były wynikiem pracy biogazowni, a pochodziły od zakłóceń powstałych w innych węzłach sieci elektroenergetycznej.



Rys. 4. Porównanie współczynników długookresowej uciążliwości migotania światła zarejestrowanych w poszczególnych biogazowniach.

Praca biogazowni rolniczych pozytywnie wpływa na wartości parametrów opisujących jakość energii elektrycznej. Można to w szczególności zauważyć na przebiegach opisujących parametry zmierzone w biogazowni nr 1 (zarejestrowano tam wartości bez i z pracującą elektrownią). Właściciele biogazowni utrzymują w nich, zgodnie z wytycznymi zakładów dystrybucyjnych, $\cos\varphi$ bliski jedności. Nie jest to, jak wykazano powyżej, optymalne rozwiązanie z punktu widzenia eksploatacji sieci elektroenergetycznej, do której przyłączona jest biogazownia. Wykonany na zarejestrowanych próbkach test Kołmogorowa-Smirnowa wykazał, że dystrybuanta teoretyczna w postaci rozkładu normalnego, w większości przypadków (poza współczynnikiem migotania światła) bardzo dobrze opisuje rozkład badanej populacji. Z wykresów przedstawiających wyniki analizy statystycznej zarejestrowanych wartości poszczególnych parametrów jakościowych można zauważyć również ścisłą korelację pomiędzy niektórymi wielkościami. W każdej z analizowanych biogazowni można zauważyć wyraźny spadek wartości współczynnika odkształcenia prądu THD_I , wraz ze wzrostem prądu (mocy) wytwarzanej. Korelacja pomiędzy wartością prądu wytwarzanego a współczynnikiem odkształcenia napięcia THD_U jest tym silniejsza im bliżej GPZtu znajduje się badane źródło. Analogiczną korelację można zauważyć porównując ze sobą wartości współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ z mocą wytwarzaną w biogazowni rolniczej – zależność ta rośnie wraz ze wzrostem odległości pomiędzy biogazownią a GPZtem. Porównując ze sobą współczynniki odkształcenia napięcia

widać ponad trzykrotnie większe wartości maksymalne w Biogazowni nr 3, co przekłada się również na wzrost wartości kwantylu 95 %.



Rys. 5. Porównanie współczynników całkowitego odkształcenia napięcia THD_U zarejestrowanych w poszczególnych biogazowniach.

Z przeprowadzonych badań wynikało ponadto, że największe odkształcenie od przebiegu sinusoidalnego (największą wartość współczynnika THD_I) rejestrowano w prądzie podczas rozruchu biogazowni. Wartości całkowitego odkształcenia prądu THD_I niejednokrotnie przekraczały wówczas 40 %. Stwarzało to problem z doбором przekrojów żył kabli zasilających, przez które przepływał prąd odkształcony.

4.5. Podsumowanie

Sformułowany problem badawczy został rozwiązany. Na postawione na wstępie pytania uzyskano następujące odpowiedzi:

1. Istnieje możliwość poprawy bilansu energetycznego współpracujących z biogazowniami sieci elektroenergetycznych, poprzez ograniczenie występujących w nich strat mocy i energii. Najlepszym rozwiązaniem (z punktu widzenia ograniczenia strat) byłoby przyłączenie biogazowni w środku obciążenia linii, a moc bierna wytwarzana w źródle powinna mieć tę samą wartość, lecz przeciwny charakter w stosunku do mocy przesyłanej siecią. W tym celu należałoby biogazownię wyposażyć w układ regulacyjny, który zapewniałby korelację w czasie rzeczywistym tych parametrów.

Znaczący wpływ biogazowni na ogólny bilans energetyczny układu widać na przykładzie ograniczenia kosztów związanych z występującymi w układzie

elektroenergetycznym stratami mocy i energii. Miejsce przyłączenia biogazowni powinno być dobierane indywidualnie tak, aby jak najbardziej ograniczyć ilość energii przesyłanej przez transformator WN/SN, oraz jak najbardziej skrócić drogę jaką musi pokonać energia ze źródła do odbiorników. Jak pokazały przedstawione w pracy wyliczenia, prawidłowy wybór miejsca przyłączenia jednej biogazowni o mocy 0,6 MW, może spowodować ograniczenie kosztów występujących w układzie elektroenergetycznym strat nawet o 120 000 zł/rok (przy cenie 800 zł/MWh).

2. Jak wykazały badania terenowe przeprowadzone w trzech biogazowniach rolniczych zlokalizowanych na terenie województwa podlaskiego, przyłączenie biogazowni rolniczych do sieci średniego napięcia, wpływa na poprawę parametrów opisujących jakość energii elektrycznej przesyłanej w liniach średniego napięcia. W szczególności, biogazownia – jako stabilne źródło energii – nie wpływa na występowanie wahań napięcia wywołanych zmiennością mocy wytwarzanej w czasie (tak jak to ma miejsce w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych). Ponadto praca biogazowni wpływa na zmniejszenie wartości całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia THDu. Ze względu na zarejestrowany spadek wartości współczynnika odkształcenia prądu $THDI$, wraz ze wzrostem prądu (mocy) wytwarzanego, biogazownie powinny pracować z mocą jak najbliższą wartością mocy znamionowej.

Praca biogazowni rolniczej może współpracować z systemem energetycznym w zakresie płynnej regulacji wartości napięcia występującego w linii przesyłowej. Gdy napięcie jest za niskie należy wytwarzać moc o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym, gdy jest za wysokie – o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym. Wartość zmiany napięcia należy regulować ilością mocy biernej generowanej, w danej chwili czasowej, przez agregat kogeneracyjny, co powinno umożliwić pełne wykorzystanie możliwości produkcyjnych generatora.

Nowatorskim rozwiązaniem, które doprowadziło do opracowania monografii, jest propozycja modyfikacji wytycznych dotyczących lokalizacji i zasad generacji energii w biogazowniach rolniczych, co wydaje się być koniecznością w świetle obowiązujących przepisów prawnych. Działania takie mają na celu uzyskanie wysokiej efektywności produkcji energii w biogazowniach rolniczych, ograniczenie strat mocy i energii w sieciach elektroenergetycznych oraz kosztów z tym związanych, jak również zapewnienie właściwej jakości energii elektrycznej zasilającej odbiorców. Jak wykazały przeprowadzone badania i analizy, w układach elektroenergetycznych należałoby podjąć następujące działania:

1. Należy dążyć, w miarę możliwości, by biogazownie rolnicze były przyłączane w środku długości ciągu liniowego – należy ograniczać do minimum źródła przyłączanie w bezpośrednim sąsiedztwie GPZ.
2. W warunkach przyłączenia wydawanych dla biogazowni rolniczych należy wprowadzić obowiązek wyposażania ich w układ automatycznej regulacji ilości generowanej mocy biernej, tak aby równoważyła ona moc bierną przesyłaną w linii elektroenergetycznej w każdej chwili czasowej (sygnał regulacyjny należy dostarczyć do układu kogeneracyjnego z zacisków przekładników napięciowych zainstalowanych w stacji transformatorowej biogazowni oraz przekładników prądowych zainstalowanych w linii przesyłowej). Równolegle należy znieść zapisy dotyczące kar za niedotrzymanie wartości współczynnika mocy generowanej w biogazowni w wymaganych przepisami granicach.
3. Należy utrzymywać w sieci elektroenergetycznej, do której przyłączana jest biogazownia rolnicza, możliwie niską wartość napięcia (zgodną z obowiązującymi w tym zakresie przepisami), tak aby umożliwić generację energii elektrycznej o charakterze pojemnościowym. Poprawi to nie tylko stabilność napięciową układu, ale również ograniczy znacząco koszty strat przesyłanej liniami energii.
4. Biogazownie rolnicze należy przyłączać jak najbliżej odbiorców wrażliwych na jakość energii elektrycznej (np. gospodarstw rolnych nastawionych na chów bydła mlecznego). Wpłynie to zarówno na stabilizację napięcia zasilającego, jak również ograniczy odkształcenie prądu i napięcia od przebiegu sinusoidalnie przemiennego.
5. W celu umożliwienia szerszego wyboru miejsca przyłączenia biogazowni rolniczych do sieci elektroenergetycznej (co wymagałoby niejednorodnie budowy dłuższych linii kablowych pomiędzy biogazownią a linią SN) zakłady energetyczne powinny partycypować w kosztach przyłączenia tego rodzaju źródeł. Koszt ten, dzięki ograniczeniu strat energii występujących w liniach elektroenergetycznych, zwróciłby się w przeciągu kilku lat.

4.6. Wykorzystana w autoreferacie bibliografia

1. EBA Biomethane & Biogas Report 2015 published dostępne pod adresem <https://www.europeanbiogas.eu/biogasreport2015/> (data wejścia 11.12.2020 r.)
2. Gołasa P.: Potencjał do produkcji biogazu rolniczego w Polsce i jego aktualne wykorzystanie [w:] Ekonomiczne uwarunkowania produkcji bioenergii w gospodarstwach rolnych, 2014.

3. Gostomczyk W.: Stan i perspektywy rozwoju rynku biogazu w UE i Polsce – ujęcie ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa 2017.
4. Hanzelka Z.: Wyższe harmoniczne napięć i prądów. Seminarium nt. „Ciągłość i jakość zasilania”, LPQI, Tarnów, 25 listopada 2003.
5. <https://bip.kowr.gov.pl/informacje-publiczne/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/dane-dotyczace-dzialalnosci-wytworcow-biogazu-rolniczego-w-latach-2011-2019> (data wejścia 21.12.2021 r.)
6. Kowalski Z.: Jakość energii elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
7. Marzecki J.: Elektroenergetyczne sieci terenowe. Wybrane zagadnienia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2017.
8. Mystkowski E.: Odnawialne źródła energii w województwie podlaskim, Podlaski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Szepietowie, Szepietowo 2016.
9. Niebrzydowski J.: Sieci elektroenergetyczne, Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej, Białystok 2000.
10. PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
11. Przesmycka A., Podstawka M: Ekonomiczna efektywność inwestycji w biogazownie rolnicze. Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu. Roczniki Naukowe, tom XVIII, zeszyt 6, 2016.
12. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
13. Shalukho A. V., Lipuzhin I. A., Voroshilov A. A., Power Quality in Microgrids with Distributed Generation, International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019, pp. 54-58
14. Wasiak I.: Elektroenergetyka w zarysie. Przesył i rozdział energii elektrycznej. Politechnika Łódzka, Łódź 2010.
15. Żmuda K.: Odnawialne źródła w polityce Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Kielce: MRiRW 2011.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Moja intensywna współpraca z innymi Uczelniami i ośrodkami naukowymi rozpoczęła się na początku 2019 roku. W tym czasie rozpoczęły się wspólne badania z pracownikami Wyższej Szkoły Agrobiznesu (aktualnie Międzynarodowej Akademii Nauk Stosowanych) w Łomży. Kumulacją wspólnych działań, były moje staże w WSA w Łomży, które odbyły się w

terminach od 1 lipca do 30 września 2020 roku oraz od 1 marca do 11 września 2022 roku, pod nadzorem dr. hab. Andrzeja Borusiewicza, prof. WSA. Nasze wspólne badania naukowe oraz prace badawczo-rozwojowe dotyczą głównie zagadnień związanych z oddziaływaniem odnawialnych źródeł energii na gospodarstwa rolne oraz sieci elektroenergetyczne. Wykonane zostały badania oddziaływania biogazowni rolniczych na elektroenergetyczne sieci wiejskie. W ramach tej współpracy prowadziłem i nadal prowadzę również zajęcia dydaktyczne z przedmiotu „Rynek energii i energetyka rozproszona” na kierunku Odnawialne Źródła Energii (Rolnictwo II stopnia, III semestr).

Równolegle z WSA w Łomży trwa współpraca z Instytutem Technologiczno-Przyrodniczym, Państwowym Instytucie Badawczym Falenty w Warszawie. Wspólna wymiana doświadczeń, w szczególności z prof. dr. hab. Wacławem Romaniukiem dotyczy głównie zagadnień energetycznych towarzyszących pracom realizowanym w gospodarstwach rolnych. Jednym z efektów tej współpracy było powołanie mnie przez Radę Naukową Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego – PIB w Falentach na promotora pomocniczego w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr inż. Magdalenie Tymińskiej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

W 2019 roku brałem udział we wspólnych badaniach wraz z dr. hab. inż. Markiem Suproniukiem, kierownikiem Zakładu Obwodów i Sygnałów Elektrycznych Instytutu Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej, czego efektem były nasze trzy wspólne publikacje. Aktualnie również pracujemy razem nad opracowaniem modeli matematycznych pozwalających na symulowanie oddziaływania elektrowni niekonwencjonalnych na parametry napięcia w sieci elektroenergetycznej.

Wśród zagranicznych ośrodków naukowych, współpracuję z dwoma uczelniami - Białoruską Państwową Akademią Rolniczą w Gorkach oraz Słowackim Uniwersytetem Rolniczym w Nitrze. W obu przypadkach współpraca realizowana jest w ramach umów o współpracy pomiędzy Uczelnią a Politechniką Białostocką. Wymiana doświadczeń z pracownikami Słowackiego Uniwersytetu Rolniczego w Nitrze zaowocowała przeprowadzeniem zajęć dydaktycznych (w roku akademickim 2020/2021) z zakresu technologicznych i środowiskowych uwarunkowań pracy elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych zlokalizowanych na terenach rolniczych. Współpraca naukowa z Białoruską Państwową Akademią Rolniczą w Gorkach dotyczy głównie możliwości implementowania rozwiązań dotyczących oddziaływania OZE na sieci energetyczne stosowanych w Polsce, na tereny białoruskie. Kumulacją niniejszej współpracy był odbyty w Gorkach staż naukowy

oraz przeprowadzone tam zajęcia dydaktyczne, dotyczące oddziaływania odnawialnych źródeł energii na parametry napięcia zasilającego gospodarstwa rolne.

Uwieńczeniem mojej współpracy z innymi uczelniami, zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi, są nasze wspólne publikacje. Do najważniejszych można zaliczyć:

- A1. Skibko Z.; Hołdyński G.; Borusiewicz, A.: Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters—Example from Poland. *Energies* 2022, 15, 5573
- A2. Z. Skibko, W. Romaniuk, A. Borusiewicz, S. Derehajło: Electricity supply to irrigation systems for crops away from urban areas. *Journal of Water and Land Development*, 2022, No 53 (in progress), 73-79
- A3. Skibko Z., Tymińska M., Borusiewicz A.: Analiza porównawcza instalacji fotowoltaicznych wykorzystywanych do zasilania gospodarstwa rolnego; w: *Problemy Zrównoważonego Rolnictwa, Ochrona Obszarów Wiejskich, Zasobów Wodnych i Środowiska*, 2022, t. XXVIII, s. 274–283.
- A4. Skibko Z., Derehajło S., Romaniuk W.: Elektrownia fotowoltaiczna jako źródło energii zasilające gospodarstwo rolne – analiza przypadku; w: *Problemy Zrównoważonego Rolnictwa, Ochrona Obszarów Wiejskich, Zasobów Wodnych i Środowiska*, 2022, t. XXVIII, s. 266–273.
- A5. Romaniuk W., Chigarev Y. V, Borusiewicz A., Skibko Z.: Metodologia teorii działania maszyn rolniczych i badań technologii chowu zwierząt. Monografia, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Falenty – Warszawa, 2021, str. 136,
- A6. Skibko, Z., Tymińska, M., Borusiewicz, A. (2021). Wykorzystanie nowoczesnych technologii w gospodarstwach rolnych. W: W. Romaniuk (Red.), *Doskonalenie technologii produkcji rolnej, w tym energii odnawialnej, z uwzględnieniem wymagań zrównoważonego rozwoju* (T. XXVII, s. 302–208).
- A7. Skibko Z, Derehajło S, Borusiewicz A. (2021). Oddziaływanie biogazowni na elektroenergetyczne sieci wiejskie. W: Romaniuk W, (red). *Doskonalenie technologii produkcji rolnej, w tym energii odnawialnej, z uwzględnieniem wymagań zrównoważonego rozwoju*. (T. XXVII, s. 294–301).
- A8. Skibko Z, Tymińska M, Romaniuk W, Borusiewicz A. Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm. *Sustainability*. 2021;13(13):1–15.
- A9. Skibko Z., Romaniuk W., Borusiewicz A., Porwisiak H., Lisowski J.: Use of pellets from agricultural biogas plants in fertilisation of oxytrees in Podlasie, Poland. *Journal of Water and Land Development*, 2021, No. 51 (X–XII), s. 124–128.

- A10. Barwicki J., Borusiewicz A., Holden L., Kulcsar L., Skibko Z., Żuchowski I. and Romaniuk W. (2022) Leaching of Elements from Soil in Grassland Field Crops Treated with Raw and Acidified Slurry. *Agricultural Engineering*, Vol.26 (Issue 1), pp. 145-156.
- A11. Suproniuk M., Skibko Z., Stachno A.: Diagnostyka wybranych parametrów energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach wiatrowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95, nr 11, s.105-108.
- A12. Suproniuk M., Stachno A., Skibko Z.: Work disruptions of electronics devices in hospital objects, W: *Radioelectronic Systems Conference 2019 / Kaniewski Piotr, Matuszewski Jan (red.), Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2019, vol. 11442, Bellingham, SPIE - The International Society for Optics and Photonics, s.1-10, ISBN 9781510636712.
- A13. Stachno A., Suproniuk M., Skibko Z.: Identyfikacja profilu osobowego na podstawie analizy neuronowej parametrów środowiskowych w inteligentnym budynku, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95, nr 11, s.133-135

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Przyznane nagrody i wyróżnienia:

- nagroda zespołowa III stopnia Rektora PB za wyróżniającą się działalność dydaktyczną i organizacyjną za rok 2020/2021;
- medal Komisji Edukacji Narodowej za szczególne zasługi dla oświaty i wychowania (2019 r.);
- nagroda zespołowa III stopnia Rektora PB za wyróżniającą się działalność dydaktyczną i organizacyjną za rok 2018/2019;
- brązowy medal Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej za długoletnią służbę (2018 r.);
- nagroda zespołowa III stopnia Rektora PB za wyróżniającą się działalność dydaktyczną i organizacyjną za rok 2017/2018;
- laureat nagrody VERBA DOCENT 2017 przyznawanej przez Elektro.info;
- nagroda zespołowa III stopnia Rektora PB za wyróżniającą się działalność dydaktyczną i organizacyjną za rok 2016/2017;

- nagroda zespołowa III stopnia Rektora PB za wyróżniającą się działalność naukową, organizacyjną i dydaktyczną (2012 r.);
- nagroda zespołowa III stopnia Rektora PB za wyróżniającą się działalność naukową, organizacyjną i dydaktyczną (2010 r.);

Do największych osiągnięć dydaktycznych oraz popularyzujących naukę mogę zaliczyć:

- autorstwo skryptu: Budowa i eksploatacja instalacji i urządzeń elektrycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2019;
- autorstwo skryptu: Low-voltage electrical installations. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2019;
- współautorstwo skryptu do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu Sieci elektroenergetyczne: Hołdyński G., Skibko Z.: Laboratorium sieci elektroenergetycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2010;
- współautorstwo rozdziału w „Poradniku monter elektryka T. 3”. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017;
- laureat konkursu „Belfer roku 2012/2013” na Wydziale Elektrycznym PB;
- promotorstwo 158 prac dyplomowych (60 prac magisterskich oraz 98 prac inżynierskich) z zakresu projektowania, budowy i eksploatacji instalacji elektrycznych i sieci elektroenergetycznych, odnawialnych źródeł energii oraz jakości energii elektrycznej;
- recenzje 85 prac: magisterskich (26) oraz inżynierskich (59);
- autorstwo programów nauczania z przedmiotów: Podstawy elektroenergetyki 2 - Elektrotechnika st. I stopnia stacjonarne; Budowa oraz eksploatacja instalacji i urządzeń elektrycznych - Elektrotechnika st. I stopnia stacjonarne; Metody wytwarzania energii elektrycznej - Energetyka st. I stopnia stacjonarne; Seminarium dyplomowe - Energetyka st. I stopnia stacjonarne; Metody wytwarzania energii elektrycznej - Energetyka st. I stopnia niestacjonarne; Seminarium dyplomowe - Energetyka st. I stopnia niestacjonarne;
- autorstwo instrukcji do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotów: Podstawy inżynierii elektrycznej (6 instrukcji), Budowa oraz eksploatacja instalacji i urządzeń elektrycznych (9 instrukcji), Podstawy elektroenergetyki (4 instrukcje); Instalacje elektryczne (2 instrukcje);

- organizacja praktyk studenckich oraz pośredniczenie w znalezieniu pracy po studiach, dzięki ścisłej współpracy z przemysłem (między innymi: Eltron Sp. z o.o., Energy Nortle Sp. z o.o., Elpro Sp z o.o. Zaprom);
- koordynacja modernizacji 4 stanowisk laboratoryjnych z przedmiotów: Budowa oraz eksploatacja instalacji i urządzeń elektrycznych, Podstawy elektroenergetyki;
- współorganizacja oraz opiekun 12 wycieczek dydaktycznych dla studentów Wydziału Elektrycznego PB kierunków Elektrotechnika oraz Energetyka do obiektów i zakładów pracy branży elektrycznej: Elektrownia Bełchatów, Instytut Energii Atomowej w Świerku, Instytut Energetyki w Warszawie, Elektrownia Wodna we Włocławku, Tele-Fonika Kable, Zespół Elektrowni w Ostrołęce, ABB Przasnysz, Apator Toruń, Elektrownia Wiatrowa Kozaki, Elektrownia Wodna Żarnowiec, Elektrownia Wodna Dębe, Zakład Przewodów i Kabli „Elktrim” w Ełku, stacja elektroenergetyczna 400/110 kV „NAREW”, Elektrownia Wiatrowa Jaśki, Elektrownia Wiatrowa Wólka Pietkowska;
- opiekun studentów studiów niestacjonarnych (od 2003 r. do 2021 r.);
- opiekun praktyk studenckich w latach 2003 – 2005;
- liczne prelekcje i szkolenia otwarte z zakresu szeroko rozumianej elektryki organizowane w gminach oraz szkołach średnich;
- organizacja 53 szkoleń otwartych w ramach działalności w Związku Elektro-Wykonawców;
- czynny udział w seminarium technicznym ELSEP;
- ścisła współpraca z Zespołem Szkół Mechanicznych w Łapach, w wyniku czego udało się w 2016 r. odtworzyć klasę o profilu elektrycznym;
- przygotowanie programu i współprowadzenie 5 kursów dla kadry inżynieryjno-technicznej przedsiębiorstw działających na terenie województwa podlaskiego z zakresu projektowania oraz eksploatacji sieci i instalacji elektroenergetycznych w ramach projektów finansowanych ze środków Unii Europejskiej;
- współprowadzenie 6 kursów dla kadry inżynieryjno-technicznej przedsiębiorstw działających na terenie województwa podlaskiego z zakresu projektowania oraz eksploatacji sieci i instalacji elektroenergetycznych w ramach projektów finansowanych ze środków Unii Europejskiej;
- czynny udział w działaniach promocyjnych Wydziału Elektrycznego PB: Dni otwarte Wydziału Elektrycznego PB, Festiwal Nauki;

- Prowadzenie wykładów otwartych z zakresu Odnawialnych Źródeł Energii, w ramach Uniwersytetu III Wieku oraz na zaproszenie Wójtów Gmin Wiejskich.

Do największych osiągnięć organizacyjnych mogę zaliczyć:

- członkostwo w Komisji Wydziału Elektrycznego ds. Badania Opinii Pracodawców Dotyczących Programów Studiów oraz Osiągniętych Efektów Uczenia się w Politechnice Białostockiej (od 2020 r.);
- członkostwo w Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia w Politechnice Białostockiej (od 2020 r.);
- członkostwo w Uczelnianej Komisji ds. Jakości Kształcenia w Politechnice Białostockiej (od 2020 r.);
- pełnienie funkcji przewodniczącego Komisji ds. opracowania programów kształcenia na studiach drugiego stopnia na kierunku Elektrotechnika w Politechnice Białostockiej (2019 r.);
- członkostwo w Komisji ds. udoskonalenia programów kształcenia na kierunkach studiów dla cyklu kształcenia rozpoczętego w roku akademickim 2012/2013 w Politechnice Białostockiej;
- członkostwo w Komisji ds. przygotowywania raportów samooceny w związku z ubieganiem się o uzyskanie akredytacji międzynarodowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej (2017 r.);
- członkostwo w Komisji ds. przygotowywania raportów samooceny w związku z oceną programową Polskiej Komisji Akredytacyjnej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej (2018 r.);
- członkostwo w Komisji ds. opracowania planów studiów stacjonarnych i niestacjonarnych I i II stopnia w Politechnice Białostockiej (2011 r.);
- członkostwo w Komisji ds. koordynacji i realizacji projektu „INNO-EKO-TECH” Innowacyjne centrum dydaktyczno-badawcze alternatywnych źródeł energii, budownictwa energooszczędnego i ochrony środowiska PB w zakresie dotyczącym Wydziału Elektrycznego (2011 r.);
- członkostwo w Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej (2009 r., 2017 r.);
- członkostwo w Komisji Egzaminacyjnej egzaminów wstępnych na PB (2005 r.).

7. Inne informacje, dotyczące kariery zawodowej.

Poniżej przedstawię inne najważniejsze osiągnięcia, stanowiące istotny wkład w rozwój dyscypliny „inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka”.

Od początku swojej kariery naukowej szczególną uwagę poświęcałem praktycznemu zastosowaniu nauki, czyli znajdowaniu rozwiązań trudności technicznych napotykanym przez przedsiębiorców oraz przedsiębiorstwa energetyczne. Moje badania dotyczyły zagadnień związanych z szeroko rozumianą energetyką, ze szczególnym zwróceniem uwagi na elektroenergetykę.

Pierwszym tematem, którym się zająłem w swojej karierze naukowej było zagadnienie związane z wyznaczaniem obciążalności prądowej przewodów ułożonych w kilku stykających się ze sobą warstwach. Układanie przewodów w wiązkach (układach złożonych z kilku stykających się ze sobą warstw przewodów) jest powszechnie stosowanym sposobem wykonania instalacji elektrycznej, głównie w przemyśle, rolnictwie oraz w budynkach użyteczności publicznej. Wyznaczenie wartości prądu, jaki może płynąć długotrwale w takim układzie przewodów, nie powodując przekroczenia w nim wartości temperatury dopuszczalnej długotrwale, było istotne ze względów bezpieczeństwa, niezawodnej pracy oraz ekonomicznych. Dokumentem regulującym kwestię doboru przewodów ze względu na obciążalność prądową długotrwałą jest norma PN-IEC 60364-5-523: 2001 „Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Obciążalność prądowa długotrwała przewodów”. W normie tej podano wartości prądów dopuszczalnych długotrwale przewodów, w zależności od rodzaju przewodu, liczby żył przewodu, jak również sposobu jego ułożenia. Norma ogranicza się jednak do podania obciążalności prądowej długotrwałej przewodów ułożonych maksymalnie w jednej warstwie, nie podając wartości obciążalności przewodów, gdy przewody te zostaną ułożone w kilku stykających się ze sobą warstwach. Nieuwzględnienie w normie takiego sposobu ułożenia przewodów, uniemożliwia właściwy dobór przekroju przewodów ułożonych w kilku stykających się ze sobą warstwach i w praktyce bardzo często powodował wystąpienie w takim układzie temperatury wyższej od temperatury dopuszczalnej długotrwale. W tym przypadku bardzo często występowała szybsza degradacja materiału, z jakiego wykonana została izolacja przewodu, co skutkowało skróceniem czasu eksploatacji takiego przewodu.

Aby istniała możliwość wyznaczania obciążalności prądowej przewodów, bądź układu przewodów, przy zmiennym charakterze ich obciążenia, niezbędna jest znajomość wartości cieplnej stałej czasowej. Wartości cieplnych stałych czasowych przewodów dostępne

w literaturze są uogólnione i nie uwzględniają liczby obciążonych żył ani sposobu ułożenia przewodów. Stosowane dotychczas metody wyznaczania obciążalności prądowej długotrwałej przewodów ułożonych w kilku stykających się ze sobą warstwach wymagają od projektantów znajomości wartości wielkości powszechnie uznawanych za niedostępne (np. współczynnika oddawania ciepła do otoczenia, temperatury występującej na powierzchni przewodu, cieplnej stałej czasowej itp.) bądź też posiadania oraz znajomości obsługi specjalistycznego oprogramowania komputerowego pozwalającego na analizę zjawisk cieplnych w złożonych układach (np. Comsol, EMRC Nisa). W związku z tym, przeprowadzone zostały badania polegające na opracowaniu metody wyznaczania obciążalności prądowej przewodów ułożonych w kilku stykających się ze sobą warstwach, w zależności od liczby warstw i liczby przewodów w warstwie oraz od charakteru obciążenia tych przewodów. Wszystkie badania w tym zakresie przeprowadzałem samodzielnie, pod nadzorem prof. Brunona Lejdy. Pierwszym krokiem w prowadzonych pracach było określenie – na podstawie badań laboratoryjnych – wartości cieplnej stałej czasowej przewodów w zależności od liczby żył i liczby obciążonych żył oraz od sposobu ich ułożenia (przewód odosobniony lub w układzie wielowarstwowym). Na podstawie określonych wartości cieplnej stałej czasowej przewodów ułożonych wielowarstwowo, w zależności od liczby warstw oraz liczby przewodów w warstwie, została opracowana metoda pozwalająca projektantom na wyznaczanie wartości prądu dopuszczalnego długotrwałe, w zależności od sposobu jego ułożenia oraz charakteru jego obciążenia (obciążenie ciągłe, dorywcze, przerywane lub dowolnie zmienne).

Wyznaczanie rozkładu pola temperatury w przewodach ułożonych w kilku stykających się ze sobą warstwach, ze względu na złożoność badanego środowiska, wymagało rozwiązania skomplikowanych równań różniczkowych. W takich układach dużym ułatwieniem było zastosowanie metod numerycznych, do których zalicza się między innymi metodę elementów skończonych (MES). Otrzymane w wyniku obliczeń numerycznych obciążalności prądowe przewodów ułożonych wielowarstwowo zweryfikowane zostały następnie przy pomocy badań laboratoryjnych. Różnica między wartościami współczynnika zmniejszającego obciążalność prądową długotrwałą wyznaczonymi przy wykorzystaniu metody elementów skończonych a wartościami wyznaczonymi na drodze badań laboratoryjnych dla układu dwuwarstwowego, sięgała nawet 27 %, podczas, gdy dla układu trójwarstwowego (złożonego z co najmniej dziewięciu przewodów) maksymalna różnica wartości wyniosła zaledwie 5 %.

Różnice między wartościami współczynników zmniejszających obciążalność prądową długotrwałą przewodów ułożonych w kilku stykających się ze sobą warstwach, wyznaczonymi przy pomocy MES oraz w badaniach laboratoryjnych, wynikały z następujących powodów:

- grubości poszczególnych warstw izolacji oraz średnice żył przewodów wykorzystane do budowy modelu geometrycznego różniły się od rzeczywistych (różnice notowano także dla jednego przewodu w funkcji jego długości);
- współczynnik oddawania ciepła z powierzchni zewnętrznej układu do otoczenia, przyjęty (na podstawie literatury) do analizy numerycznej, różnił się od współczynnika rzeczywistego (wynika to z różnicy w wartościach zmniejszającego obciążalność prądową długotrwałą (wyznaczonych numerycznie i doświadczalnie) dla układu dwuwarstwowego oraz zbieżności tych wartości przy ułożeniu przewodów w trzech warstwach, gdzie najwyższa temperatura występuje w przewodzie położonym w środku układu przewodów).

W ramach prowadzonych badań zostały również wyznaczone wartości obciążalności prądowej długotrwałej przewodów ułożonych wielowarstwowo w układach poziomych, pionowych, obciążonych prądem sinusoidalnie przemiennym symetrycznym i niesymetrycznym, a także prądem odkształconym od przebiegu sinusoidalnego. Wyniki przeprowadzonych przeze mnie badań były szeroko publikowane nie tylko w czasopismach naukowych (np. Wiadomości Elektrotechniczne, Przegląd Elektrotechniczny), poradnikach (Poradnik monera elektryka T.3, WNT 2017) ale również w czasopismach branżowych (np. Elektrosystemy, ElektroInfo). Umożliwiło to dotarcie do szerokiego grona odbiorców, a szczególnie do grona osób najbardziej zainteresowanych tą tematyką, czyli osób zajmujących się projektowaniem oraz eksploatacją instalacji elektrycznych.

Kolejnym tematem, którym zająłem się w swojej karierze naukowej były zagadnienia związane z oddziaływaniem odnawialnych, niestabilnych źródeł energii, takich jak elektrownie wiatrowe i fotowoltaiczne, na jakość energii przesyłanej przez elektroenergetyczne sieci średniego napięcia (ze szczególnym uwzględnieniem ich oddziaływania na parametry napięcia zasilającego gospodarstwa rolne znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie analizowanych źródeł). Był to temat bardzo ważny nie tylko z punktu widzenia odbiorców, ale również i dla Przedsiębiorstwa Energetycznego zajmującego się eksploatacją sieci elektroenergetycznych. Na terenie województwa podlaskiego, takim przedsiębiorstwem jest PGE Dystrybucja S.A. Oddział Białystok. W ramach nawiązanej współpracy, wspólnie z dr. inż. Grzegorzem Hołdyńskim zajęliśmy się wykonaniem badań terenowych oddziaływania elektrowni wiatrowych na parametry opisujące jakość energii elektrycznej. Wspólnie opracowywaliśmy koncepcję badań, wykonywaliśmy pomiary, obrabialiśmy i interpretowaliśmy wyniki oraz opracowywaliśmy wnioski i zalecenia (wkład każdego z nas oceniam na 50 %).

Wymagania dotyczące współpracy elektrowni wiatrowych z siecią elektroenergetyczną opisane zostały między innymi w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, a ich spełnienie niezbędne jest do otrzymania zgody na ostateczne przyłączenie elektrowni wiatrowej oraz podpisanie umowy na dostawę energii elektrycznej. Brak jest tam jednak szczegółowych wytycznych, jak należy przeprowadzać takie badania. Dlatego pierwszym poczynionym krokiem było opracowanie metodologii badań, umożliwiającej sprawdzenie wszystkich wymaganych wytycznych i uzgodnienie ich z Przedsiębiorstwem Energetycznym. Przyczyną konieczności badania jakości energii elektrycznej jest coraz większy udział energii wiatrowej w ogólnym bilansie energii systemu elektroenergetycznego. Obecnie światowy rynek siłowni wiatrowych charakteryzuje się ogromną różnorodnością oferowanych rozwiązań. Dostępne są elektrownie o mocach od kilkuset watów do nawet 15 MW. W zależności od wykorzystanych do budowy elektrowni rozwiązań technicznych zmienia się zakres oddziaływania danej siłowni wiatrowej na system elektroenergetyczny w punkcie jej przyłączenia. Urządzenia tego typu mogą oddawać do sieci niesinusoidalny prąd, który może powodować powstawanie niesinusoidalnych spadków napięcia w układzie zasilającym, a te z kolei wpływają na odkształcenie sinusoidalnej krzywej napięcia zasilającego w sieci elektroenergetycznej. Parametry opisujące jakość energii elektrycznej zależą od producentów, dystrybutorów i użytkowników energii elektrycznej. Odkształcenia i zaburzenia napięcia zasilającego w układzie elektroenergetycznym zależą od impedancji układu zasilającego (mocy zwarciowej) oraz od liczby i mocy odbiorników nieliniowych przyłączonych u odbiorców energii elektrycznej, generujących składowe harmoniczne. Wzrost zainteresowania oceną jakości energii elektrycznej doprowadził do tworzenia rozwiniętych systemów zbierania danych, pozwalających uwzględnić składowe harmoniczne i porównania energii do wzorców jakościowych dwuwymiarowych (RMS - Czas) z okresami całkowania i okresami obserwacji z góry ustalonymi. W związku z potrzebą usystematyzowania wiedzy (w szczególności dostępnej w literaturze, będącej w głównej mierze wynikiem prac symulacyjnych oraz badań laboratoryjnych) dotyczącej oddziaływania elektrowni na elektroenergetyczne sieci wiejskie średniego napięcia, określony został cel badawczy, sformułowany w postaci następujących pytań:

1. Czy moc generowana przez elektrownię wiatrową w funkcji prędkości wiatru pokrywa się z krzywą podawaną przez producenta?
2. W jaki sposób praca elektrowni (farm) wiatrowych oraz procesy łączeniowe w nich zachodzące wpływają na wartość napięcia występującego w miejscu ich przyłączenia do sieci elektroenergetycznej?

3. Jak energia generowana w elektrowniach wiatrowych wpływa na odkształcenie przebiegu prądu i napięcia w sieci elektroenergetycznej?
4. Jaka jest korelacja pomiędzy pracą elektrowni wiatrowych a współczynnikiem mocy występującym w sieci zasilającej?

W celu określenia oddziaływania elektrowni (farm) wiatrowych na parametry napięcia w elektroenergetycznych sieciach wiejskich wykonane zostały badania terenowe 36 źródeł. W zbiorze tym znajdowały się najczęściej spotykane w kraju typy jednostek wytwórczych. Różniły się między sobą nie tylko mocą znamionową (badano elektrownie o mocach od 500 kW do 3.5 MW), ale również budową wewnętrzną – z generatorami synchronicznymi i asynchronicznymi, przekładniowe i bezprzekładniowe, ze zintegrowaną i z osobną stacją transformatorową SN/nn. Badania przeprowadzano na pojedynczych elektrowniach, jak i farmach wiatrowych złożonych z 2 lub trzech jednostek wytwórczych. Wspólnym aspektem dla wszystkich badanych obiektów było to, że były one przyłączone do elektroenergetycznej sieci wiejskiej średniego napięcia (o napięciu znamionowym 15 lub 20 kV), do której przyłączone były gospodarstwa rolne, jak i odbiorcy indywidualni.

Wyposażenie elektrowni powinno być tak dobrane, aby zapewnić utrzymanie (określonych w warunkach przyłączenia) wartości napięć w miejscu przyłączenia do sieci i stabilność współpracy elektrowni z systemem elektroenergetycznym. Dlatego pierwsze z przeprowadzanych badań dotyczyło sprawdzenia rzeczywistej mocy generowanej przez turbinę wiatrową i porównanie jej z danymi podawanymi przez producenta. Z porównania obu przebiegów wynikają przede wszystkim dwa spostrzeżenia. Po pierwsze, rzeczywista maksymalna moc generowana przez turbinę wiatrową jest wyższa od mocy podawanej przez producenta elektrowni. Po drugie, dla prędkości wiatru poniżej 9 m/s elektrownia potrafi generować moc nawet dwukrotnie większą od mocy podawanej przez producenta. Ma to bardzo duże znaczenie nie tylko na etapie planowania inwestycji (rzeczywisty zysk będzie wyższy niż zakładany, co przełoży się na skrócenie czasu zwrotu z inwestycji) ale również z punktu widzenia eksploatacji elektrowni (większa moc generowana wywołuje większy przyrost temperatury urządzeń, co może powodować konieczność stosowania dodatkowych systemów wentylacyjnych/chłodniczych).

Kolejne badanie miało na celu określenie wpływu pracy elektrowni wiatrowej na wartość napięcia występującego w punkcie przyłączenia elektrowni (jest to punkt, w którym zmiany te są największe). Elektrownie wiatrowe przyłączone do sieci nie powinny powodować nagłych zmian i skoków napięcia przekraczających 3 % napięcia znamionowego, zarówno podczas normalnej pracy, jak i w przypadku rozruchów i wyłączeń jednostek wytwórczych

(w tym wyłączeń awaryjnych). Stabilność wartości napięcia jest szczególnie ważna z punktu widzenia odbiorców znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie OZE. Najbardziej newralgicznymi z tego punktu widzenia są procesy załączania i awaryjnego wyłączenia elektrowni wiatrowej.

Z analizy zarejestrowanych podczas badań przebiegów zmian wartości napięcia wyciągnięto następujące spostrzeżenia:

- w przypadku awaryjnego wyłączenia elektrowni wiatrowej, następuje gwałtowne zmniejszenie wartości napięcia w stosunku do wartości występującej przy pracującej znamionowo elektrowni. Zmiana ta niejednokrotnie jest bliska wartości dopuszczalnej przepisami i zależy w głównej mierze od mocy elektrowni oraz miejsca jej przyłączenia do sieci.
- załączenie elektrowni wiatrowej powoduje widoczny wzrost wartości napięcia znamionowego. Jest on tym większy, im większy gradient przyrostu mocy mu towarzyszy. Jego wartość zależy również od mocy elektrowni oraz miejsca jej przyłączenia do sieci.
- załączenie jednostki wytwórczej powoduje najpierw obniżenie napięcia o około 1 % w stosunku do napięcia przy odłączonej elektrowni wiatrowej, a dopiero potem wzrost jego wartości. Zjawisko to spowodowane jest udarem prądowym, wynikającym z poboru energii przez urządzenia uruchamiające elektrownię.
- elektrownie wiatrowe, w sytuacja awaryjnych, mogą powodować zakłócenia w pracy odbiorników zainstalowanych w gospodarstwach rolnych, wrażliwych na szybkie zmiany wartości napięcia.

Kolejne badania wpływu elektrowni wiatrowych na sieć elektroenergetyczną dotyczyły ich oddziaływania na kształt przebiegów prądów i napięć występujących w układach zasilających. Badania terenowe wykazały, że elektrownie wiatrowe w nieznacznym stopniu wpływają na występujące w sieci wartości wyższych harmonicznnych, przy czym w większości przypadków ich praca powodują zmniejszenie wartości współczynnika całkowitego odkształcenia napięcia THD_U , co pozytywnie wpływa na pracę przyłączonych do sieci odbiorników.

Do badań prowadzonych na elektrowniach wiatrowych należała również analiza wpływu pracy elektrowni wiatrowych na poziom asymetrii napięć przewodowych i doziemnych w punkcie ich przyłączenia do sieci elektroenergetycznej średniego napięcia. W wyniku przeprowadzonych badań i analiz zauważono, że wpływ pracy elektrowni wiatrowych na wartość współczynników asymetrii i niezrównoważenia napięć występujących

w sieciach wiejskich zależy przede wszystkim od dwóch czynników: mocy znamionowej elektrowni wiatrowej oraz odległości danej jednostki od stacji SN/WN. Im większa moc i im większa odległość elektrowni od GPZ, tym bardziej zauważalny jest wzrost wartości współczynnika asymetrii napięcia po wyłączeniu generującej moc znamionową jednostki, co oznacza, że generacja energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych wpływa na ograniczenie występującej w sieci średniego napięcia asymetrii napięć.

Kolejnym tematem, którym zająłem się w swej karierze naukowej była analiza zagadnień związanych ze współpracą farm fotowoltaicznych z systemem elektroenergetycznym. Efektem tych prac było wykonanie na zlecenie PGE Dystrybucja S.A. Oddział Białystok ponad 300 ekspertyz dotyczących technicznych możliwości przyłączenia elektrowni w danym punkcie sieci średniego napięcia. Wszystkie ekspertyzy wykonywane były wspólnie z dr. inż. G. Hołdyńskim. Wspólnie opracowaliśmy metodykę badań. Dr Hołdyński opracowywał modele numeryczne oraz wykonywał obliczenia, ja zaś zajmowałem się analizą otrzymanych wyników oraz wyciąganiem wniosków oraz proponowaniem ewentualnych zaleceń. Na potrzeby każdego z przypadków wykonywany był model komputerowy fragmentu układu elektroenergetycznego (w środowisku programu Neplan), na podstawie którego wyznaczane były wartości parametrów zwarciovych, rozplływowych i napięciowych w danym punkcie sieci. W układach z zainstalowanymi instalacjami fotowoltaicznymi (w szczególności rzędu kilkudziesięciu kW – tak jak ma to miejsce w gospodarstwach rolnych), coraz częściej zauważalny jest aktualnie problem dotyczący przekraczania dopuszczalnych wartości napięcia. Prowadzi to w większości przypadków (przy prawidłowych nastawach zabezpieczeń falownika) do wyłączenia się falownika przy najbardziej sprzyjających do generacji warunkach, co wiąże się w konsekwencji z licznymi stratami finansowymi (brak generacji równa się brakowi przychodu). W praktyce, w celu wyeliminowania tego zjawiska wykonywana jest jedna z dwóch czynności: zmiana nastaw zabezpieczeń falownika (co może prowadzić do uszkodzeń urządzeń przyłączonych w pobliżu źródła, w wyniku wystąpienia zbyt dużej wartości napięcia) lub zastosowanie transformatora obniżającego napięcie (zabezpiecza to urządzenia pracujące w instalacji z fotowoltaiką, ale może prowadzić do uszkodzenia urządzeń przyłączonych w instalacjach sąsiednich). W związku z tymi konsekwencjami, oba te sposoby są niepoprawne. Dlatego bardzo istotne jest, aby już na etapie projektowania instalacji fotowoltaicznej wyznaczyć wartość mocy źródła możliwą do przyłączenia w danych punkcie sieci. W tym celu niezbędna jest znajomość wartości impedancji pętli zwarciovych w danym układzie. Pomimo iż na rynku dostępnych jest wiele urządzeń służących do pomiaru wartości tej wielkości, to wraz z dr. inż. Grzegorzem Hołdyńskim opracowaliśmy sposób i

układ do pomiaru wartości zespolonej impedancji pętli zwarciowej w instalacjach elektrycznych o napięciu znamionowym nieprzekraczającym 1 kV. Sposób pomiaru wartości zespolonej impedancji pętli zwarciowej, oparty został na pomiarze wartości skutecznej napięcia w badanej sieci. Układ do pomiaru wartości zespolonej impedancji pętli zwarciowej, charakteryzował się tym, że do zacisków wejściowych przyłączone zostały gałęzie obciążenia pomiarowego, składające się z impedancji obciążeniowej i wyłącznika sterowanego przez jednostkę centralną sterująco-pomiarowo-liczącą oraz wskaźnika wyniku pomiaru. Zaproponowany sposób i układ został opatentowany pod numerem Pat.233169. Następnie wykonany został prototyp, umożliwiający zbadanie poprawności działania zaproponowanego układu pomiarowego w praktyce. Aktualnie trwają prace nad ograniczeniem błędu pomiarowego w zaproponowanym rozwiązaniu – wstępne wyniki badań zostały zaprezentowane w 2021 roku na konferencji TEFEN i spotkały się z aprobatą słuchaczy. Równolegle trwają prace badawcze i przygotowania do opatentowania układu, który można będzie montować w gospodarstwach wyposażonych w instalację fotowoltaiczną i który będzie mierzył i porównywał z wartościami wymaganymi napięć oraz nie dopuszczał do przekraczania ich wartości dopuszczalnych (ma to się odbywać bez zagrożenia uszkodzeń urządzeń przyłączonych do analizowanego układu lub w jego bezpośrednim sąsiedztwie). Efektem powyższego zakresu badań naukowych były liczne artykuły publikowane zarówno w czasopismach naukowych (Energies, Sustainability, Przegląd Elektrotechniczny, Wiadomości Elektrotechniczne) jak i w czasopiśmie branżowym (Elektr.info), co pozwoliło dotrzeć z wynikami badań do szerokiego grona naukowców oraz ludzi związanych z projektowaniem, wykonaniem i eksploatacją odnawialnych źródeł energii (spis tych publikacji został przedstawiony w punkcie 2 i 4 załącznika nr III).

W swojej karierze zawodowej odbyłem następujące studia podyplomowe oraz szkolenia:

- Szkolenie: Niepełnosprawność na uczelni. Świadomość i wsparcie – 2022 r.,
- Studia podyplomowe w zakresie CSR - Corporate Social Responsibility – 2021 -2022 r. - Wyższa Szkoła Kadr Menedżerskich Filia w Białymstoku,
- Szkolenie i dyplom: PRINCE2 Foundation Certificate in Project Management – 2022 r.,
- Szkolenie: Korupcja w biznesie – 2020 r.,
- Szkolenie: Korupcja w administracji publicznej – 2020 r.,
- Szkolenie: Przeciwdziałanie korupcji – 2020 r.,

- Studia podyplomowe w zakresie MBA- Master of Business Administration – 2018-2019 r. – Uczelnia Jańskiego w Łomży,
- Szkolenie: Leadership, czyli jak być Przywódcą – 2018 r.,
- Szkolenie: Efektywna organizacja pracy – 2018 r.,
- Szkolenie: Efektywna komunikacja i współpraca w zespołach – 2018 r.,
- Szkolenie: Komunikacja lidera – 2018 r.,
- Szkolenie: Perswazja i socjotechniki wywierania wpływu – 2017 r.,
- Szkolenie: Dydaktyka akademicka w praktyce, czyli jakich kompetencji potrzebuje nauczyciel akademicki – 2017 r.,

Ponadto odbyłem staż przemysłowy w firmie „Eltron” Jan Klewinowski w Łapach zajmującej się projektowaniem i wykonawstwem instalacji elektroenergetycznych i sieci elektroenergetycznych - 12.04. – 30.09.2010 r.

W załączniku 4 zawarłem kopie dokumentów poświadczających wybrane osiągnięcia

.....
Zbigniew Skibko

(podpis wnioskodawcy)