PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

OPEN ACCESS

Marek SUPRONIUK[1], Zbigniew SKIBKO[2], Bogdan PERKA[3], Piotr PAZIEWSKI[4], Karol PIWOWARSKI[5]

ORCID: [1]0000-0003-3723-6116, [2]0000-0002-5238-6019, [3]0000-0003-4762-4833, [4]0000-0002-6566-4620, [5]0000-0001-5922-2706

DOI: XXXXXXXXXX

Problemy z mocą bierną przy niewłaściwym wysterowaniu urządzeń biogazowni

Problems with reactive power under improper control steering of biogas plant equipmentu

[1] dr hab. inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, 00-908 Warszawa 46 ul. Gen. S. Kaliskiego 2, e-mail: marek.suproniuk@wat.edu.pl

[2] dr hab. inż. Zbigniew Skibko, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: z.skibko@pb.edu.pl

[3] dr inż. Bogdan Perka, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, 00-908 Warszawa 46, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, e-mail: bogdan.perka@wat.edu.pl

[4] mgr inż. Piotr Paziewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, 00-908 Warszawa 46, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, e-mail: piotr.paziewski@wat.edu.pl

[5] mgr inż. Karol Piwowarski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, 00-908 Warszawa 46, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, e-mail: karol.piwowarski@wat.edu.pl

Adres do korespondencji: marek.suproniuk@wat.edu.pl

Streszczenie: Artykuł porusza problem jakości energii elektrycznej w biogazowniach, koncentrując się na zjawisku nieoptymalnego sterowania urządzeniami elektroenergetycznymi. Wykazano, że niewłaściwe wysterowanie generatorów, falowników i układów kompensacji prowadzi do nadmiernych przepływów mocy biernej, asymetrii napięć oraz obecności wyższych harmonicznych. Skutkuje to obniżeniem efektywności pracy instalacji, wzrostem strat przesyłowych i ryzykiem przeciążeń transformatorów. Autorzy rekomendują wdrożenie układów kompensacyjnych, filtrów harmonicznych oraz lepszego bilansowania obciążeń fazowych w celu poprawy jakości energii i stabilności pracy biogazowni.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, biogazownia, problemy z mocą bierną

Abstract: This article addresses the issue of power quality in biogas plants, focussing on the phenomenon of incorect control of electrical power devices. The improper control of generators, inverters, and compensation systems has been shown to lead to excessive reactive power flows, voltage asymmetry, and the presence of higher harmonics. This results in reduced installation efficiency, increased transmission losses, and the risk of transformer overloads. The authors recommend the implementation of compensation systems, harmonic filters, and improved phase load balancing to enhance power quality and ensure stable operation of biogas plants.

Keywords: power quality, biogas plant, reactive power issues

Wstęp

W dobie intensywnego rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) biogazownie zyskują coraz większe znaczenie jako stabilne źródło energii elektrycznej i cieplnej, niezależne od warunków atmosferycznych. Jako instalacje przetwarzające biomasę w biogaz, a następnie w energię, stanowią ważny element strategii dekarbonizacji sektora energetycznego. Jednak pomimo licznych korzyści środowiskowych i energetycznych, eksploatacja biogazowni niesie ze sobą szereg wyzwań technicznych. Jednym z istotnych, lecz często niedocenianych problemów, jest niewłaściwe zarządzanie mocą bierną wynikające z błędnego lub nieoptymalnego wysterowania urządzeń energetycznych i elektroenergetycznych w obrębie instalacji [1 – 3].

Moc bierna, chociaż nie wykonuje użytecznej pracy, odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego. Umożliwia powstawanie pól elektromagnetycznych w urządzeniach takich jak transformatory, silniki czy generatory, ale jej nadmiar lub niedobór może prowadzić do licznych konsekwencji technicznych oraz ekonomicznych. W przypadku biogazowni, których układy elektroenergetyczne cechują się dużą złożonością, niewłaściwe wysterowanie falowników, przekształtników czy systemów sterowania może skutkować powstawaniem znacznych

przepływów mocy biernej. W skrajnych przypadkach prowadzi to do przeciążeń linii, spadków napięcia, strat przesyłowych, a także do pogorszenia jakości energii dostarczanej do sieci.

Zjawisko to jest szczególnie niebezpieczne w kontekście współpracy biogazowni z krajową siecią elektroenergetyczną, której stabilność i jakość zależą od odpowiedniego bilansu mocy czynnej i biernej. Nieodpowiednie wysterowanie układów automatyki może powodować rozregulowanie tego bilansu, co z kolei prowadzi do sankcji finansowych dla operatorów, a nawet – w ekstremalnych przypadkach – do automatycznego odłączenia jednostki od sieci przez zabezpieczenia sieciowe. Dlatego zagadnienia związane z właściwym sterowaniem i kompensacją mocy biernej powinny stanowić jeden z priorytetów przy projektowaniu, uruchamianiu oraz eksploatacji biogazowni [4, 5].

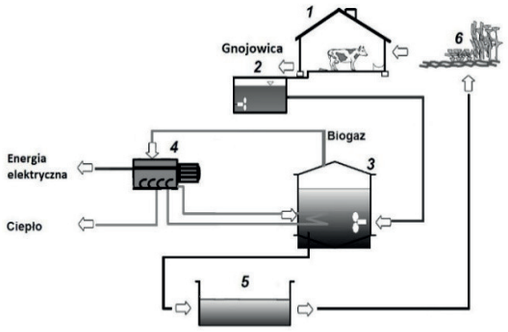
Celem niniejszego artykułu jest analiza problematyki mocy biernej w biogazowniach, ze szczególnym uwzględnieniem skutków niewłaściwego wysterowania urządzeń. W świetle zaostrzających się norm technicznych i coraz większego nacisku na jakość energii elektrycznej, kwestia optymalizacji mocy biernej w instalacjach biogazowych staje się tematem nie tylko aktualnym, ale i koniecznym do zaadresowania zarówno przez inżynierów, jak i operatorów tych obiektów.

Budowa i zasada działania biogazowni rolniczej

Produkcja biogazu stanowi złożony, wieloetapowy proces technologiczny, integrujący elementy mikrobiologii, chemii procesowej oraz inżynierii środowiska i energetyki. Typowa biogazownia rolnicza (rys. 1) składa się z następujących podstawowych bloków:

- zbiornika na gnojowicę,
- komory fermentacyjnej ze zbiornikiem na biogaz,
- agregatu kogeneracyjnego,
- zbiornika na poferment.

Zasadę działania biogazowni rolniczej można podzielić na trzy podstawowe etapy. Etap początkowy obejmuje dostarczenie substratów organicznych do układu technologicznego. Źródłem surowców są najczęściej odpady pochodzenia rolniczego (gnojowica, obornik, resztki roślinne), odpady przemysłu spożywczego (serwatka, wywary, tłuszcze) oraz odpady komunalne (frakcje organiczne odpadów biodegradowalnych, osady ściekowe). Kluczowym parametrem kwalifikującym substrat do fermentacji jest zawartość łatwo biodegradowalnej materii organicznej (związków węgla organicznego – COD, BZT5).



Rys. 1. Schemat technologiczny biogazowni rolniczych. 1 – obiekt inwentarski, 2 – zbiornik na gnojowicę, 3 – komora fermentacyjna ze zbiornikiem na biogaz, 4 – agregat kogeneracyjny, 5 – zbiornik na poferment, 6 – pole uprawne [6]

W kolejnym etapie następuje przygotowanie wsadu: substraty są poddawane operacjom mechanicznym (mieszanie, rozdrabnianie, homogenizacja), a następnie transportowane do komory fermentacyjnej (fermentatora). Fermentor stanowi główny reaktor biologiczny, w którym w warunkach beztlenowych i w kontrolowanej temperaturze (typowo: 35–38 °C w procesach mezofilowych) zachodzi proces fermentacji metanowej. Proces ten składa się z kilku faz mikrobiologicznych: hydrolizy, acidogenezy, acetogenezy i metanogenezy. W ich wyniku złożona materia organiczna ulega rozkładowi do prostszych związków, czego efektem jest produkcja biogazu – mieszaniny gazowej o zawartości metanu (CH_4) w zakresie 50–75%, dwutlenku węgla (CO_2) 25–45% oraz śladowych ilości siarkowodoru (H_2S), amoniaku (NH_3) i pary wodnej. Czas retencji wsadu w fermentorze wynosi zazwyczaj 20–40 dni, w zależności od składu substratu i warunków technologicznych. Wydzielony biogaz zbierany jest w górnej strefie fermentora lub w zewnętrznych zbiornikach buforowych, po czym poddawany jest procesom oczyszczania – usuwania zanieczyszczeń gazowych (przede wszystkim siarkowodoru i pary wodnej), w celu ochrony układów kogeneracyjnych i infrastruktury przesyłowej [7, 8].

Oczyszczony biogaz może być wykorzystywany do zasilania jednostek kogeneracyjnych (silników gazowych lub turbin), gdzie następuje skojarzona produkcja energii elektrycznej i cieplnej (CHP – Combined Heat and Power). Alternatywnie, po dalszym procesie uszlachetniania (np. techniką PSA, absorpcji aminowej lub membranowej), biogaz może zostać wtłoczony do sieci gazowej jako biometan [9].

Końcowym etapem procesu jest zagospodarowanie pofermentu – pozostałości po fermentacji. Poferment, ze względu na wysoką zawartość składników pokarmowych (azotu, fosforu, potasu), znajduje zastosowanie jako nawóz organiczny w rolnictwie. W ten sposób instalacja biogazowa realizuje założenia go-

spodarki o obiegu zamkniętym – wytwarzając energię przy jednoczesnym wykorzystaniu produktów ubocznych w rolnictwie.

Do zalet biogazowni rolniczych można zaliczyć stabilną produkcje prądu i ciepła niezależnie od pogody oraz obniżenie kosztów utylizacji surowców czy możliwość otrzymania dopłat za przyjęcie odpadów. Poferment stosowany do nawożenia gleby poprawia jej żyzność powodując minimalizację stosowania nawozów sztucznych. Ciepło odzyskiwane z silnika i spalin jest wykorzystywane do zasilania fermentatorów czy ogrzania budynków. Dodatkowo do zalet biogazowni można zaliczyć również wzrost samowystarczalności energetycznej gospodarstw czy wsparcie lokalnej społeczności powodujące powstanie nowych miejsc pracy do ich obsługi.

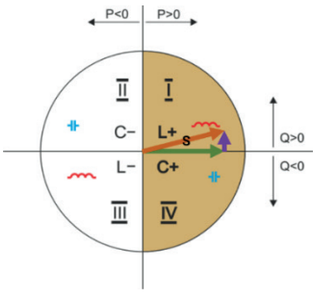
Do wad biogazowni rolniczych można zaliczyć wysokie koszty inwestycyjne czy wymagania techniczne wymagające konieczności stałego monitoringu parametrów takich jak pH czy temperatura, ze względu na stabilność procesu fermentacji. Uciążliwości środowiskowe takie jak zapachy, hałas, ryzyka związane z awarią powodują, że instalacje biogazowni powinny być lokalizowane z uwzględnieniem otoczenia [10].

Metodyka pomiarowa

Biogazownia, podobnie jak każda instalacja OZE, aby mogła współpracować z siecią elektroenergetyczną, musi spełniać określone wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej. Do najczęściej występujących problemów należą: niewłaściwe sterowanie generacją i przepływem mocy biernej, niesymetria napięć i prądów oraz wprowadzanie zniekształceń w postaci harmonicznych. Skutkami tych zjawisk mogą być przeciążenia transformatorów, niepożądane zadziałania zabezpieczeń napięciowych i częstotliwościowych, a przede wszystkim – nałożenie opłat przez operatorów sieci za przekroczenie dopuszczalnego współczynnika tgφ (≤ 0,4).

Celem pomiarów jest ocena jakości energii elektrycznej w instalacji, identyfikacja zakłóceń oraz zapewnienie zgodności z obowiązującymi normami (PN-EN 50160, PN-EN 61000). Pomiary umożliwiają wykrycie problemów związanych z napięciem, prądem, obecnością harmonicznych oraz ocenę współczynnika mocy. Finalnym etapem jest zaplanowanie odpowiednich działań korygujących, takich jak kompensacja mocy biernej czy filtracja zakłóceń.

Zakres pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej obejmuje szereg kluczowych wielkości, które pozwalają na kompleksową ocenę stanu instalacji.



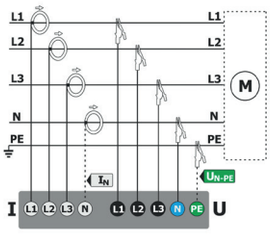
Rys. 2. Energie czterokwadrantowe [11]

Przede wszystkim rejestrowane są wartości skuteczne napięcia i prądu (RMS) w każdej fazie, a także częstotliwość, której stabilność jest istotna dla prawidłowego działania urządzeń. Istotnym parametrem jest również współczynnik mocy (cos φ), który odzwierciedla efektywność energetyczną systemu. Dodatkowo analizowana jest moc czynna (P), bierna (Q), pozorna (S) oraz energia liczona czterokwadrantowo (rysunek 2), co pozwala na ocenę bilansu energetycznego instalacji. W ramach pomiarów uwzględnia się również obecność harmonicznych napięcia i prądu, zarówno w postaci całkowitego współczynnika THD, jak i poszczególnych rzędów harmonicznych. Rejestrowane są także wahania napięcia, migotanie światła, a także asymetria napięć i prądów, która może świadczyć o nierównomiernym obciążeniu faz. Wszystkie te parametry są niezbędne do prawidłowej diagnostyki jakości energii elektrycznej i planowania ewentualnych działań korygujących.

Większość dostępnych na rynku cyfrowych przyrządów pomiarowych do analizy mocy w układach trójfazowych określa jej wartości zgodnie z definicją Budeanu wg. której moc pozorną można rozłożyć na moc czynną P, bierną Q i moc odkształcenia D związane ze sobą poprzez zależność:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{1}$$

Lokalizacja punktów pomiarowych w instalacji elektroenergetycznej biogazowni powinna być starannie dobrana, aby uzyskać pełny obraz jakości energii elektrycznej. Pomiarów dokonuje się przede wszystkim w punkcie przyłączenia do sieci, który stanowi granicę odpowiedzialności między biogazownią a operatorem systemu dystrybucyjnego. Kolejnym istotnym miejscem są główne rozdzielnie średniego i niskiego napięcia (SN i nN), gdzie zbiegają się główne ciągi zasilające i odbiorcze. Dodatkowo, pomiary warto prowadzić bezpośrednio przy dużych odbiornikach energii, takich jak silniki, falowniki czy agregaty, które mogą generować zakłócenia i wpływać na lokalną jakość energii. Rysunek 3 przedstawia sposób podłączenia analizatora jakości energii elektrycznej.



Rys. 3. Sposób podłączenia analizatora jakości energii elektrycznej PQM-707– układ trójfazowy 4-przewodowy [12]

Do realizacji pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej wykorzystuje się przede wszystkim analizatory jakości energii elektrycznej. Urządzenia takie jak Sonel PQM umożliwiają rejestrację szerokiego zakresu parametrów. Dzięki wysokiej precyzji i możliwości długoterminowej rejestracji, analizatory te stanowią podstawowe narzędzie w diagnostyce i ocenie jakości energii w instalacjach elektroenergetycznych.

Proces pomiaru parametrów jakości energii elektrycznej rozpoczyna się od etapu przygotowawczego, który obejmuje wybór odpowiednich punktów pomiarowych w instalacji, sprawdzenie bezpieczeństwa pracy urządzeń oraz właściwą konfigurację analizatora – w tym ustawienie zakresów pomiarowych, częstotliwości próbkowania oraz czasu rejestracji danych.

Następnie przeprowadza się rejestrację danych, która powinna trwać nieprzerwanie przez co najmniej 7 dni, co pozwala uchwycić pełen cykl pracy instalacji. Dane mogą być zapisywane lokalnie w pamięci urządzenia lub przesyłane zdalnie do systemu analitycznego.

Po zakończeniu pomiarów następuje analiza zebranych danych. Obejmuje ona porównanie wyników z obowiązującymi normami (PN-EN 50160), identyfikację ewentualnych przekroczeń i anomalii oraz przygotowanie raportu zawierającego wnioski i rekomendacje.

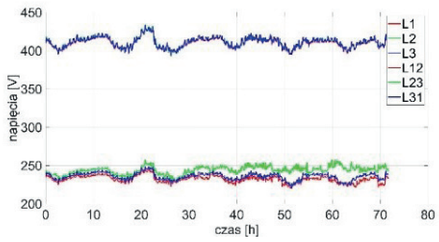
Na podstawie wyników analizy można zaplanować i wdrożyć odpowiednie działania korygujące. Mogą one obejmować dobór i instalację urządzeń do kompensacji mocy biernej, zastosowanie filtrów harmonicznych, optymalizację rozruchów urządzeń energochłonnych, a także wdrożenie systemów monitoringu online, które umożliwiają bieżącą kontrolę jakości energii i szybką reakcję na pojawiające się zakłócenia.

Analiza pomiarów

Badania przeprowadzono dla biogazowni wyposażonej w dwa generatory spalinowe OTTO o mocy znamionowej 20 kW każdy. Znamionowo powinny pracować oba generatory, jednakże, ze względu na niską wydajność substratu, w analizowanym okresie wystąpił niedobór wytworzonego biogazu, co umożliwiło pracę tylko jednej jednostki wytwórczej. Substratem wykorzystywanym w procesie wytwarzania energii jest gnojowica pochodząca z obory krów mlecznych zlokalizowanej na terenie gospodarstwa.

Analiza zarejestrowanych pomiarów przeprowadzonych podczas pracy biogazowni wykazała występowanie zjawiska niesymetrii napięć w instalacji (rysunek 4). Zjawisko to może być wynikiem kilku czynników, do których najczęściej należą:

- brak lub niewłaściwe uziemienie punktu neutralnego generatora – w takiej sytuacji może dochodzić do tzw. „dryfowania" punktu neutralnego, co skutkuje nierównomiernym rozkładem napięć fazowych względem przewodu neutralnego, mimo zachowania równych napięć międzyfazowych;
- niesymetryczne obciążenie odbiorów wewnętrznych – w biogazowniach często stosowane są urządzenia takie jak silniki, falowniki czy pompy, które obciążają tylko wybrane fazy, prowadząc do nierównowagi w systemie zasilania;
- nieprawidłowa praca układów kompensacji mocy biernej – błędne działanie baterii kondensatorów, dławików lub regulatorów napięcia może powodować fluktuacje napięć fazowych, szczególnie gdy kompensacja nie jest równomiernie rozłożona między fazami.

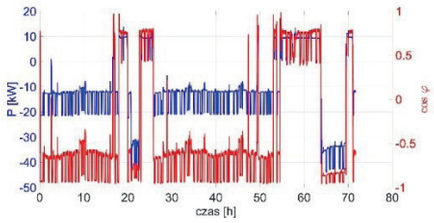


Rys. 4. Przebiegi czasowe napięć fazowych i przewodowych

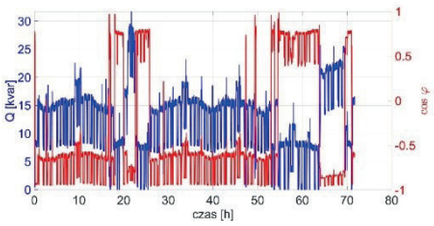
Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi czasowe współczynnika mocy (cos φ) oraz mocy czynnej, natomiast rysunek 6 ilustruje zależność pomiędzy cos φ a mocą bierną. Warto zauważyć, że znak współczynnika mocy jest umowny – przyjmuje wartość dodatnią w przypadku poboru mocy (praca odbiorcza) oraz ujemną w przypadku oddawania mocy do sieci (praca generacyjna).

Niepokojącym zjawiskiem jest natomiast utrzymująca się dodatnia moc bierna przez cały okres rejestracji. Może to świadczyć o niewłaściwym wysterowaniu generatora, a konkretnie o jego niedowzbudzeniu, co prowadzi do nieefektywnej pracy układu i może skutkować dodatkowymi opłatami za przekroczenie dopuszczalnych wartości parametrów jakości energii.

Rysunek 7 przedstawia analizę widma harmonicznych prądu. Zarejestrowane dane wskazują na podwyż-



Rys. 5. Przebiegi czasowe cosφ i mocy czynnej



Rys. 6. Przebiegi czasowe cosφ i mocy biernej

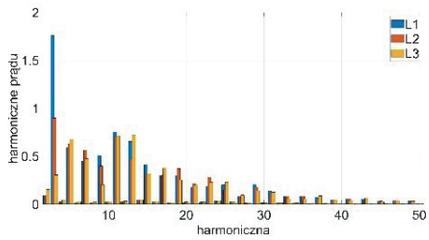
szone wartości wyższych harmonicznych, szczególnie dla trzeciej, piątej, jedenastej i trzynastej. Obecność tych składowych sugeruje działanie nieliniowych odbiorników w instalacji, takich jak falowniki, zasilacze impulsowe czy przekształtniki energoelektroniczne, które są powszechnie stosowane w biogazowniach.

Podwyższony poziom harmonicznych może prowadzić do szeregu niekorzystnych zjawisk, takich jak przegrzewanie transformatorów, zakłócenia pracy urządzeń automatyki, zwiększone straty energii czy błędne działanie zabezpieczeń. Szczególnie niebezpieczna jest obecność trzeciej harmonicznej, która – jako składowa współbieżna – sumuje się w przewodzie neutralnym, mogąc prowadzić do jego przeciążenia. Taka sytuacja stanowi realne zagrożenie dla bezpieczeństwa i niezawodności całej instalacji.

Podsumowanie i wnioski

Należy zaznaczyć, że problemy wynikające z niewłaściwej pracy odnawialnych źródeł energii są w większości przypadków zauważalne dopiero po analizie rachunków za energię elektryczną. Objawiają się one między innymi brakiem oczekiwanych oszczędności, nieproporcjonalnym wzrostem kosztów zakupu energii z sieci lub niewystarczającym stopniem autokonsumpcji energii wytwarzanej lokalnie. W praktyce oznacza to, że użytkownicy często nie dostrzegają odchyleń w bieżącej eksploatacji instalacji, ponieważ urządzenia działają pozornie prawidłowo, a ewentualne straty ujawniają się dopiero w rozliczeniach finansowych.

Do najczęściej występujących przyczyn tego zjawiska należą: nieoptymalne sterowanie pracą źródeł , nieprawidłowa konfiguracja systemu magazynowania energii lub błędne przyjęcie założeń dotyczących pro-



Rys. 7. Zarejestrowane harmoniczne prądu

filu zużycia w gospodarstwie. W konsekwencji instalacja może charakteryzować się obniżoną efektywnością energetyczną, co prowadzi do wydłużenia okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych.

W artykule przedstawiono aspekty nieoptymalnego sterowania urządzeniami technologicznymi biogazowni które mają wpływ na jakość energii elektrycznej w systemie. Autorzy przeprowadzili pomiary w punkcie przyłączenia biogazowni do sieci, analizując m.in. napięcia fazowe, współczynnik mocy oraz obecność wyższych harmonicznych prądu. Zaobserwowano znaczne nierównomierności napięć fazowych, wskazujące na asymetryczne obciążenie faz. Prezentowane przebiegi obrazują występowanie znacznej mocy biernej, obniżającej efektywność energetyczną układu. Dodatkowo stwierdzono obecność wyższych harmonicznych, szczególnie rzędów 3, 5 i 11, generowanych głównie przez falowniki i silniki asynchroniczne. Obecność tych zjawisk prowadzi do zwiększonych strat przesyłowych, ryzyka przeciążeń transformatorów oraz pogorszenia jakości napięcia w lokalnej sieci. Problemem jest także brak automatycznej kompensacji mocy biernej, co skutkuje dodatkowymi kosztami za przekroczenie dopuszczalnych parametrów jakości energii. Autorzy rekomendują zastosowanie układów kompensacyjnych, filtrów harmonicznych oraz dokładniejszego bilansowania obciążeń międzyfazowych. Wskazują, że poprawa jakości sterowania urządzeniami technologicznymi może znacząco zwiększyć stabilność pracy biogazowni i ograniczyć jej negatywny wpływ na sieć.

Przedstawione w pracy analizy i wnioski dotyczą konkretnej biogazowni, ale z takimi samymi problemami mierzy się wielu innych posiadaczy tego rodzaju OZE w krajju. Bez względu na to, czy będą pracowały oba generatory, czy też tylko jeden, problemy z mocą bierną będą porównywalne (skalowalne). Na ilość generowanej mocy biernej nie będzie miał też wpływu skład wykorzystywanego w danej biogazowni substratu.

Praca była finansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu badawczego UGB/22-060/2025/WAT

Przyjęto: XXXXXX, **zaakceptowano:** XXXXXX, **opublikowano:** XXXXXX

LITERATURA

[1] Golkar M. A., Reactive power control in distribution systems by using advanced techniques, IEEE Xplore; (Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 2011
[2] Kumar C., Lakshmanan M., Jaisiva S., Prabaakaran K., Barua S., Fayek H. H., Reactive power control in renewable rich power grids: A literature review, IET Renewable Power Generation, 2023, DOI: 10.1049/rpg2.12674 Golkar M. A., Reactive power control in distribution systems by using advanced techniques, IEEE Xplore; (Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 2011
[3] Wiatr J., Eksploatacja urządzeń elektroenergetycznych, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013
[4] Zhang K., Zhou B., Li C., Voropai N.,. Li J, Huang W, Wang T., Dynamic Modeling and Coordinated Multi-Energy Management for a Sustainable Biogas-Dominated Energy Hub, Energy, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2020.119640Wiatr J., Eksploatacja urządzeń elektroenergetycznych, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013
[5] Kirchner D., Thrän D., Integrating Biogas Plants into Microgrids for Bridging Temporary Power Supply Interruptions, Chemical Engineering & Technology, vol. 42, nr 5, 2019, DOI: 10.1002/ceat.201800154
[6] Skibko Z., Współpraca biogazowni rolniczych z systemem elektroenergetycznym, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy w Falentach, 2022
[7] Ram N.R., Nikhil G.N., A critical review on sustainable biogas production with focus on microbial-substrate interactions: bottlenecks and breakthroughs, Bioresource Technology Reports, Vol. 19, September 2022, 101170, DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101170
[8] Pilarski K., Wydajność procesu fermentacji metanowej w biogazowniach rolniczych, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 2019
[9] Tomczak W., Gryta M., Daniluk M., Żak S., Biogas Upgrading Using a Single-Membrane System: A Review, Membranes, 2023, DOI: 10.3390/membranes14040080
[10] Jameel M. K. and all: Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review, Results in Chemistry, Vol. 7, January 2024, 101549, DOI: 10.1016/j.rechem.2024.101549
[11] materiały szkoleniowe firmy Sonel dostępne na stronie internetowej https://sonel.pl/pl/centrum-wiedzy/teoria-pomiarow/abc-jakosci-zasilania/energia-liczona-czterokwadrantowo-skutki-pomiary-analiza/
[12] instrukcja obsługi Sonel PQM-707, https://sonel.pl/pl/produkt/analizator-jakosci-zasilania-sonel-pqm-707