

Analiza symulacyjna autonomicznej pracy lokalnej jednostki wytwórczej zakładu górniczego w przypadku rozległej awarii w systemie elektroenergetycznym

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwość zastosowania pracy autonomicznej w strukturze sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego. Rozwiązanie to ma zwiększyć pewność zasilania obiektów podstawowych zakładu górniczego, w szczególności w przypadku wystąpienia awarii typu blackout w systemie elektroenergetycznym.

Abstract. The paper presents possibility of applications of island operation in the power network structure of coal mining. The solution is to improvement of electricity supply reliability in important mining objects, in particular in the event of a failure in the power system such as blackout. (Simulative analysis of autonomous operation of the power generator in the mining plant under the wide catastrophic failure of the power system).

Słowa kluczowe: niezawodność zasilania, blackout, praca autonomiczna.

Keywords: power supply reliability, blackout, autonomous operation

Wstęp

Ciągłość zasilania obiektów podstawowych zakładu górniczego jest podstawowym czynnikiem gwarantującym bezpieczeństwo dla pracującej załogi. Wymagania w zakresie ciągłości zasilania zakładów górniczych są sformułowane w przepisach górniczych, w tym w Rozporządzeniu Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych [1]. Wymagania te wskazują jednoznacznie na konieczność występowania dwóch niezależnych dróg zasilania w energię elektryczną. Podkreśla się, że jedna droga zasilania powinna zapewnić pokrycie pełnego zapotrzebowania na moc zakładu górniczego, a druga – rezerwowa – zapotrzebowanie minimalne, tzn. gwarantować ciągłość zasilania obiektów podstawowych zakładu górniczego warunkujących bezpieczeństwo pracującej załogi.

Zgodnie z §29 [1] do podstawowych obiektów zakładu górniczego, dla których powinna być realizowana podwyższona ciągłość zasilania, zalicza się:

- górnicze wyciągi szybowe w szybach i szybikach,
- stacje wentylatorów głównych,
- stacje odmetanowania,
- urządzenia i układy głównego odwadniania wraz z rozdzielniami zasilającymi,
- główne stacje sprężarek,
- wewnętrzne instalacje i sieci elektroenergetyczne wysokiego i średniego napięcia, zasilające podstawowe obiekty i urządzenia na powierzchni.

W zależności od skutków, jakie powoduje przerwa w zasilaniu od strony systemu elektroenergetycznego (SEE), odbiorniki energii elektrycznej zakładu górniczego dzieli się zwykle na trzy kategorie [2]. Do najważniejszych odbiorników energii elektrycznej, tzn. do odbiorników, dla których przerwa w zasilaniu może wywołać bezpośrednie zagrożenia dla życia pracującej załogi, zalicza się:

- wentylatory głównego przewietrzania,
- pompy głównego odwadniania,
- stacje odmetanowania,
- systemy łączności i bezpieczeństwa,
- maszyny wyciągowe do jazdy ludzi.

Zakłady górnicze posiadają stacje odmetanowania, dotyczy to szczególnie zakładów zaliczonych do IV kategorii zagrożenia metanowego. Metan ten niejednokrotnie wykorzystuje się jako paliwo do zasilania lokalnej jednostki wytwórczej. Przy odpowiednim przygotowaniu struktury

elektroenergetycznej sieci wewnętrznej zakładu górniczego, generator taki może stanowić własne, autonomiczne źródło energii elektrycznej, które można traktować jako dodatkowe awaryjne źródło zasilania dla wybranych odbiorów zakładu górniczego. Przeprowadzone rozważania wskazują, że tego typu rozwiązanie w znacznym stopniu przyczyniłoby się do zwiększenia pewności zasilania w energię elektryczną obiektów podstawowych. Lokalna jednostka wytwórcza energii elektrycznej pracująca w strukturze zakładu górniczego, w przypadku pełnej utraty zasilania od strony SEE (np. black-out'u grożącego utratą zasilania podstawowego oraz rezerwowego zakładu górniczego), może pracować na wydzieloną wyspę sieciową, zasilając np. wybrane podstawowe obiekty zakładu górniczego.

Koncepcja pracy autonomicznej lokalnej jednostki wytwórczej w ramach zakładu górniczego

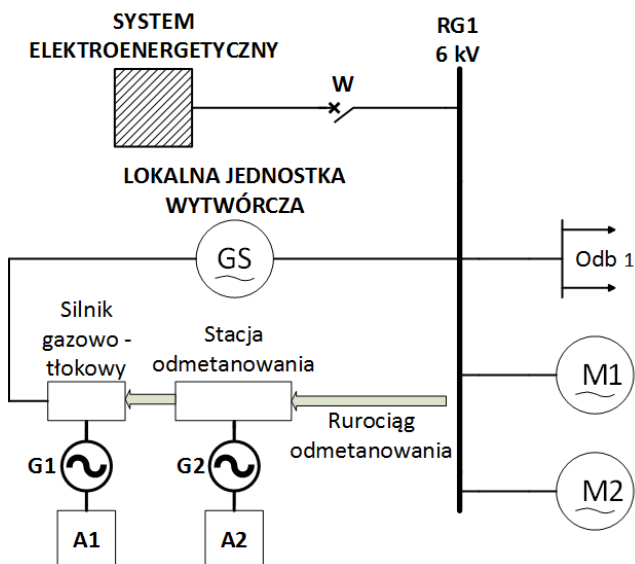
Praca wyspowa sieci elektroenergetycznej występuje, gdy wydzielony fragment sieci pracuje bez połączenia z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym. Układ taki powstaje wskutek całkowitego wydzielenia się ze „sztywnego” SEE pewnej struktury topologicznej i funkcjonalnej z aktualnie pracującymi generatorami (generatorem) energii elektrycznej oraz odbiorami [3]. Przejście do pracy wyspowej wydzielonego fragmentu sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego w przypadku blackout'u powinno zapewnić zasilanie najistotniejszych obiektów podstawowych warunkujących bezpieczeństwo pracy górników. W przeprowadzonych badaniach założono, że lokalną jednostką wytwórczą energii elektrycznej zasilającej układ pracy autonomicznej będzie metanowe źródło energii, które pracuje najczęściej w układzie kogeneracyjnym, wytwarzając energię elektryczną i ciepłą. Tego typu jednostki zwykle składają się z silnika spalinowego gazowo-tłokowego umieszczonego na wspólnej ramie z czterobiegowym, bezszczotkowym generatorem synchronicznym i osiągają moc znamionową do kilku MW [4]. Paliwem silnika spalinowego gazowego jest metan wydobyty z pokładów węgla za pomocą odpowiedniej instalacji i stacji odmetanowania.

Praca autonomiczna lokalnej jednostki wytwórczej zakładu górniczego wymaga wyposażenia tej jednostki i stacji odmetanowania w zasilanie rezerwowe, umożliwiające utrzymanie tej jednostki w pracy lub jej rozruch. Źródłami zasilania rezerwowego mogą być np. agregaty prądotwórcze A1, A2 (patrz rys.1).

Charakterystyka modelu układu sieci zakładu górniczego do badań symulacyjnych

Analizę możliwości przejścia do pracy autonomicznej lokalnej jednostki wytwórczej w strukturze sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego przeprowadzono m.in. w oparciu o badania symulacyjne. W tym celu wykorzystany został program MATLAB Simulink, który umożliwia wykonanie symulacji złożonych zjawisk o charakterze elektromagnetycznym i elektromechanicznym występujących w układach elektroenergetycznych. Korzystając z dostępnych w programie MATLAB Simulink bibliotek SimPowerSystems, stworzono model analizowanej sieci wraz z niezbędnymi obiektami elektroenergetycznymi m.in. w postaci lokalnej jednostki wytwórczej i silników dużych mocy podstawowych odbiorów zakładu górniczego.

W scenariuszach symulacyjnych rozpatrzono dwa przypadki przejścia do pracy autonomicznej lokalnej jednostki wytwórczej zakładu górniczego. Przypadek pierwszy dotyczy przejścia do pracy wyspowej w trybie ciągłym, tzn. bez wyłączenia lokalnej jednostki wytwórczej (patrz rys.1). W takim przypadku w chwili utraty zasilania od strony SEE następuje automatyczne wydzielenie fragmentu sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego z odbiorami dynamicznymi takimi jak silniki asynchroniczne (M1, M2) oraz statycznymi (Odb 1).

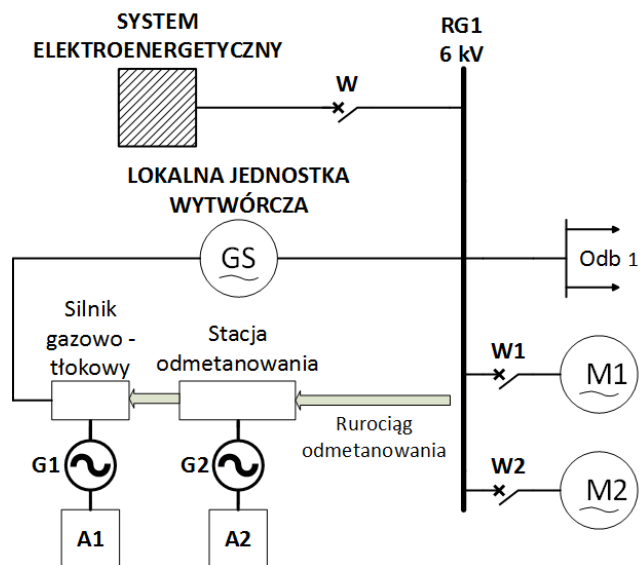


Rys.1. Schemat ideowy modelu sieci zakładu górniczego dla scenariusza przejścia do pracy autonomicznej w trybie ciągłym

Przypadek drugi dotyczy przejścia do pracy wyspowej w trybie z krótką przerwą. W momencie utraty zasilania od strony SEE występuje proces uruchomienia lokalnej jednostki wytwórczej. Po zakończeniu procesu rozruchu układ sterowania dokonuje sekwencyjnego (według przyjętej strategii) załączenia wytypowanych obiektów podstawowych, np. poprzez łączniki (W1, W2), załączając w pierwszej kolejności odbiorniki o najwyższym priorytecie ciągłości zasilania (patrz rys.2).

Analiza wyników badań symulacyjnych przejścia układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym

Prezentowane w niniejszym punkcie wybrane wyniki badań symulacyjnych dotyczą sytuacji przejścia układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym, tzn. przy ciągłej pracy lokalnej jednostki wytwórczej. Dzięki temu odbiorniki podstawowe kopalni nawet na chwilę nie powinny utracić zasilania w przypadku nagłego zaniku zasilania od strony SEE.



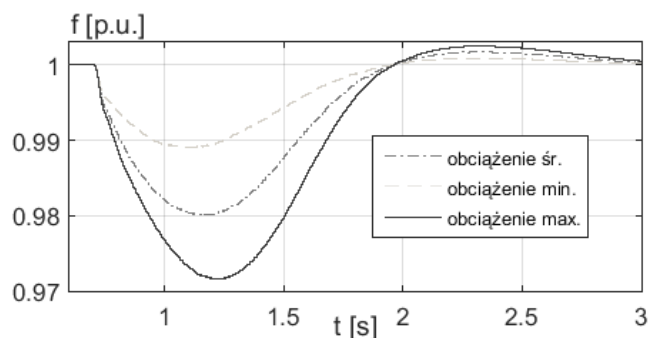
Rys. 2. Schemat ideowy modelu sieci zakładu górniczego dla scenariusza przejścia do pracy autonomicznej w trybie z krótką przerwą

W analizowanym przypadku utratę zasilania od strony SEE zamodelowano jako wyłączenie wyłącznika W (patrz rys. 1), co odpowiada wydzieleniu fragmentu sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego z SEE. W skład wydzielonego fragmentu sieci wchodzi: obiekty podstawowe, takie jak silnik wentylatora głównego przewietrzania (M1), silnik pompy głównego odwadniania (M2), stacja odmetanowania oraz systemy łączności i bezpieczeństwa (Odb 1). Parametry wymienionych obiektów podstawowych zestawiono w tab. 1.

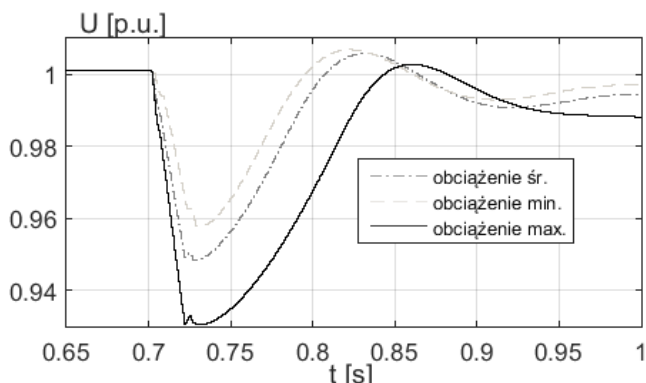
Tabela 1. Parametry znamionowe obiektów elektroenergetycznych zamodelowanych na rysunku 1

Obiekt	U [kV]	P [MW]
GS	6,0	2,8
M1	6,0	1,5
M2	6,0	1,0
Odb 1	6,0	0,3

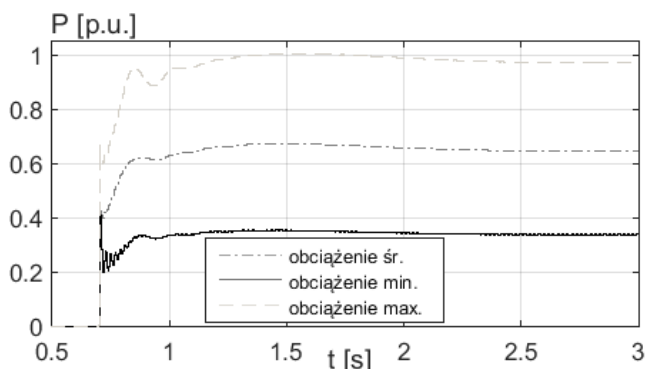
Wybrane przebiegi symulacyjne zarejestrowane dla analizowanego stanu pracy badanego układu przedstawiono na rys. 3 – 6. Zanik zasilania od strony SEE następował w 0,7 s symulacji. Badania symulacyjne wykonano dla trzech różnych poziomów obciążeń (maksymalnego, średniego, minimalnego) silników M1 i M2 (patrz tab. 2).



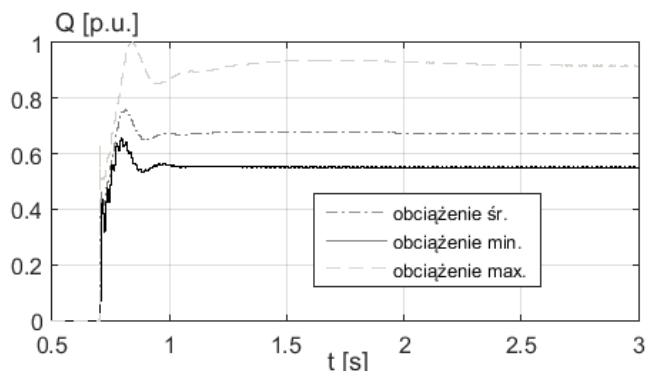
Rys.3. Przebiegi częstotliwości na zaciskach generatora GS towarzyszące przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym



Rys.4. Przebiegi wartości skutecznej napięcia na zaciskach generatora GS towarzyszące przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym



Rys.5. Przebiegi mocy czynnej generatora GS towarzyszące przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym



Rys.6. Przebiegi mocy biernej generatora GS towarzyszące przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym

Tabela 2. Wartości obciążeń na wale silników M1 oraz M2 dla analizowanych stanów pracy

obiekt	obciążenie		
	max.	śr.	min.
obciążenie M1, [MW]	1,50	1,00	0,50
obciążenie M2, [MW]	1,00	0,66	0,33

Tabela 3. Wybrane parametry generatora GS, w chwili przejścia do pracy autonomicznej

parametr	obciążenie		
	max.	śr.	min.
napięcie, U [kV]	5,58	5,7	5,76
częstotliwość, f [Hz]	48,50	49,00	49,45
moc czynna, P [MW]	2,83	1,88	1,15
moc bierna, Q [MVar]	2	1,5	1,32

Celem symulacji było przedstawienie działania układu regulacji wzbudzenia generatora (regulacja napięcia) oraz układu regulacji prędkości obrotowej silnika gazotłokowego (regulacja częstotliwości). Generator GS lokalnej jednostki wytwórczej w chwili przejścia zakładu górnego

do pracy autonomicznej pracuje bez obciążenia, a napięcie na jego zaciskach utrzymywane jest na poziomie znamionowym. Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, iż wartość obciążenia załączanych silników ma wpływ na przebieg wielkości elektrycznych występujących w wydzielonym fragmencie sieci i powoduje odkształcenia analizowanych parametrów jakości energii elektrycznej (napięcie i częstotliwości) wydzielonej wyspy (patrz tab. 3). Odkształcenia te jednak mieszczą się w dopuszczalnych granicach.

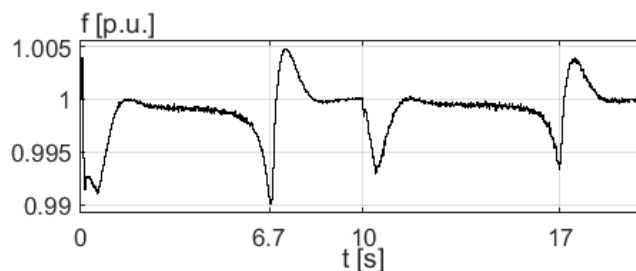
Analiza wyników badań symulacyjnych przejścia układu do pracy autonomicznej w trybie z krótką przerwą

Drugi scenariusz prezentowanych wyników badań symulacyjnych dotyczy przejścia do pracy autonomicznej lokalnej jednostki wytwórczej w trybie z krótką przerwą. Dla takiego scenariusza po zaniku zasilania od strony SEE odbiory są krótkotrwale pozbawione zasilania; dopiero wówczas rozpoczyna się proces uruchomienia lokalnej jednostki wytwórczej w celu zapewnienia rezerwowego zasilania. Po zakończeniu procesu rozruchu tej jednostki układ sterowania dokonuje sekwencyjnego (według zadanej kolejności) załączenia wytypowanych obiektów podstawowych, np. poprzez wyłączniki (W1, W2), załączając je w kolejności od odbiorów o najwyższym priorytecie ciągłości zasilania.

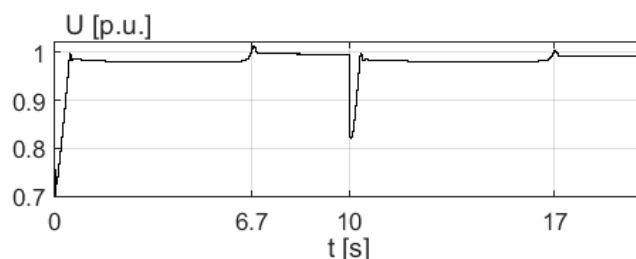
Kolejność oraz czasy załączeń odbiorów (patrz tab. 4) analizowanego fragmentu sieci są następujące:

- najpierw załączany jest wyłącznik W1, co skutkuje podaniem napięcia na silnik M1 (wentylator głównego przewietrzania) oraz na Odb 1 (stacja odmetanowania oraz układy łączności i bezpieczeństwa),
- następnie po czasie rozruchu silnika M1 załączany jest wyłącznik W2, co skutkuje podaniem napięcia na silnik M2 (pompa głównego odwadniania) (por. rys.2).

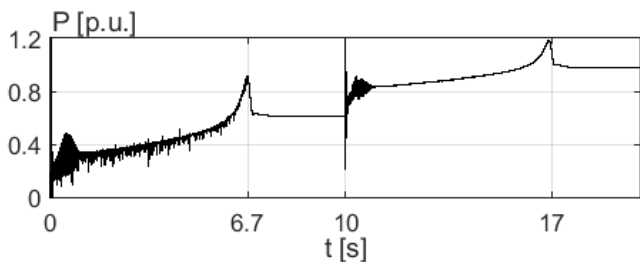
Wybrane przebiegi symulacyjne zarejestrowane dla analizowanego stanu pracy badanego układu przedstawiono na rys. 7 – 10.



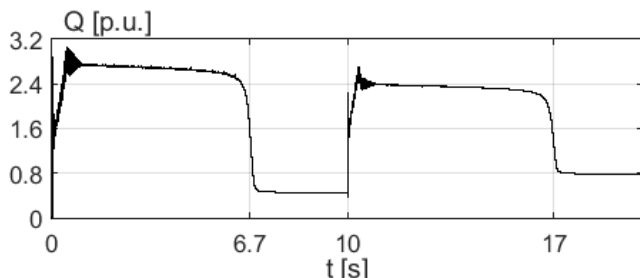
Rys.7. Przebieg częstotliwości na zaciskach generatora GS towarzyszący przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie z krótką przerwą



Rys.8. Przebieg wartości skutecznej napięcia na zaciskach generatora GS towarzyszący przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie z krótką przerwą



Rys.9. Przebieg mocy czynnej generatora GS towarzyszący przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie z krótką przerwą



Rys.10. Przebieg mocy biernej generatora GS towarzyszący przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie z krótką przerwą

Tabela 4. Czasy rozruchu silników M1 oraz M2

obiekt	czas rozruchu, [s]	
	początek	koniec
M1	0	6,7
M2	10	17

Tabela 5. Wybrane parametry generatora GS, w czasie rozruchu silników M1 oraz M2

obiekt	parametr	rozruch	
		początek	koniec
M1	napięcie, U [kV]	4,38	6,06
	częstotliwość, f [Hz]	49,55	49,5
	moc czynna, P [MW]	0,59	2,52
	moc bierna, Q [MVar]	6,04	1,02
M2	napięcie, U [kV]	4,92	6
	częstotliwość, f [Hz]	49,65	49,67
	moc czynna, P [MW]	2,35	3,28
	moc bierna, Q [MVar]	5,26	2,46

Rysunki 7 – 10 przedstawiają zachowanie się rozpatrywanego układu sieciowego podczas przejścia do pracy autonomicznej lokalnej jednostki wytwórczej zakładu górniczego (z punktu widzenia kryterium częstotliwościowego i napięciowego). Moment obciążenia podczas procesu rozruchu silników M1 oraz M2 zmienia się parabolicznie (tzw. charakterystyka wentylatorowa).

W analizowanym przypadku częstotliwość w całym procesie odbudowy układu waha się od wartości 49,5 Hz do 50,25 Hz (patrz tab. 5). Związane jest to m.in. z inercją procesu regulacji mocy czynnej w generatorze GS, w tym z działaniem układu regulacji prędkości obrotowej silnika gazowo-tłokowego tej jednostki wytwórczej. Natomiast po zakończonym procesie łączeniowym częstotliwość utrzymuje się na poziomie znamionowym. Wartość skuteczna napięcia w całym procesie odbudowy układu waha się od wartości 4,38 kV (rozruch silnika M1) do 6,06 kV (patrz tab. 5), co związane jest z inercją układu regulacji wzbudzenia generatora GS. W procesie zakończenia rozruchu silnika M1 następuje gwałtowny spadek pobieranej mocy biernej, co skutkuje podwyższeniem wartości skutecznej napięcia na zaciskach generatora GS. Natomiast po zakończonym procesie łączeniowym wartość skuteczna napięcia utrzymuje się na poziomie znamionowym.

Zatem – podobnie jak przy przejściu układu do pracy autonomicznej w trybie ciągłym – również w analizowanym przypadku do największych odchyłek przebiegów wielkości elektrycznych dochodzi podczas rozpoczęcia oraz zakończenia rozruchu silników. Odształcenia te jednak mieszczą się w dopuszczalnych granicach.

Wnioski

Przeprowadzone badania miały na celu symulacyjną weryfikację możliwości przejścia do pracy autonomicznej (z punktu widzenia kryterium częstotliwościowego i napięciowego) układu elektroenergetycznego składającego się z fragmentu sieci zakładu górniczego (wraz z urządzeniami o najwyższym priorytecie ciągłości zasilania) z lokalną jednostką wytwórczą. W związku z tym w ramach pierwszego etapu przeprowadzono analizę wyników badań symulacyjnych przejścia do pracy autonomicznej lokalnej jednostki wytwórczej w trybie ciągłym oraz w trybie z krótką przerwą. Na bazie przeprowadzonego rozeznania i uzyskanych wyników badań symulacyjnych stwierdza się, że jest możliwość zastosowania pracy autonomicznej analizowanego układu sieci z lokalną jednostką wytwórczą. Podkreśla się, że dla układu rzeczywistego należałoby jeszcze przeprowadzić szereg szczegółowych analiz dotyczących m.in. następujących kwestii:

- jakości napięcia zasilania i spełnienia odpowiednich warunków pracy obiektów podstawowych,
- poprawności identyfikacji i eliminacji zakłóceń zwarciovych w wydzielonym fragmencie sieci [5].

Z uwagi na możliwość wystąpienia rozległej awarii SEE tzw. blackout'u i tym samym długotrwałego pozbawienia zasilania zakładu górniczego rekomenduje się rozważenie możliwości przechodzenia wydzielonego fragmentu sieci wewnętrznej tego zakładu do pracy autonomicznej.

W układach sieciowych pracujących autonomicznie uzyskanie wysokiej pewności i niezawodności działania automatyki zabezpieczeniowej może wymagać stosowania nie-klasycznych systemów automatyki zabezpieczeniowej, przykładowo układów WAMS [6] lub systemów wieloagentowych [7].

Autorzy: dr inż. Piotr Rzepka, dr inż. Mateusz Szablicki, mgr inż. Dawid Jurczyk, Dawid.Jurczyk@polsl.pl, prof. dr hab. inż. Adrian Halinka, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układami, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych
- [2] Praca zbiorowa: Sieci elektroenergetyczne w zakładach przemysłowych. Poradnik. Część 1. Zasilanie i rozdział energii. WNT, Warszawa 1987
- [3] Kacejko P., *Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo uczelniane 2004,
- [4] Kalina J., Skorek J.: *Gazowe układy kogeneracyjne*. WNT, Warszawa 2005
- [5] Halinka A., Rzepka P.: Koncepcja obszarowego systemu automatyki elektroenergetycznej do nadzoru autonomicznych struktur sieci SN z lokalnymi źródłami w postaci źródeł biogazowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 NR 8/2014, ISSN 0033-2097, ss. 101-104
- [6] Halinka A., Rzepka P.: Wykorzystanie WAMS do identyfikacji pracy wyspowej klastrów energii. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 10 (86), 2018, ss. 17-22
- [7] Halinka A., Rzepka P., Szablicki M., Agent model of multi-agent system for area power system protection. *Modern Electric Power Systems Conference 2015 (MEPS)*, 191-194