

**ZASTOSOWANIE ZESPOŁÓW PRĄDOTWÓRCZYCH Z SILNIKAMI GAZOWYMI  
LNG W SYSTEMACH „SHORE TO SHIP”**

*Dariusz TARNAPOWICZ  
Akademia Morska w Szczecinie  
Sergiej GERMAN-GALKIN  
University ITMO, Sankt Petersburg*

**Streszczenie:** Głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza w portach są statki morskie, na których energię elektryczną wytwarza się w autonomicznych zespołach prądotwórczych Diesel-Generator. Najbardziej skutecznym sposobem ograniczenia szkodliwych emisji spalin przez statki jest wyłączenie okrętowych zespołów prądotwórczych i dostarczenie energii elektrycznej z lądu w systemie „Shore To Ship”. Główny problem realizacji zasilania statków z lądu związany jest z dopasowaniem parametrów napięcia sieci lądowej z siecią okrętową. Obecnie zalecanym rozwiązaniem jest zasilanie z elektroenergetycznej sieci lądowej z wykorzystaniem przekształtników energoelektronicznych.

W artykule przeprowadzono analizę systemu „Shore To Ship” z wykorzystaniem zespołów prądotwórczych z silnikami gazowymi LNG. Przedstawiono topologie układów z generatorami LNG, korzyści ekologiczne takiego rozwiązania, zalety i wady

**Słowa kluczowe:** system „Shore To Ship”, zespoły prądotwórcze LNG – Generator,

**WSTĘP**

Transport morski odgrywa istotną rolę w gospodarce globalnej. Stale zwiększający się stan światowej floty towarowej powoduje wzrost ilości statków cumujących w portach. Zwiększający się na statkach udział układów mechatronicznych i zaawansowanych systemów automatyki prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną. Źródłem energii elektrycznej na statkach są autonomiczne zespoły prądotwórcze Diesel-Generator (D-G). Statki podczas postoju porcie są źródłem zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Przeprowadzane w portach badania dotyczące emisji spalin prowadzą do wniosku, iż tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ), dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) oraz tlenek siarki ( $\text{SO}_x$ ) pochodzą głównie ze statków morskich [1, 2].

Pracujące w portach okrętowe zespoły prądotwórcze D-G są również źródłem hałasu na poziomie średniej mocy akustycznej powyżej 100 dB. Poziom hałasu pochodzący od silników agregatów o mocy powyżej 1 MVA dochodzi nawet do 140 dB. Zespoły prądotwórcze emitują również drgania przekraczające próg wrażliwości człowieka.

W ostatnim dwudziestolecu IMO (International Maritime Organization) opracowała zbiór przepisów o zapobieganiu zanieczyszczenia powietrza przez statki, które dotyczą dwóch składników szkodliwych spalin  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_x$ . Ograniczenia emisji tych składników spalin ma być szczególnie egzekwowane w strefach specjalnych ECA (Emission Control Area). Przykładem ograniczania emisji  $\text{SO}_x$  może być stosowanie coraz powszechniej na statkach paliw z niską zawartością siarki.

Jedyną skuteczną metodą ograniczania emisji spalin (wszystkich składników), jak również ograniczenia hałasu i drgań w portach jest wyłączenie autonomicznych okrętowych agregatów prądotwórczych DG i podłączenie statków do sieci elektroenergetycznej na lądzie.

Główny problem podłączenia statku w porcie do elektroenergetycznej sieci lądowej związany jest z dopasowaniem obu sieci elektrycznych. Parametry znamionowe napięć sieci okrętowych różnią się w zależności od klasy statków, ich wielkości i obszaru eksploatacji. Na statkach morskich występuje ok. 10 poziomów napięć niskich (poniżej 1000 V) i 3 poziomy napięć średnich (3.3 kV, 6.6 kV i 11 kV). Ważna jest również różna częstotliwość napięcia sieci okrętowej w stosunku do lądowej. Na statkach przeważa częstotliwość napięcia sieci elektrycznej 60 Hz (około 70% statków) [1]. Na świecie występuje częściej częstotliwość sieci energetycznych 50 Hz (Europa, Azja, Afryka, Ameryka Południowa).

Różniące się poziomy napięć sieci lądowej i okrętowej nie są problemem technicznym. Zaawansowane technologicznie transformatory energetyczne, których koszty nie są wysokie, pozwalają na dopasowanie poziomu napięć. Większy problem stanowi dopasowanie częstotliwości napięć. Zalecanym i praktycznie jedynym obecnie rozwiązaniem jest stosowanie przemienników częstotliwości [3, 4]. Alternatywą dla przemienników częstotliwości może być zastosowanie zespołów prądotwórczych z silnikami gazowymi LNG.

Budowa uniwersalnego systemu „Shore To Ship”(STS), pozwalającego na elektryczne podłączenie w porcie każdego statku, jest związana ze światową standaryzacją systemu. W lipcu 2012 opublikowano dokument IEC/ISO/IEEE 80005-1 [4]. Celem tej normy jest określenie wymagań, wsparcie dla projektantów, określenie odpowiedniej praktyki podłączenia, zapewnienia szybkiej operacyjności przy podłączaniu i zapewnienie bezpieczeństwa połączeń przez załogę statków i pracowników portów.

### **ZESPOŁY PRĄDOTWÓRCZE LNG – GENERATOR W SYSTEMIE STS**

Alternatywnym rozwiązaniem dla uzyskania napięcia o częstotliwości 60 Hz może być zespół prądotwórczy, w którym silnikiem napędzającym prądnice jest silnik gazowy wykorzystujący gaz ziemny skroplony LNG (Liquefied Natural Gas).

Metoda LNG polega na skropleniu gazu ziemnego, co prowadzi do zmniejszenia jego objętości o ok. 600 razy. Temperatura skraplania metanu wynosi  $-161,6^{\circ}\text{C}$ . Oznacza to, że z  $1\text{ m}^3$  skroplonego gazu można uzyskać  $584\text{ m}^3$  gazu sieciowego, natomiast z 1 tony LNG ok.  $1380\text{ m}^3$  gazu.

Do niedawna uważano, że zespoły prądotwórcze D-G są niezawodne i niedrogie, ale głośnie i emitujące związki toksyczne do atmosfery, natomiast zespoły prądotwórcze LNG – Generator (LNG-G) są drogie, mniejszej mocy, ale bardziej ciche i o niskiej emisji zanieczyszczeń powietrza. Obecnie, dzięki rozwojowi nowych technologii w silnikach, obudowach i innych elementach, różnice dotyczące dostępnych mocy są już porównywalne. Jeśli chodzi o trwałość, silniki diesla wciąż są bardziej długowieczne niż porównywalne silniki LNG. Jednak nowe technologie pozwalają zwiększyć wydajność silników LNG jednocześnie zwiększając ich niezawodność i długowieczność. Sprzedaż światowa zespołów prądotwórczych wynosi obecnie

82% D-G i 12% LNG-G, ale prognozy mówią, że ten stosunek będzie się wyrównywał już w najbliższych 10 latach [5].

Firm oferujących zespoły prądotwórcze LNG-G jest wiele, wiodących na rynku kilka (Caterpillar, Cummins, Perkins, MAN czy MWM-Deutz). Dla systemu STS, analizując możliwości zastosowania, a przede wszystkim dostępne moce zespołów LNG-G firma Caterpillar posiada najbogatszą ofertę. Rys. 1 przedstawia zespoły prądotwórcze firmy Caterpillar typu CG170-16 oraz CG260-16, których analiza wykorzystania w systemie STS będzie przedstawiona dalszej części referatu. Wybrane dane techniczne zespołów LNG-G [6]:

- CG170-16 – P=1550 kW; U=11 kV, f=60 Hz; fuel - Natural Gas
- CG260-16 – P=4000 kW; U=11 kV, f=60 Hz; fuel - Natural Gas

a)



b)

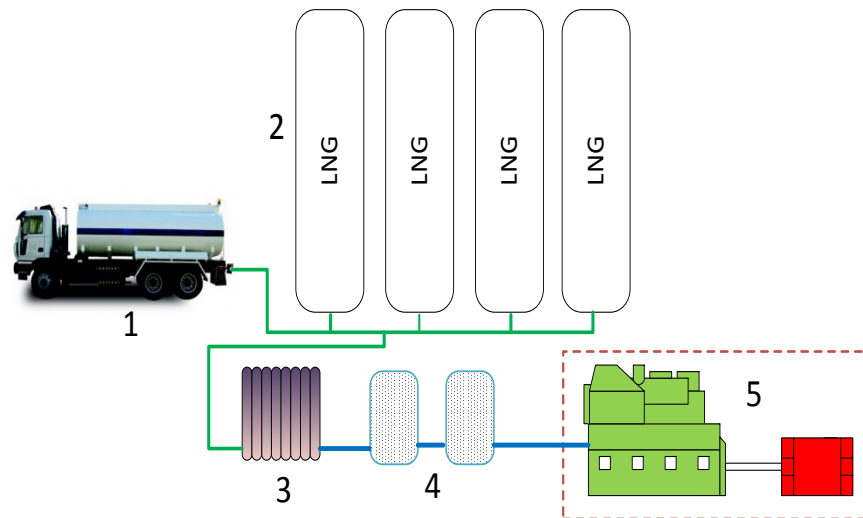


**Rys. 1 Zespół prądotwórczy LNG-Generator firmy Caterpillar  
a) CG170-16 o mocy 1550 kW b) CG260-16 o mocy 4000 kW**

Źródło: [6]

Rozwiązanie z zastosowaniem zespołu prądotwórczego LNG-G wymaga oprócz skomplikowanej instalacji zasilającej zespół zbiorniki LNG do magazynowania gazu. Jak już wspomniano 1 m<sup>3</sup> LNG jest równy 600 Nm<sup>3</sup> (metry sześciennie w warunkach normalnych) gazu ziemnego, co umożliwi jego magazynowanie przez skupienie dużej ilości energii w małej objętości. Najczęściej wykonuje się zbiorniki o pojemności 60 m<sup>3</sup> LNG, co odpowiada 36000 Nm<sup>3</sup>. Taki zbiornik przy założeniu zużycia energii elektrycznej na poziomie 1MW przez dobę wystarcza na około 5 dni.

W skład instalacji LNG oprócz zbiornika wchodzi również parownice powietrzne, podgrzewacz gazu, linie redukcyjne oraz automatyka sterująca. Instalacja taka wymaga dodatkowego miejsca w porcie. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy schemat instalacji regazyfikacji LNG.



Rys. 2 Schemat stacji regazyfikacji LNG do zasilania zespołów prądowórczych LNG-G

Główne elementy takiego systemu to [7]:

- Cysterna kriogeniczna (1) – Gaz LNG transportowany jest do stacji regazyfikacji w specjalistycznych cysternach kriogenicznych, utrzymujących niską temperaturę skroplonego gazu w trakcie jego przewożenia. Typowa cysterna ma pojemność 18 ton, z których po regazyfikacji można uzyskać 25 600 m<sup>3</sup> paliwa w postaci gazowej.
- Zbiorniki kriogeniczne (2) – Technologicznie istnieje możliwość dostawiania kolejnych zbiorników na stacji regazyfikacji LNG, w celu uzyskania większej pojemności magazynowej.
- Parownice (3) – Służą do zamiany postaci paliwa gazowego z ciekłej w gazową. Są zaprojektowane w taki sposób, aby zapewnić wymaganą przez odbiorcę moc regazyfikacji, liczoną w m<sup>3</sup>/h.
- Stacja redukcyjno-pomiarowa (4) – Odbywa się na niej pomiar paliwa gazowego oraz redukcja ciśnienia gazu. Redukcji ciśnienia można dokonywać na stacji, bądź na ścieżce gazowej przed odbiornikiem. Ostateczną decyzję podejmuje projektant instalacji indywidualnie dla każdego projektu
- Pomieszczenie zespołu prądowórczego LNG-G (5)

Przeprowadzono analizę ograniczenia emisji spalin z zastosowaniem systemu STS porównując pracę okrętowych zespołów prądowórczych przy zasilaniu paliwem Heavy Fuel Oil (HFO) i Marine Diesel Oil (MDO) dla wytworzenia 1MWh energii elektrycznej przez cały rok w stosunku do systemu STS zasilanym z zespołów prądowórczych LNG-G i z sieci energetycznej (Coal Power Station)

Ograniczenie emisji spalin poprzez zastosowanie w/w rozwiązań zestawiono w tabeli 1 dla różnych źródeł energii elektrycznej wytwarzających energię 1 MWh przez cały rok.

**Tabela 1 Emisja spalin w porcie z różnych źródeł (wykonano w oparciu o OPS calculation tool)**

Pollutants	Emissions (ton/year)			
	ship generating set		STS	
	MDO - Generator	HFO -Generator	Coal Power Station	LNG-Generator
CO <sub>2</sub>	4111,36	4111,36	7901,52	3521,52
NO <sub>x</sub>	87,3664	87,3664	3,564	3,095669
PM	2,69808	4,034272	0,028539	0
SO <sub>2</sub>	6,424	69,3792	3,2472	0,137585

Źródło: [8]

Zysk procentowy redukcji emisji spalin z zastosowania systemu STS przedstawia tabela 2

**Tabela 2 Zysk procentowy redukcji emisji spalin z zastosowania systemu STS**

Pollutants	Emission reductions electricity by STS	
	Coal Power Station	LNG-Generator
NO <sub>x</sub>	96%	96%
PM	95%	100%
SO <sub>2</sub>	99%	100%
CO <sub>2</sub>	-92%	14%

Przeprowadzona analiza prowadzi do wniosku, że redukcja emisji spalin przez statki w porcie z zastosowaniem systemu STS jest porównywalna przy wykorzystaniu LNG-G i zasilania z sieci energetycznej (Coal Power Station). Jedynie przy wykorzystaniu systemu STS zasilanym z sieci energetycznej poziom emisji CO<sub>2</sub> się zwiększa. Nie ma to bezpośredniego wpływu na zdrowie okolicznych mieszkańców ponieważ Coal Power Station znajduje się zazwyczaj daleko od miasta.

## TOPOLOGIA UKŁADU STS Z ZASTOSOWANIEM ZESPOŁÓW PRĄDOTWÓRCZYCH LNG-G

W celu wyboru optymalnej topologii układu należy w pierwszej kolejności przeprowadzić analizę zapotrzebowania mocy oraz parametrów okrętowych sieci elektrycznych w aspekcie częstotliwości napięcia dla statków korzystających z systemu STS.

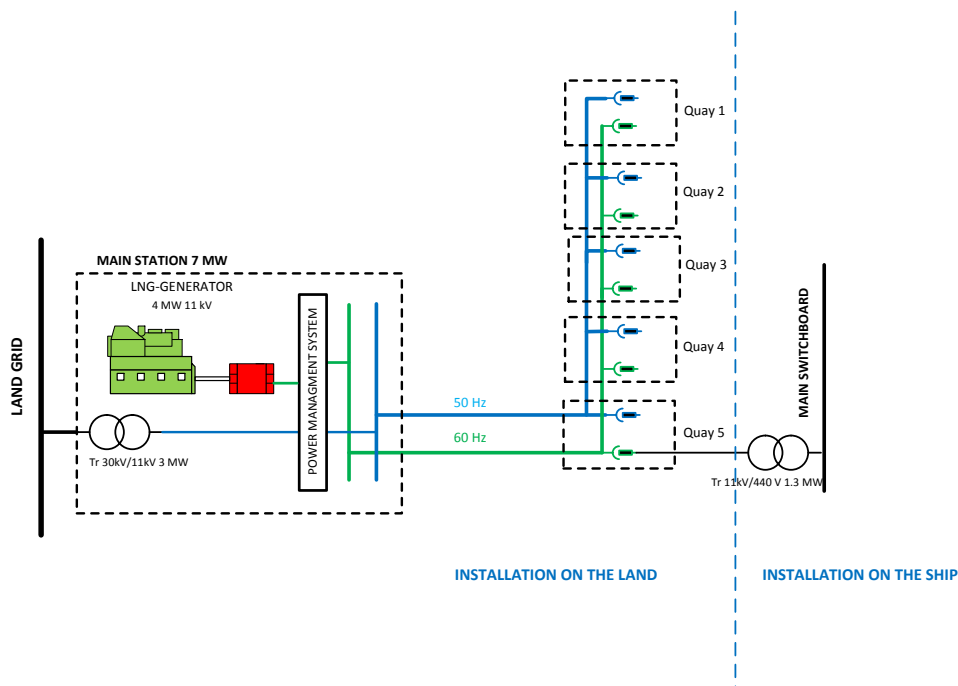
Przykładową analizę przeprowadzono dla zapotrzebowania mocy na nabrzeżu 7 MW i ilości statków z częstotliwością napięcia sieci okrętowej 60 Hz na poziomie 65%. W celu jak najmniejszej ingerencji w nabrzeże portowe główne stacje, w których znajdują się zespoły prądotwórcze LNG-G i transformatory energetyczne, znajdują się z dala od nabrzeży. Na kei instalowane są jedynie zautomatyzowane żurawiki z okablowaniem i łącznikami [1]. Pod uwagę brano dwa warianty topologii układu STS.

### Topologia I

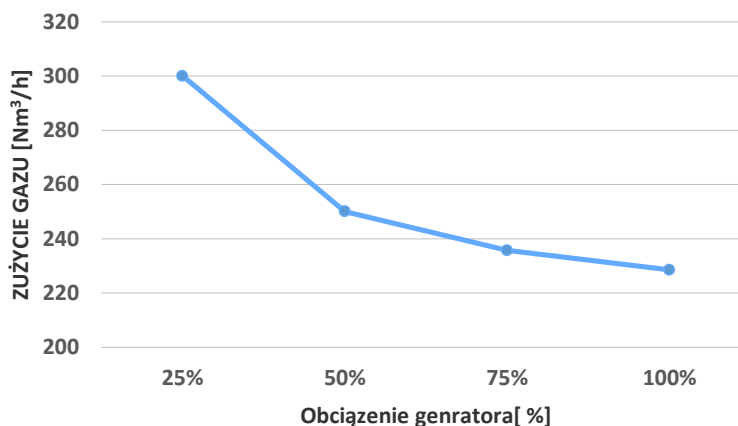
Topologię I przedstawiono na rys. 3.

W głównej stacji znajduje się dużej mocy (4 MW) autonomiczny zespół prądotwórczy LNG-G realizujący źródło napięcia 11 kV o częstotliwości 60 Hz oraz transformator energetyczny o mocy 3 MW i napięciu wtórnym 11 kV zapewniający źródło energii elektrycznej o częstotliwości 50 Hz. Między główną stacją rozdzielcza, która znajduje się z dala od kei, a

miejszem podłączenia promów na poszczególnych kejach prowadzone są dwie linie zasilające 50 Hz i 60 Hz, co jest zaletą układu ze względu na niewielką ilość kabli. Wadą tego rozwiązania jest to, że w przypadku awarii zespołu prądotwórczego LNG-G zasilających kilka statków nastąpi przerwa w ich zasilaniu.



**Rys. 3 Topologia systemu STS z LNG-G o mocy 4MW**



**Rys. 4 Zużycie gazu w zależności od obciążenia zespołu Caterpillar CG260-16**

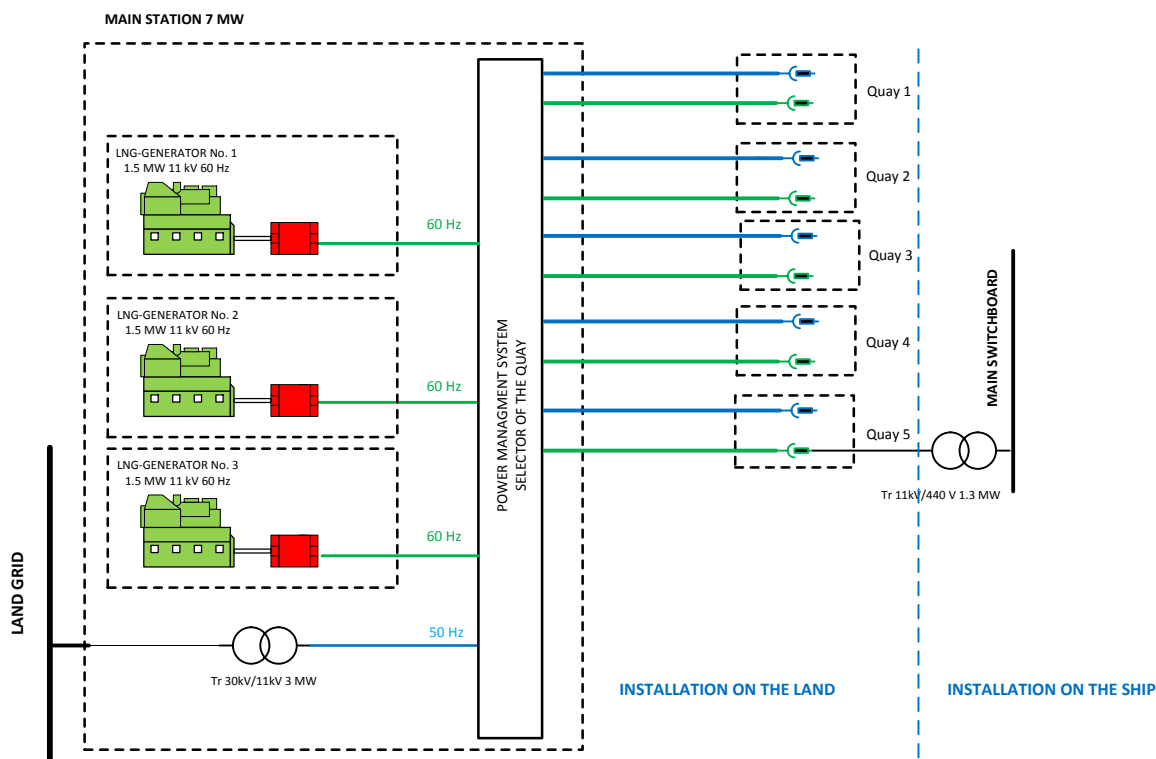
Źródło: na podstawie [6]

Na rys 4 przedstawiono zależność zużycia gazu dla zespołu Caterpillar CG260-16 (o mocy 4 MW). Istotna jest możliwość pracy niedociążonego silnika gazowego zespołu LNG-G. W przypadku zasilania jednego statku zespół LNG-G może pracować na około 30% mocy

nominalnej, co się wiąże ze zwiększeniem ilości gazu niezbędnego do wyprodukowania 1 MWh energii elektrycznej. Na rys 4 przedstawiono zależność zużycia gazu dla zespołu Caterpillar CG260-16 (o mocy 4 MW).

## Topologia II

Topologia II różni się od topologii I ilością i mocą zespołów prądotwórczych LNG-G. W układzie przedstawionym na rys. 5 zastosowano trzy zespoły prądotwórcze LNG-G o mocy 1.5 MW każdy.



Rys. 5 Topologia systemu STS z LNG-G o mocy 3x1.5 MW

Rozwiązanie te pozwala na niezależne zasilanie statków z autonomicznych zespołów prądotwórczych. Zwiększa to zasadniczo niezawodność systemu, a co za tym idzie problem opisany przy topologii I nie występuje. Zespoły LNG-G podobnie jak w topologii I zostały zainstalowane w głównej stacji rozdzielczej znajdującej się z dala od kei. Na kei znajduje się jedynie urządzenia pozwalające na podłączenie statku do systemu STS (żurawik z kablem łączeniowym).

Przeprowadzono analizę korzyści ekonomicznych związane z ceną wytwarzania energii elektrycznej z zastosowaniem zespołów prądotwórczych LNG-G, bezpośredniego zasilania z systemu energetycznego z zastosowaniem przemienników częstotliwości w porównaniu do ceny energii elektrycznej wytwarzanej w zespołach D-G. Przyjęto średnie ceny paliwa LNG i MDO oraz energii elektrycznej na ładzie w Polsce (styczeń 2016).

## Management Systems in Production Engineering No 3(23), 2016

- dla topologii I zapotrzebowanie paliwa gazowego LNG do wytworzenia 1 MWh (przy założeniu obciążenia agregatu LNG-G 50%) wynosi 245 Nm<sup>3</sup>/h. Przy cenie 1Nm<sup>3</sup> = 1.2 zł cena 1MWh wynosi 294 zł
- dla topologii II zapotrzebowanie paliwa gazowego LNG do wytworzenia 1 MWh (przy założeniu obciążenia agregatu LNG-G 75%) wynosi 238 Nm<sup>3</sup>/h. Przy cenie 1Nm<sup>3</sup> = 1.2 zł cena 1MWh wynosi 285 zł
- dla zasilania z systemu energetycznego lądowego z zastosowaniem przekształtników częstotliwości cena 1 MWh energii wynosi 280 zł
- dla zasilania z okrętowych zespołów prądotwórczych D-G zużycie paliwa MDO dla wytworzenia 1 MWh wynosi 300 l/h (przy założeniu obciążenia agregatu D-G na poziomie 40%). przy cenie 400 \$/tone (1\$ = 4 zł) cena 1 MWh wynosi 436 zł.

### PODSUMOWANIE

W tabeli 3 przedstawiono zestawienie wad i zalet zespołów prądotwórczych z silnikami gazowymi LNG w systemie STS w odniesieniu do systemu STS zasilanego z sieci energetycznej.

Przedstawione w tabeli 3 zestawienie pokazuje, że pomimo ewidentnych zalet zespołów prądotwórczych LNG-G w systemach STS układy takie obecnie nie znajdują zastosowania. Związane jest to przede wszystkim z dużymi wymaganiami odnośnie bezpieczeństwa eksploatacji (wysokokwalifikowany serwis). Przykładem może być port Hamburg, gdzie zainicjowano pilotażowy projekt zasilania statków pasażerskich z barek, na których firma Becker Marine Systems i AIDA zainstalowała zespoły prądotwórcze LNG-G. Barka o długości 76.6 m posiada 5 zespołów prądotwórczych firmy Caterpillar o łącznej mocy 7.5 MW [9]. Pomimo pozytywnych testów systemu STS z zastosowaniem zespołów prądotwórczych LNG-G w efekcie podjęto decyzję o budowie w porcie systemu STS opartego o zasilanie z sieci energetycznej krajowej z przekształtniki częstotliwości.



Tabela 3 Wady i zalety różnych wariantów systemu STS

Wariant STS	zalety	wady
<b>Topologia I (z jednym zespołem LNG-G)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Niska cena 1MWh</li> <li>2. Dużą skuteczność w redukcji emisji spalin</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Niska sprawność LNG-G</li> <li>2. Duże jednostkowe zużycie paliwa przy niskim obciążeniu zespołu</li> <li>3. Bardzo wysoki koszt serwisowania zesp. LNG-G (ok. 150 tys zł/rok)</li> <li>4. Układ bezpieczeństwa wyłącza zasilanie przy większości stanu alarmowych</li> <li>5. Wysoki koszt inwestycji</li> <li>6. Budowa stacji regazyfikacji</li> </ol>
<b>Topologia II (z trzema zespołami LNG-G)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Autonomiczność zespołów LNG – generator – niezawodność układu STS</li> <li>2. Niska cena 1MWh</li> <li>3. Możliwość budowy modułowej (kontenerowej)</li> <li>3. Dużą skuteczność w redukcji emisji spalin</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Niska sprawność LNG-G</li> <li>2. Bardzo wysoki koszt serwisu zesp. LNG-G (ok. 150 tys zł/rok)</li> <li>3. Układ bezpieczeństwa wyłącza zasilanie przy większości stanu alarmowych</li> <li>4. Duża powierzchnia głównej stacji rozdzielczej</li> <li>5. Najwyższa koszt inwestycji spośród wariantów STS</li> <li>6. Budowa stacji regazyfikacji</li> </ol>
<b>Zasilanie z sieci energetycznej (przełącznik częstotliwości)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Niska cena 1MWh</li> <li>2. Wysoka sprawność systemu STS</li> <li>3. Niski koszt serwisowania</li> <li>4. Możliwość budowy modułowej (kontenerowej)</li> <li>5. Dużą skuteczność w redukcji emisji spalin</li> <li>6. Duża niezawodność układu STS</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wysoki koszt inwestycji</li> <li>2. Zwiększenie emisji CO<sub>2</sub> w odległej Coal Power Station</li> </ol>

## LITERATURA

1. D. Tarnapowicz, T. Borkowski. *Shore to Ship System: Alternative Power Supply of Ships in Ports*, Szczecin: Scientific Publishing House of the Maritime University, 2014.
2. D. Tarnapowicz, T. Borkowski. „Shore to ship» system-an alternative electric power supply in port”, in *Journal of KONES*, vol. 19(3), 2012, pp. 49-58.
3. *EU (2006/339/EC) COMMISSION RECOMMENDATION of 8 May 2006 On the promotion of shore-side electricity for use by ships at berth in Community ports* (Text with EEA relevance).
4. *IEC/ISO/IEEE 80005-1. INTERNATIONAL STANDARD Utility connections in port – Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – General requirements.*
5. R.R. Acosta. „Comparing Natural Gas and Diesel Generator Sets”, in *Power Engineering Magazine*, vol. 119(2), 2015.
6. *Technical data of CG170-16 and CG260-16* (2016) [Online]. Available: [http://www.cat.com/en\\_US/products](http://www.cat.com/en_US/products)
7. *Cryogas M&T Poland S.A. LNG facilities – scheme* (2016) [Online]. Available: [http://www.cryogas.pl/o\\_lng](http://www.cryogas.pl/o_lng)
8. *OPS calculation tool, version 05-08-2013* (2015) [Online]. Available: <http://www.ops.wpci.nl/costs/cost-calculation/>
9. Becker Marine Systems, PRESS RELEASE NO. 7/2014.

## Management Systems in Production Engineering No 3(23), 2016

dr inż. Dariusz Tarnapowicz  
Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny  
Zakład Elektrotechniki i Elektroniki  
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, Polska

Sergiej German-Galkin  
University ITMO  
Sablinskaja 14, 197101 Sankt Petersburg, Russia  
e-mail: ggsg@yandex.ru

*Data przesłania artykułu do Redakcji: 04.2016*

*Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 06.2016*