

Zbigniew ŁOSIEWICZ, Zbigniew ŁUKASIK

ZESPÓŁ NAPĘDOWY SPALINOWO - ELEKTRYCZNY NA STATKACH OFFSHORE - ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE W ASPEKcie ZDATNOŚCI DO WYKONANIA ZADANIA EKSPLOATACYJNEGO I BEZPIECZEŃSTWA ŻEGLUGI

W artykule omówione zostały wybrane kryteria doboru zespołów napędu głównego statków offshore z uwzględnieniem zdatności tych statków do wykonania zadania eksploatacyjnego i bezpieczeństwa żeglugi.

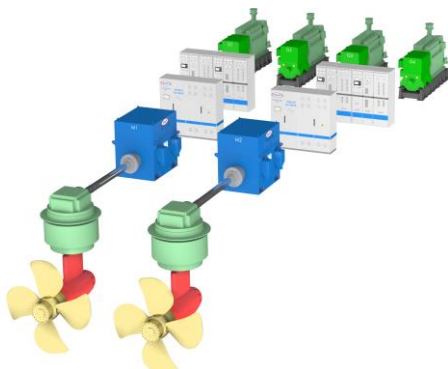
WSTĘP

Do napędu statków o małym zanurzeniu, wymagających dużej manewrowości i zmiennego obciążenia napędu głównego stosuje się napęd spalinowo – elektryczny (DE- Diesel-Electric). Silniki spalinowe napędzają generatory prądu, którym zasilane są silniki elektryczne napędzające śruby o skoku stałym Rys. 1



Rys. 1. Napęd spalinowo elektryczny ze śrubą konwencjonalną [15]

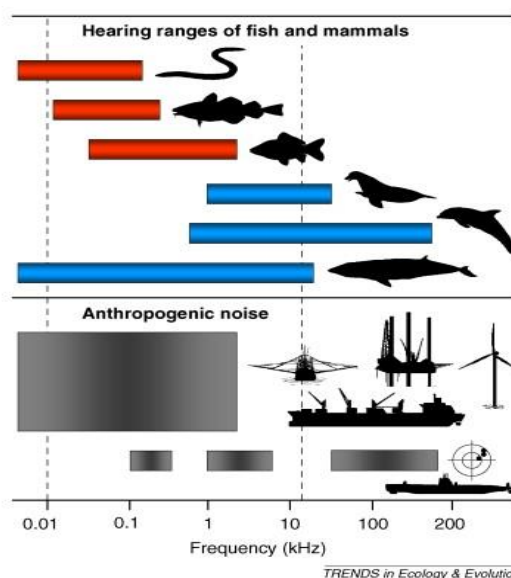
Do napędu statków lub innych jednostek pływających (np. jednostki wydobywcze, kablownce, lodołamacze), które wymagają dokładnego pozycjonowania (DP) stosuje się pędniki azymutalne.



Rys. 2. Napęd spalinowo – elektryczny z zastosowaniem pędników azymutalnych typu „POD”. [14]

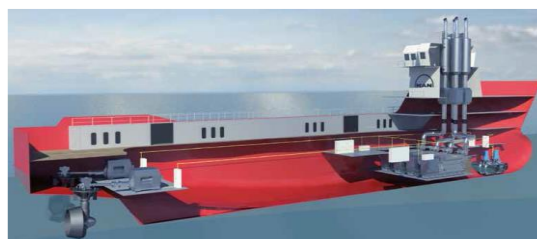
Istnieje wiele napędów D-E, co wynika z zapotrzebowania eksploatacyjnego. I mimo, że każde przetwarzanie energii powoduje straty i obniżenie sprawności napędu, konstruktorzy decydują się na stosowanie układów spalinowo – elektrycznych.

Bardzo istotnym problemem jest wpływ statku na środowisko naturalne. Oprócz zanieczyszczenia morza związkami ropopochodnymi, dużym problemem jest zanieczyszczenie atmosfery spalinami, hałas i wibracje [1, 4, 5, 6,]



Rys. 3. Wpływ wibracji na florę morską [1]

Ponieważ bardzo mocno rozbudowana jest flota statków wsparcia jednostek wydobywczych gazu i ropy naftowej, armatorzy i stocznie zwrócili uwagę na koszty eksploatacyjne tych statków [2, 3, 12]. Ponieważ jednostki te pracują w określonym miejscu lub przemieszczają się w bardzo ograniczonym sektorze (np. dozowce, statki zaopatrzenia - wahadłowe zaopatrzenie wieża wiertnicza – port) ich napęd jest wykorzystywany z różnym obciążeniem.

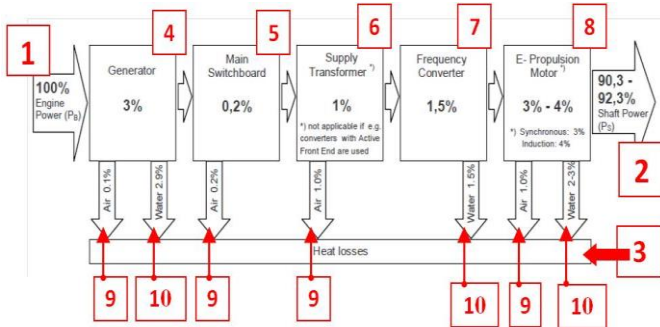


Rys. 4. Statek wsparcia jednostki wydobywczej. Napęd typu „Truster” Źródło: [16]

Napęd musi być elastyczny pod kątem zarządzania energią [8z]. Dlatego też to na tych jednostkach najczęściej stosuje się system spalinowo – elektryczny.

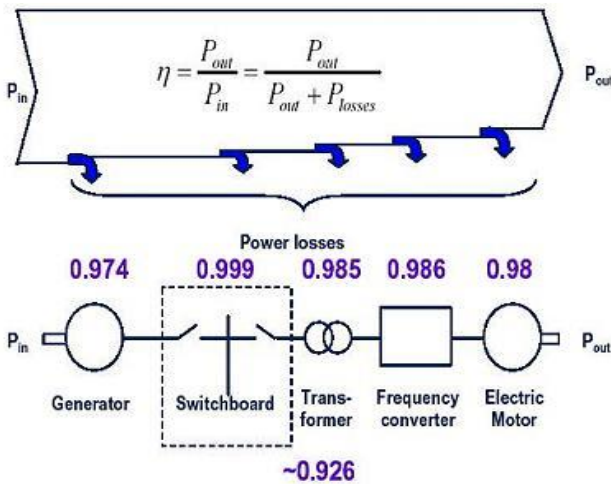
1. EFEKTYWNOŚĆ NAPĘDU

O efektywności napędu decyduje sprawność jego elementów. Na rys. 7 pokazano elementy standardowego napędu elektrycznego, straty energii na jego elementach oraz całkowitą sprawność systemu [8,10].



Rys. 5. Straty energii na elementach standardowego napędu elektrycznego: 1. 100% mocy wyjściowej (efektywnej) silnika spalinowego całkowitą sprawność systemu, 2. Moc na wale śrubowym, 3. Straty spowodowane wydzielaniem ciepła, 4. Generator prądu, 5. Główna tablica rozdzielcza (GTR), 6. Transformator zasilający, 7. Falownik, 8. Silnik elektryczny, 9. Ciepło przekazywane powietrzu, 10. ciepło przekazywane wodzie[10]

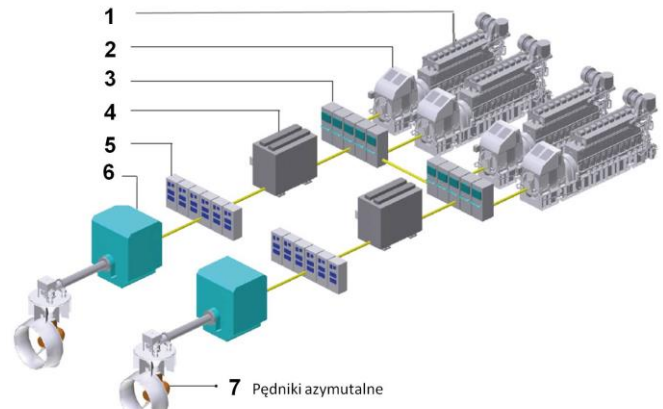
Inne źródła, opisujące połączenie napędu spalinowego gazowego z elektrycznym podają wyższą sprawność systemu D-E.



Rys. 6. Elementy standardowego napędu elektrycznego, straty energii na jego elementach, [11]

Każdy armator przystępując do zakupu jednostki musi przeprowadzić analizę techniczno – ekonomiczną. W dalszej części publikacji pokazano algorytm takiego działania.

Na rysunku 7. pokazano przykładowy system napędowy [8]. Na bazie tego systemu pokazano problemy projektowania napędu D-E.



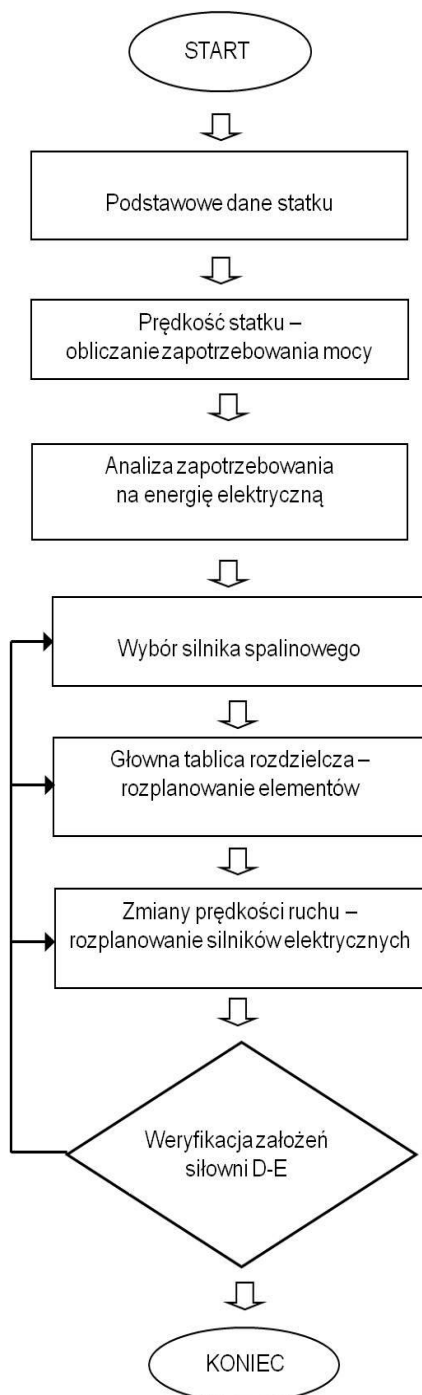
Rys. 7. Przykładowy spalinowo - elektryczny system napędowy: 1. Zespół silnik spalinowy – generator prądu, 2. Główna tablica rozdzielcza (GTR), 3. Transformator zasilający (opcjonalnie, zależy od typu falownika), 4. Falownik, 5. Silnik elektryczny, 6. Przekładnia obrotów (w zależności od prędkości obrotowej silnika elektrycznego), 7. Pędnik (azymutalny)[10]

Przystępując do projektowania napędu spalinowo – elektrycznego statku należy opracować odpowiedni algorytm. [8 10]

1. Podstawowe dane statku:
 - typ statku, linia wału napędowego, rodzaj napędu – śruba, pędnik azymutalny typu „truster”, pędnik azymutalny „pod”,
 - przeznaczenie, rodzaj wykonywanych zadań,
 - państwo bandery, klasyfikator, klasa pływania, zasięg pływania,
2. Prędkość statku – obliczanie zapotrzebowania mocy:
 - osiągi kontraktowe,
 - moc napędowa: w morzu, manewrowa, w porcie, itp.,
 - zapas morski mocy
3. Moc elektryczna odbiornika: w morzu, manewrowa, w porcie, itp.,
 - sprawność zespołu spalinowo – elektrycznego: uwzględnienie strat na głównych elementach systemu
 - wyznaczenie całkowitej mocy na hamowni: mocy do zainstalowania
4. Wybór silnika spalinowego
 - ilość i typy elementów zespołu silniki spalinowe/ generatory prądu. Ilość cylindrów i układ cylindrów,
 - maksymalne dopuszczalne obciążenie silnika (moc efektywna): % mocy nominalnej - MCR (MCR – Maximum Continuous Rating)
 - strategia wykonywania obsługi silników: w morzu, w porcie, i inne,
5. Główna tablica rozdzielcza (GTR):
 - wybór częstotliwości: 50/60 Hz,
 - wybór napięcia: niskie napięcie, średnie napięcie,
 - ilość sekcji GTR,
 - parametry głównego alternatora: $\cos \varphi$, maksymalną oporność synchroniczną- x_d'' (total synchronous reactance)
6. Zmiany prędkości i obciążenie napędowego silnika elektrycznego: wybór falowników,
 - wybór transformatora zasilającego (jeżeli tego wymaga falownik),
 - wybór silnika elektrycznego; typ, maksymalne przeciążenia momentem,
 - metody minimalizacji współczynnika zawartości harmoniczych (THD - Total Harmonic Distortion)
7. Weryfikacja założeń siłowni spalinowo – elektrycznej (D-E):

- sprawdzenie wartości prądu zwarciovego, zwiększenie napięcia, zoptymalizować całkowitą oporność synchroniczną x_d (total synchronous reactance)
- sprawdzić dostępność mocy biernej: zmniejszyć typy/ilość alternatorów, $\cos \varphi$, itd.
- sprawdzić ograniczenia współczynnika zawartości harmonicznych (THD): zwiększyć liczbę biegunów, filtrów

Na rys. 8 pokazano algorytm doboru komponentów zespołu napędowego D-E.



Rys. 8. Algorytm projektowania napędu spalinowo – elektrycznego statku [8, 10]

Dobór silnika elektrycznego

Głównymi kryteriami wyboru i doboru napędu spalinowo – elektrycznego są:

- manewrowość,

- koszty eksploatacyjne
- nawigacja w lodach
- ekonomia
- emisja zanieczyszczeń,
- poziom hałasu i wibracji,
- elastyczność lokalizacji i montażu.

Silnik elektryczny dobiera się do konkretnego typu statku, biorąc pod uwagę następujące kryteria:

- Typ - przeznaczenie statku
- wielkość – opory kadłuba, zapotrzebowanie mocy na pędniku / pędnikach
- charakter żeglugi,
- warunki żeglugi np. w lodach (odporność pędnika na uderzenie kry, grysu lodowego)
- możliwości technologiczne
- możliwości przeprowadzenia obsługi (czy silnik elektryczny jest w siłowni – napęd śruby przez wał, mechaniczny pędnik azymutalny z przekładnią kątową, napędy typu „truster”, czy napędy gondolowe (Pod) znajdujące się pod wodą.

Silniki elektryczne stosowane do napędu statku.

Każdy typ statku posiada swoją charakterystykę [19, 20]. Do głównych cech należą:

- przeznaczenie, czyli specyfika zadań eksploatacyjnych
- czas wykonywania poszczególnych zadań eksploatacyjnych (żegluga dalekomorska, przybrzeżna, portowa)
- obciążenie napędu:
- stałe lub zmienne w przedziałach czasu (długi lub krótki rejs),
- stałe lub zmienne co do wartości (długi rejs pod obciążeniem oscylującym wokół zadanej wartości lub zmienna praca manewrowa).

Na statkach stosuje się silniki, które pod względem prędkości obrotowej można podzielić na:

- silniki o stałej prędkości obrotowej (np. silniki do pomp, sprężarek, wind cumowniczych i kotwicznych, dźwigów)
- silniki o zmiennej prędkości obrotowej (np. napęd główny statku)

Dlatego też, kierując się efektywnością, należy dobierać silniki do konkretnych typów statków.[3, 7, 12, 13, 15, 16]

Podstawowy podział silników:

- Silniki prądu stałego (DC – motors)
- Najdawniej stosowane silniki, rozwój spowodowany zapotrzebowaniem na napędy nie wymagające powietrza do spalania (np. na okrętach podwodnych)[2,9]

Zalety:

- prosta konstrukcja, łatwe sterowanie prędkością przy użyciu konwerterów (przetwornice napięcia stałego DC-DC)

Wady:

- relatywnie mała moc – do 5 [MW]
- duży reżim przeglądów. Jeżeli przeglądy nie są prowadzone prawidłowo, może wystąpić iskrzenie, uszkodzenie silnika lub pożar.

- Silniki prądu zmiennego, synchroniczne
- Szeroko stosowane w pędnikach azymutalnych typu „Truster” i gondolowych („POD”), ze względu na dużą moc.

Zalety:

- brak limitów co do mocy, nawet powyżej 100 MW,
- duży moment obrotowy przy prędkościach obrotowych w zakresie 0- max,
- precyzyjne sterowanie przez zmiany częstotliwości dają bardzo dobrą sterowność statkowi w porcie, przy nabrzeżu, przy konieczności pozycjonowania np. na jednostkach wydobywczych lub badawczych

Wady:

- przy bardzo dużych mocach – najważniejsze wady to duże wymiary, duży ciężar, duży stopień skomplikowania,
- skomplikowany start, który rozwiązano za pomocą konwerterów częstotliwości
- bardzo wysoki koszt w stosunku do silników asynchronicznych podobnej mocy
- Silniki prądu zmiennego indukcyjne (asynchroniczne)[18]
Szeroko stosowane na statkach do napędów urządzeń pomocniczych, ale nie stosowane do napędów głównych statków.

Zalety:

- dobrze opanowana technologia produkcji, wszechstronność zastosowania
- sterowany za pomocą cyklo – konwertera (konwersja częstotliwości AC – AC)

Konwerter częstotliwości

Ważnym elementem w sterowaniu obrotami silników elektrycznych napędu głównego statku jest konwerter częstotliwości. Jest kilka typów konwerterów częstotliwości, ale na statkach najczęściej jest stosowany cyklo – konwerter.

Cyklo-konwerter zmienia częstotliwość prądu silnika:- dla silnika synchronicznego oznacza to zależność prędkości silnika od ilości par biegunów,

N_s [Obr/min] = 120 x (częstotliwość [Hz] / ilość par biegunów silnika)

- dla silnika asynchronicznego oznacza to zależność prędkości silnika od ilości par biegunów, ale należy dodać współczynnik poślizgu [%]wg zależności:

$$\text{Poślizg [\%]} = (N_s - N) / N_s$$

N_s – prędkość synchroniczna [obr/min],

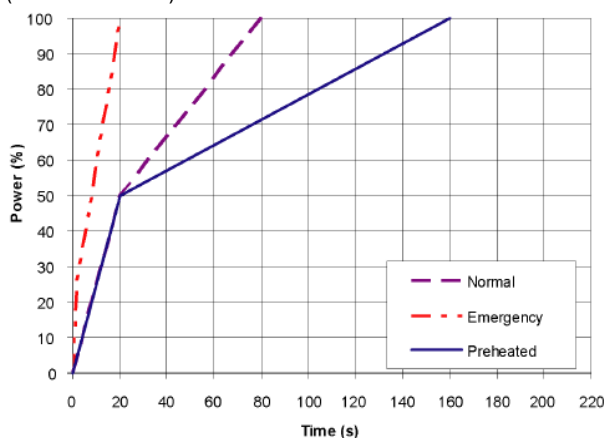
N – prędkość wirnika [obr/min]

Częstotliwość oznacza częstotliwość sieci / silnika [Hz]

Poślizg powoduje nieznaczny spadek obrotów silnika, ale nie ma to specjalnego znaczenia przy ilości obrotów przy przedstawianiu prędkości obrotowej w obr/min

Ponieważ silniki spalinowe mają ograniczenia dotyczące minimalnych obrotów jak i różnorodnego zużycia paliwa w zależności od obciążenia, należy je wziąć pod uwagę.

Na wykresie poniżej pokazano maksymalny dozwolony wzrost obciążenia silnika Wartsila 32 dla napędu spalinowo – elektrycznego (Diesel – Electric).



Rys. 9. Maksymalny dozwolony wzrost obciążenia silnika Wartsila 32 dla napędu spalinowo – elektrycznego (Diesel – Electric) [16]

PODSUMOWANIE

Statki, od których wymaga się wykonania zadania eksploatacyjnego wymagającego dużej precyzji, oraz uprawiającego żeglugę bardzo zmienna co do obciążenia napędu głównego, wymagają specjalistycznego napędu głównego, zaprojektowanego ściśle dla danej jednostki. Takim napędem jest napęd spalinowo-elektryczny.

Zalety napędu spalinowo – elektrycznego to:

- przekazywanie mocy zgodne z zapotrzebowaniem (wrażliwość napędu),
- możliwość utrzymania bardzo małych obrotów od $n_{min} = 0 - n_{max}$,
- mniejsze zużycie paliwa, a przez to zmniejszenie emisji zanieczyszczeń atmosfery
- lepsza dystrybucja mocy poprzez dokładne sterowanie konwerterem częstotliwości (falownikiem)
- wyższa sprawność hydrodynamiczna śruby o skoku stałym (optymalnym do kształtu płatów)
- niższy koszt eksploatacji podczas całego „cyklu życia” napędu
- większa elastyczność lokalizacji napędu (możliwość ulokowania w odległych pomieszczenia zespołów silnik spalinowy – generator prądu i w odległym miejscu silnik elektryczny – śruba)
- cichsza praca (brak hałasu przekładni, mniejsze drgania, krótszy wał napędowy),
- możliwość uzyskiwania maksymalnego momentu obrotowego przy każdej prędkości obrotowej (przy śrubie o skoku stałym, płyty zawsze ustawione są optymalnie pod względem sprawności śruby.)

BIBLIOGRAFIA

1. Brandon Keim Noise Pollution Could Frustrate Fish, <https://www.wired.com/2010/06/fish-and-noise/>
2. Łosiewicz Z., Analiza przydatności innowacyjnych źródeł energii do napędów urządzeń w zastosowaniu morskim, jako rozwiązań alternatywnych do napędów zasilanych paliwami węglowodorowymi, Logistyka Nr 3/2015..
3. Łosiewicz Z.: Wpływ czynnika ludzkiego na bezpieczną eksploatację statku w aspekcie różnych faz życia statków, Technika Transportu Szynowego Nr 12/2015.
4. Łosiewicz Z.: Przykładowe uszkodzenia na statkach morskich spowodowane drganiami – w aspekcie stochastycznych warunków eksploatacyjnych i ich wpływ na bezpieczeństwo statku, Technika Transportu Szynowego Nr 12/2015.
5. Łosiewicz Z. Banaszek A.: Węzły funkcjonalne okrętowego silnika spalinowego wolnoobrotowego wodzikowego jako źródła drgań, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe Nr 6/2016, s. 986-988
6. Łosiewicz Z., Cioch W., Drgania na statku morskim – W aspekcie bezpieczeństwa eksploatacyjnego, Technika Transportu Szynowego Nr 12/2015.
7. www.abb.com/marine: Azipod VI Series Product Introduction.
8. <http://dieselturbo.man.eu/>
9. <http://www.liquefiedgascarrier.com/fuel-cost-for-duel-fuel-electrical-propulsion.html>
10. <http://marine.man.eu>
11. <http://www.portal.pemp.pl/efektywnosc-energetyczna/ie>
12. „Porównanie kosztów cyklu życia standardowych i energooszczędnych silników indukcyjnych niskiego napięcia przy pracy z różnym obciążeniem”
http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/73/ref_03.pdf
13. <http://www.marineinsight.com/tech/main-engine/>
14. <http://www.motorship.com/news101/ships-and-shipyards/new-generation-icebreaking-supply-vessels-for-sakhalin-duty>

15. www.rollsroyce.com
16. www.Wartsila.com

Diesel-electric propulsion for offshore ships - project designs as a compatibility for operation and safety

This article discusses the selection criteria for offshore main propulsion units, taking into account the suitability of these vessels for the performance of the operational task and the safety of navigation.

Autorzy:

dr inż. **Zbigniew Łosiewicz**

Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Al. Piastów 41., 71-065 Szczecin, Poland

E-mail: zbigniew.losiewicz@zut.edu.pl

Prof. dr hab. inż. **Zbigniew Łukasik**

Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny

im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu

Wydział Transportu i Elektrotechniki

ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom