Scientific Journals
Maritime University of Szczecin

Zeszyty Naukowe
Akademia Morska w Szczecinie

2009, 17(89) pp. 51–55

2009, 17(89) s. 51–55

Siłownia okrętowa jako element układu energetycznego statku

Marine power plant as an element of ship's energy system

Paweł Krause

Akademia Morska w Szczecinie
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1–2, e-mail: p.krause@am.szczecin.pl

Słowa kluczowe: siłownia okrętowa, energia, energia użyteczna, sprawność energetyczna

Abstrakt

W artykule zaproponowano zakres osłony bilansowej siłowni okrętowej statku towarowego, będącej częścią składową okrętowego układu energetycznego, obejmującą urządzenia i instalacje przemiany energii paliwa na inne postacie energii, urządzenia obsługujące oraz inne, niebiorące udziału w procesach przemian energetycznych, a niezbędne ze względów bezpieczeństwa i ochrony środowiska. Przyjęty zakres osłony bilansowej pozwala wyznaczyć energię użyteczną, czyli wytworzoną i pomniejszoną o energię zużytą na potrzeby autonomicznej żeglugi, stąd sugerowana nazwa „autonomiczna siłownia okrętowa". Ten sposób podejścia umożliwia m.in. ocenę skutków energetycznych zastosowania utylizacji ciepła odpadowego na statku.

Key words: marine power plant, energy, useful energy, energy efficiency

Abstract

The paper presents proposal of scope of control surface for marine power plant of merchant ship, being an element of ship's energy system and consists of devices and energy plants exchanging fuel energy into other kind of energy, auxiliary devices and others irrelevant to the energy conversion processes, but indispensable because of international safety at sea and environmental protection provisions. Accepted scope of control surface allows to derive useful energy, or total generated minus energy consumed for autonomous shipping, this is why the suggested term "autonomous ship's power plant". This way makes possible (among others) valuation of results of waste heat recovery system used on board.

Wstęp

Eksploatacja statku jest zdeterminowana decyzjami podejmowanymi w oparciu o różnego rodzaju wskaźniki, w tym wskaźniki ekonomiczne. Jednostkowy koszt przewozu ładunku to najistotniejsza kwestia dla operatora i klienta statku. Uwzględnia wszystkie koszty eksploatacji statku (paliwo, płace załogi, ubezpieczenie, opłaty portowe, itd.) i jest wyrażany w jednostce waluty na jednostkę ładunku, np. w $/t lub $/TEU. Jest to ekonomiczny wskaźnik efektywności statku. Innym jest paliwochłonność przewozu jednostki towaru, wyrażona ilością masy paliwa na jednostkę przewożonego ładunku i jednostkę drogi, ale niestety nieuwzględniającą właściwości paliwa i warunków zewnętrznych eksploatacji, takich jak: siła i kierunek wiatru, stan morza, temperatura wody zaburtowej, ciśnienie atmosferyczne, prądy wody, itd. Na wysokość zużycia paliwa przez statek ma wpływ wartość każdego z przytoczonych wskaźników.

Stopień wykorzystania energii chemicznej zużytego paliwa w przemianach na inne postacie energii (co ma wpływ na zużycie paliwa) wyrażony jest sprawnością układu energetycznego, w którym te przemiany zachodzą. Wyższa wartość sprawności to poprawa wskaźników m.in. ekonomicznych.

Do oceny sprawności energetycznej układu niezbędne jest wyznaczenie mocy (lub energii) użytecznej. Nie nastręcza to żadnych problemów w przypadku pojedynczych urządzeń, gdzie sprawność energetyczna urządzenia jest zdefiniowana jako stosunek mocy użytecznej do mocy dostarczanej.

$$\eta = \frac{P_{uż}}{P_d} \tag{1}$$

gdzie:
$P_{uż}$ – moc użyteczna,
P_d – moc dostarczana.

Wyznaczenie sprawności dla grupy licznych urządzeń i instalacji powiązanych ze sobą funkcjonalnie i składających się na układ energetyczny jest możliwe, jednak problem sprawia jednoznaczne przyjęcie zakresu energii użytecznej [1].

Statek jest złożonym układem energetycznym. Złożoność wynika z dużej liczby urządzeń i instalacji spełniających różnorodne funkcje i zapewniających autonomiczność statku. Składa się na nią także autonomiczność energetyczna ograniczona wielkością zapasów energii. W skład układu energetycznego statku wchodzą urządzenia i instalacje, w których zachodzi przemiana postaci energii lub przekazywanie energii. Układ ten nie powinien być utożsamiany z pojęciem „siłowni okrętowej", która niezależnie od sposobu definiowania stanowi tylko jego część.

W dostępnej literaturze (np. [1, 2]) dominuje pogląd, że energia użyteczna to energia uzyskana z przemiany energii chemicznej paliwa na inne postacie energii (mechaniczną, elektryczną i cieplną), w paliwochłonnych urządzeniach statku: silnikach napędu głównego, silnikach zespołów prądotwórczych i kotłach opalanych. Moc mechaniczną wyznacza się na podstawie pomiarów parametrów na wale SG, elektryczną – na zaciskach prądnicy i cieplną – na kotle (pomiar ilości i parametrów wody zasilającej i parametrów pary). Taki pogląd determinuje przyjęcie zakresu osłony bilansowej układu.

Analiza pozycji [1, 2, 3, 4] uwidacznia ewolucję poglądów na przestrzeni lat i dążenie do systemowego uporządkowania pojęcia układu energetycznego statku i jego sprawności. Wśród nich można m.in. odnaleźć analogie do metod wyznaczania sprawności „netto" i „brutto", mających zastosowanie w lądowych układach energetycznych, a zwięźle opisanych w [5].

Jak dotąd nie wypracowano jednej uniwersalnej definicji sprawności siłowni okrętowej, a znane z literatury są wyrazem odmiennych stanowisk autorów. Stan definicji i poglądów na temat okrętowych układów energetycznych oraz ich sprawności jest obszernie przedstawiony w [1].

Pierwsze okrętowe układy energetyczne zawierały tylko napęd główny w pomieszczeniu nazwanym siłownią okrętową. Jedyną funkcją siłowni był mechaniczny napęd statku uzupełniający lub zastępujący żagle. Czynnikiem roboczym statku z silnikiem parowym była para wodna. W miarę wzrostu mocy pojawiały się dodatkowe urządzenia, wymagane potrzebą indywidualnego napędu pomp obsługujących napęd główny i siłownię. Wprowadzenie energii elektrycznej pozwoliło znacznie unowocześnić instalacje statkowe, ale wiązało się z koniecznością zamontowania dodatkowego, niezależnego od napędu głównego źródła energii elektrycznej. Elektryczność na statkach znacząco przyspieszyła rozwój technologii urządzeń do przewozu ładunku i pozwoliła na zwiększenie komfortu pracy załogi. Tym samym znacznie wzrosła liczba urządzeń wymagających zasilania energią.

Tak jak dla pierwszych statków z napędem mechanicznym pojęcie siłownia okrętowa było synonimem okrętowego układu energetycznego, tak na wielu współczesnych statkach handlowych energochłonne urządzenia do obsługi ładunku i załogi stanowią znaczący (w stosunku do napędu głównego) udział mocy i powodują, że bardziej właściwym jest stosowanie nazwy „okrętowy układ energetyczny".

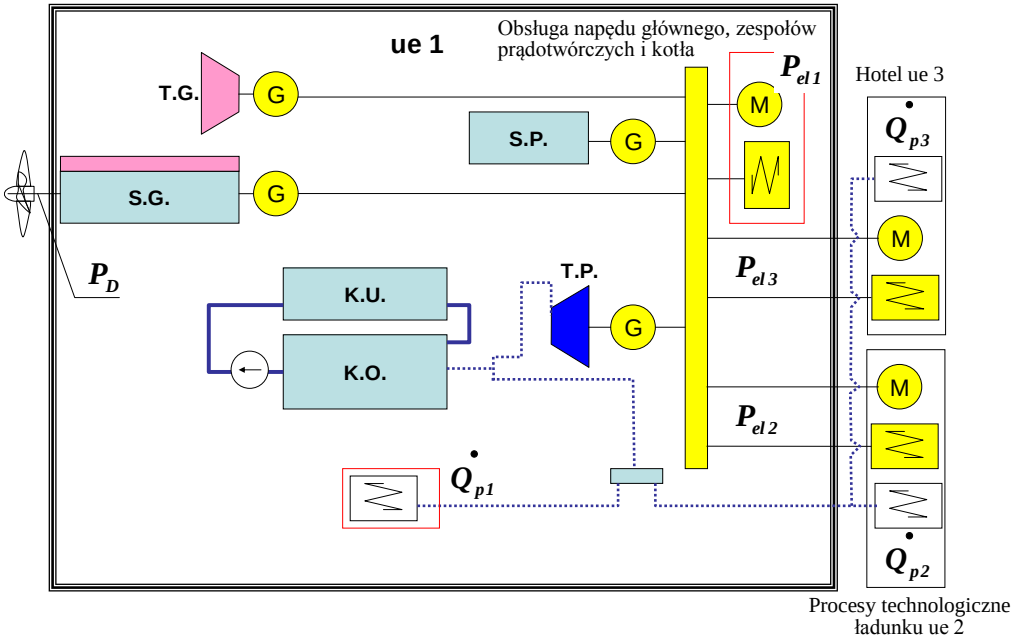
Biorąc pod uwagę podstawowe zadanie, jakim jest przewóz ładunku, współczesny statek towarowy musi spełniać trzy podstawowe funkcje:
- dostarczać energię do napędu statku oraz obsługi ładunku i załogi,
- zapewniać obsługę ładunku,
- zapewniać warunki pracy i bytowe załogi.

Niezbędne do tego celu wyposażenie może być zgromadzone w trzech grupach funkcyjnych, tworzących odrębne układy energetyczne (ue):
ue 1 – (siłownia okrętowa) urządzenia i instalacje napędzające statek, zespoły prądotwórcze i kotły wraz ze statkowymi zapasami paliwa;
ue 2 – urządzenia i instalacje obsługujące procesy technologiczne ładunku;
ue 3 – urządzenia i instalacje służące obsłudze załogi.

Kryterium przynależności urządzenia (czy instalacji) do określonej grupy jest pełniona funkcja, a nie umiejscowienie.

Z energetycznego punktu widzenia najistotniejszymi są urządzenia, w których następuje pierwotna przemiana energii paliwa na inne postacie energii. Sprawność tej przemiany ma decydujący wpływ na ekonomiczne wskaźniki eksploatacji, ponieważ koszty zużywanego paliwa stanowią kilkadziesiąt procent całkowitych kosztów statku. Dlatego celowym wydaje się rozpatrywanie pod tym kątem wydzielonej grupy urządzeń napędzających statek i wytwarzających energię elektryczną i cieplną na potrzeby siłowni i pozostałych układów energetycznych.

Jak wspomniano wcześniej, występują jednak rozbieżności w ustaleniu zakresu mocy użytecznej. Dla zminimalizowania tych różnic proponuje się granice osłony bilansowej obejmujące urządzenia i instalacje umożliwiające hipotetyczną autonomiczność żeglugi samej siłowni okrętowej. Ilustracją takiej idei jest pchacz zestawów barek, którego budowa i okrętowy układ energetyczny pozwala albo na samodzielną podróż, albo na transport ładunku. W układzie energetycznym statku towarowego można teoretycznie wydzielić urządzenia i instalacje tworzące strukturę energetyczną „pcha-



Rys. 1. Przykład okrętowego układu energetycznego, ue 1 – autonomiczna siłownia okrętowa, ue 2 – urządzenia i instalacje obsługujące ładunek, ue 3 – urządzenia i instalacje obsługujące załogę (hotel); S.G. – silnik główny, S.P. – silnik pomocniczy zespołu prądotwórczego, K.O. – kocioł opalany, K.U. – kocioł utylizacyjny, T.G. – turbina gazowa, T.P. – turbina parowa, indeksy 1, 2 i 3 odpowiadają numerom układów energetycznych ue; $\dot{Q}_{p1}$ – strumień ciepła pary przeznaczonej do ogrzewania zbiorników zapasowych paliwa, zbiorników osadowych, rozchodowych, podgrzewacza paliwa S.G., rurociągów paliwowych, podgrzewaczy wirówek olejowych i paliwowych, podgrzewacza wody chłodzącej S.G., zbiornika oleju obiegowego S.G., odolejacza wód zęzowych, zbiorników odpadów olejowych, itd.; $\dot{Q}_{p2}$ – strumień ciepła pary przeznaczonej do ogrzewania ładunku, ogrzewania zbiorników oleju hydraulicznego, napędu pomp ładunkowych, itd.; $\dot{Q}_{p3}$ – strumień ciepła pary przeznaczonej do ogrzewania instalacji związanych z obecnością załogi na statku, kuchni, podgrzewaczy wody sanitarnej, klimatyzacji, itd.; P_{el1} – energia elektryczna zużyta do napędu silników elektrycznych pomp obsługujących napęd główny (wraz z S.G.), S.P. i kotłów, wirówek paliwa, sprężarek powietrza, pomp odolejacza, pomp i wentylatorów spalarki odpadów olejowych, pompy transportowej paliwa, wentylatorów siłowni, elektrycznych podgrzewaczy obsługujących S.G., S.P. i kotły, maszyny sterowej, urządzeń nawigacyjnych i radiowych, itd.; P_{el2} – energia elektryczna zużyta do napędu pomp ładunkowych, sprężarek chłodniczych ładunku, podgrzewaczy elektrycznych urządzeń obsługujących ładunek, dźwigów ładunkowych, itd.; P_{el3} – energia elektryczna zużyta do zasilania urządzeń i instalacji związanych z obecnością załogi na statku, kuchni, klimatyzacji, podgrzewacz wody sanitarnej i pitnej, pomp zasilających i pomp obiegowych, oczyszczalni ścieków sanitarnych, oświetlenia, itd.

Fig. 1. Example of ship's energy system, ue 1 – autonomous marine power plant, ue 2 – devices and plants servicing cargo, ue 3 – devices and plants servicing crew members (hotel); S.G. – main engine, S.P. – auxiliary engine of generator set, K.O. – fueled boiler, K.U. – waste heat recovery boiler, T.G. – gas turbine, T.P. – steam turbine, indexes 1, 2 and 3 correspond with numbers of energy systems ue; $\dot{Q}_{p1}$ – heat flux of steam for a purpose of heating of fuel storage tanks, settling and service tanks, fuel oil heaters of main engine, fuel oil pipes, lubricating and fuel oil separators, main engine cooling water heaters, main engine lubricating oil sump tank, bilge water separator, sludge tanks, etc.; $\dot{Q}_{p2}$ – heat flux of steam for a purpose of heating of cargo, hydraulic oil tanks, driving of cargo pumps, etc.; $\dot{Q}_{p3}$ – heat flux of steam for a purpose of heating of plants connected with a presence of crew members on board, air condition, kitchen, water heaters, etc.; P_{el1} – electric energy consumed for driving of pumps servicing main propulsion plant (with main engine), auxiliary engines and boilers, lubricating and fuel oil separators, starting air compressors, pumps of bilge water separator, pumps and funs of sludge incinerator, fuel oil transfer pump, engine room funs, steering gear, electric heaters for main and auxiliary engines and boilers, navigational and radio equipment, etc.; P_{el2} – electric energy consumed for driving of cargo pumps, cargo refrigerating plant, electric heaters for cargo, cargo cranes, etc.; P_{el3} – electric energy consumed for a purpose of supplying of plants connected with a presence of crew members on board, air condition, kitchen, water heaters, supply and circulating pumps of water, waste water treatment plant, lighting, etc.

cza", którą można nazwać „autonomiczną siłownią okrętową". Składa się na nią wyposażenie techniczne i zapas energii umożliwiający samodzielną żeglugę. Grupuje w ue 1 urządzenia i instalacje realizujące procesy przemiany energii chemicznej paliwa i instalacje je obsługujące W skład takiej siłowni wchodzą także instalacje realizujące zadania, które nie są bezpośrednio związane z przemianami energetycznymi, ale ich niezbędność wynika z przepisów bezpieczeństwa żeglugi (wyposażenie nawigacyjne i łączności) i ochrony środowiska (instalacja wód zęzowych, odpadów ropopochodnych czy też oczyszczania spalin).

Osłona bilansowa ue 1 obejmuje wtedy następujące urządzenia i instalacje siłowni:

1. Napęd główny – parametrem wyjściowym jest moc dostarczana do śruby P_D;
2. Zespoły prądotwórcze – parametrem wyjściowym jest moc na zaciskach prądnicy P_{el};
3. Kocioł opalany i utylizacyjny – parametrem wyjściowym jest moc cieplna pary Q_P;
4. Instalacje grzewcze wszystkich zbiorników paliwa silników głównych, prądotwórczych, pomocniczych oraz kotła;
5. Wszystkie urządzenia i instalacje obsługujące napęd główny, ZP i kocioł;
6. Urządzenie sterowe;
7. Instalacje zęzowe;
8. Instalacje przechowywania, ewentualnie obróbki i spalania odpadów ropopochodnych;
9. Instalacje oczyszczania spalin;
10. Wszystkie urządzenia nawigacyjne.

W siłowni okrętowej (ue 1) mieszczą się silniki napędu głównego z elementami transmisji mocy do pędnika, zespoły prądotwórcze, kotły parowe (lub olejowe), instalacje grzewcze zbiorników paliwowych (także zapasowych), pompy, sprężarki powietrza i instalacje obsługujące napędy główne, zespoły prądotwórcze i kotły, urządzenia nawigacyjne, urządzenia do oczyszczania paliw i olejów, odolejacz, spalarka odpadów olejowych, wentylatory siłowni. Na rysunku 1 w osłonie bilansowej siłowni pokazano przykładowe rozwiązanie z prądnicą wałową oraz służące do utylizacji ciepła odpadowego: turboprądnicę gazową i turboprądnicę parową. W tej grupie urządzeń i instalacji następuje zamiana energii chemicznej paliwa na energię mechaniczną, elektryczną i cieplną oraz ewentualna utylizacja ciepła odpadowego, procesy, dzięki którym zasilane są układy ue 2 i ue 3. Układ energetyczny ue 1 jest właściwą „siłownią okrętową", której zadaniami są napęd statku i wytwarzanie energii, z uwzględnieniem zużycia energii niezbędnej do pracy autonomicznej.

Ue 2, czyli instalacje i urządzenia obsługujące ładunek lub procesy technologiczne (np. na chłodniowcu wentylatory, sprężarki i instalacje chłodnicze ładowni), są odrębnym układem energetycznym. W zależności od rodzaju ładunku (np. mrożona ryba, banany, jabłka, itd.), rejonu pływania, różne jest zapotrzebowanie na energię do obsługi ładunku. Kiedy statek podróżuje pod balastem, zapotrzebowanie energii dla tego układu jest niemalże równe zeru, podobnie jak w przypadku masowca. Są tu też urządzenia takie, jak pompy balastowe, ładunkowe, mycia ładowni, instalacje hydrauliczne, np. otwierania ładowni lub dźwigów, dźwigi elektryczne, urządzenia samowyładowawcze, instalacje chłodnicze, grzewcze, cumownicze, kotwiczne itd.

Urządzenia trzeciego układu ue 3 są przeznaczone do zapewnienia warunków bytowych załogi obsługującej statek. W jego skład wchodzą chłodnie prowiantowe, wentylacja i klimatyzacja, wyparownik, pompy obiegowe wody sanitarnej ciepłej, pompy hydroforowe wody pitnej i sanitarnej, kuchnia, oczyszczalnia ścieków, itd.

Układ 1 może funkcjonować niezależnie od obecności ue 2 lub ue 3, natomiast układy 2 i 3 są zależne od energii dostarczonej z ue 1.

W pierwszym układzie (ue 1) wszystkie urządzenia i instalacje charakteryzują się jednoznacznymi i mierzalnymi wartościami parametrów dla wyznaczenia mocy wejściowej i wyjściowej. To pozwala na utworzenie bilansu energetycznego tak pojmowanej siłowni okrętowej ue 1 i ewentualnie wskazanie źródeł energii odpadowej siłowni.

Umowne wyodrębnienie urządzeń i instalacji siłowni autonomicznej pozwala wyznaczyć składniki jej bilansu energetycznego (rys. 2):

$$\dot{B} \cdot W_d = P_D + P_{el} + \dot{Q}_p + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 \qquad (2)$$

gdzie:

$\dot{B}$ – strumień masy paliwa [kg/s];

W_d – wartość opałowa paliwa [kJ/kg];

P_D – moc dostarczona do śruby [kW];

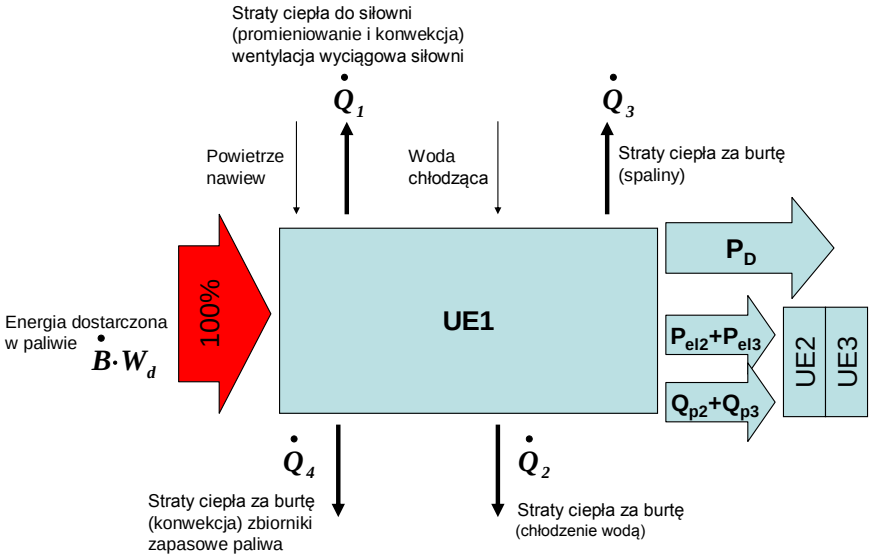
$P_{el} = P_{el1} + P_{el2} + P_{el3}$ – całkowita moc elektryczna wyprodukowana w siłowni [kW];

$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{p1} + \dot{Q}_{p2} + \dot{Q}_{p3}$ – całkowita moc cieplna pary uzyskana w siłowni [kW];

$\dot{Q}_1$ – straty ciepła urządzeń i instalacji na skutek promieniowania i konwekcji unoszone w powietrzu [kW];

$\dot{Q}_2$ – straty ciepła unoszone w wodzie chłodzącej zaburtowej (morskiej) [kW];

$\dot{Q}_3$ – straty ciepła unoszone w spalinach silników głównych, zespołów prądotwórczych, pomocniczych, kotłów [kW];



Rys. 2. Składniki bilansu energetycznego okrętowego układu energetycznego (opis w tekście)
Fig. 2. Energy balance components of ship's energy system (specification in text)

$\dot{Q}_4$ – straty ciepła zbiorników zapasowych paliwa w kadłubie (kW)

i tym samym jej sprawność energetyczną, uwzględniając składniki opisane na rysunku 1:

$$\eta_{autn} = \frac{P_D + (P_{el} - P_{el1}) + (\dot{Q}_p - \dot{Q}_{p1})}{\dot{B} \cdot W_d} \qquad (3)$$

Sprawność energetyczna siłowni autonomicznej η_{autn} jest równoznaczna ze sprawnością wytwarzania energii przez układ ue 1. Znane i stosowane obecnie instalacje utylizacji ciepła odpadowego na statku umiejscowione są w układzie energetycznym ue 1, wpływając na podwyższenie sprawności wytwarzania energii. Umiejscowienie ich w tym miejscu jest uzasadnione parametrami źródeł ciepła odpadowego, pochodzącymi przede wszystkim z silników napędu głównego [6].

Zastosowanie proponowanej definicji autonomicznej siłowni okrętowej dla statków towarowych umożliwi porównywanie wartości sprawności różnych siłowni okrętowych i pozwoli na ocenę skutków energetycznych zastosowania utylizacji ciepła odpadowego.

Bibliografia

1. BALCERSKI A.: Modele probabilistyczne w teorii projektowania i eksploatacji spalinowych siłowni okrętowych. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2007.
2. URBAŃSKI P.: Gospodarka energetyczna na statkach. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1978.
3. KOWALSKI A., KRZYŻANOWSKI J.: Okrętowe siłownie parowe. Wyższa Szkoła Morska, Gdynia 1991.
4. WOJNOWSKI W.: Okrętowe siłownie spalinowe, cz. 2. Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Gdynia 1999.
5. KACPERCZYK G. i zespół: Zasady metodyczne sprawozdawczości statystycznej z zakresu gospodarki paliwami i energią oraz definicje stosowanych pojęć. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2006.
6. BEHRENDT C., ADAMKIEWICZ A., KRAUSE P.: Turboprądnica utylizacyjna na parę nasyconą jako alternatywne źródło energii elektrycznej w systemie odzyskiwania energii wtórnej statku. SymSO 2006, Szczecin 2006.

Recenzent:
prof. dr hab. inż. Andrzej Balcerski
Politechnika Gdańska