

## MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA METOD I MODELI PROBABILISTYCZNYCH W PROJEKTOWANIU OKRĘTOWYCH INSTALACJI PAROWYCH

**Damian Bocheński**  
**Dominik Kreft**

*Politechnika Gdańska,  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,  
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych  
Ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
e-mail: [daboch@pg.edu.pl](mailto:daboch@pg.edu.pl), [dominik.kreft@pg.edu.pl](mailto:dominik.kreft@pg.edu.pl)*

### Streszczenie

*Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania metod i modeli probabilistycznych w projektowaniu okrętowych instalacji parowych w siłowniach spalinowych. Zaproponowano dwie możliwości opisu eksploatacyjnych wydajności kotłów utylizacyjnych oraz eksploatacyjnego zapotrzebowania ciepła. Pierwsza to zastosowanie do opisu rozkładu normalnego, drugą jest zamodelowanie okrętowej instalacji parowej jako systemu masowej obsługi.*

**Słowa kluczowe:** instalacja parowa, zapotrzebowanie ciepła, kotły utylizacyjne, system masowej obsługi

### 1. Wprowadzenie

Instalacja parowa w okrętowych siłowniach spalinowych spełnia rolę instalacji grzewczej. Jej zadaniem jest pokrywanie zapotrzebowania na ciepło. Najczęstszym rozwiązaniem instalacji jest układ z dwoma kotłami pomocniczymi: jeden – jest kotłem utylizacyjnym wykorzystującym ciepło odpadowe spalin silnika głównego, drugi – jest kotłem opalonym. Istotnym elementem instalacji jest skraplacz nadmiarowy, który skrapla nadmiar pary wytworzonej przez kocioł utylizacyjny.

Projektowanie instalacji parowej na wstępnych etapach projektowania statku obejmuje określenie zapotrzebowania ciepła i na jego podstawie wstępny dobór kotłów pomocniczych. Do określania zapotrzebowania ciepła wykorzystywane są głównie metody wskaźnikowe, zależności regresyjne [8]. Wielkość kotła utylizacyjnego jest zależna od doboru silnika głównego. Obecnie zakłada się maksymalne wykorzystanie ciepła odpadowego spalin. Nadmiar wytworzonej pary grzewczej skraplany jest skraplaczu, którego parametry na tym etapie projektu statku nie są jeszcze dokładnie określone.

Na etapie projektu technicznego (klasyfikacyjnego) określone są parametry wszystkich urządzeń występujących na statku. W przypadku instalacji parowej określone są parametry pomp zasilających i obiegowych, chłodnicy skroplin, wszystkich podgrzewaczy oraz węzownic grzewczych w zbiornikach czynników ogrzewanych (głównie paliwa ciężkiego). Dobór tych urządzeń pozwala na wykonanie tzw. bilansu zapotrzebowanego ciepła, który sporządza się dla dwóch skrajnych warunków zewnętrznych: zima i lato, oraz dla wytypowanych charakterystycznych stanów eksploatacji projektowanego statku.

Sporządzony bilans zapotrzebowanego ciepła pozwala na skorygowanie parametrów charakteryzujących kotły pomocnicze oraz na określenie parametrów skraplacza nadmiarowego.

Wszystkie metody wykorzystywane w projektowaniu instalacji parowej są w zasadzie metodami wykorzystującymi modele deterministyczne. Dobór urządzeń dokonywany jest przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków eksploatacji. Nie podważając stosowanych w praktyce projektowej metod warto zastanowić się nad ewentualnym zastosowaniem metod wykorzystujących modele probabilistyczne, które mogą lepiej opisać rzeczywistość eksploatacyjną statku [4].

Niniejszy artykuł przedstawia dwie możliwości wykorzystania metod probabilistycznych, które mogą być wykorzystane na wcześniejszych etapach projektowania statku. Obie dotyczą opisu eksploatacyjnych wydajności kotłów utylizacyjnych oraz eksploatacyjnego zapotrzebowania ciepła.

## **2. Wykorzystanie rozkładu normalnego do opisu eksploatacyjnych wydajności kotłów pomocniczych i zapotrzebowania pary grzewczej**

Eksploatacyjne obciążenia silników głównych, zespołów prądotwórczych i kotłów pomocniczych związane są z pracą licznych, pracujących niezależnie odbiorników. Odbiorniki te stwarzają zapotrzebowanie na energię, które są wynikiem zmian szeroko rozumianych niezależnych warunków zewnętrznych.

W przypadku zapotrzebowania pary grzewczej liczba jej odbiorników na statku często przekracza 100. Odbiorniki te charakteryzują się zróżnicowanym sposobem eksploatacji. Wśród nich są odbiorniki o pracy ciągłej, np. podgrzewacz paliwa ciężkiego przed silnikiem głównym, bądź okresowym np. podgrzewacz wody sanitarnej. Duży wpływ na łączne zapotrzebowanie pary grzewczej ma częstość uruchamiania odbiorników pracujących okresowo. Na zapotrzebowanie pary grzewczej przez niektóre odbiorniki, np. węzownice w zbiornikach paliwa, ma wpływ zmienna temperatura wody zaburtowej i powietrza, stopień zapelnienia zbiorników, i inne okoliczności.

W kilku pracach [2,3,7] przyjmuje się, zgodnie z granicznym twierdzeniem Lapunova, że rozkłady eksploatacyjnych obciążeń silników głównych, zespołów prądotwórczych i kotłów pomocniczych mają charakter rozkładu normalnego (lub zbliżonego do normalnego). Potwierdzają to wyniki badań [4,6] wskazujące na możliwość aproksymacji tych rozkładów obciążeń przy wykorzystaniu rozkładu normalnego.

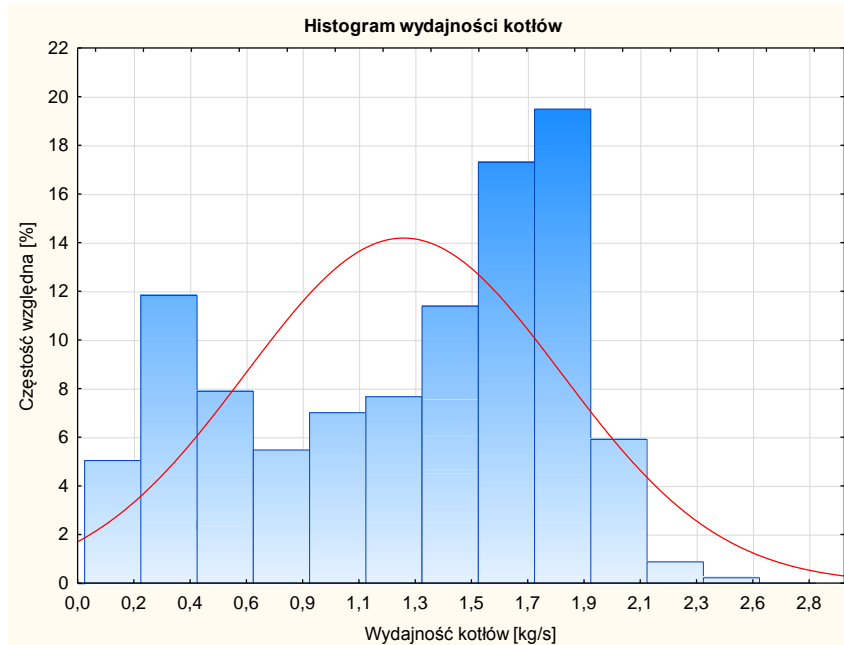
Podsumowując, pierwszą możliwością wykorzystania modeli probabilistycznych przy projektowaniu okrętowych instalacji parowych jest przyjęcie rozkładu normalnego do opisu eksploatacyjnych wydajności kotłów pomocniczych (utylizacyjnych i opalanych) oraz do opisu eksploatacyjnego łącznego zapotrzebowania pary grzewczej.

Zastosowanie rozkładu normalnego w metodach projektowych daje możliwości wykorzystania jego właściwości matematycznych, z których najważniejszą jest fakt, że suma i różnica dwóch zmiennych o rozkładach normalnych ma rozkład normalny. W przypadku instalacji parowej tę właściwość można wykorzystać przy obliczaniu eksploatacyjnej przepustowości skraplacza nadmiarowego, która jest różnicą eksploatacyjnej wydajności kotła utylizacyjnego i eksploatacyjnego zapotrzebowania pary grzewczej.

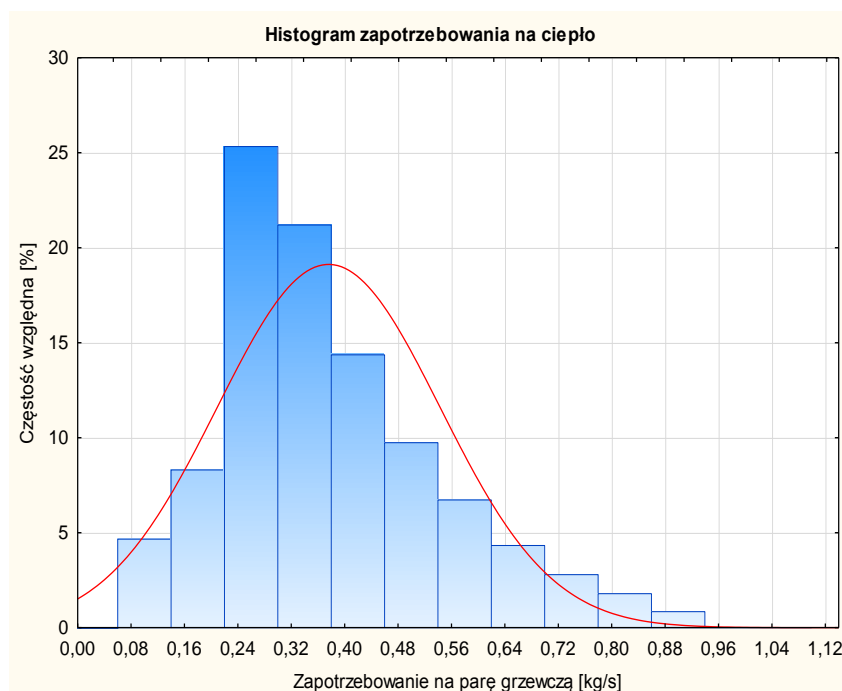
Na rys. 1 i 2 przedstawiono rozkłady eksploatacyjnych wydajności kotła utylizacyjnego i eksploatacyjnego zużycia pary na kontenerowcu „Blandine”. Przedstawiono je wraz z krzywymi gęstości rozkładu normalnego.

Wszystkie dane eksploatacyjne przedstawione w artykule dotyczą kontenerowca „Blandine”. Wydajność kotła utylizacyjnego określano wykorzystując zależność ciepła strat w spalinach wylotowych jako funkcji obciążenia silnika głównego. Do określania

eksploatacyjnego zużycia pary wykorzystywano obliczane wartości ciepła wymienianego w skraplaczu nadmiarowym (zainstalowano urządzenia do pomiaru natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacz nadmiarowy i czujniki temperatury wody chłodzącej na wlocie i wylocie ze skraplacza). Badania eksploatacyjne przeprowadzane były w okresie: 22.10.2018 r. – 28.01.2019 r.



Rys. 1. Histogram wydajności kotła utylizacyjnego na kontenerowcu „Blandine”



Rys. 1. Histogram eksploatacyjnego zużycia pary grzewczej na kontenerowcu „Blandine”

### 3. Instalacja parowa jako system masowej obsługi

Drugą możliwością wykorzystania metod probabilistycznych w projektowaniu okrętowych instalacji parowych jest zamodelowanie tej instalacji jako systemu masowej

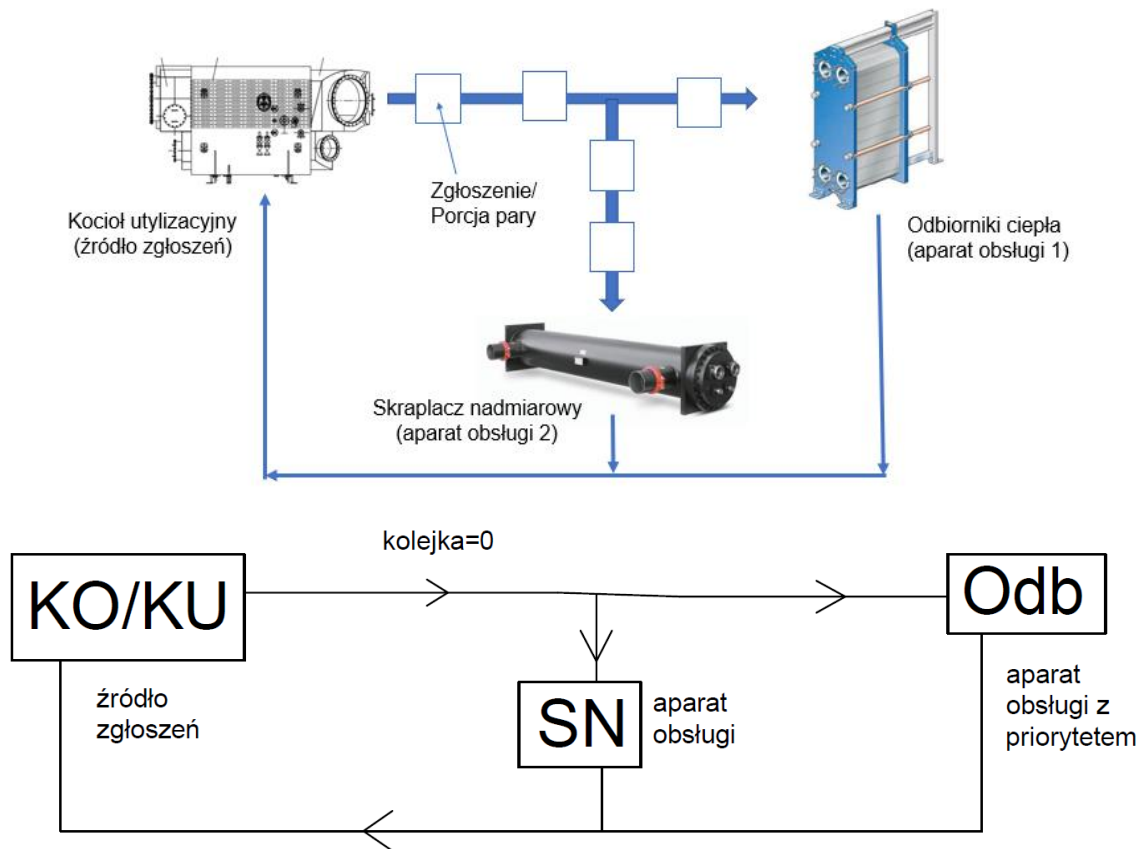
obsługi. Przykładem zastosowania metod teorii masowej obsługi w okrętownictwie jest jej wykorzystanie do projektowania układów przetwórstwa ryb [1], czy też do projektowania układu wytwarzania i gospodarki wodą słodką na trawlerach rybackich [5].

Wykorzystanie metod teorii masowej obsługi do projektowania instalacji parowej uwarunkowane jest możliwością przedstawienia tej instalacji jako systemu masowej obsługi. Przykładowym systemem masowej obsługi, który mógłby zostać wykorzystany do opisu instalacji parowej jest układ przedstawiony na rys. 3.

W tym przypadku zakłada się, że:

- ✓ Strumieniowi zgłoszeń na obsługę odpowiada strumień pary grzewczej wytwarzanej w kotle utylizacyjnym. Za zgłoszenie można przyjąć porcję pary np. 100 kg, lub porcję ciepła np. 200 MJ. Intensywności zgłoszeń odpowiada rzeczywista wydajność kotła utylizacyjnego;
- ✓ Dwa aparaty obsługi (związane z nimi dwa kanały obsługi), pierwszy odpowiadający odbiornikom zużywającym parę, drugi to skraplacz nadmiarowy;
- ✓ Procesowi obsługi odpowiada proces pokrywania zapotrzebowania pary grzewczej, przy czym intensywność obsługi odpowiada wartości zapotrzebowania;
- ✓ Regulamin kolejki, który podaje sposób pobierania zgłoszeń z kolejki, w tym wypadku dotyczący priorytetu obsługi pojawiających się zgłoszeń przez aparat obsługi 1 (aparat z priorytetem).

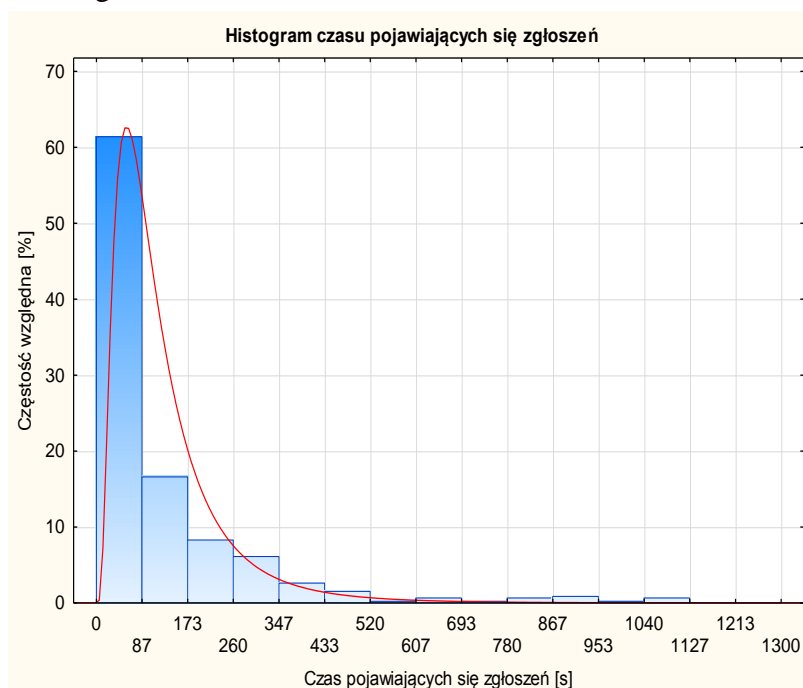
Przedstawiony powyżej system masowej obsługi jest jednym z kilku możliwych. Innym systemem może być np. system z jednym aparatem obsługi (odbiorniki ciepła) z zabronioną kolejką, zgłoszenie nie jest wtedy obsłużone i wychodzi z systemu trafiając do skraplacza. Ewentualnie system z ograniczoną kolejką, obejmującą pojemność głównego kolektora doprowadzającego parę do odbiorników.



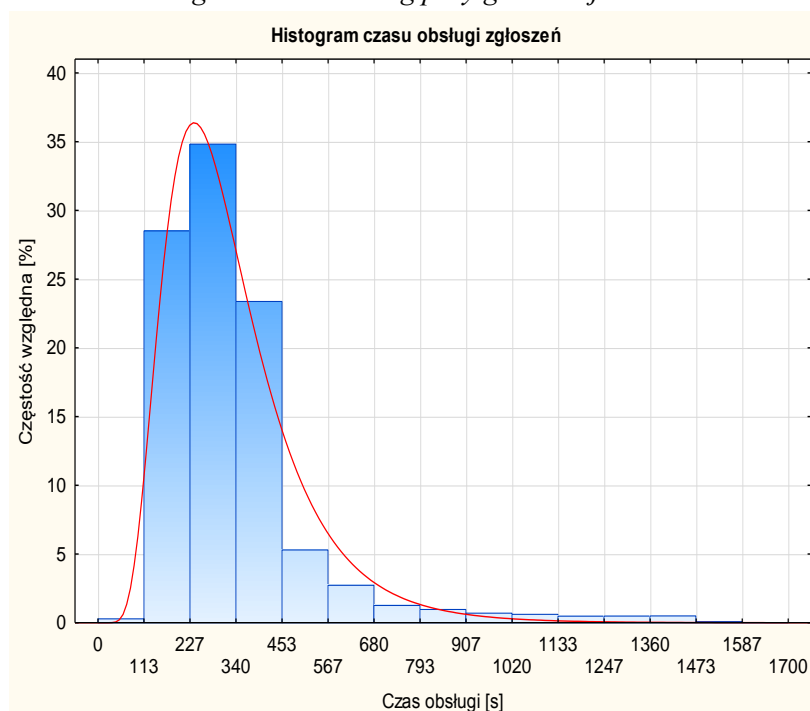
Rys. 3. Parowa instalacja grzewcza jako system masowej obsługi

Specyfikacja systemów masowej obsługi wymaga określenia charakterystyk strumienia zgłoszeń i procesu obsługi zgłoszeń. Charakterystyką strumienia zgłoszeń będzie rozkład czasów pojawiających się zgłoszeń, zaś charakterystyką procesu obsługi będzie rozkład czasów trwania obsługi pojawiających się zgłoszeń.

Na rys. 4 i 5, przedstawiono odpowiednio: rozkład czasów pojawiających się zgłoszeń (za jedno zgłoszenie przyjęto 100 kg pary) oraz rozkład czasów obsługi zgłoszeń na kontenerowcu „Blandine”. Przedstawiono je wraz z krzywymi gęstości rozkładu logarytmiczno-normalnego.



Rys. 4. Histogram czasów pojawiających się zgłoszeń na kontenerowcu „Blandine”. Jedno zgłoszenie = 100 kg pary grzewczej



Rys.5. Histogram czasów obsługi zgłoszeń na kontenerowcu „Blandine”. Jedno zgłoszenie = 100 kg pary grzewczej

Wstępnie przeprowadzone badania wykazały możliwość opisu rozkładu czasu pojawiających się zgłoszeń rozkładami: Gamma, Erlanga, logarytmiczno-normalnym, a nawet wykładniczym. W przypadku rozkładu czasu obsługi zgłoszeń najbliższe rzeczywistości eksploatacyjnej są rozkłady: logarytmiczno-normalny, Gamma i Erlanga.

#### 4. Podsumowanie

Wstępnie przeprowadzone badania eksploatacyjne nie wykazały wyższości jednej metody nad drugą. Autorzy prowadzą dalsze badania eksploatacyjne na statkach różnych typów jak również pozyskują dane eksploatacyjne z innych źródeł. Celem tych badań jest pozyskanie jak największego zbioru danych eksploatacyjnych dotyczących eksploatacji parowych instalacji grzewczych na statkach, które posłużą do opracowania nowych metod projektowych wykorzystujących modele probabilistyczne. Będzie to stanowić istotne dopełnienie metod teorii projektowania siłowni okrętowych.

Proponowane metody, wykorzystujące modele probabilistyczne, będą miały charakter narzędzia analizy różnych wariantów rozwiązań okrętowej instalacji parowej. Pozwolą na określenie konsekwencji eksploatacyjnych związanych z tymi wariantami. Metody te mogą być przydatne na etapie opracowywania założeń armatorskich i projektu wstępnego, a także oceny celowości modernizacji istniejących instalacji parowych.

#### Literatura

1. Balcerski A.: *Metoda doboru głównych parametrów systemów przetwórczych uprzemysłowionych statków rybackich*. Praca doktorska, Instytut Okrętowy PG, Gdańsk 1976
2. Balcerski A.: *Studium projektowania układów energetycznych trawlerów łowczo-przetwórczych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Okrętowe LVIII. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991
3. Balcerski A. (kier. projektu): *Badania identyfikacyjne rzeczywistych warunków pracy maszyn i urządzeń siłowni różnych typów morskich jednostek pływających*. Projekt KBN nr 9 S6 0406907. Gdańsk 1996
4. Balcerski A.: *Modele probabilistyczne w teorii projektowania i eksploatacji spalinowych siłowni okrętowych*. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2007
5. Bocheński D.: *Dobór głównych parametrów układów wytwarzania i gospodarki wodą słodką na uprzemysłowionych statkach rybackich z uwzględnieniem rzeczywistych warunków ich eksploatacji*. Praca doktorska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa PG, Gdańsk 1995
6. Bocheński D. (kier. projektu): *Badania identyfikacyjne energochłonności i parametrów urabiania oraz transportu urobku na wybranych typach pogłębiarek i refulerów*. Projekt KBN nr 9 T12 C01718. Gdańsk 2003
7. Bocheński D.: *Projektowanie wstępne siłowni pogłębiarek z wykorzystaniem metod i modeli probabilistycznych*. Seria Monografie nr 142, Gdańsk 2013
8. Kreft D.: *Analiza metod stosowanych przy projektowaniu okrętowych instalacji grzewczych*. Journal of Polish CIMEEAC, vol. 13 no 1, Gdańsk 2018.