

MAŁGORZATA PAWLAK, LESZEK PIASECZNY *

MODELOWANIE RUCHU JEDNOSTEK MORSKICH DLA OKREŚLANIA EMISJI ZWIĄZKÓW TOKSYCZNYCH SPALIN

MODELING SHIP TRAFFIC TO DETERMINE EXHAUST GAS TOXIC COMPOUNDS EMISSION

Streszczenie

Rozwój transportu morskiego oraz prognozowany wzrost emisji związków szkodliwych powstających w wyniku spalania paliw żeglugowych, oprócz badania tej emisji, wymusza potrzebę modelowania dyspersji zanieczyszczeń oraz ich imisji w rejonach nadmorskich aglomeracji miejskich. Pierwszym krokiem do opracowania modeli emisji związków toksycznych w spalinach jednostek pływających jest określenie modeli matematycznych ruchu jednostek pływających. Modele emisji zaś mogą być w dalszej kolejności wykorzystane do budowy modeli dyspersji i imisji tych związków. W artykule wskazano na możliwość wykorzystania teorii masowej obsługi i metod Monte Carlo do uzyskania modelu symulacyjnego ruchu jednostek morskich na danym obszarze.

Słowa kluczowe: morskie jednostki pływające, modelowanie drogi, emisja, modele masowej obsługi, Monte Carlo

Abstract

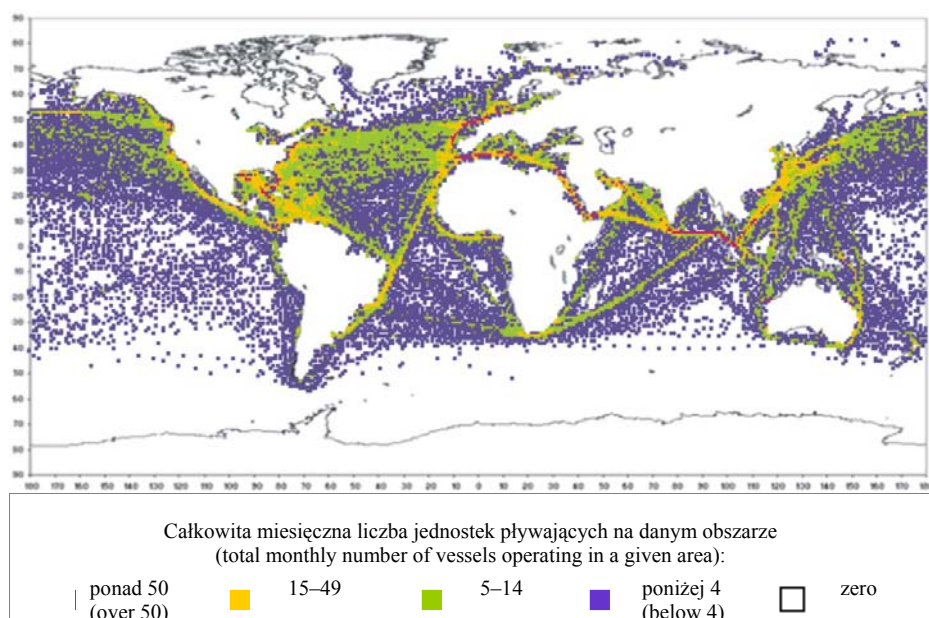
Marine transport development and projected global increase in emission of harmful compounds produced when burning marine fuels, apart from conducting research on emission of toxic compounds in marine engines exhaust gases, enforces the need of modelling dispersion of these pollutants and their imission in seaside agglomeration areas. The first step of formulating models of emission of toxic compounds in marine vessels exhaust gases is to formulate mathematical models of vessels movement. Later, emission models can be used in formulating dispersion and imission models of these compounds. The article indicates the possibility of using the queuing theory and Monte Carlo methods to formulate a simulation model describing the marine vessels movement in a given sea area.

Keywords: marine vessels, trajectory modelling, emission, queuing theory, Monte Carlo models

* Mgr inż. Małgorzata Pawlak, prof. dr hab. inż. Leszek Piaseczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni.

1. Wstęp

Międzynarodowy handel drogą morską stanowi istotną część światowej gospodarki. Ponad 90% handlu światowego odbywa się właśnie tą drogą. Szacuje się, że 85% globalnego ruchu statków odbywa się na półkuli północnej, z czego 70% w odległości do 400 km od lądu [1]. Zanieczyszczanie powietrza przez statki ma miejsce nie tylko na pełnym morzu, ale również w portach, czyli w bliskim sąsiedztwie aglomeracji miejskich. Problem emisji ze statków jest tym istotniejszy, że w przeciwieństwie do zmniejszających się z roku na rok emisji ze źródeł lądowych, prognozuje się, że emisja zanieczyszczeń ze statków będzie cały czas wzrastać [2–4].



Rys. 1. Ruch statków na wodach morskich na świecie w czerwcu 2007 r. [21] Każdy kolorowy punkt zaznaczony na rysunku odpowiada wielkością wymiarowi jednego stopnia (60 minut szerokości geograficznej na 60 minut długości geograficznej) i jest miesięcznym uśrednieniem gęstości ruchu statków w danym miejscu

Fig. 1. Marine vessels traffic worldwide for June 2007 [21]. Each coloured dot displayed on the chart approximates a one-degree "cell" (60 minutes of latitude by 60 minutes of longitude) and constitutes for the mean monthly density of vessels at a given cell

Obecnie, jednym z narzędzi wykorzystywanych w próbach szacowania emisji substancji szkodliwych wprowadzanych do atmosfery, na skutek spalania paliwa, są specjalistyczne modele matematyczne [5–20]. Najwięcej takich modeli jest budowanych w celu badań emisji pochodzenia motoryzacyjnego [5–16]. Modele te przeważnie zawierają mo-

dele ruchu scharakteryzowane średnią prędkością ruchu pojazdów, a także charakterystyki ekonomiczne i ekologiczne pojazdów w postaci drogowego zużycia paliwa i emisji drogowej, uzależnione od średniej prędkości ruchu pojazdów [7–8]. W odniesieniu do statków, istnieją bazy danych o rozkładzie średniej liczby statków w rozpatrywanym okresie na określonym obszarze (rys. 1).

Takie oszacowania, choć dają ogólny pogląd na natężenie statków w danym obszarze, to jednak bywają często zbyt ogólne i mało dokładne, zwłaszcza, jeśli celem badań nie jest określenie średniej liczby jednostek w danym akwenie, ale opisanie trajektorii ruchu pojedynczych jednostek w określonym obszarze, w określonym przedziale czasu (np. od momentu wypłynięcia z portu t_0 do momentu przybycia do innego portu t_k). Modelowanie powinno również uwzględniać parametry techniczne jednostki (rodzaj, obciążenie, moc itp.), co byłoby pomocne w modelowaniu emisji, a także dyspersji związków szkodliwych w spalinach tej jednostki.

W związku z tym, że w literaturze specjalistycznej obserwuje się brak modeli adekwatnych do charakteru ruchu statków i emitowanych przez nie związków szkodliwych, a tym samym przydatnych do modelowania ich emisji, dyspersji i imisji w rejonie nadmorskim, autorzy podjęli próbę opracowania modelu ruchu jednostek morskich odpowiedniego dla tych celów. Określenie trajektorii ruchu jednostki pływającej za pomocą odpowiedniego modelu matematycznego stanowi pierwszy i niezbędny krok do opracowania tych modeli. Natomiast modele emisji mogą być w dalszej kolejności wykorzystane przy budowie modeli dyspersji związków szkodliwych i ich imisji na obszarach oddalonych od źródeł emisji, np. na terenach aglomeracji miejskich [22, 23].

2. Pozyskiwanie danych o ruchu jednostek morskich

Informacje identyfikujące jednostkę pływającą oraz określające jej parametry ruchu można uzyskać za pomocą systemu Służby Kontroli Ruchu Statków (VTS – ang. *Vessel Traffic Service*), który jest stosowany w rejonach gdzie natężenie ruchu, skupienie dużej liczby jednostek w wąskich przejściach lub obecność niebezpieczeństw nawigacyjnych stwarzają duże zagrożenie kolizji lub wejścia na mieliznę. System ten m.in. dostarcza danych o sytuacji hydrometeorologicznej w rejonie oraz podaje informacje na temat pozycji jednostek, ich ruchu oraz zamierzeniach i intencjach [24].

Innym systemem jest System Automatycznej Identyfikacji (AIS – ang. *Automatic Identification System*), czyli morski system identyfikacji statków. Zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Organizacji Morskiej IMO, zainstalowany na jednostce pływającej AIS powinien automatycznie transmitować (na paśmie VHF) i odbierać następujące dane [25]:

- dane statyczne: numer MMSI (ang. *Maritime Mobile Service Identity*), numer IMO statku, sygnał wywoławczy i nazwę statku, długość i szerokość statku, typ statku oraz położenie anteny statkowego odbiornika radionawigacyjnego podłączonego do AIS w stosunku do kadłuba statku,
- dane dynamiczne: współrzędne geograficzne pozycji otrzymane ze statkowego odbiornika radionawigacyjnego podłączonego do AIS, wraz ze wskazaniem jej dokładności, czas uniwersalny (UTC – ang. *Universal Time*), kąt drogi nad dnem (COG) i prędkość nad dnem (VTG), kurs rzeczywisty (HDG), status nawigacyjny określony zgodnie z postanowieniami międzynarodowych przepisów o zapobieganiu zderzeniom na morzu

(np. nieodpowiadający za swoje ruchy, na kotwicy itp.), prędkość kątową zwrotu (ROT), opcjonalnie: stały kąt przechyłu bocznego i aktualne wartości kątów przechyłów wzdłużnych i poprzecznych,

- dane dotyczące podróży: zanurzenie statku, wymagane przez administrację morską lub władze portowe informacje o przewożonych ładunkach niebezpiecznych, port przeznaczenia i przewidywany czas przybycia do tego portu (ETA – ang. *Estimated Time of Arrival*), opcjonalnie: planowaną trasę przejścia (pozycje kolejnych punktów zwrotu), oraz informację dotyczącą bezpieczeństwa.

Urządzenie statkowe powinno transmitować w sposób autonomiczny w określonych odstępach czasowych:

- informację statyczną – co 6 minut i na żądanie,
- informację dynamiczną – w odstępach czasowych od 2 sekund do 3 minut, w zależności od prędkości statku,
- dane o podróży – co 6 minut, po każdej zmianie którejkolwiek z danych oraz na żądanie,
- krótką informację dotyczącą bezpieczeństwa – na żądanie.

Ten statkowy system nadawczy, działający jak transponder, jest zdolny do przesyłania i obsługi ponad 4500 raportów na minutę i odświeżania danych co 2 sekundy.

Dostępność tych szczegółowych danych dotyczących jednostek będzie pomocna w modelowaniu nie tylko trajektorii ruchu poszczególnych jednostek, ale również emisji, a w dalszej kolejności dyspersji zanieczyszczeń w spalinach jednostek pływających.

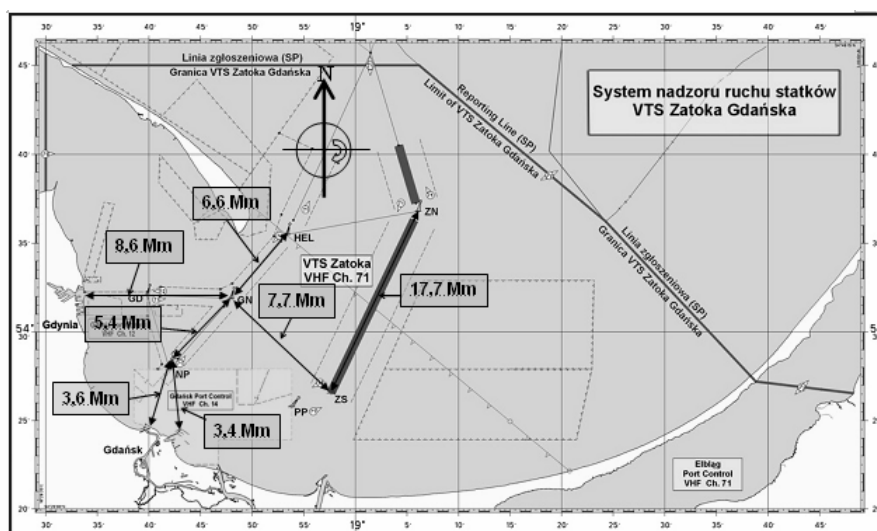
3. Określanie trajektorii ruchu jednostki pływającej

W celu opisanie trajektorii ruchu jednostki poruszającej się w danym obszarze torem wodnym z punktu P_{i-1} do punktu P_i w przedziale czasu (t_0, t_k) , należy zbudować odpowiedni model matematyczny. Należałoby tu rozważyć dwie opcje: model deterministyczny oraz model stochastyczny. Każdy z tych modeli musiałby składać się z funkcji drogi opisującej ruch pojedynczych jednostek oraz elementu opisującego w sposób probabilistyczny całkowitą liczbę jednostek poruszających się po danej drodze w przedziale czasu $(t_0, t_k]$, pozycję tych jednostek w czasie początkowym t_0 , jak również ich prędkość. Niezbędne jest tutaj założenie, że czasy wypłynięcia każdej jednostki z punktu P_i mają rozkład Poissona oraz że prędkość, z jaką poruszają się jednostki, oraz długość drogi, jaką przebywają, są statystycznie niezależne. Określenie trajektorii ruchu jednostki jest możliwe, jeśli zbudujemy funkcję drogi po jakiej porusza się jednostka, funkcję ruchu jednostki oraz funkcję trajektorii jednostki opisaną za pomocą dwóch pierwszych funkcji.

Funkcja drogi, którą porusza się jednostka pływająca opisuje zbiór wszystkich możliwych dróg z punktu P_{i-1} do punktu P_i , gdzie punkt P_{i-1} oznacza początek podróży, np. port wypłynięcia, a punkt P_i – koniec podróży, np. port docelowy. Im większy obszar zostanie wzięty pod uwagę, tym większa liczba par punktów (P_{i-1}, P_i) musi zostać rozpatrzona. Każda możliwa droga pomiędzy dwoma dowolnymi punktami jest funkcją odległości x mierzoną od punktu P_{i-1} wzdłuż drogi, którą porusza się jednostka.

Jednostki pływające z reguły poruszają się po szlakach żeglugowych (torach wodnych), czyli obszarach o określonej długości i szerokości. Na przykład, na Zatoce Gdańskiej można wyróżnić kilka głównych dróg, po których w dwu kierunkach poruszają się jed-

nostki (rys. 2). Te określonej długości i szerokości obszary (prostokąty) mają długość od kilku do kilkunastu mil morskich, a szerokość ok. 2 mil morskich.



Rys. 2. Mapa rejonu Zatoki Gdańskiej uwzględniająca długości odcinków podstawowych szlaków żeglugowych (w milach morskich) [26]

Fig. 2. Map of the Gdańsk Bay area, taking into account lengths of intervals of the main shipping lanes (in nautical miles) [26]

Znajomość tras żeglugowych w określonym rejonie powoduje, że dla większości jednostek pływających, jak np. statki handlowe czy promy pasażerskie podróżujące z portu do portu, można przyjąć założenie, że droga jaką pokonują odbywa się wzdłuż znanej trajektorii. Jednak, istnieje również grupa statków, jak np. jednostki rybackie, jednostki rekreacyjne czy militarne, które mogą pływać poza ściśle określonymi szlakami żeglugowymi. Dla tych kategorii jednostek konieczne może okazać się stworzenie bardziej skomplikowanych modeli ruchu, które w niniejszej pracy nie będą rozpatrywane.

Niech Δ_N będzie uporządkowanym zbiorem punktów $t_i, i \in \overline{1, N}$ dzielących przedział $[\alpha, \beta]$ na N podprzedziałów, przy czym $\alpha = t_0 < \dots < t_N = \beta$. Podziałowi temu odpowiada zbiór $N + 1$ punktów P_0, P_1, \dots, P_N leżących na łuku. Punkty te tworzą łamaną, która aproksymuje drogę jednostki pływającej. Długość odcinka łączącego punkty $P_{i-1}, P_i, i = 1, \dots, N$ wyrażona jest wzorem

$$|P_{i-1}P_i| = \sqrt{[x(t_i) - x(t_{i-1})]^2 + [y(t_i) - y(t_{i-1})]^2} \quad (1)$$

Korzystając z twierdzenia Lagrange'a o wartości średniej, szukana długość odcinka łączącego punkty $P_{i-1}, P_i, i = 1, \dots, N$ wynosi

$$|P_{i-1}P_i| = \sqrt{[x'(\theta_i)]^2 + [y'(\vartheta_i)]^2} \Delta t_i \quad (2)$$

gdzie θ_i , ϑ_i są pewnymi punktami z przedziału $[t_{i-1}, t_i)$, oraz $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$.

Dzięki danym statystycznym uzyskanym za pomocą systemu AIS dla jednostek morskich przepływających przez określone odcinki testowe (rys. 3), prostopadłe do torów podejściowych portu Gdynia i portu Gdańsk, oraz do toru wodnego rozdzielającego się na oba te tory (w okolicy portu Hel), istnieje możliwość opracowania strumieni ruchu jednostek. Współrzędne geograficzne odcinków testowych to:

$\overline{AB} = (54,58325^\circ\text{N}; 18,85362^\circ\text{E}) (54,45917^\circ\text{N}; 18,88191^\circ\text{E})$

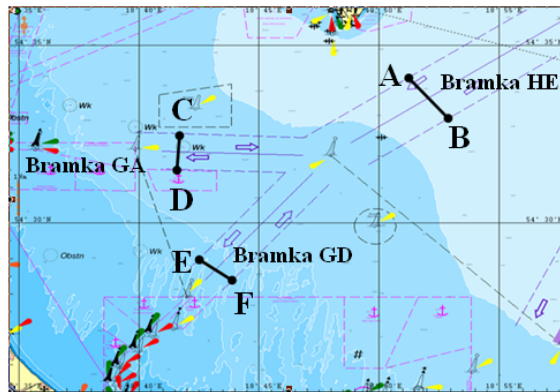
$\overline{CD} = (54,54200^\circ\text{N}; 18,69511^\circ\text{E}) (54,52508^\circ\text{N}; 18,69326^\circ\text{E})$

$\overline{EF} = (54,48666^\circ\text{N}; 18,70878^\circ\text{E}) (54,47326^\circ\text{N}; 18,73178^\circ\text{E})$

Dla potrzeb niniejszej pracy, rozpatrzono jednostki przepływające w ciągu jednego miesiąca – w dniach 01–30.06.2006 r. – przez odcinek \overline{EF} (zwany dalej bramką GD), które obrały kurs na Hel i przepłynęły przez odcinek \overline{AB} (zwany dalej bramką HE) bądź Gdynię i przepłynęły przez odcinek \overline{CD} (zwany dalej bramką GA). Dostępne dane statystyczne pozwoliły na zdefiniowanie rodzaju jednostek, ich prędkości, a co za tym idzie wyznaczenie czasu płynięcia na danej drodze (długość drogi od bramki GD do bramki HE wynosi 7,72 Mm, a od bramki GD do bramki GA wynosi 3,4 Mm).

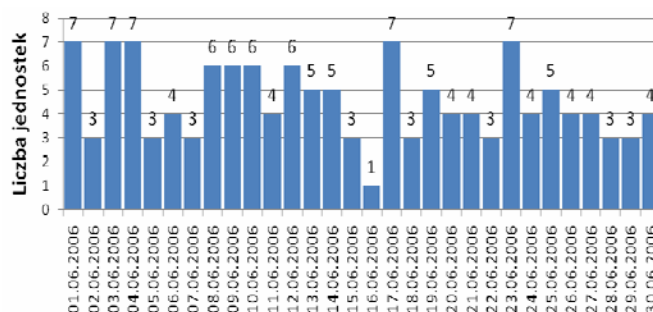
Liczba jednostek wychodzących w morze dla bramki GD w okresie: 01–30.06.2006 r. wyniosła 136. W pierwszym tygodniu czerwca (01–07.06.2006 r.) były to 34 jednostki, w drugim (08–14.06.2006 r.) – 38 jednostek, w trzecim (15–21.06.2006 r.) – 27 jednostek, a w ostatnim (22–30.06.2006 r.) – 37 jednostek. Dokładny, dobowy rozkład liczby jednostek wychodzących w morze przez Bramkę GD w czerwcu 2006 r. przedstawiono na rys. 4.

Przeciętnie, w ciągu jednej doby wychodzi w morze od 3 do 5 jednostek (rys. 5), najczęściej wypływa w godzinach popołudniowych (rys. 6), zaś najczęściej spotykana prędkość wynosi od 8 do 14 węzłów (rys. 7).



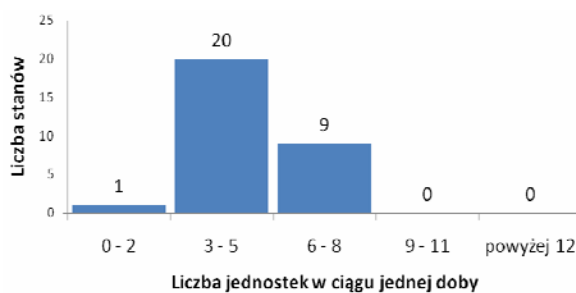
Rys. 3. Mapa Zatoki Gdańskiej z zaznaczonymi odcinkami testowymi [25]

Fig. 3. Map of Gdańsk Bay with the test intervals marked [25]



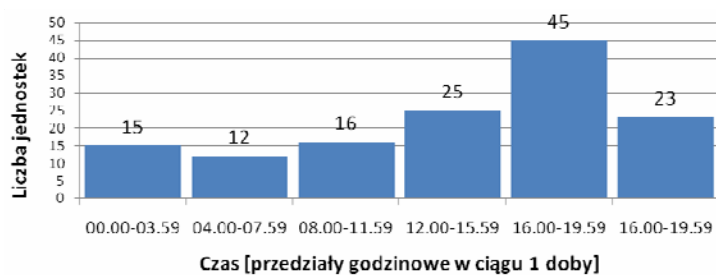
Rys. 4. Dobowy rozkład liczby jednostek wychodzących w morze przez bramkę GD (w okresie 01–30.06.2006 r.)

Fig. 4. A twenty-four hours distribution of the number of vessels outward bound passing through the gate GD (01–30.06.2006)



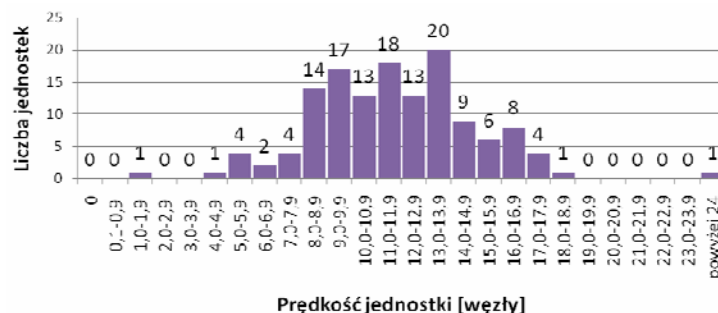
Rys. 5. Rozkład liczby jednostek wychodzących w morze przez bramkę GD w ciągu jednej doby (w okresie 01–30.06.2006 r.)

Fig. 5. Distribution of the number of vessels outward bound passing through the gate GD during 24 hours (01–30.06.2006)



Rys. 6. Rozkład liczby jednostek wychodzących w morze przez bramkę GD w zależności od pory dnia (w okresie 01–30.06.2006 r.)

Fig. 6. Distribution of the number of vessels outward bound passing through the gate GD depending on time intervals during 24 hours (01–30.06.2006)



Rys. 7. Rozkład liczby jednostek wychodzących w morze przez bramkę GD w zależności od prędkości VOG (nad dnem) [w węzłach] w okresie 01–30.06.2006 r.

Fig. 7. Distribution of the number of vessels outward bound passing through the gate GD depending on their velocity over ground (VOG) [in knots] (01–30.06.2006)

4. Modele wykorzystujące teorię masowej obsługi

W modelowaniu ruchu statków płynących torem wodnym z punktu P_{i-1} (np. bramka GD) do punktu P_i (np. bramka HE) (rys. 3) można się posłużyć teorią masowej obsługi, której podstawą jest charakterystyka strumienia wchodzących jednostek („strumienia zgłoszeń”) do analizowanego obszaru („kanału obsługi”) oraz strumienia wychodzącego z „kanału”. Dla jednostek pływających, które wpłynęły do „kanału” (na tor wodny), czasem obsługi będzie czas ich przejścia po rozpatrywanym torze.

Niech chwila wejścia pierwszego statku do systemu (chwila zgłoszenia) w danym okresie, np. dniu, będzie chwilą początkową $t_0 = 0$. Wówczas dokładne przewidzenie momentu nadejścia następnego zgłoszenia (wejścia kolejnych statków na tor wodny), a także momentów dalszych wszystkich kolejnych zgłoszeń (w tym samym dniu, jak i w dniach następnych) jest bardzo trudne, a nawet niemożliwe. Chwile nadejścia wszystkich następnych zgłoszeń nie będą się pokrywały. A zatem, zarówno chwila nadejścia każdego zgłoszenia, jak i liczba zgłoszeń w ciągu dnia, tygodnia itd. są zmiennymi losowymi.

Proces nadchodzenia zgłoszeń jest procesem stochastycznym, a strumień zgłoszeń może być opisany pewną funkcją $X(t)$, określającą liczbę zgłoszeń wymagających „obsługi” w przedziale czasu $(0, t)$. Funkcja $X(t)$ jest zmienną losową dla każdej wartości t [27].

Dla przykładu rozpatrzmy strumień zgłoszeń jednostek w punkcie P_{i-1} (bramka GD) dla 48 h (dane dla 01–02.06.2006 r.). W czasie 48 h liczba zgłoszeń wynosiła 10 jednostek. Odstępy czasu pomiędzy poszczególnymi zgłoszeniami oraz parametry zgłaszanych jednostek przedstawiono w tabeli 1.

Jednostki zgłaszały się do systemu w następujących odstępach czasowych (w minutach): jednostka nr 1: $t_0 = 0$, jednostka nr 2: $t_1 = 497$; jednostka nr 3: $t_2 = 316$; jednostka nr 4: $t_3 = 58$; jednostka nr 5: $t_4 = 125$; jednostka nr 6: $t_5 = 211$; jednostka nr 7: $t_6 = 207$; jednostka nr 8: $t_7 = 1016$; jednostka nr 9: $t_8 = 30$; jednostka nr 10: $t_9 = 297$.

Na rys. 8 przedstawiono jedną z realizacji funkcji losowej $X(t)$, czyli przebieg zgłoszeń nadchodzących do bramki GD w obranym okresie (48 h).

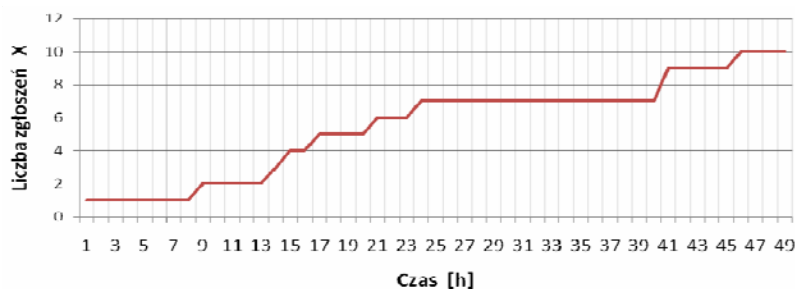
Tabela 1

Zgłoszenia jednostek dla bramki GD w okresie: 01-02.06.2006 r. wg danych przesłanych za pośrednictwem systemu AIS [25]

Lp.	Data przesłania	Czas UTC przesłania	Nazwa statku	Długość geograf. w stopniach	Szerokość geograf. w stopniach	Prędkość nad dnem w węzłach	Kurs nad dnem w stopniach	Typ jednostki morskiej (*)	Status nawigacyjny (**)
1	01.06.2006	00:59:24	Oocl Neva	18,7256°E	54,4768°N	16,1	45,7°	79	0
2	01.06.2006	08:18:28	Bazalt	18,7241°E	54,4777°N	13,5	43,6°	52	0
3	01.06.2006	13:34:28	New Wind	18,7261°E	54,4765°N	8,2	45,9°	70	5
4	01.06.2006	14:26:28	Copernicus	18,7249°E	54,4772°N	10,6	46,0°	89	0
5	01.06.2006	16:31:33	Scandinavia	18,7263°E	54,4764°N	14,5	44,9°	60	0
6	01.06.2006	20:02:46	Pamela	18,7247°E	54,4773°N	7,7	44,0°	70	0
7	01.06.2006	23:29:11	Argus	18,7231°E	54,4782°N	7,0	42,8°	52	0
8	02.06.2006	16:25:47	Odys	18,7273°E	54,4758°N	6,3	43,8°	52	3
9	02.06.2006	16:45:32	Cold Stream	18,7230°E	54,4783°N	12,1	45,9°	79	0
10	02.06.2006	21:42:39	Zillertal	18,7244°E	54,4775°N	8,9	43,3°	70	0

(*) Oznaczenia: **52** – Holownik; **60** – Statek pasażerski; **70** i **79** – Statek towarowy; **89** – Chemikaliowiec, gazowiec lub zbiornikowiec.
(**) Oznaczenia: **0** – O napędzie mechanicznym w drodze; **3** – Ograniczona zdolność manewrowania; **5** – Zaczumowany.

Aby dać pełne określenie strumienia zgłoszeń, wystarczy wiedzieć, jakie będzie prawdopodobieństwo tego, że w czasie $(0, t_1)$ nadejdzie k_1 zgłoszeń, w czasie $(0, t_2)$ nadejdzie k_2 zgłoszeń itp. Jeśli to prawdopodobieństwo będzie znane dla dowolnej grupy całkowitych liczb dodatnich k_1, k_2, \dots, k_n i dodatnich t_1, t_2, \dots, t_n , to strumień zgłoszeń będzie w pełni opisany.

Rys. 8. Przebieg realizacji funkcji losowej $X(t)$ zgłoszeń statków do bramki GDFig. 8. Realisation of a random function $X(t)$ of vessels arriving at the gate GD

Istotną cechą wielu realnych strumieni zgłoszeń stanowi stacjonarność znacznie upraszczająca budowany model. Cechę stacjonarności ma również rozpatrywany strumień zgłoszeń jednostek pływających do toru wodnego. Strumień ten ma dodatkowo cechy stru-

mienia *bez następstw* lub *strumienia o przyrostach niezależnych* (dystrybuanta grupy $X(t_i + a) - X(a)$, gdzie $(i = 0, 1, 2, \dots, n)$ przy $t_i > 0$ i dowolnym $a > 0$ nie zależy od wartości wielkości $X(t)$ przy $t < a$).

Oprócz określania prawdopodobieństwa liczby zgłoszeń do toru wodnego, istotne jest również podanie czasu ich podróży, który w świetle teorii masowej obsługi można rozpatrywać jako *czas obsługi*. Oczywiście jest to, że czas obsługi jest różny dla poszczególnych jednostek i zależy od wielu czynników, przede wszystkim ich prędkości, ale także losowych warunków zakłócających, takich jak: warunki otoczenia, czyli warunki atmosferyczne (kierunek i siła wiatru, stan morza, prądy morskie, ciśnienie atmosferyczne, temperatura powietrza) oraz akweny pływania (otwarte morze, porty, cieśniny itp.), jak również warunki związane z samą jednostką pływającą (oporami kadłuba, stanem technicznym, możliwościami nautycznymi itp.).

W związku z powyższym, w rozpatrywanym przypadku dla jednostek pływających, czas obsługi jest zmienną losową, a więc opisany może być za pomocą dystrybuanty: $F(t) = P\{\gamma < t\}$ dla $t \geq 0$, gdzie γ jest czasem obsługi. Funkcja $F(t)$ określa tutaj prawdopodobieństwo tego, że czas obsługi γ będzie mniejszy od pewnego z góry określonego t (funkcja $F(t)$ powinna być dodatnią funkcją monotonicznie rosnącą oraz nie powinna być większa od jedności).

Jeżeli przyjmiemy, że wszystkie jednostki ujęte w tabeli 1 wpływają do kanału obsługi, jakim jest tor wodny GD-HE (czyli tor wodny łączący bramkę GD z bramką HE), to wówczas, odczytując ich prędkość oraz wiedząc, że droga na odcinku bramka GD–bramka HE wynosi 7,72 Mm, możemy oszacować czas potrzebny na „obsługę” pojedynczego zgłoszenia. Odpowiednio, dla 10 jednostek wyszczególnionych w tab. 1 czas ten wynosi:

dla jednostki nr 1: $t_1 = 29$ min; dla jednostki nr 2: $t_2 = 34$ min; dla jednostki nr 3: $t_3 = 57$ min; dla jednostki nr 4: $t_4 = 44$ min; dla jednostki nr 5: $t_5 = 32$ min; dla jednostki nr 6: $t_6 = 60$ min; dla jednostki nr 7: $t_7 = 66$ min; dla jednostki nr 8: $t_8 = 74$ min; dla jednostki nr 9: $t_9 = 38$ min; dla jednostki nr 10: $t_{10} = 52$ min.

5. Modele stosujące metody Monte Carlo

W praktyce spotyka się sytuacje, w których strumień zgłoszeń nie ma cech strumienia prostego lub jest niestacjonarny i niejednorodny, rozkład czasu obsługi może być dowolny, względnie organizacja w systemie obsługi ma charakter złożony i wieloetapowy. Tego typu zagadnienia są trudne lub niemożliwe do rozwiązania metodami analitycznymi.

Modele symulacyjne metod Monte Carlo pozwalają rozwiązać wiele zagadnień niemożliwych do rozwiązania z zastosowaniem modeli analitycznych.

Symulacje „obsługi statków”, czyli strumienia wejścia statków na rozpatrywany tor wodny oraz czasu znajdowania się na danym torze można wykonać przy założeniu (wcześniej poprzedzonym badaniem identyfikacyjnym), że strumień zgłoszeń jest jednorodnym procesem Poissona o parametrze λ , a czas przebywania na rozpatrywanym torze ma rozkład normalny. W symulacji wykonywanej tzw. metodą stałego kroku systemu stacjonarnego „bez oczekiwania” przeprowadza się symulowanie strumienia zgłoszeń w ciągu założonych M dni, np. z krokiem jednej doby. Prawdopodobieństwo wystąpienia w każdej dobie l zgłoszeń oblicza się wg wzoru

$$P(l) = \frac{\lambda^l}{l!} \exp(-\lambda) \quad \text{dla } l = 0, 1, 2, 3, \dots, D \quad (3)$$

Dla $\lambda = 6$ statków/dobę, rozkład prawdopodobieństw $P(l)$ przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2

Rozkład prawdopodobieństw $P(l)$ dla $\lambda = 6$ statków/dobę

n	$P(l)$	$\sum_{x=0}^n P(x \leq l)$
0	0,0025	0,0025
1	0,0149	0,0174
2	0,0446	0,0620
3	0,0892	0,1512
4	0,1330	0,2851
5	0,1606	0,4457
6	0,1606	0,6063
7	0,1377	0,7440
8	0,1033	0,8473
9	0,0688	0,9161
10	0,0413	0,9574
11	0,0113	0,9799
12	0,0052	0,9964

Obliczonym wartościom prawdopodobieństw można przyporządkować np. 10 000 liczb pseudolosowych rozkładu równomiernego, co wynika z przyjętej w tab. 2 dokładności obliczeń (czterech miejsc po przecinku). Jeżeli $\lambda = 6$ statków/dobę, to prawdopodobieństwo niewystąpienia w ciągu doby zgłoszenia ($l = 0$) wynosi 0,0025 (jak w tab. 2) i temu prawdopodobieństwu przyporządkowuje się kolejne 25 cyfr, jak na rys. 9 ($\lambda_{p1} = 0,0025$).

Dla symulacji procesu „obsługi” zgłoszeń można przyjąć rozkłady prędkości statków poruszających się po rozpatrywanym torze lub rozkład czasu pobytu na tym torze. Można również symulować liczbę statków opuszczających tor w rozpatrywanym przedziale czasu.

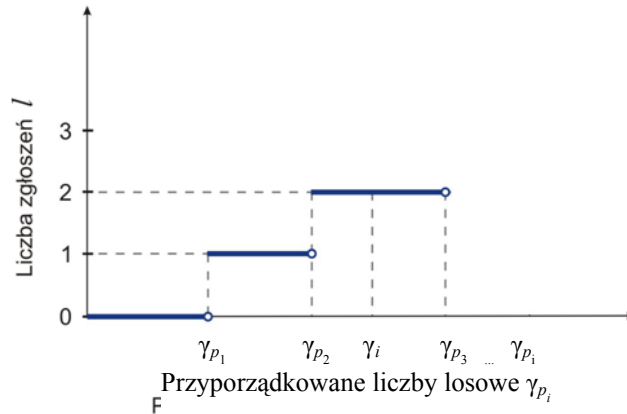
W tabeli 3 przedstawiono symulowane metodą Monte Carlo strumienie zgłoszeń statków (będącego procesem Poissona o parametrze $\lambda = 6$ statków/dobę) do „kanału obsługi” oraz opuszczania tego „kanału”. Dla tego ostatniego strumienia przyjęto rozkład normalny o wartości przeciętnej a i odchyleniu standardowym σ . W przykładzie przyjęto rozkład normalny o parametrach: $a = 6$ statków/dobę, $\sigma = 2$ statki/dobę.

Przepustowość „kanału obsługi” wyrażana liczbą statków opuszczających w i -tej jednostce czasu tor wodny oblicza się według wzoru

$$W_i = \alpha_i \cdot \sigma + a \quad (4)$$

gdzie:

- α_i – wylosowana liczba losowa rozkładu normalnego $N(0, 1)$,
- a – wartość przeciętna liczby statków opuszczających tor wodny („obsłużonych przez kanał”) w jednostce czasu.



Rys. 9. Zasada symulacji liczby zgłoszeń do obsługi

Fig. 9. A rule of simulation of the number of incoming traffic to the system

Jeżeli średnią liczbę obsłużonych w jednostce czasu statków oznaczyć przez μ , to $\frac{1}{\mu}$ wynosi średni czas „obsługi”. Z kolei dla znanej długości kanału można wyznaczyć średnią prędkość pływania statków po rozpatrywanym torze wodnym.

W metodzie „kolejnych zdarzeń” symuluje się czas każdego kolejnego zgłoszenia do „kanału” i czas jego „obsługi” w kanale. Kolejne wartości czasu τ_i odstępów między zgłoszeniami można obliczyć za pomocą generowania liczb losowych rozkładu równomiernego. Wykorzystuje się tu zależność

$$\int_0^{\tau} \lambda \exp(-\lambda t) dt = \xi \quad (5)$$

z której wynika, że

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - \xi) \quad (6)$$

Ponieważ rozkład wartości $1 - \xi$ jest taki sam jak wartość ξ , można zapisać, że

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln \xi \quad (7)$$

Tabela 3

**Symulowane strumienie zgłoszeń (wejść) do toru wodnego i opuszczeń tego toru statków
w czasie rozpatrywanych 12 kolejnych dni**

Kolejny dzień rozpatrywanego okresu	Wylosowana czterocyfrowa liczba pseudolosowa rozkładu równomiernego γ_i	Obliczona symulowana liczba statków	Wylosowana liczba losowa rozkładu normalnego $N(0,1)$	Obliczona symulowana liczba statków „obsłużonych” w kanale
1	1009	3	0,464	6
2	7325	7	0,137	6
3	3376	5	2,455	10
4	5201	6	-0,323	5
5	3586	5	-0,068	5
6	3468	5	0,296	6
7	3548	5	-0,288	5
8	7680	8	1,298	8
9	9590	11	0,241	6
10	3754	5	0,060	6
11	2048	4	-2,526	0
12	564	2	-0,531	4
Razem w ciągu 12 dni		66	-	67

Wzór (7) jest bezpośrednio przydatny do wyznaczania wartości τ_i , przy różnych wartościach wylosowanych liczb losowych ξ_j .

Czas obsługi zgłoszenia symuluje się, losując oddzielnie kolejne liczby losowe α_j o rozkładzie normalnym $N(0, 1)$ i obliczając ze wzoru symulowany czas pobytu j -tego zgłoszenia na torze wodnym

$$t_j = \sigma \cdot \alpha_j + t_o^{sr} \quad (8)$$

gdzie:

- σ – odchylenie standardowe czasu pobytu statku na torze wodnym,
- t_o^{sr} – wartość średnia czasu pobytu statków w obszarze,
- $j = 1, 2, 3, \dots, m$ – oznacza kolejną liczbę losową obsługi j -tego zgłoszenia.

Do symulacji strumienia zgłoszeń losuje się M (M – liczba doświadczeń) liczb losowych rozkładu wykładniczego β_i ($i = 1, 2, 3, \dots, M$) i oblicza odstępy czasu pomiędzy zgłoszeniami według wzoru

$$\tau_i = \beta_i \cdot \tau \quad (9)$$

Tok obliczeń rozpoczyna się z chwilą pojawienia się pierwszego zgłoszenia (przyjścia statku do wejścia na tor wodny). Czas pobytu na torze wodnym oblicza się wg wzoru (8).

Przykład symulacji ruchu statków o strumieniu zgłoszeń jak poprzednio w przykładzie oraz o normalnym rozkładzie czasu pobytu w kanale o wartości przeciętnej $a = 3$ h i odchyleniu standardowym 0,5 h pokazano w tab. 4.

Przykład symulacji ruchu statków na torze wodnym metodą „kolejnych zdarzeń”

Kolejne doświadczenie	Liczba losowa	Odstęp czasu między zgłoszeniami [h]	Skumulowany czas i -tego zgłoszenia [h]	Liczba losowa α dla czasu obsługi	Czas pobytu w „kanale” [h]	Skumulowany czas opuszczenia toru [h]
i	β_i	τ_i	T_i	α_i	t	t_i
1	–	–	0	0,464	3,5	3,5
2	0,550	5,5	5,5	0,482	3,4	8,9
3	0,426	4,3	9,8	-1,805	1,1	10,9
4	0,711	7,1	16,9	-2,008	1,0	17,9
...
21	1,272	12,7	164,6	-1,186	1,4	166,0

Symulacje ruchu statków w rozpatrywanym obszarze można przeprowadzić z zastosowaniem oprogramowania komputerowego. Tok obliczeń czasu „obsługi” zgłoszenia z równoczesnym wyznaczaniem czasu zajęcia toru wodnego od chwili początkowej $t_0 = 0$ pozwala wyznaczyć dowolne charakterystyki ruchu zbioru jednostek, a na ich podstawie – charakterystyki emisji związków szkodliwych w spalinach. Można sporządzić symulowane dla różnych warunków rozkłady prędkości pływania statków w kanale oraz z nią związanych wartości natężenia emisji związków szkodliwych w spalinach.

6. Wnioski

Zastosowanie metod teorii masowej obsługi do określania parametrów ruchu statków w określonych obszarach morskich oraz zastosowanie metod Monte Carlo do symulacji tego ruchu w różnych warunkach jego funkcjonowania może być bardzo przydatne i efektywne w wielu sytuacjach, które określić można następująco:

1. Istnieje potrzeba badania parametrów ruchu jednostek w różnych warunkach i na ich podstawie szacowania wskaźników emisji związków toksycznych spalin.
2. Modele te umożliwiają znaczne skrócenie czasu badań, a dane o statystycznych parametrach ruchu można wyznaczyć z bazy danych systemu AIS.
3. Metody te cechuje dość duża uniwersalność, a symulowane parametry ruchu i wskaźniki emisji pozwalają stworzyć najbardziej wiarygodną ocenę tej emisji w różnych warunkach pływania statków.
4. Jak każdy model matematyczny, również modele teorii masowej obsługi i Monte Carlo obarczone są ograniczeniami, do których należy zaliczyć przede wszystkim konieczność dokonywania uproszczeń modelowanej rzeczywistości. Na obecnym etapie rozwoju modelowania emisji na podstawie modeli ruchu jednostek dokonywane uproszczenia nie naruszają przydatności tych modeli, a ich adekwatność przewyższa niekiedy istniejące obligatoryjnie modele ocenowe emisji.

Literatura

- [1] IMO Marine Environment Protection Committee (MEPC), 53rd Session, Agenda Item #4, *Prevention from Air Pollution from Ships*, London, July 21, 2005.
- [2] *Reducing Shipping Emissions of Air Pollution – Feasible and Cost-effective Options*, A Background Paper by Clean Air Task Force, Bluewater Network, European Environmental Bureau, European Federation for Transport and Environment, North Sea Foundation, Seas at Risk, Swedish NGO Secretariat on Acid Rain, 2002.
- [3] Vieira João, *Emissions from Ships: time to decide, Workshop on ship emissions*, European Parliament, Strasburg, 23 May 2007 www.ebcd.org/EPISD/2007/23May2007/Vieira.pdf.
- [4] European Commission Directorate General Environment Service Contract on Ship Emissions, *Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 1 – Preliminary Assignment of Ship Emissions to European Countries*, Final Report, ENTEC UK Limited, August 2005.
- [5] Nitziachristos L., Samaras Z., *Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters*, Atmospheric Environment 34, 2000.
- [6] Pronello C., André M., *Pollutant emissions estimation in road transport models*, Report INRETS-LTE No. 2007, 2000.
- [7] Joumard R., Sérié E., *Modelling of cold start emissions for passenger car*, INRETS Report LTE 9931, 1999.
- [8] *COPERT II – Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport – Methodology and Emission Factors*, European Environment Agency, European Topic Center on Air Emission, 1997.
- [9] Joumard R., *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art*, INRETS report LTE 9901, Bron, France and European Commission, DG Transport EUR 18902, Luxembourg 1999.
- [10] Chłopek Z., Polichnowski T., *Emisja substancji szkodliwych dla środowiska z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach*, Polskie Drogi Nr 4(90).
- [11] Chłopek Z., *Badania modelu globalnej emisji spalin z silników pojazdów drogowych*, Chemia i Inżynieria Ekologiczna, t. 6, Nr 8/1999.
- [12] Chłopek Z., *Modelowanie emisji globalnej spalin z silników pojazdów drogowych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 4(35)/99.
- [13] Chłopek Z., *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*, Prace Naukowe, Seria „Mechanika” z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [14] Chłopek Z., *Ocena wpływu organizacji ruchu pojazdów drogowych na globalną emisję substancji szkodliwych dla środowiska naturalnego*, Chemia i Inżynieria Ekologiczna, t. 7, Nr 7/2000.
- [15] Brzozowska L., Brzozowski K., Wojciech S., *Zastosowanie charakterystyk dynamicznych i makroskopowego modelu ruchu pojazdów do bilansowania emisji związków szkodliwych w spalinach silników*, Zeszyty Naukowe Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Samochodów Małolitrażowych BOSMAL, Zeszyt nr 36 (II/2007), Bielsko Biała 2007.

- [16] D r a g Ł., *Modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze środków transportu drogowego*, Archiwum Motoryzacji, Wyd. Naukowe PTNM, Nr 1/2007.
- [17] Praca zbiorowa pod red. W. K o t l a r z a, *Turbinowe zespoły napędowe źródłem skażeń powietrza na lotniskach wojskowych*, rozdz. 4: *Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w przyziemnej warstwie atmosfery*, Dęblin, 2003.
- [18] BUWAL, INFRAS AG, *Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010*. BUWAL–Bericht, No. 255, 1995.
- [19] C o o p e r D.A., *Exhaust emissions from ships at berth*, Atmospheric Environment 37, 2003.
- [20] C o o p e r D.A., G u s t a f s s o n T., *Methodology for calculating emissions from ships – 1, Update of emission factors*, 2004.
- [21] USCG AMVER, June 2007 www.amver.com/2007June.htm.
- [22] P a w l a k M., P i a s e c z n y L., *Evaluation of suitability of existing harmful compounds dispersion models for assessment of land pollution with marine engines' exhaust gases*, PTNSS Congress Proceedings, Kraków 2007.
- [23] P a w l a k M., P i a s e c z n y L., *Przegląd modeli rozprzestrzeniania się toksycznych składników spalin z silników statków morskich*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa Transport XXI w., materiały konferencyjne, Stare Jabłonki 2007.
- [24] F e l s k i A., P i a s e c z n y L., *Monitoring of the movement of the objects on the Gdansk Bay in order to recognize the characteristics of their main propulsion systems*, Silniki Spalinowe/Combustion Engines, No. 2007-SC1, 377-382.
- [25] N a u s K., *Opracowanie statystyczne strumieni obsługi jednostek morskich na wytypowanym torze wodnym*, Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej, Gdynia 2008.
- [26] Mapa Zatoki Gdańskiej dostępna na stronie internetowej Urzędu Morskiego w Gdyni www.umgdy.gov.pl.
- [27] P a w l a k M., P i a s e c z n y L., *Modele symulacyjne ruchu jednostek morskich*, Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Badania symulacyjne w technice samochodowej”, Susiec 26–28 maja 2008.