

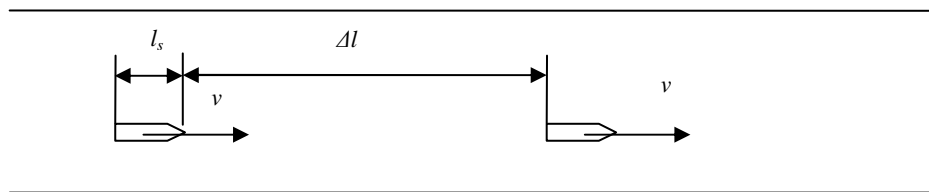
Wojciech PISZCZEK<sup>1</sup>

## Model sterowania gęstością ruchu strumienia jednostek na torze wodnym

### 1. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Przyjmijmy, że na wybranym odcinku toru (rys. 1.) odbywa się ruch jednokierunkowy. Statki o reprezentatywnej długości  $l_s$  podążają w odstępach  $\Delta l$ , ze średnią prędkością  $v$  tworząc strumień o intensywności  $\lambda$ .

Naszym zadaniem jest zbudowanie analitycznego modelu matematycznego uwzględniającego istotne dla ruchu zjawiska i pozwalającego na analizę i optymalizację operacyjnych parametrów procesu ruchu.



Rys 1. Relacje między jednostkami w procesie ruchu na torze wodnym

Źródło: [4]

Dla poprawy komunikatywności wywodów, wyprowadzone zależności analityczne na bieżąco będą egzemplifikowane przykładami liczbowymi w zakresie realnych wartości miar. Założmy, że obowiązują następujące parametry procesu ruchu [6] istotne dla przedmiotu badań:

- minimalna odległość między jednostkami wynosi  $\Delta l_{min} = 370$  m,
- dopuszczalna prędkość jednostek wynosi  $v_{dop} = 8$  w,

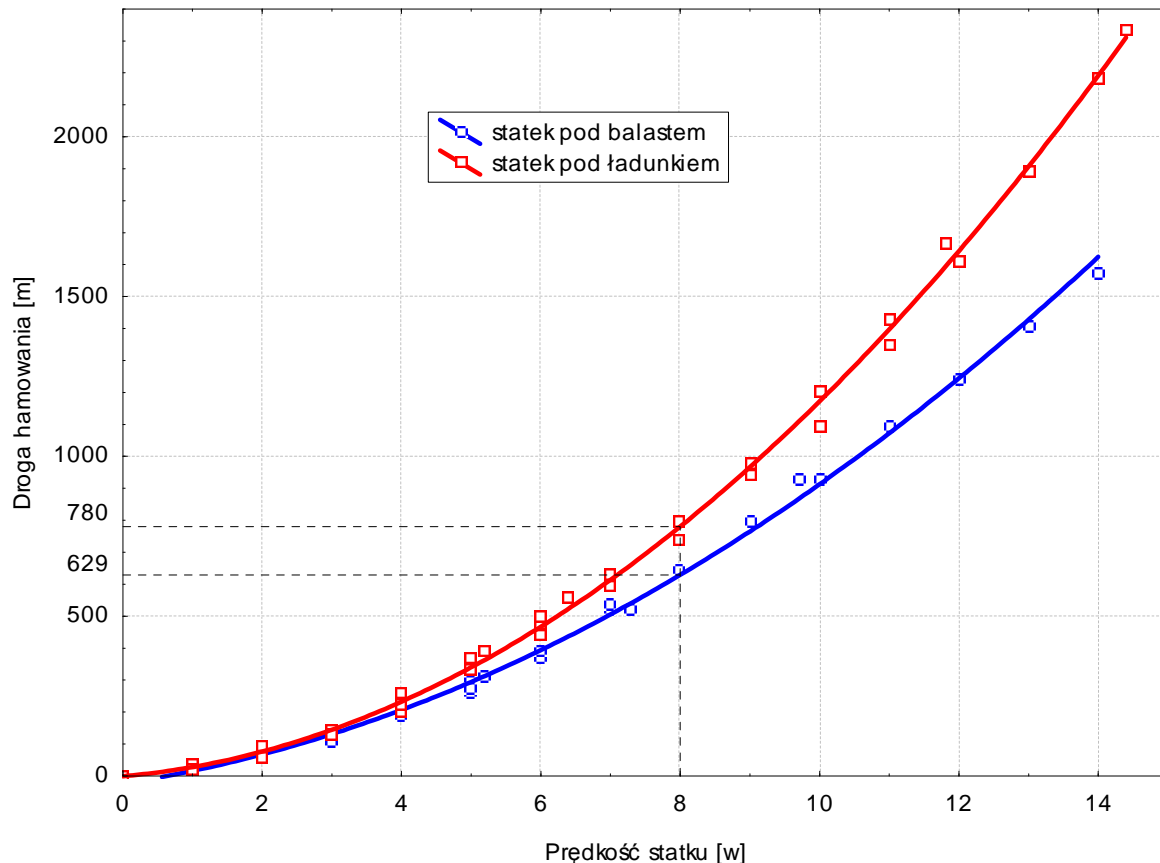
Jako ilustracyjny przykład rozpatrzmy przypadek gdy jednostkami będą statki typu m/s Kopalnia Siersza o długości  $l_s = 159$  m. Drogi hamowania tego statku dla manewru „cała wstecz” - określono poprzez transformację i interpolację krzywych z prób manewrowych [5] – (Rys.2).

- droga hamowania z prędkości początkowej 8 w wynosi  $l_h = 780$  m.

<sup>1</sup> Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny

## 2. PRZYPADEK RUCHU NIESTEROWANEGO

Zakładając, brak ograniczeń sterujących ze strony przepisów ruchu na torze – statki dbając o swoje bezpieczeństwo stosować się będą jedynie do przepisu nr 6 Międzynarodowego Prawa Drogi Morskiej [7], - „... każdy statek powinien iść z bezpieczną szybkością, tak aby mógł podjąć właściwe działanie w celu uniknięcia zderzenia i zatrzymać się w odległości odpowiedniej do istniejących okoliczności i warunków...”. W tym przypadku oznacza to, że będą zachowywały odległości nie mniejsze niż droga hamowania.



Rys. 2. Zależność drogi hamowania od prędkości początkowej dla statku m/s Kopalnia Siersza.

Źródło: [1]

Analiza krzywych manewrowych zsyntetyzowana na rys. 2 wykazała z dostateczną, dla celów eksploatacyjnych, dokładnością, że droga hamowania jest funkcją kwadratową prędkości początkowej hamowania o postaci:

$$l_h = a \cdot v_{pocz}^2 \quad (1)$$

gdzie  $a$  – współczynnik paraboli

Świadczy to o tym, że w toku hamowania następuje prosta zamiana energii kinetycznej statku o masie reprezentatywnej  $m$  na pracę siły oporu hamowania  $F_h$  tak, że można przyjąć równanie:

$$F_h \cdot l_h = \frac{m \cdot v_{pocz}^2}{2} \quad (2)$$

czyli

$$a = \frac{m}{2 \cdot F_h} \quad (3)$$

Badania współczynnika  $a$  wykazały jego dostateczną stałość dla danego statku i stanu załadowania. Dla takiego warunku można wyprowadzić teoretyczną postać równania określającego przepustowość toru  $\mu$  w funkcji gęstości ruchu  $\rho$  z możliwością jego parametryzacji dla reprezentatywnych typów statków. Wychodząc z zależności:

$$\Delta l = l_h = a \cdot v^2 \quad (4)$$

$$\mu = \lambda = v \cdot \rho \quad (5)$$

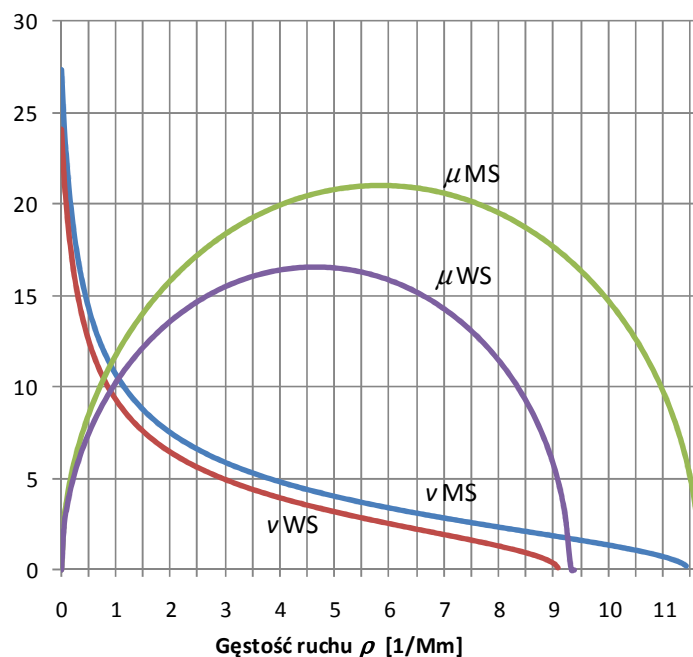
$$\rho = \frac{1}{\Delta + l_s} \quad (6)$$

po przekształceniach, otrzymujemy wzory na prędkość jednostek w strumieniu  $v$  i przepustowość takiego odcinka toru  $\mu$ .

$$v = \sqrt{\frac{1}{a} \left( \frac{1}{\rho} - l_s \right)} \quad [w] \quad (7)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{a} (\rho - \rho^2 l_s)} \quad \left[ \frac{1}{h} \right] \quad (8)$$

Egzemplifikację graficzną tych zależności pokazuje rys. 3.



Rys. 3. Wykresy:  $v=f(\rho)$  oraz  $\mu=f(\rho)$  dla mniejszych statków (MS) i większych statków (WS).

Źródło: Opracowanie własne.

Oczywiście są to wykresy teoretyczne, które w następnym kroku będą przekształcane do postaci realnych wartości miar. W tym miejscu można jednak dokonać próby optymalizacji w zakresie wyznaczenia maksymalnie możliwych do osiągnięcia wartości przepustowości toru. W tym celu zróżniczkujemy funkcję  $\mu = f(\rho)$  i określmy jej ekstremum. Funkcja posiada maksimum dla:

$$\rho_{opt} = \frac{1}{2l_s} \left[ \frac{1}{Mm} \right] \quad (9)$$

wynosi ono:

$$\mu_{max} = \sqrt{\frac{1}{4al_s}} \left[ \frac{1}{h} \right] \quad (10)$$

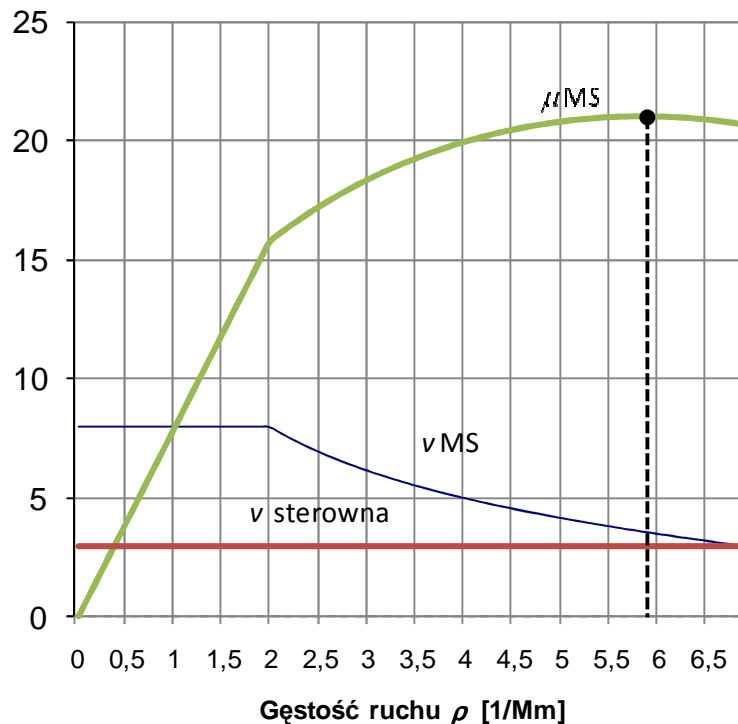
Dla założonych danych liczbowych statku (mniejszego - MS)  $\rho_{opt}=5,8$  1/Mm,  $\mu_{max}=21$  1/h przy prędkości statków  $v = 3,6$  w. Wynika z tego wniosek, że aby osiągnąć największą przepustowość statki musiałyby się poruszać z odstępem jednej długości statku i z prędkością bliską manewrowej. Stwarza to znaczne zagrożenie bezpieczeństwa ruchu.

Warto zwrócić uwagę na wpływ wielkości statków na przepustowość toru. Analiza wyprowadzonych zależności i ich graficzna ilustracja potwierdzają, zgodnie z praktyką, że przepustowość toru dla statków większych ( $a$  i  $l_s$  większe) jest mniejsza. Jednak wartość gęstości  $\rho_{opt}$  dla której osiągamy maksymalną wartość przepustowości zależy jedynie od długości statku.

### 3. PRZYPADEK RUCHU Z OGRANICZENIAMI PRĘDKOŚCI PODĄŻANIA

W praktyce statki nie mogą rozwijać ani dowolnie dużych prędkości ze względu na ograniczenia wprowadzane przez administrację morską ani dowolnie małych ze względu na konieczność utrzymania sterowności. Nałożmy zatem na opracowany model ww. ograniczenia. Przyjmijmy, że dopuszczalna prędkość na torze wynosi  $v_{dop} = 8$  w a sterowna ok. 3 w. Do pewnych wartości gęstości ruchu statki mogą wykorzystywać  $v_{dop}$  a po przekroczeniu tej gęstości muszą zmniejszać prędkość ale nie niżej niż do prędkości sterownej. Wtedy wyprowadzone zależności na  $v=(\rho)$  oraz  $\mu = f(\rho)$  są poprawne w przedziale gęstości  $\rho \{2,0;6,9\}$  1/Mm. Dolna granica określa gęstość powyżej której należy już zredukować prędkość a górna określa gęstość powyżej której, wymagana drogą hamowania prędkość, schodzi poniżej wartości sterownej. Wykresy:  $v=(\rho)$  oraz  $\mu = f(\rho)$  przyjmą postać pokazaną na rys.4. Sterowanie gęstością ruchu będzie polegało na tym, że do wartości  $\rho=2$  1/Mm statki mogą poruszać się z maksymalną dopuszczalną prędkością

$v=8w$ . Graniczna przepustowość osiągnie wtedy wartość  $\mu = 15,8$  1/h. Chcąc nadal zwiększyć przepustowość toru należy zwiększać gęstość ruchu kosztem zmniejszania prędkości.



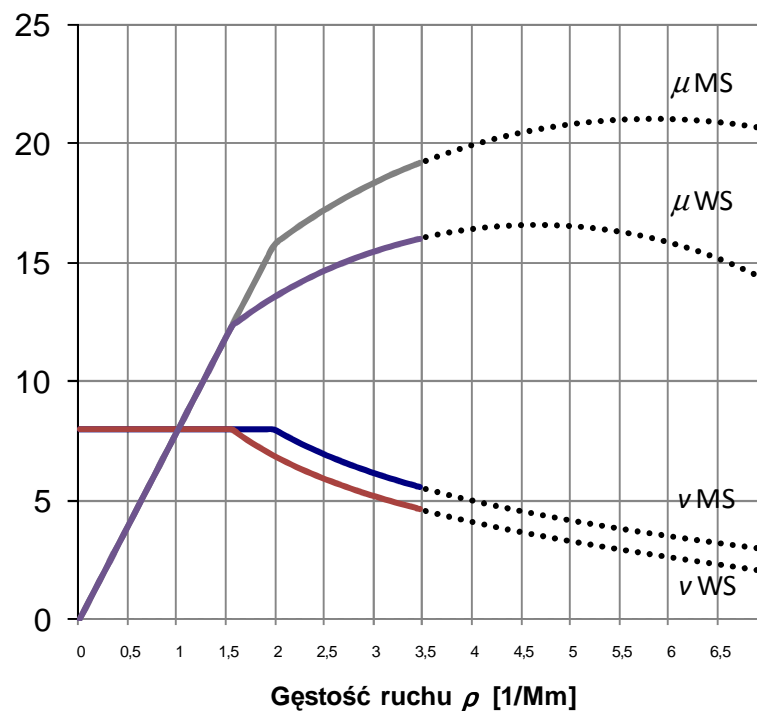
Rys.4. Wykresy:  $v=(\rho)$  oraz  $\mu=f(\rho)$  dla statku MS w przypadku ruchu z ograniczeniami prędkości podążania.

Źródło: Opracowanie własne.

Jest to decyzja sterująca bardzo korzystna dla administracji toru wodnego. Obniżenie prędkości statków zmniejsza destruktywne działanie ruchu statku na konstrukcję toru wodnego a jednocześnie wzrost przepustowości powiększa możliwość osiągania wyższych przychodów z opłat za korzystanie z toru. Jest to jednocześnie decyzja niekorzystna dla armatora gdyż wydłuża czas podróży torem wodnym a więc jego koszty. Ryzykowne jest zbliżanie się do prędkości sterownej ze względu na niebezpieczeństwo kolizji związane z obniżającą się manewrowością statku a to jest niekorzystne zarówno dla armatora jak i administracji toru. Na przykładzie zilustrowanym na rys.4. widać, że drogą obniżania prędkości ruchu można osiągnąć znaczący wzrost przepustowości. Dla omawianego przypadku wynosi on około 33% ponad przepustowość graniczną. Jednak ze względu na przedstawione wyżej argumenty koniecznym wydaje się przyjęcie gęstości kompromisowej na zasadach negocjacyjnych lub zbudowania funkcji kryterialnej uwzględniającej miary ww. zjawisk.

#### 4. PRZYPADEK RUCHU Z OGRANICZENIAMI: PRĘDKOŚCI PODĄŻANIA I MINIMALNEGO ODSTĘPU

Autorowi nie są znane szczegółowe argumenty leżące u podstaw przyjęcia minimalnej, dopuszczalnej odległości między jednostkami na poziomie  $\Delta l_{min} = 370$  m przez przepisy portowe Urzędu Morskiego ale wpisuje się ona logicznie w tok niniejszego wywodu jako wcześniej sygnalizowany kompromis. Na rys.5. przedstawiono wykresy zależności  $v=(\rho)$  oraz  $\mu = f(\rho)$  przy ograniczeniach obowiązujących na badanym torze wodnym dla statku MS (m/s Kopalnia Siersza) i większego - WS.



Rys.5. Wykresy:  $v=(\rho)$  oraz  $\mu=f(\rho)$  dla przypadku ruchu z ograniczeniami prędkości podążania i minimalnego odstępu dla statku MS i WS.

Źródło: Opracowanie własne.

Ograniczenie  $\Delta l_{min} = 370$  m, przy długości statku  $l_s = 159$  m powoduje ograniczenie gęstości ruchu do poziomu  $\rho = 3,5$  1/Mm. Stąd wykresy poza granicą stosowności narysowane są linią kropkowaną. W konsekwencji linie ciągłe przedstawiają obszar sterowalności ruchu strumienia jednostek podążających jednokierunkowym torem wodnym przy pomocy parametru gęstości tego ruchu. Przebieg funkcji  $\mu = f(\rho)$  wskazuje, że sterowanie gęstością ruchu pozwala na osiągnięcie przepustowości ponad wartość graniczną ( $\mu = 15,8$  1/h) lecz ze względu na wymogi bezpieczeństwa a co za tym idzie ograniczenia przepisami portowymi – osiągnięcie ekstremum przepustowości nie jest celowe. Mimo to dzięki sterowaniu gęstością ruchu uzyskano ponad 20% wzrost przepustowości w stosunku do

wartości granicznej. Przedziały sterowania prędkością wydają się również mieścić w granicach realnych wartości miar procesów ruchu zapewniając sterowalność w pełnym przedziale dopuszczalnych wartości.

## 5. WNIOSKI

Wyniki badań analitycznych wraz z egzemplifikacją w zakresie realnych wartości miar procesów ruchu, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Zbieżność wyników analizy teoretycznej i przyczynkowych wyników obserwacji praktycznych pozwala pozytywnie zweryfikować zastosowanie opracowanego modelu dla celów eksploatacyjnych.
- Model ten pozwala na operacyjne sterowanie gęstością ruchu i prędkością statków stosownie do intensywności ruchu na torze wodnym celem optymalizacji parametrów ekonomicznych przy zapewnieniu właściwego poziomu bezpieczeństwa.
- Opracowany model można stosować autonomicznie lub może być elementem złożonych modeli optymalizacyjnych służących rozwiązywaniu problemów Inżynierii Ruchu Wodnego - IRW. Stanowi on rozwinięcie modeli przedstawionych w artykułach [2,3].

### MODEL STEROWANIA GĘSTOŚCIĄ RUCHU STRUMIENIA JEDNOSTEK NA TORZE WODNYM

#### Streszczenie

Artykuł przedstawia opracowany analityczny model sterowania gęstością ruchu strumienia jednostek podążających jednokierunkowym torem wodnym. Model uwzględnia warunek utrzymywania bezpiecznej odległości od poprzedzającej jednostki jak również typowe ograniczenia ze strony przepisów ruchu na torze. Wyprowadzono zależności pozwalające na racjonalne sterowanie procesem ruchu a także na jego optymalizację. Dokonano egzemplifikacji w zakresie realnych wartości miar procesów ruchu. Wyciągnięto istotne wnioski praktyczne.

### THE DENSITY CONTROL MODEL OF TRAFFIC FLOW ON THE WATERWAYS

#### Abstract

This paper presents an analytical model of developed density traffic flow control for vessels which proceed along one lane fairway. The model includes a condition of maintaining a safe distance from the preceding vessel as well as typical constraints of the rules of roads. Dependencies are derived allowing for the rational control of the process of moving as well as its optimization. There have been exemplified the real value of measurement of traffic processes. Important practical conclusions have been drawn.

## LITERATURA

- [1] Majzner P., *Metoda oceny akwenów ograniczonych z wykorzystaniem symulacji ruchu strumieni jednostek*, rozprawa doktorska, Szczecin 2008.
- [2] Majzner P., Piszczek W., *Problemy przepustowości torów wodnych*, Zeszyty Naukowe nr 6 (78) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2005.
- [3] Majzner P., Piszczek W., *Miary oceny przepustowości torów wodnych*, Zeszyty Naukowe nr 7 (79) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2005.
- [4] Piszczek W., *Modele miar systemu inżynierii ruchu morskiego*. Studia nr 14, WSM Szczecin 1990,
- [5] Praca zlecona pod kierunkiem A. Jaśkiewicz „*Informacja o zdolności manewrowej statku typu Kopalnia Siersza*”, WSM w Szczecinie, 1980.
- [6] Przepisy portowe Urzędu Morskiego w Szczecinie,  
<http://www.ums.gov.pl/prawne/port.pdf>.
- [7] Rymarz W. „*Podręcznik międzynarodowego prawa drogi morskiej*” Trademar, Gdynia 1995.