ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 12 (84)
AKADEMII MORSKIEJ
SZCZECIN 2007

WYDZIAŁ INŻYNIERYJNO-EKONOMICZNY TRANSPORTU

Piotr Majzner
Wojciech Piszczek

Symulacyjne badania procesów ruchu strumieni jednostek w systemie przeładunkowym

Słowa kluczowe: *podsystem przeładunkowy, przepustowość, strumień jednostek pływających*

Artykuł jest kontynuacją rozważań na temat miar określających przepustowość systemów inżynierii ruchu wodnego. Dotyczy racjonalnego doboru poziomu intensywności ruchu statków kierowanych do przeładunku. Podstawy teoretyczne poparto egzemplifikacją w zakresie realnych wartości wielkości identyfikujących proces ruchu jednostek pływających. Wykazano użyteczność metody symulacyjnej do wyznaczania charakterystyk systemu IRW. Wyciągnięto istotne wnioski praktyczne.

Simulations Research of Vessel Traffic Streams in on Transshipment System

Key words: *transshipment subsystem, traffic capacity, traffic stream*

This article, continuing considerations on the measures determining the capacity of water traffic engineering system, refers to a rational choice of traffic capacity for acceptable operating conditions. The theoretical foundation has been supported with examples of real values of quantities identifying the process of vessel traffic. The simulation method has proved to be useful in determining measures of choice of the capacity characteristics of a WTE system. Important practical conclusions have been drawn.

Wprowadzenie

Spośród różnych systemów transportowych ważną rolę pełni transport drogami wodnymi ze względu na relatywnie niskie koszty eksploatacji. Ruchem jednostek pływających na akwenach ograniczonych zajmuje się inżynieria ruchu morskiego – IRM, dokonując jakościowego i ilościowego opisu procesów tego ruchu [7]. Biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój IRM i fakt, że poligon badawczy tej dyscypliny w przeważającej mierze dotyczy akwenów ograniczonych, a te pod względem procesów ruchu wykazują znaczne podobieństwo również do akwenów śródlądowych, można wnioskować o uogólniającą zmianę nazwy tej dyscypliny na inżynierię ruchu wodnego – IRW. Wśród problematyki badawczej IRW istotną rolę odgrywają badania relacji strumienie jednostek – akwen. W artykułach [1, 2] przedstawiono wyniki badań stacjonarnych procesów ruchu strumieni jednostek, a w opracowaniu [3] dynamiki procesów. W kolejnych pracach [4, 5, 6] przeprowadzono badania ruchu strumieni jednostek na podejściu do toru wodnego i na samym torze wodnym, w tym opracowano szereg użytecznych miar. Postęp w badaniach ukierunkowany jest na analizę kolejnych procesów w systemie IRW. Niniejszy artykuł jest kolejnym krokiem w tym kierunku – badaniu poddano proces ruchu strumieni jednostek przechodzących przez podsystem IRW, składający się z elementu realizującego przeładunek (np. nabrzeże przeładunkowe itp.) oraz elementu realizującego oczekiwanie na przeładunek (np. nabrzeże postojowe, kotwicowisko, dalbowisko itp.).

Celem analizy procesów ruchu w badanym podsystemie zastosowano analogiczną metodykę badań, jak przy opracowaniach [1–6]. Po sformułowaniu problemu badawczego dokonano analizy deterministycznej, której wyniki potraktowano jako tło dla metody symulacji komputerowej. Opracowanie statystyczne wyników symulacji pozwoliło na znalezienie interesujących współzależności i przebiegu wartości miar opisujących badany proces.

Szczególną uwagę zwrócono na zjawiska związane z przepustowością badanego podsystemu w aspekcie uwzględnienia:

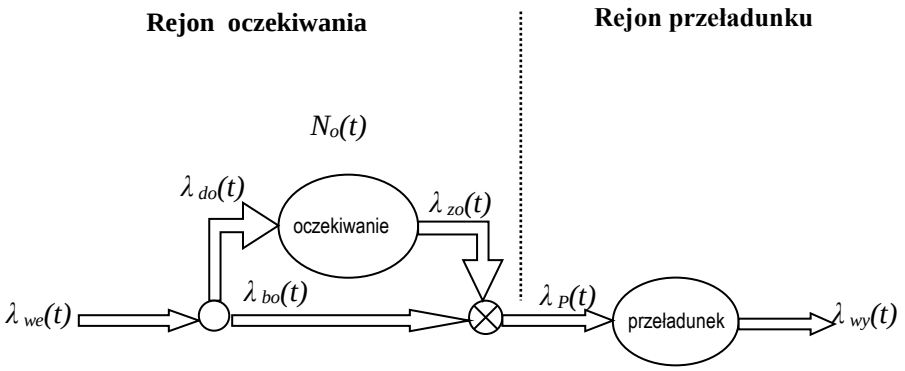
- ograniczonej pojemności miejsca postojowego,
- racjonalnego doboru intensywności strumienia wejściowego jednostek.

1. Określenie problemu badawczego

Rozpatrzmy podsystem systemu IRW zawierający element pozwalający oczekiwać jednostkom – pod nazwą: rejon oczekiwania i element realizujący przeładunek – pod nazwą: rejon przeładunku – rys. 1.

Załóżmy, że badany podsystem zasilany jest jednorodnym strumieniem jednostek o intensywności $\lambda_{we}(t)$. Jednostki, które bez opóźnienia mogą zostać

skierowane do przeładunku tworzą strumień o intensywności $\lambda_{bo}(t)$. Gdy nabrzeże przeładunkowe jest zajęte lub w oczekiwaniu znajdują się już jednostki – nowo pojawiający się statek przechodzi do stanu oczekiwania, tworząc element strumienia o intensywności $\lambda_{do}(t)$. Tak więc o kolejności przeładunku decyduje zasada *first in, first out*. Jednostki przeładowywane tworzą strumień o intensywności $\lambda_P(t)$, na wyjściu powstaje strumień o intensywności $\lambda_{wy}(t)$. Kiedy jednostka cumująca przy nadbrzeżu zostanie przeładowana (załadowana lub wyładowana), ze stanu oczekiwania do nadbrzeża przeładunkowego podchodzi następna jednostka realizując element strumienia o intensywności $\lambda_{zo}(t)$ lub podsystem oczekuje na podejście kolejnej jednostki strumienia $\lambda_{we}(t)$. W stanie oczekiwania może pozostawać pewna liczba jednostek $N_o(t)$.



Rys.1. Proces ruchu strumieni jednostek w podsystemie IRW

Fig. 1. The process of vessel traffic streams in the IRW subsystem

Źródło: opracowanie własne

Liczba jednostek $N_o(t)$, jaka przebywa w chwili t_k w stanie oczekiwania jest różnicą między liczbą jednostek $N_{do}(t_k)$ skierowanych do oczekiwania do chwili t_k a liczbą jednostek $N_{zo}(t_k)$ wychodzących ze stanu oczekiwania do chwili t_k z uwzględnieniem stanu początkowego Np, co wyraża się zależnością:

$$N_o(t_k) = N_p + N_{do}(t_k) - N_{zo}(t_k) = N_p + \int_0^{t_k} \lambda_{do}(t)dt - \int_0^{t_k} \lambda_{zo}(t)dt \qquad (1)$$

Intensywność strumienia $\lambda_{we}(t)$ jest odwrotnością okresu pojawiania się jednostek na wejściu T_{we}, który można traktować jako zmienną losową.

Z punktu widzenia IRW, podstawową miarą opisującą przepustowość systemu przeładunkowego jest ***przepustowość nominalna*** μ_{nom}, określona najpraktyczniej w rozpatrywanym przypadku (jednorodny strumień jednostek) w statkach na dobę [*st*/*d*] lub [1/*d*] i wyrażająca się wzorem:

$$\mu_{nom} = \frac{R}{N_s} \qquad \left[\frac{1}{d}\right] \tag{2}$$

gdzie:

N_s – masa ładunku statku [t],

R – wydajność systemu przeładunkowego wyrażona w *t/d*.

Jeśli intensywność strumienia wejściowego λ_{we} jest mniejsza od przepustowości μ_{nom}, podsystem pracuje w stanie podkrytycznym. Proces przebiega bez istotnych opóźnień, ale powstają straty z powodu niewykorzystania przepustowości systemu, natomiast średnia liczba jednostek w stanie oczekiwania $N_o(t)$ rośnie nieproporcjonalnie w miarę zbliżania się λ_{we} do μ_{nom}. Stan krytyczny występuje, gdy intensywność ruchu strumienia wejściowego λ_{we} jest równa przepustowości μ_{nom} danego podsystemu. Jest to stan pożądany, ponieważ wykorzystuje przepustowość systemu, lecz jest to stan niestabilny, gdyż przy minimalnych zmianach λ_{we} stan ten może przechodzić w podkrytyczny lub nadkrytyczny. Stan nadkrytyczny występuje, gdy intensywność ruchu strumienia wejściowego λ_{we} jest większa niż przepustowość systemu μ_{nom}. W stanie tym powstaje strumień jednostek oczekujących λ_o, rosnący z czasem do nieskończoności (dla systemów otwartych). Jest to stan niepożądany, w praktyce trwale nie występujący.

Pozostawanie pewnej liczby jednostek $N_o(t)$ w stanie oczekiwania, szczególnie w podsystemach nie sterowanych jest zjawiskiem naturalnym. Decydenci takiego podsystemu często decydują się na uruchomienie rejonu oczekiwania dla jednostek nie mogących wchodzić bezpośrednio na stanowiska przeładunkowe. Rejon oczekiwania ma zwykle ograniczoną pojemność N_{omax} – ogranicza to przepustowość całego podsystemu. Istotną miarą staje się wtedy ***przepustowość graniczna ze względu na możliwości oczekiwania*** μ_{No}:

$$\mu_{No} = \lambda_{we} \qquad \text{dla} \quad N_o(\lambda_{we}) = N_{o\max} \qquad [1/d] \tag{3}$$

Poza liczbą jednostek przebywających w danej chwili w stanie oczekiwania $N_o(t)$ – dla eksploatatorów systemów IRW istotne staje się, z punktu widzenia ekonomicznego, wyznaczenie takich parametrów strumienia wejściowego, przy którym praca podsystemu przynosi największe dochody. Wtedy jakość procesu ruchu może być opisana miarą, którą można nazwać ***dochodem jednostkowym*** $\boldsymbol{D_o}$ i określić wzorem:

$$D_o = (\alpha - \gamma) \cdot \lambda_{we}(t) - \beta \cdot N_o(t) - \delta \qquad [€/\text{d}] \tag{4}$$

gdzie:

- α – przychód za przeładowanie jednostki, [€/st.];
- γ – koszt zmienny przeładowania jednostki, [€/st.];
- $\lambda_{we}(t)$ – intensywność wejściowa, [st./d];
- β – wskaźnik strat związanych z oczekiwaniem na obsługę, [€/st.*d];
- $N_o(t)$ – średnia liczba jednostek przebywających w stanie oczekiwania, [st.];
- δ – jednostkowe koszty stałe, [€/d].

Funkcja $D_o(\lambda_{we})$ jest wypukła i posiada ekstremum (maksimum) w punkcie $\lambda_{we} = \mu_{ek}$, które wynosi D_{omax}. Wtedy system przeładunkowy zyskuje kolejną miarę zwaną ***przepustowością ekonomiczną*** μ_{ek} określoną wzorem:

$$\mu_{ek} = \lambda_{we} \qquad \text{dla} \quad D_o(\lambda_{we}) = D_{o\max} \qquad [1/d] \tag{5}$$

3. Egzemplifikacja

Celem ilustracji możliwości zastosowania metody symulacji cyfrowej dla znalezienia interesujących współzależności i przebiegu wartości opracowanych miar, opisujących badany proces z punktu widzenia IRW – przeanalizujmy następujący przykład rachunkowy. Załóżmy, że okres pojawiania się jednostek na wejściu T_{we}, można opisać rozkładem wykładniczym przesuniętym [4] o funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f_{Twe}(t_{we})$ opisanej wzorem:

$$f_{Twe}(t_{we}) = 0 \; dla \; t_{we} < T_p, \qquad f_{Twe}(t_{we}) = \lambda \cdot e^{-\lambda(t_{we} - Tp)} \; dla \; t_{we} \geq T_p \tag{6}$$

gdzie:

- t_{we} – realizacja zmiennej losowej T_{we};
- λ – średnia wartość intensywności ruchu;
- T_p – przesunięcie.

W niniejszym artykule, aby badania prowadzić dla warunków mieszczących się w granicach realnych wartości – przyjęto przybliżone wartości liczbowe niektórych parametrów podsystemu i procesu ruchu, określone na podstawie identyfikacji procesu ruchu w Porcie Szczecin. Badania przeprowadzono dla ograniczonego czasu pracy systemu. Założono, że czas przejścia statku ze stanu oczekiwania do przeładunku można pominąć lub został wkalkulowany w zdolność przeładunkową nabrzeża. Przyjęto następujące parametry procesu istotne dla przedmiotu badań:

- podsystem przeładunkowy zasilany jest jednorodnym strumieniem jednostek typu m/s „Kopalnia Siersza”;

- ładowność statków wynosi 15 077 t (90% nośności);
- okres pojawiania się jednostek na wejściu systemu przeładunkowego opisany jest rozkładem wykładniczym przesuniętym o wartości średniej $T_{śr}$, oraz T_p= 0 s;
- zdolność przeładunkowa nabrzeża wynosi 4500 t/d;
- opłata za przeładowanie jednej tony wynosi 3 €/t;
- kara za oczekiwanie statku na obsługę wynosi 3000 €/d;
- niech koszty zmienne związane z przeładunkiem wynoszą odpowiednio:
  a) 25% przychodu;
  b) 50% przychodu;
  c) 75% przychodu;
- koszty stałe dla ilustracji przykładu przyjęto na poziomie δ = 720 €/d.

4. Analiza deterministyczna

Przy podanych założeniach, jeśli uznać, że wartości średnie dostatecznie dobrze opisują podsystem, można wyznaczyć przepustowość nominalną systemu przeładunkowego μ_{nom} na podstawie zależności (2):

$$\mu_{nom} = 0{,}3 \qquad [1/d] \tag{7}$$

Zależności deterministyczne dobrze odzwierciedlają proces (rys. 2 i 3 – linia gruba przerywana) pod warunkiem, że wariancje wszystkich zmiennych losowych występujących w badanym procesie są bliskie, równe zeru, co wiązałoby się z realizacją strategii *just in time*. Rzeczywistość zwykle odbiega od tego założenia, aczkolwiek korzyści dla badanego podsystemu są zachęcające (maksymalizacja dochodu a na pewno przychodu, minimalizacja kosztów oczekiwania), co nie gwarantuje analogicznych korzyści dla makrosystemu.

Liczba jednostek przebywających w stanie oczekiwania wg analizy deterministycznej, w stanie podkrytycznym i krytycznym wynosi N_o = 0. Dla stanu nadkrytycznego N_o jest funkcją czasu trwania tego stanu (jak wiadomo, stan taki w rzeczywistości nigdy nie jest permanentny) i wyraża się wzorem:

$$N_o = (\lambda_{we} - \mu_{nom}) \cdot T_s \qquad [st.] \tag{8}$$

gdzie:

λ_{we} – intensywność wejściowa,
μ_{nom} – przepustowość nominalna,
T_s – czas trwania stanu nadkrytycznego.

Liczba jednostek przebywających w stanie oczekiwania N_o wraz ze wzrostem czasu dąży do nieskończoności. Oczywiście, stan nadkrytyczny

w praktyce jest stanem nietrwałym, N_o osiąga ograniczone wartości, gdyż system IRW reaguje zwykle spadkiem λ_{we} i powrotem do stanu krytycznego lub podkrytycznego.

Dochód jednostkowy D_o (rys. 3) narasta liniowo proporcjonalnie do λ_{we}, osiągając maksimum D_{omax} = 8500 €/d dla intensywności wejściowej równej przepustowości. Przepustowość ekonomiczna μ_{ek} jest równa przepustowości nominalnej μ_{nom}.

5. Metoda symulacyjna

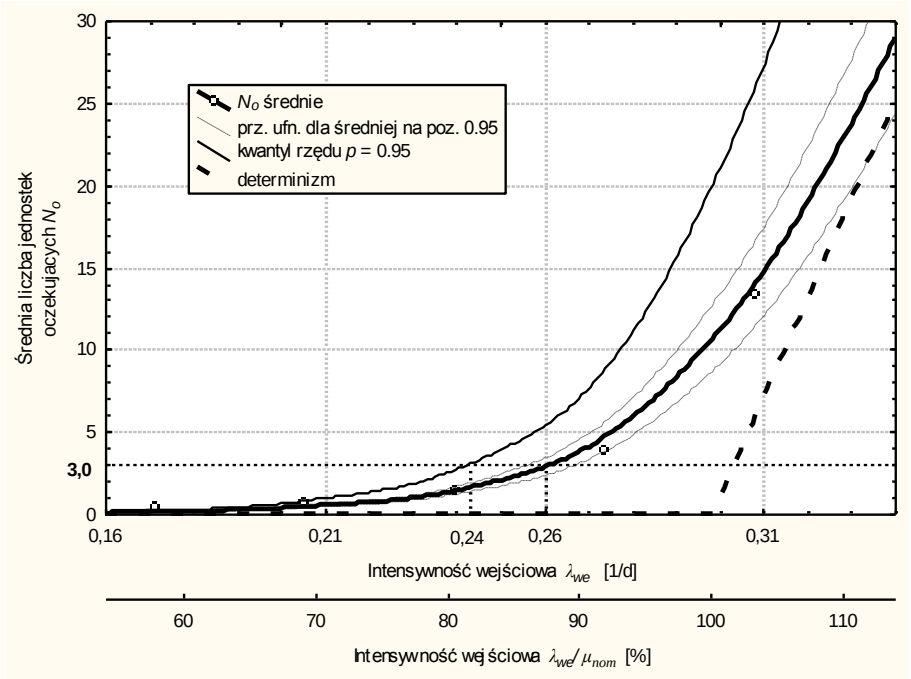
Dokonano szeregu prób symulacyjnych. W trakcie badań zwiększano intensywność strumienia wejściowego λ_{we} rejestrując:

- intensywność strumienia wyjściowego λ_{wy},
- liczbę jednostek przebywających w stanie oczekiwania N_o,
- intensywność strumienia jednostek przeładowywanych bez przechodzenia przez stan oczekiwania λ_{bo},
- intensywność strumienia jednostek kierowanych do stanu oczekiwania λ_{do}.

Wyniki poddano obróbce statystycznej, określając i interpolując przebieg badanych miar w funkcji intensywności strumienia wejściowego λ_{we}.

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy zależności średniej liczby jednostek przebywających w stanie oczekiwania N_o w zależności od intensywności strumienia wejściowego λ_{we}.

Wielkość ***przepustowości granicznej ze względu na możliwości oczekiwania*** μ_{No} można skalkulować na podstawie badania parametrów rozkładu zmiennej losowej, jaką jest N_o. Jeśli przyjąć, że rejon oczekiwania ma pojemność około trzech jednostek, intensywność strumienia wejściowego nie powinna przekraczać około 0,26 1/d (88% przepustowości). Jeżeli pojemność rejonu oczekiwania należy traktować bardzo rygorystycznie, tzn. nie ma możliwości wytracania czasu dla więcej niż np. trzech jednostek z prawdopodobieństwem nie mniejszym niż 0,95, wtedy strumień wejściowy należy ograniczyć znacznie mocniej do 0,24 1/d (82% przepustowości – przecięcie N_o = 3 z kwantylem rzędu np. 0,95).

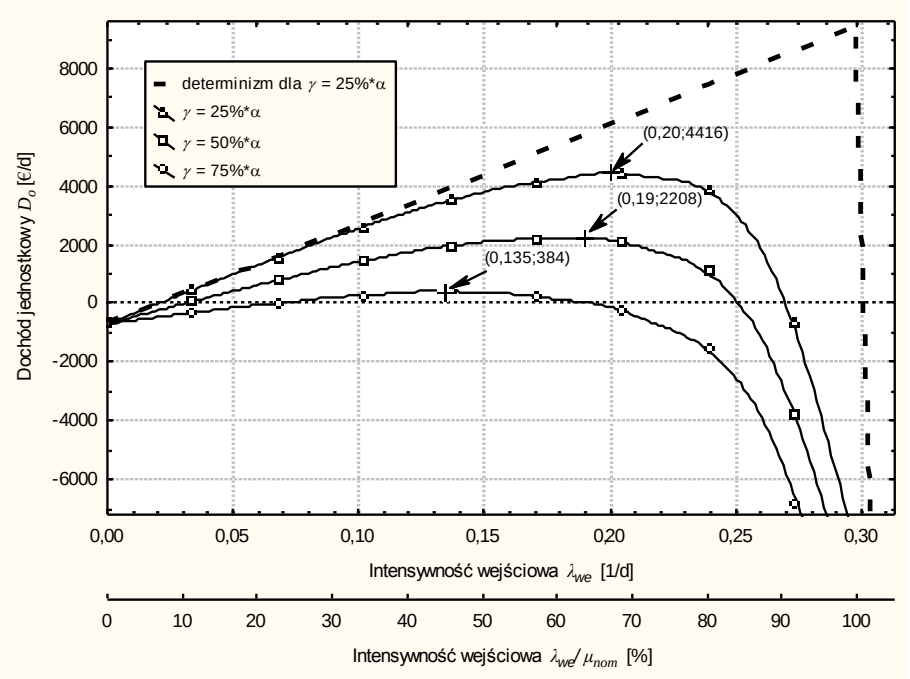


Rys. 2. Wykresy średniej liczby jednostek oczekujących na wejście pod przeładunek N_o w funkcji intensywności wejściowej λ_{we}

Fig.2. Graphs of average number of vessels waiting for transshipment N_o in the function of entry intensity λ_{we}

Źródło: opracowanie własne

W badanym przykładzie rachunkowym ograniczenie to nie będzie jednak decydujące. Na rysunku 3 przedstawiono wykresy zależności dochodu jednostkowego D_o w funkcji intensywności wejściowej λ_{we}. Funkcja $D_o(\lambda_{we})$ dla żadnego z badanych wariantów nie posiada maksimum w punkcie λ_{we} => 80% μ_{nom}. Przebieg tej funkcji potwierdza znaną z ekonomii prawidłowość. Niepracujący podsystem przynosi straty z tytułu ponoszenia kosztów stałych, próg dochodowości osiąga po przekroczeniu pewnej intensywności realizowanych przeładunków (w badanym przypadku kilku – dwudziestu kilku procent μ_{nom}. Maksymalny dochód D_{omax} osiąga dla ***przepustowości ekonomicznej*** μ_{ek} (w tym wypadku 40 – 70%). Dalsze wymuszanie wzrostu λ_{we} nie jest racjonalne, gdyż zmniejsza dochód a nawet może doprowadzić do strat. Można natomiast wyobrazić sobie inne działania racjonalizacyjne, np. zmianę rozkładu zmiennej losowej okresu pojawiania się jednostek na wejściu T_{we} na mniej rozproszony. Wykres ten może być inspiracją do podejmowania dalszych działań optymalizacyjnych, których omówienie przekroczyłoby ograniczoną objętość niniejszego artykułu.



Rys. 3. Wykresy dochodu jednostkowego D_o w funkcji intensywności wejściowej λ_{we}

Fig.3. Graphs of unit income D_o in the function of entry intensity λ_{we}

Źródło: opracowanie własne

Wnioski z przeprowadzonych badań

W artykule sformułowano podstawowe miary podsystemu przeładunkowego w aspekcie badań IRW. Miary te pozwalają na identyfikację parametrów tego podsystemu i procesów w nim zachodzących a w dalszej kolejności na optymalizację systemów IRW i procesów ruchu.

Opracowane miary związane są z przepustowością podsystemu przeładunkowego w aspekcie uwzględnienia:

- ograniczonych możliwości oczekiwania statków na wejście pod przeładunek,
- optymalizacji eksploatacyjnego poziomu strumienia wejściowego λ_{we}.

Podstawy teoretyczne poparto egzemplifikacją w zakresie realnych wartości wielkości identyfikujących proces ruchu jednostek pływających. Wyciągnięto istotne wnioski praktyczne, pozwalające na zasadną interpretację zjawisk znanych

często intuicyjnie jako wynik doświadczenia praktyków i na podejmowanie działań usprawniających proces ruchu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda symulacji umożliwia bardziej adekwatne w stosunku do rzeczywistości odzwierciedlenie zjawisk procesu ruchu. Pozwala na:

- elastyczność w projektowaniu modeli systemów IRW i procesów ruchu;
- identyfikację zjawisk zachodzących w podsystemie przeładunkowym;
- wyznaczenie wartości miar przepustowości w zależności od różnych przyjętych kryteriów wartościujących procesy w systemach IRW;
- określenie miar mających istotne znaczenie dla praktyki nawigacyjnej.

Literatura

1. Majzner P., Piszczek W., *Symulacyjne badania procesów ruchu strumieni jednostek na akwenach ograniczonych,* IX MKN-T IRM, Świnoujście 2003.
2. Majzner P., Piszczek W., *Symulacyjne badania przepustowości i bezpieczeństwa ruchu strumieni jednostek na torze wodnym w warunkach probabilistyki zjawisk zgłoszeń i prędkości jednostek,* Zeszyty Naukowe nr 2(74) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2004.
3. Majzner P., Piszczek W., *Symulacyjne badania dynamiki procesów ruchu strumieni jednostek na akwenach ograniczonych,* VI Sym. Naw., Gdynia 2005.
4. Majzner P., Piszczek W., *Problemy przepustowości torów wodnych,* Zeszyty Naukowe nr 6 (78) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2005.
5. Majzner P., Piszczek W., *Miary oceny przepustowości toru wodnego,* Zeszyty Naukowe nr 8 (80) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2005.
6. Majzner P., Piszczek W., *Miary doboru przepustowości toru wodnego w aspekcie eksploatacyjnym.* Zeszyty Naukowe nr 9(81) Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2006.
7. Piszczek W., *Modele miar systemu inżynierii ruchu morskiego*. Studia nr 14, WSM, Szczecin 1990.

Wpłynęło do redakcji w październiku 2006 r.

Recenzent

dr hab. inż. Władysław Buchholz, prof. PS

Adres Autorów

mgr inż. Piotr Majzner
Instytut Nawigacji Morskiej
e-mail: pmaj@am.szczecin.pl

dr hab. inż. Wojciech Piszczek, prof. AM w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
e-mail: wojciech.piszczek2@neostrada.pl
Akademia Morska w Szczecinie
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1/2