EXIT OF SAFETY WATERWAY NAVIGATIONAL ACCIDENT PROBABILITY ASSESSMENT MODEL BASED ON NAVIGATION CYCLES CONCEPT

MODEL PRAWDOPODOBIENSTWA WYSTĄPIENIA AWARII NAWIGACYJNEJ WYJŚCIA STATKU POZA BEZPIECZNE GRANICE TORU WODNEGO BAZUJĄCY NA POJĘCIU CYKLI NAWIGACYJNYCH

Lucjan Gucma

Maritime Univeristy of Szczecin
Akademia Morska w Szczecinie
70-500 Szczecin Wały Chrobrego 1-2

e-mails: lucek@am.szczecin.pl

Abstract. The paper presents the concept of ships exit of waterway navigational accident probability assessment. Model enables to determine the total probability of accident during ships passage through waterways. Data from simulation trials or real experiments could be used as the input data.

Keywords: Navigational accident, safety of navigation

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję modelu określania prawdopodobieństwa wypadku wyjścia statku poza granice toru na akwenach ograniczonych. Model umożliwia szacowanie całkowitego prawdopodobieństwo wypadku podczas przejścia jednostki drogami wodnymi. Jako dane wejściowe mogą być wykorzystane dane z symulacji ruchu statków bądź dane rzeczywiste pochodzące z systemów monitoringu lub eksperymentów rzeczywistego.

Słowa kluczowe: Awaria nawigacyjna, bezpieczeństwo nawigacji

EXIT OF SAFETY WATERWAY NAVIGATIONAL ACCIDENT PROBABILITY ASSESSMENT MODEL BASED ON NAVIGATION CYCLES CONCEPT

1. Introduction

There is well worked methodology of determination of manoeuvring areas for ships as the two dimensional areas with given probability of ships presence inside them. The models presently used provide well assessment in relatively short waterway discrete sections but the assessment of total accident probability is not yet well worked out. The assessment made by these models offer only partially satisfactory results (Gucma 2006a) due to model limitations. With use of navigational process concept the model of total probability of accident during whole ships voyage is proposed. The use of such model is determined by availability of sufficient amount of data from either simulations or real experiments.

2. The model of navigational risk assessment of ships exit the safety waterways

Ships are moving on given, previously to the passage determined routes. Through control of position navigator tries to follow the routes however various random factors such as external conditions influence or navigators mistakes results in exit from given routes. The extreme random distances from given route are random functions with parameters which could be determined by simulation experiments for given waterway section (Fig 1). These functions are creating separately for right and left side of the waterway as $f_l(y)$ i $f_p(y)$ (Fig. 1 and Fig. 2). Usually normal distribution is well approximation of maximal distance to the centre of waterway functions [Iribarren 1999]. The parameters of these functions are dependent of:

1. dimensions and manoeuvring parameters of ships,
2. waterway area parameters.

On the basis of the simulation experiments it is assumed that central tendencies of distributions are dependant of first group of above and

variance are dependant of second group. These models were determined in [Gucma 2000, 2006a].

Fig. 1. The concept of determination safety manoeuvring areas (grey area)

In the further step the probability of exit of safety borders by ships P_a are determined as (Fig. 2):

$$P_a = \int_D^{+\infty} f_{N(m,\sigma)}(y) dy \quad (1)$$

where: D —available waterway width, $f_{N(m,\sigma)}(y)$ —normal distribution with parameters m i σ .

Probability are assessed usually for the right and left side of waterway separately dividing waterway on longitude discrete sections.

Fig. 2. Process of ships manoeuvring, determination of accident probability and navigational cycles concept (n_i i n_{i+1})

The concept of navigational cycles is based on assumption that navigational process on restricted areas consist of (Fig 2):

1. information gathering and making the manoeuvre (duration usually less than 10s),
2. control and steering devices input (duration usually less than 10s),
3. wait to output of given manoeuvre (depends of kind of ship and conditions usually more than 10s, longer for bigger ships).

Duration of whole manoeuvring cycle can be calculated by simulation or real experiments.

To determine the probability during whole ships passage binominal distribution can be applied with distribution function defined as:

$$P_{(k,p)}(n) = [k! / n!(k-n)!] p^n (1-p)^{k-n} \quad (2)$$

where: k —number of manoeuvring cycles, p —probability of accident in given cycle.

The assumption of usability of above formula is unchanging value of probability of accident during passage. The probability of at least one accident during passage is expressed as:

$$P(n > 0) = 1 - P(n = 0) = 1 - (1-p)^n \quad (3)$$

The binominal distribution converges to Poisson distribution with assumption that number of cycles approach to infinity practically is large ($(n > 30)$) and probability of accident in one passage is small ($p < 0,1$) which

can be easily fulfilled in this kind of researches. Poisson distribution is defined as:

$$P_{(\lambda)}(n) = \lambda^n e^{-\lambda} / n! \quad (4)$$

where λ —intensity of accidents equals kp , where k —mean number of cycles
 p —probability of accident in given cycle.

In case if assumption of constant accident intensity cannot be fulfilled of the nonstationary Poisson distribution could be used [Gucma 2006].

Function of minimal distance from assumed route $f(x)$ (Fig. 2) is random and could be obtained by simulation researches of ships manoeuvring. The number of cycles could be assessed calculated as a sum maximum and minimum distance in given passages as follows:

$$n = \sum [\max f(x) + \min f(x)] \quad (5)$$

The function $f(x)$ could be used for the mean length of navigation cycle $E(L)$ in given simulation passage determination.

The time of manoeuvring cycle is random and could be determined by speed distribution in given area. Distribution of ship speed depends of its position on the waterway and it could be used for time determination of given manoeuvring cycles $E(V)$.

3. Model validation

To validate presented model the simulation researches was applied. The researches were conducted at the entrance to Kolobrzeg port and the main aim of them was to find the safety of ships passage in respect to modernised layout of breakwaters. The researched ship was universal general cargo ship with parameters deadweight $DWT=2500\text{ton}$; length overall $L_c=750\text{m}$; breadth $B=13\text{m}$; draught $T=4,5\text{m}$; main engine power $P_n=1480\text{KM}$; left side turning propeller with controllable pitch; bow thrusters power $p_s=125\text{kW}$; Becker type main rudder; speed full sea $v_m=12\text{w}$. The captains taking part in researches made in total 12 series each consists of 15 passages in difficult wind and current conditions. The real time simulation method was applied [Analiza 2007] and simulation IRMSym hydrodynamic model was applied.

The model enables to control and observe basic ship movement parameters (Fig. 3).

Fig. 3. The computer interface of IRMSym simulation model of ships movement (entrance to Kołobrzeg port)

The passages data were recorded and after the whole simulation worked out to determine the important parameters. In further step the safety manoeuvring areas was determined on 95% confidence level as a standard level used for design of waterways (Fig. 4).

Fig. 4. Safety manoeuvring areas on 95% level of confidence (95), maximal areas (max), mean areas (m), safety waterway borders (izo) and middle of the waterway (o)

The mean number of navigational cycles has been determined on the basis of distances of ships from the centre of the waterway (Fig 5). The discrete section length in researches was assumed as 10m. The mean number of sections were evaluated as $n=7,6$, mean length of single cycle is $l=136m$ decreasing inside port.

Fig. 5. Practical illustration of manoeuvring cycle concept and distances from the waterway in function of section number (section length = 10m)

In further step the distribution speed of ships V and length of section L was determined (Fig.6). Mean speed of ship equals $E(V) = 2,7\text{m/s}$ and mean time of given cycle duration is $E(T) = 50,4\text{s}$.

Fig. 6. Speed of ships in given sections and simulation series

With use of formulas (2) or (4) in this case the solutions obtain by them are similar. with use of probabilities determined in given sections for mean parameters probability of 0,95% safety waterway border exit in one passage equals $P_{\Sigma} 0,32$. The probability determined in given sections is presented in Fig. 7.

Fig. 7. Probability of safety waterway borders exit in given sections

4. Conclusions

The model of navigational accident assessment on the waterway based on manoeuvring cycle's concept was presented. The model was validated on the basis of simulation experiment conducted in port of Kołobrzeg. The model could be applied for complex analysis of ships navigational safety during passage through the waterways and for the navigational risk management.

References

1. Gucma L.: *The method of average navigation risk assessment with consideration of inequality of ship's accident probability along the waterway*. Risk Analysis II. Wit Press. Southampton and Boston, 2000.
2. Gucma L.: *Modelowanie czynników ryzyka zderzenia jednostek pływających z budowlami hydrotechnicznymi* Wyd. AM Szczecin, 2006a.
3. Gucma L.: *The method of simulation experiments results validation with use of statistical data for ship risk assessment on restricted water areas*. Proc of the ESREL 2006 Conference Lisbon, 2006b.
4. Iribarren J. R.: *Determining the Horizontal Dimensions of Ship Manoeuvring Areas*. PIANC Bulletin No 100, Bruxelles, 1999.
5. *Analiza nawigacyjna nowoprojektowanego wejścia do portu Kołobrzeg metodami symulacyjnymi*. Praca naukowo-badawcza. Akademia Morska Szczecin 2007.

MODEL PRAWDOPODOBIEŃSTWA WYSTĄPIENIA AWARII NAWIGACYJNEJ WYJŚCIA STATKU POZA BEZPIECZNE GRANICE TORU WODNEGO BAZUJĄCY NA POJĘCIU CYKLI NAWIGACYJNYCH

1. Wstęp

Istnieje szeroko udokumentowana metodologia określania obszarów manewrowych statku jako obszarów dwuwymiarowych o założonym poziomie prawdopodobieństwa wystąpienia statku w ich rejonie. O ile modele obecnie stosowane dają dobre oszacowanie w krótkich odcinkach dróg wodnych (sekcjach, obszarach dyskretnych) to ocena sumarycznego prawdopodobieństwa wypadku podczas przejścia jak do tej pory nie została dostatecznie dobrze opracowana. Autor podejmował wcześniej próby oszacowania takiego zdarzenia [Gucma 2006a] jednak nie były one zadowalające z uwagi na ograniczania zaprezentowanych modeli. Wykorzystując koncepcję procesu nawigacyjnego można zbudować model określania prawdopodobieństwa dla całej podróży jednostki na akwenach nawigacyjnych w różnych warunkach. Użycie prezentowanej metody jest zdeterminowane posiadaniem dostatecznej ilości wyników danych symulacyjnych lub wykonania badań rzeczywistych.

2. Model prawdopodobieństwa wystąpienia awarii nawigacyjnej wyjścia statku poza bezpieczne granice toru wodnego

Statki poruszają się po wyznaczonych i z góry założonych trasach. Poprzez ścisłą kontrolę swojej pozycji nawigator stara się utrzymać statek na zadanej trasie jednak losowe wymuszania i błędy sterowania prowadzą do zejścia z niej. Maksymalne losowe zejścia od założonej trasy można opisać funkcjami, których typ i parametry określa się za pomocą badań symulacyjnych, dla każdej części toru wodnego (Rys. 1). Funkcje te buduje się osobno dla lewej i prawej strony toru jako $f_l(y)$ i $f_p(y)$. Najczęściej przyjmuje się rozkład normalny jako dobrą aproksymację funkcji maksymalnych odległości od środka toru wodnego [Iribarren 1999].

Parametry tych funkcji zależą od wielu zmiennych, które można pogrupować następująco:

1. rozmiar i parametru manewrowe statku,
2. parametry akwenu.

Na podstawie badań symulacyjnych i rzeczywistych przyjmuje się, że miary wartości centralnych rozkładów odległości od środka toru zależą od pierwszej grupy, a miary rozrzutu tych rozkładów od drugiej. Próby określanie ich modeli podjęto w [Gucma 2000, 2006a].

Rys. 1. Koncepcja wyznaczania bezpiecznych obszarów manewrowych

W dalszym kroku określa się prawdopodobieństwo zderzenia statku z konstrukcjami hydrotechnicznymi P_a umiejscowionymi na granicy dostępnego toru jako (Rys. 1):

$$P_a = \int_D^{+\infty} f_{N(m,\sigma)}(y) dy \quad (1)$$

gdzie: D – dostępna szerokość akwenu manewrowego, $f_{N(m,\sigma)}(y)$ – rozkład normalny o parametrach m i σ .

Prawdopodobieństwo szacuje się zwykle osobno dla prawej i lewej strony toru wodnego stosując dyskretny podział na sekcje.

Rys. 2. Proces manewrowania, określanie prawdopodobieństwa wypadku i cykle manewrowe (n_i i n_{i+1})

Koncepcja cykli manewrowych opiera się na założeniu, że prowadzenie nawigacji na akwenie ograniczonym przy możliwości oceny wizualnej pozycji lub za pomocą mapy elektronicznej jest oparte na wykonaniu trzech kolejno po sobie następujących cykli (Rys. 2):

4. zbierania informacji i wypracowania manewru (czas trwania z reguły do 10s),
5. zadania manewru (czas trwania z reguły do 10s),
6. wykonania manewru (zależny od typu statku i warunków z reguły ponad 10s, dłuższy dla większych bardziej bezwładnych jednostek).

Czas trwania pełnego cyklu manewrowego może być obliczony na podstawie danych symulacyjnych lub rzeczywistych.

Do określania prawdopodobieństwa podczas całego przejścia można wykorzystać rozkład dwumianowy w postaci:

$$P_{(k,p)}(n) = [k! / n!(k-n)!] p^n (1-p)^{k-n} \quad (2)$$

gdzie: k – liczba cykli manewrowych, p – prawdopodobieństwo awarii w jednym cyklu.

Założeniem stosowalności wyżej wymienionego rozkładu jest niezmienność prawdopodobieństwa wypadku podczas przejścia. Prawdopodobieństwo, co najmniej jednego wypadku podczas całego przejścia statku jest określane jako:

$$P(n > 0) = 1 - P(n = 0) = 1 - (1-p)^n \quad (3)$$

Model można zbudować jako przejście graniczne do rozkładu Poissona zakładając, że liczba cykli nawigacyjnych dąży do nieskończoności a praktycznie jest dostatecznie duża ($n > 30$) i prawdopodobieństwo w pojedynczym cyklu jest niewielkie ($p < 0,1$) co jest założeniem zwykle spełnionym w przypadkach badania bezpieczeństwa ruchu statków. Rozkład taki przyjmie postać:

$$P_{(\lambda)}(n) = \lambda^n e^{-\lambda} / n! \quad (4)$$

gdzie λ – intensywność wypadków równa w przybliżeniu kp , gdzie k – średnia ilość cykli, p – prawdopodobieństwo wypadku w pojedynczym cyklu.

W przypadku niestacjonarności rozkładu można stosować zaproponowane przez Autora modele oparte na niestacjonarnym procesie Poissona [Gucma 2006].

Funkcja minimalnych odległości do krawędzi toru $f(x)$ (Rys. 2) jest losowa i można ją określić za pomocą badań symulacyjnych ruchu statków. Liczbę cykli można określić jako sumę jej maksimów i minimów podczas badanego przejścia statkiem jako:

$$n = \sum [\max f(x) + \min f(x)] \quad (5)$$

Za pomocą takiej funkcji można określić średnią długość pojedynczego cyklu w próbie symulacyjnej jako $E(L)$.

Czas cyklu traktuje się jako losowy i określa się za pomocą funkcji rozkładu prędkości jednostek na badanym akwenie. Funkcja prędkości jednostki zależy od jego położenia na torze wodnym jej znajomość pozwoli na określanie czasu poszczególnych cykli manewrowych $E(V)$.

3. Weryfikacja modelu

Model zweryfikowano wykorzystując badania przeprowadzone w Kołobrzegu, których celem było określanie bezpieczeństwa zmodernizowanego układu falochronów. Badanym statkiem był drobnicowiec uniwersalny o następujących parametrach: nośność $DWT=2500$ ton; długość całkowita $Lc=750$ m; szerokość $B=13$ m; zanurzenie $T=4,5$ m; moc silnika głównego $Pn=1480$ KM; śruba nastawna lewoskrętna;

ster strumieniowy o mocy $p_s=125\text{kW}$; ster główny łamany; prędkość cała naprzód morską $vm=12\text{w}$.

Kapitanowie biorący udział w badaniach wykonali w sumie 12 serii po około 15 przejazdów symulacyjnych w każdej w tym prób każda po w trudnych warunkach wiatrowych i prądowych.

Zastosowano metodę symulacji ruchu statków w czasie rzeczywistym [Analiza 2007] i model interaktywny IRMSym z interfejsem pozwalającym na kontrole podstawowych parametrów ruchu statku. Interfejs modelu przedstawiono na Rys. 3.

Rys. 3. Interfejs modelu symulacyjnego IRMSym ruchu statków (wejście do portu Kołobrzeg)

Przejazdy zostały rejestrowane i po wykonaniu badań przetworzono je pod kątem badanych parametrów. W dalszym kroku określono bezpieczny obszar manewrowy na poziomie ufności 0,95 jako standardowo stosowany w pracach związanych z projektowaniem akwenów i oceną ich bezpieczeństwa. (Rys. 4).

Rys. 4. Bezpieczne obszary manewrowe na poziomie 95% (95), maksymalne obszary (max), obszary średnie (m), izobaty bezpieczne (izo), i środek toru (o)

Określono średnią ilość cykli nawigacyjnych na podstawie odległości od środka toru dla wszystkich sekcji oraz ich rozkłady (Rys.5). Przyjęto podział na dyskretne sekcje o długości 10m. Określono rozkład i estymowano jego parametry średnia ilość cykli wynosi $n=7,6$ długość średniego cyklu wynosi $l=136m$ i maleje wewnątrz portu.

Rys. 5. Praktyczna ilustracja koncepcji cykli manewrowych oraz odległości od środka toru w funkcji ilości sekcji (długość sekcji =10m)

Określano rozkład prędkości statku w poszczególnych sekcjach jako zmienna losową V oraz i długość cykli jako L (Rys. 6). Średnia prędkość jednostki wynosi $E(V)=2,7\text{m/s}$, a średni czas trwania cyklu wynosi $E(T)=50,4\text{s}$.

Rys. 6. Prędkości statków w poszczególnych seriach i sekcjach

Za pomocą zależności (2) oraz (4) (w badanym przypadku dają one zbliżone wartości) oszacowano dla średnich parametrów prawdopodobieństwo całkowite wyjścia poza granice 95% bezpiecznego obszaru manewrowego w jednym średnim przejściu wynosi około $P_z=0,32$. Prawdopodobieństwa określone w poszczególnych sekcjach przedstawiono na Rys. 7.

Rys. 7. Prawdopodobieństwa wyjścia poza dostępne granice toru w poszczególnych sekcjach

4. Wnioski

Przedstawiono model oceny bezpieczeństwa statku przechodzącego torem wodnym bazujący na pojęciu cykli nawigacyjnych. Model zweryfikowano na podstawie eksperymentu symulacyjnego. Model może być zastosowany do kompleksowej oceny bezpieczeństwa statku podczas przejścia drogami wodnymi oraz do modeli zarządzania ryzykiem na akwenach ograniczonych.

GUCMA Lucjan is professor in Navigational Faculty of Maritime University of Szczecin, Poland. In 2004 he became the Director of Marine Traffic Engineering Institute. His main scientific interest is concern with probabilistic method in safety of ships assessment on restricted water areas. He has published the book titled “The models of risk factors of ship collision with fixed offshore and port structures” and more than 50 papers in journals and conference proceedings.