



POLITECHNIKA GDAŃSKA

WYDZIAŁ OCEANOTECHNIKI I OKRĘTOWNICTWA

---

**Analiza ryzyka jako alternatywna  
metoda oceny bezpieczeństwa  
statecznościowego statku w stanie  
nieuszkodzonym**

---

*Autor:*  
Tomasz HINZ

*Promotor:*  
Prof. Lech KOBYLIŃSKI

10 czerwca 2015

*Pracę tą dedykuję moim **Dziadkom**,  
którzy najbardziej we mnie wierzyli*

# Spis treści

Spis rysunków . . . . .	III
Spis tabel . . . . .	IV
Lista symboli . . . . .	V
Spis skrótów . . . . .	IX
<b>1. Wprowadzenie . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. Stawiane hipotezy i problemy badawcze . . . . .	3
1.2. Cel pracy . . . . .	3
1.3. Naukowe metody badawcze stosowane w pracy . . . . .	3
1.4. Struktura pracy . . . . .	3
1.5. Podziękowania . . . . .	4
<b>2. Sposoby normowania stateczności statku . . . . .</b>	<b>6</b>
2.1. Rozwój przepisów statecznościowych . . . . .	6
2.2. Współczesne przepisy statecznościowe . . . . .	9
2.2.1. Kodeks Statecznościowy — IS Code . . . . .	9
2.2.2. Kryterium pogody w kodeksie statecznościowym . . . . .	9
2.3. Propozycje przedstawione przez IMO odnośnie opracowania kryteriów nowej generacji . . . . .	13
2.4. Nowe przepisy dla kryterium pogody — scenariusz „Dead Ship Condition” . . . . .	15
2.5. Podsumowanie rozdziału . . . . .	15
<b>3. Alternatywne metody oceny bezpieczeństwa statku w oparciu o ocenę ryzyka . . . . .</b>	<b>17</b>
3.1. Safety case . . . . .	18
3.2. Formalna Ocena Bezpieczeństwa — FSA . . . . .	20
3.2.1. Krok 1 – Identyfikacja zagrożeń . . . . .	21
3.2.2. Krok 2 – Ocena ryzyka . . . . .	23
3.2.3. Krok 3 – Opcje kontroli ryzyka . . . . .	24
3.2.4. Krok 4 – Ocena kosztów . . . . .	25
3.2.5. Krok 5 – Rekomendacje dla decydentów . . . . .	26
3.3. Podsumowanie . . . . .	26
<b>4. Model ryzyka wypadku statecznościowego statku w stanie nieuszkodzonym</b>	<b>27</b>
4.1. Sieci Bayes’a . . . . .	29
4.1.1. Tworzenie sieci Bayes’a w oparciu o wiedzę ekspercką . . . . .	31
4.1.2. Tworzenie sieci Bayes’a w oparciu o zestaw danych uczących . . . . .	32
4.2. Definiowanie modelu ryzyka . . . . .	34
4.2.1. Definiowanie zmiennych . . . . .	34

4.2.2.	Tworzenie jakościowej części modelu . . . . .	35
4.2.3.	Tworzenie ilościowej części modelu . . . . .	35
4.2.4.	Walidacja modelu . . . . .	36
4.3.	Parametry modelu ryzyka . . . . .	37
4.3.1.	Modelowanie awarii układów napędowego i sterowniczego . . . . .	39
4.3.2.	Modelowanie właściwości środowiska . . . . .	40
4.3.3.	Przewracanie się statku w stanie nieuszkodzonym . . . . .	43
4.3.4.	Szacowanie konsekwencji wypadku statecznościowego . . . . .	50
4.4.	Walidacja modelu ryzyka . . . . .	53
4.4.1.	Walidacja krzyżowa . . . . .	53
4.4.2.	Analiza czułości . . . . .	54
4.4.3.	Analiza „wartości informacji” . . . . .	56
4.5.	Podsumowanie . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>Zastosowanie modelu ryzyka wypadku Dead Ship Condition do statku RoPax . . . . .</b>	<b>58</b>
5.1.	Projekt statku typu RoPax . . . . .	58
5.1.1.	Hydrostatyka i stany załadowania . . . . .	59
5.1.2.	Analiza stateczności zgodnie z Kodeksem Statecznościowym . . . . .	60
5.2.	Analiza ryzyka wypadku statecznościowego . . . . .	62
5.3.	Podsumowanie . . . . .	71
<b>6.</b>	<b>Wnioski i rekomendacje dla dalszych prac . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>A.</b>	<b>Propozycje normowania wypadku statecznościowego w stanie DSC . . . . .</b>	<b>83</b>
A.1.	Propozycja włoska . . . . .	83
A.2.	Propozycja japońska . . . . .	85
<b>B.</b>	<b>Metoda Monte Carlo . . . . .</b>	<b>87</b>

# Spis rysunków

2.1	Krzywe Reed'a statków CAPTAIN i MONARCH . . . . .	7
2.2	Kryterium pogody w IS Code . . . . .	10
2.3	Proces oceny w nowej generacji kryteriów stateczności . . . . .	14
3.1	Schemat ocena ryzyka . . . . .	19
3.2	Schemat Safety Case . . . . .	20
3.3	Schemat metody FSA . . . . .	22
4.1	Przykład sieci Bayes'a . . . . .	30
4.2	Struktura modelu ryzyka . . . . .	36
4.3	Obszar Północnego Atlantyku . . . . .	41
4.4	Układ współrzędnych . . . . .	45
4.5	Zagregowany czas do przewrócenia się statku . . . . .	50
4.6	Czasy do przewrócenia się statku . . . . .	51
4.7	Rozkłady czasów ewakuacji . . . . .	52
4.8	Analiza czułości - ilość ofiar wypadku . . . . .	54
4.9	Analiza czułości - przewrócenie się statku . . . . .	55
5.1	Linie teoretyczne statku RoPax . . . . .	59
5.2	Kadłub zastosowany do obliczeń statecznościowych . . . . .	60
5.3	Profil kadłuba statku RoPax . . . . .	60
5.4	Model do obliczeń hydrodynamicznych . . . . .	61
5.5	Krzywe graniczne dla maksymalnych wysokości środków ciężkości (max KG) . . . . .	62
5.6	Krzywe graniczne dla minimalnych wysokości metacentrycznych (min KG) . . . . .	63
5.7	Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC1 - ruch „Kołysanie boczne” . . . . .	65
5.8	Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC2 - ruch „Kołysanie boczne” . . . . .	65
5.9	Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC3 - ruch „Kołysanie boczne” . . . . .	66
5.10	Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC4 - ruch „Kołysanie boczne” . . . . .	66
5.11	Ogólna struktura modelu ryzyka . . . . .	67
5.12	Krzywe FN dla różnych stanów załadowania . . . . .	68
5.13	Wykres danych wejściowych do modelu . . . . .	70
5.14	Krzywa FN z obszarem ALARP . . . . .	71

# Spis tabel

2.1	Zakres stosowalności kryterium pogody . . . . .	11
4.1	Światowa flota statków typu RoPax . . . . .	28
4.2	Miejsca dla pasażerów na statkach typu RoPax . . . . .	28
4.3	Opis zmiennych przedstawionych na rysunku 4.1 . . . . .	31
4.4	Tabela prawdopodobieństw warunkowych . . . . .	31
4.5	Opis zmiennych w modelu . . . . .	37
4.6	Stany poszczególnych zmiennych wraz z ich dyskretyzacją . . . . .	38
4.7	Rozkład czasu naprawy układu manewrowo-napędowego . . . . .	39
4.8	Tabela prawdopodobieństw falowania na północnym Atlantyku . . . . .	42
4.9	Wyniki walidacji krzyżowej - zmienna objaśniana: ilość ofiar . . . . .	53
4.10	Wyniki walidacji krzyżowej - zmienna objaśniana: przewracanie się . . . . .	53
4.11	Analiza „Wartości informacji” . . . . .	56
5.1	Podstawowe parametry statku typu RoPax . . . . .	58
5.2	Stany załadowania użyte w analizie stateczności i ryzyka . . . . .	59
5.3	Prawdopodobieństwo pływania z danym GM . . . . .	64
5.4	Prawdopodobieństwo falowania z danego kierunku . . . . .	64
5.5	Rozkłady prawdopodobieństw poszczególnych zmiennych w modelu . . . . .	69

# Lista symboli

$\mu_e$	Liniowy współczynnik tłumienia
$\Delta S$	Pole powierzchni panelu
$\Delta$	Wypór okrętu
$\lambda_{EA}$	Wielkość defektu stateczności dla przypadku „Dead Ship Condition”
$\omega_{0,e}$	Skorygowana naturalna częstość kołysań bocznych
$\overline{GZ}_{res}$	Zlinearyzowane ramie prostujące
$\rho_{air}$	Ciśnienie powietrza
$\varphi$	Kąt przechyłu bocznego
$\varphi_m$	Kąt przy którym występuje maksymalne ramie prostujące
$\varphi_{lr}$	Amplituda rezonansowych kołysań bocznych
$\vec{n}$	Wektor normalny
$\widehat{H/\lambda}$	Stromość fali
$\zeta$	Profil fali
$A_B$	Powierzchnia zwilżona
$A_W$	Powierzchnia nawiewu
$Ampl$	Amplituda falowania
$B$	Szerokość okrętu
$b$	Tłumienie zależne od częstości falowania
$Beta$	Kierunek falowania
$BK$	Wiedza
$C$	Konsekwencje
$C_y$	Współczynnik aerodynamiczny
$C_B$	Współczynnik pełnotliwości
$C_{Dwy}$	Współczynnik aerodynamiczny nawodnej części statku
$Capsize$	Przewrócenie się statku
$CI_{EA}$	Indeks defektu stateczności dla przypadku „Dead Ship Condition”
$D$	Dane
$DAY$	Pora dnia
$e_{35}$	Pole pod krzywą ramion prostujących do kąta $35^\circ$
$ENV$	Parametry środowiska
$f_B$	Klasyfikator bayesowski
$F_{av}$	Wysokość wolnej burty
$F_{LOSA}$	Miara utraty życia
$GM$	Wysokość metacentryczna
$GM_0$	Początkowa wysokość metacentryczna
$GM_{0min}$	Minimalna początkowa wysokość metacentryczna

$GZ$	Ramię prostujące
$GZ_{min}$	Minimalne ramię prostujące
$H(X)$	Entropia Shannon'a
$H$	Hipoteza
$H$	Wysokość boczna okrętu
$H_W$	Położenie środka powierzchni nawiewu
$H_{dyn}$	Położenie środka powierzchni zwilżonej
$H_{s,annual}$	Maksymalna znacząca wysokość fali
$J_{add}$	Moment bezwładności wody towarzyszącej
$J_{xx}$	Moment bezwładności względem osi X
$K_W$	Moment od wiatru wokół osi X
$K_{damp}$	Moment tłumiący związany z obrotem wokół osi X
$K_{diff}$	Moment dyfrakcyjny związany z obrotem wokół osi X
$K_{FK,L}$	Część liniowa momentu Froude-Krylov'a związanego z obrotem wokół osi X
$K_{rad}$	Moment radiacyjny związany z obrotem wokół osi X
$K_{restoring,L}$	Część liniowa momentu prostującego związanego z obrotem wokół osi X
$K_{restoring}$	Moment prostujący związany z obrotem wokół osi X
$KG$	Odległość środka ciężkości od płaszczyzny podstawowej
$L$	Prawdopodobieństwo przypisywane elementom składowym scenariusza
$LC$	Stany załadowania
$M_{diff}$	Moment dyfrakcyjny związany z obrotem wokół osi Y
$M_{drif}$	Moment przechylający wynikający z dryfu statku
$M_{FK,L}$	Część liniowa momentu Froude-Krylov'a związanego z obrotem wokół osi Y
$M_{rad}$	Moment radiacyjny związany z obrotem wokół osi Y
$M_{restoring,L}$	Część liniowa momentu prostującego związanego z obrotem wokół osi Y
$M_{restoring}$	Moment prostujący związany z obrotem wokół osi Y
$M_{wave}$	Moment od fali
$M_{wind}$	Moment przechylający od wiatru
$N_S$	Ilość wszystkich symulacji
$N_W$	Moment od wiatru wokół osi Z
$N_{\phi_C}$	Ilość symulacji w których osiągnięto założony kąt
$N_{diff}$	Moment dyfrakcyjny związany z obrotem wokół osi Z
$N_{FK,L}$	Część liniowa momentu Froude-Krylov'a związanego z obrotem wokół osi Z
$N_{LOSA}$	Ilość ofiar wypadku
$N_{man}$	Moment związany z obrotem wokół osi Z
$N_{PASS}$	Ilość pasażerów na statku
$N_{rad}$	Moment radiacyjny związany z obrotem wokół osi Z
$P(C_{annual})$	Prawdopodobieństwo przewrócenia się statku
$P(N)$	Prawdopodobieństwo wystąpienia $N$ ofiar w wyniku wypadku
$p$	Ciśnienie
$P_{DSC}$	Prawdopodobieństwo utraty własności manewrowo-napędowych
$P_{fatalities caps,dsc}$	Prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku statecznościowego jako skutek stanu DSC oraz warunków hydrometeorologicznych
$q_v$	Ciśnienie wiatru



$Q_{H_s,annual}$	Prawdopodobieństwo wystąpienia danej znaczącej wysokości fali podczas sztormu
$Q_X(X)$	Prawdopodobieństwo przekroczenia zmiennej $X$
$R$	Ryzyko
$Roll_{max}$	Kąt kołysania bocznego
$S$	Scenariusz niepożądanego zdarzenia w analizowanym systemie
$S_A$	Funkcja gęstości widmowej prędkości wiatru
$S_x$	Spektrum kołysań bocznych
$T_{sr}$	Średnie zanurzenie statku
$TTC$	Czas do przewrócenia się statku
$TTE$	Czas potrzebny do ewakuacji
$TTR$	Czas osiągnięcia maksymalnego kąta kołysań bocznych
$TTRep$	Czas potrzebny na naprawę układu manewrowo-napędowego
$U$	Niepewność
$v_W$	Prędkość wiatru
$v_S$	Prędkość statku
$X$	Całkowita odpowiedź statku
$x$	Część liniowa odpowiedzi statku
$x_1$	Współrzędna $x$ pierwszego wierzchołka panelu
$x_2$	Współrzędna $x$ drugiego wierzchołka panelu
$x_3$	Współrzędna $x$ trzeciego wierzchołka panelu
$x_C$	Współrzędna $x$ środka panelu
$x_L$	Część nieliniowa odpowiedzi statku
$X_{diff}$	Siła dyfrakcyjna działająca na kierunku X
$X_{FK,L}$	Część liniowa siły Froude-Krylov'a działająca na kierunku X
$X_{FK,L}$	Siła Froude-Krylov'a działająca na kierunku X
$X_{propeller}$	Siła od śruby
$X_{resistance}$	Siła oporu kadłuba
$X_{rudder}$	Siła od steru działająca na kierunku X
$x_{wo}$	Wzdłużne położenie środka naporu wiatru względem środka ciężkości statku
$y_1$	Współrzędna $y$ pierwszego wierzchołka panelu
$y_2$	Współrzędna $y$ drugiego wierzchołka panelu
$y_3$	Współrzędna $y$ trzeciego wierzchołka panelu
$y_C$	Współrzędna $y$ środka panelu
$Y_W$	Siła od wiatru na kierunku Y
$Y_{diff}$	Siła dyfrakcyjna działająca na kierunku Y
$Y_{FK,L}$	Część liniowa siły Froude-Krylov'a działająca na kierunku Y
$Y_{FK,L}$	Siła Froude-Krylov'a działająca na kierunku Y
$Y_{rad}$	Siła radiacyjna działająca na kierunku Y
$Y_{rudder}$	Siła od steru działająca na kierunku Y
$z_1$	Współrzędna $z$ pierwszego wierzchołka panelu
$z_2$	Współrzędna $z$ drugiego wierzchołka panelu
$z_3$	Współrzędna $z$ trzeciego wierzchołka panelu
$z_C$	Współrzędna $z$ środka panelu

- $z_v$  Odległość od środka powierzchni nawiewu do środka bocznej powierzchni podwodnej
- $Z_{diff}$  Siła dyfrakcyjna działająca na kierunku Z
- $Z_{FK,L}$  Część liniowa siły Froude-Krylov'a działająca na kierunku Z
- $Z_{FK,L}$  Siła Froude-Krylov'a działająca na kierunku Z
- $Z_{rad}$  Siła radiacyjna działająca na kierunku Z
- $Z_{restoring,L}$  Część liniowa siły prostującej działająca na kierunku Z
- $Z_{restoring}$  Część liniowa siły prostującej działająca na kierunku Z
- $z_{wo}$  Pionowe położenie środka naporu wiatru

# Spis skrótów

## **ALARP**

As Low As Reasonably Practicable — Tak małe, że można je zaakceptować z praktycznego punktu widzenia.

## **BANs**

Bayesian Network Augmented Naive Bayes.

## **BN**

Sieć Bayes'a.

## **BRM**

Boolean Representation Method — Metoda Odwzorowania Boole'a.

## **CCA**

Cause-Consequence Analysis — Analiza Przyczynowo-Skutkowa.

## **CPT**

Tabela prawdopodobieństw warunkowych.

## **C-T-O**

Człowiek - Technika - Otoczenie.

## **CURR**

Cost per Unit Reduction in Risk — Koszt jednostkowej redukcji ryzyka.

## **DSC**

Dead Ship Condition – statek pozbawiony właściwości napędowo-manewrowych.

## **ET**

Event Tree — drzewa zdarzeń.

## **FMECA**

Failure Mode, Effects and Criticality Analysis — Krytyczna Analiza Rodzajów i Skutków Możliwych Defektów.

## **FN**

Fatality Number – Ilość ofiar.

## **FSA**

Formal Safety Assessment – Formalna Ocena Bezpieczeństwa.

## **FT**

Fault Tree - drzewa wypadku.

## **GBNs**

General Bayesian Networks.

**GBS**

Goal Based Standards – Standardy oparte o Cele.

**HAZOP**

Hazard and Operability analysis — Analiza Zagrożeń i Zdolności Operacyjnych.

**IMO**

Międzynarodowa Organizacja Morska.

**IS Code**

Kodeks Statecznościowy.

**MSC**

Maritime Safety Committee — Komitet Bezpieczeństwa Morskiego.

**NB**

Naive-Bayes.

**PHA**

Preliminary Hazard Analysis — Wstępna Analiza Zagrożeń.

**PLL**

Potential Loss of Life — Potencjalna Utrata Życia.

**RCO**

Risk Control Option – Opcje Kontroli Ryzyka.

**RCT**

Risk Contribution Tree — Drzewa Udziału w Ryzyku.

**SAFOP**

Safe Operations — Bezpieczne Operacje.

**SC**

Safety Case – Przypadki Bezpieczeństwa.

**SLF**

Stability, Load Lines and Fishing Vessels Safety — Stateczność, Linie ładunkowe oraz Statki rybackie.

**SOLAS**

Safety of Life at Sea — Bezpieczeństwo Życia na Morzu.

**TANs**

Tree Augmented Naive-Bayes.

# 1. Wprowadzenie

Jedną z najważniejszych cech statku jest pływerność, co wiąże się z jego zdolnością do unoszenia się na wodzie. Wynika ona wprost z prawa Archimedesesa[11]:

*Na ciało zanurzone w płynie działa pionowa, skierowana ku górze siła wyporu. Wartość siły jest równa ciężarowi wypartego płynu. Siła ta jest wypadkową wszystkich sił parcia płynu na ciało.*

Drugą bardzo ważną właściwością obiektów pływających jest stateczność, definiowana jako zdolność do przeciwstawiania się działaniu sił zewnętrznych przez statek, oraz jako zdolność do powrotu statku do pozycji wyjściowej po ustaniu obciążeń. Do podstawowych sił zewnętrznych można zaliczyć[33]:

- Siły generowane przez falowanie, wiatr, prądy morskie oraz oblodzenie,
- Oddziaływanie innych obiektów, tj: przemieszczający się pasażerowie, hol,
- Siły wynikające z ruchu statku (manewrowości), np. wynikające z cyrkulacji statku.

Te dwa zagadnienia nurtowały całe rzesze naukowców, od wspomnianego wcześniej Archimedesesa, poprzez Eulera oraz Bouguera, Reeda aż do współczesnych badaczy takich jak Rahola, Kobyliński i inni[35,78].

Mimo postępu w poznaniu tych dwóch ważnych cech statku, wciąż występują zatonięcia statków. Każdy wypadek prowadzi do kolejnych badań, które podnoszą poziom naszej wiedzy na temat stateczności. Przechodzenie od prostych wzorów mających opisać poziom bezpieczeństwa, do coraz bardziej złożonego opisu zjawiska, nie skutkuje wyeliminowaniem niebezpiecznych zdarzeń na morzu. Niezależnie od tego jak złożona będzie nasza wiedza na temat zjawisk to i tak zawsze możemy coś specjalnie lub przypadkowo opuścić, zaniechać, co może prowadzić do utraty stateczności i w konsekwencji do przewrócenia się statku. Poprzednia, obecna, ale także nowa generacja przepisów opisuje tylko fragment rzeczywistości i to tylko tej rzeczywistości, która da się opisać prostymi wzorami matematycznymi.

Początek rozwoju nauki o stateczności i rozwoju kryteriów nastąpił w XVII wieku. W miarę rozwoju wiedzy, poszczególni naukowcy próbowali rozwijać kryteria od najprostszych opartych tylko na metacentrum, poprzez takie, które brały pod uwagę nie tylko stateczność statyczną ale także dynamiczną. Pierwsze proponowane i nieoficjalne kryteria były oparte o stateczność statyczną. Część tych kryteriów nie brała pod uwagę żadnych cech statku, były one oparte jedynie o przyjętą na podstawie analizy statystycznej liczbę, jak w kryterium Denny'ego[78]. Pojawiały się także propozycje uwzględniające geometrie kadłuba, a pod wpływem pracy Moseley'a zaczęto także brać pod uwagę stateczność dynamiczną[113]. Większość kryteriów miała retroaktywny charakter, gdyż zmieniały się

one pod wpływem kolejnych wypadków. Zwieńczeniem prac nad normowaniem stateczności było przyjęcie Kodeksu Statecznościowego[52] (IS Code) przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) w 1993 roku. Kodeks Statecznościowy zawiera wymagania, których spełnienie pozwala przyjąć, że statek jest bezpieczny. Prawidła zawarte IS Code oparte są na krzywej ramion prostujących. Jednakże już na początku obecnego wieku wielu naukowców i projektantów zauważyło, że kodeks statecznościowy nie rozwiązuje wszystkich problemów. Nadal istnieją zagadnienia, których nie dało się objąć relatywnie prostymi formułami zawartymi w IS Code, np. sloshing[81]. Dyskusje nad poprawą kodeksu prowadzone na forum IMO doprowadziły do wyodrębnienia kilku najważniejszych scenariuszy wypadków statecznościowych[6][131]:

- zdarzenia związane ze zmianami ramienia prostującego – rezonans parametryczny oraz czysta strata stateczności,
- Dead Ship Condition — statek pozbawiony właściwości, napędowo-manewrowych (DSC),
- problemy związane z manewrowością na fali – broaching, surf-riding,
- problemy związane z nadmiernymi przyspieszeniami.

Mimo, iż zaproponowane przez IMO scenariusze nadal nie przewidują wszystkich możliwych przyczyn utraty stateczności, zaproponowane podejście, umożliwi w łatwiejszy sposób rozszerzenie przepisów o kolejne scenariusze. W nowych przepisach następuje odejście od podejścia pasywnego, retroaktywnego i zwrot w kierunku przepisów aktywnych, które nie powstają w wyniku badania wypadków statecznościowych, lecz wcześniejszej wnikliwej analizy zjawisk fizycznych związanych z zachowaniem statku na fali[78][82].

Oznacza to, iż przy tworzeniu kolejnej generacji przepisów należy opracować metody oceny bezpieczeństwa statku, gdzie będą brane pod uwagę nie tylko cechy fizyczne, ale także cechy eksploatacyjne statków.

Jedynymi współcześnie znanymi metodami, które biorą pod uwagę wspomniane powyżej elementy są metody oparte o analizę i ocenę ryzyka, jak metoda oparta o Przypadki Bezpieczeństwa, szeroko stosowana w przemyśle wydobywczym, czy Formalna Ocena Bezpieczeństwa, którą stosuje się w przemyśle okrętowym w procesie tworzenia nowych przepisów. Istnieje także metodologia Projektowania Opartego o Ryzyko[115]. Jest ona coraz szerzej stosowana w projektowaniu statków w obszarze statku uszkodzonego.

Metody oparte o ryzyko pozwalają brać pod uwagę każdy nawet najmniej prawdopodobny scenariusz wypadku, a także interakcje pomiędzy scenariuszami, czy pewnymi ich elementami. Coraz częściej stosowanym narzędziem w procesie oceny ryzyka są probabilistyczne modele przyczynowe (sieci Bayes'a (BN), drzewa wypadku (FT) oraz drzewa zdarzeń (ET)). Model oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku przedstawiony w tej pracy zostanie oparty właśnie o sieci Bayes'a. Pozwalają one w prosty sposób badać wpływy poszczególnych elementów na inne i to w dwóch kierunkach. W prosty sposób można dokonywać analiz przyczynowo-skutkowych, badać siłę wpływu jednych elementów na inne oraz podejmować decyzje w warunkach niepewności.

## 1.1. Stawiane hipotezy i problemy badawcze

Przyjęto następującą hipotezę będącą przedmiotem badań rozprawy:

*Możliwe jest zastosowanie analizy ryzyka do oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku.*

Problem badawczy realizowany podczas prowadzonych badań określono w formie pytań:

1. W jaki sposób określić strukturę modelu ryzyka wypadku statecznościowego oraz jak dokonać parametryzacji modelu?
2. Jak określić stopień wiarygodności modelu?
3. W jaki sposób dokonać oceny bezpieczeństwa statku z wykorzystaniem zaproponowanego modelu?

## 1.2. Cel pracy

Głównym celem pracy było stworzenie probabilistycznego modelu ryzyka wypadku statecznościowego statku, odpowiedniego do oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku w stanie nieuszkodzonym przy użyciu probabilistycznego modelu przyczynowego (sieci Bayes'a).

Z uwagi na nowatorstwo koncepcji oraz zastosowanych metod, prezentowany model ryzyka stanowi wkład w rozwój nauki o bezpieczeństwie statecznościowym statków.

Niniejsza praca może być zaczątkiem szerszej dyskusji na temat zastosowania ryzyka w ocenie bezpieczeństwa statecznościowego statków w stanie nieuszkodzonym.

## 1.3. Naukowe metody badawcze stosowane w pracy

Problem badawczy rozprawy doktorskiej dotyczy stworzenia metody oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku w stanie nieuszkodzonym w oparciu o analizę ryzyka.

Kompleksowa analiza postawionego problemu, wymaga zastosowania następujących metod badawczych:

- *Metody symulacyjnej* — symulacja komputerowa w oparciu o hydrodynamiczny model ruchu statku na fali,
- *Metody probabilistycznej*:
  - probabilistyczne modele przyczynowe do określania modelu ryzyka,
  - modele probabilistyczne do badania wpływu parametrów na wielkość ryzyka,
- *Heurystyki oraz metody analizy matematycznej* - do przeprowadzenia procesu walidacji modelu.

## 1.4. Struktura pracy

Praca składa się z sześciu rozdziałów, wstępu i podsumowania oraz trzech załączników.

Rozdział 1 jest wprowadzeniem do zagadnienia. Rozdział ten prezentuje stawianą hipotezę, cel pracy, a także metody naukowe stosowane w pracy. Właściwą pracę otwiera rozdział 2 przedstawiający zarys historii rozwoju przepisów statecznościowych od tych najprostszych deterministycznych, poprzez Kodeks Statecznościowy, aż do obecnych dyskusji nad drugą generacją przepisów. Przegląd ten ma pokazać umiejscowienie proponowanej metody. Rozdział 3 podsumowuje wiedzę o metodach oceny i analizy ryzyk.

Rozdział 4 zawiera informacje o jednym z podstawowych narzędzi, które współcześnie używa się w pracy nad ryzykiem, jakim są sieci Bayes'a. Rozdział ten zawiera również opis modelu ryzyka oraz strukturę sieci Bayes'a wypadku statecznościowego statku w stanie bezenergetycznym (Dead Ship Condition). Przedstawiono tu także metody walidacji modelu ryzyka. W rozdziale 5 przedstawiono zastosowanie modelu ryzyka do oceny bezpieczeństwa statku typu RoPax.

Rozdział 6 podsumowuje pracę i proponuje kierunki dalszych prac w temacie analizy ryzyka wypadku statecznościowego.

## 1.5. Podziękowania

Pragnę podziękować wszystkim, bez których niniejsza praca nie mogłaby powstać.

Przede wszystkim mojemu promotorowi Profesorowi Lechowi Kobylńskiemu, za wszelką pomoc jakiej mi udzielił w czasie dotychczasowej współpracy oraz za życzliwość okazaną w trakcie powstawania tej pracy.

Składam serdeczne podziękowania Panu Profesorowi Jerzemu Matusiakowi za cenne wskazówki, naukową inspirację, okazaną pomoc oraz za użyczenie oprogramowania do symulacji ruchu statku na fali, a także za umożliwienie mi studiowania na Politechnice Helsińskiej.

Pragnę podziękować doktorowi Jakubowi Mantewce z Uniwersytetu Aalto, za wielogodzinne, nocne rozmowy, za wszelką pomoc merytoryczną oraz krytyczne uwagi, a także za bycie przyjacielem.

Równie gorące słowa podziękowania kieruję pod adresem Profesora Pentiego Kujali, kierownika Laboratorium Okrętowego na Uniwersytecie Aalto za to, że zawsze byłem tam mile widziany, że mogłem się czuć jak członek tej wspaniałej społeczności naukowej.

W tym miejscu chciałbym także podziękować pozostałym pracownikom Laboratorium Okrętowego, w szczególności Satu Hanninen, Teemu Manderbacka, za wszystkie rozmowy, wszelką pomoc udzielaną mi podczas moich pobytów w Finlandii.

Serdeczne podziękowania kieruję także do moich recenzentów Profesora Jana Szantyrę i Tadeusza Szelangiewicza za ich krytyczne uwagi do mojego doktoratu, które pomogły mi w ulepszeniu tej pracy.

Gdyby nie grupa Przyjaciół, która zawsze mnie wspierała, ten doktorat pewnie nigdy by nie powstał. Dlatego w tym miejscu chciałbym podziękować Gosi i Jarkowi Tuross, Annie Montewce oraz ks. Andrzejowi Fincowi.



Chciałbym również serdecznie podziękować moim Rodzicom oraz Teściom za wsparcie, zarówno duchowe jak i materialne, które pozwoliło mi częściowo zapomnieć o problemach dnia codziennego.

Szczególne podziękowania składam mojej Żonie Sabinie za cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie w chwilach zwątpienia.

## 2. Sposoby normowania stateczności statku

### 2.1. Rozwój przepisów statecznościowych

W 1746 roku Bouguer wprowadził pojęcia: metacentrum i wysokość metacentryczna oraz zaproponował zastosowanie ich jako miar stateczności. Cały wiek osiemnasty to czas rozwoju nauki o stateczności, a Bernouilli, Euler, Attwod zapisali się jako osoby rozwijające podstawy teoretyczne nauki o stateczności.

W roku 1850 Moseley opublikował pracę, w której jako pierwszy przedstawił koncepcję dynamicznej stateczności statku [113].

W roku 1870 podczas sztormu na Zatoce Biskajskiej przebywały między innymi dwa statki „HMS Captain” oraz „HMS Monarch”. Rysunek 2.1 ukazuje wykres ramion prostujących dla tych dwóch statków[12]. „HMS Monarch” przetrwał sztorm, zaś „HMS Captain” już nie. Admirał Reed ostrzegął Brytyjską Admiralicję o niedostatecznej krzywej ramion prostujących okrętu „Captain”[118], jednak jego sugestie zignorowano.

Koniec dziewiętnastego wieku to początki tworzenia pierwszych kryteriów statecznościowych. Najstarszym kryterium opartym o właściwości fizyczne statku, jest kryterium zaproponowane przez Denny’ego w 1884 r.:

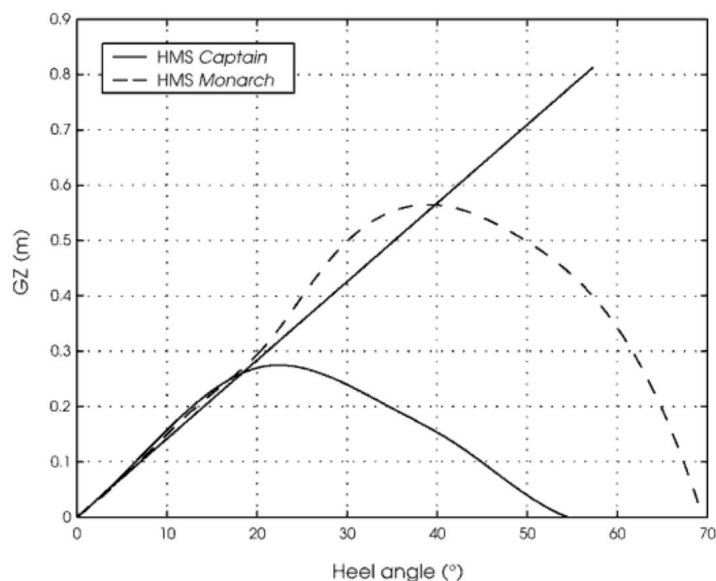
$$GM_0 = 0.244[m].$$

Kryterium to było szeroko stosowane przy projektowaniu statków handlowych, mimo tego, że nigdy nie było oficjalnie przyjęte. W grudniu 1894 podczas silnego sztormu zatono 6 niemieckich trawlerów, co spowodowało, że Niemiecki Związek Zawodowy Marynarzy (German Professional Mariners’ Association’) podjął badania nad krzywymi ramion prostujących piętnastu statków rybackich[78]. Na podstawie tych badań zaproponowano kolejne kryteria:

- ramiona prostujące powinny mieć wartości dodatnie przy kątach przechyłu co najmniej do  $60^\circ$ ,
- maksymalne ramię prostujące powinno być przy kącie co najmniej  $30^\circ$ .

Przed I Wojną Światową Benjamin zaproponował zastosowanie stateczności dynamicznej jako kryterium stateczności. Zasugerował, że dynamiczne ramię prostujące powinno przyjmować wartości:

- $0.05[mrad]$  przy kącie  $30^\circ$ ,
- $0.2[mrad]$  przy kącie  $60^\circ$ .



Rysunek 2.1. Krzywe Reed'a statków CAPTAIN i MONARCH[12]

Kryteria Benjamina nie przyjęły się w tamtym czasie, jakkolwiek obecne przepisy zawarte w Kodeksie Stateczności[65] niewiele odbiegają od tej propozycji[78]. Lata 20 ubiegłego wieku to czas intensywnych prac nad kryteriami stateczności, skutkujące między innymi opacowaniem przez Andersona w 1923 roku kryterium minimalnej wysokości metacentrycznej dla dużych statków pasażerskich:

$$GM_{0_{min}} = \frac{0.213A_W}{C_B A_B}, \quad (2.1)$$

gdzie:

- $A_W$  to powierzchnia nawiewu,
- $A_B$  to powierzchnia zwilżona,
- $C_B$  to współczynnik pełnotliwości.

Kryterium to można nazwać pierwszym kryterium pogodowym, gdyż w sposób niebezpośredni bierze pod uwagę moment przechylający od wiatru. Posdunin w tym samym czasie zaproponował kryterium opisane wzorem:

$$GM_{0_{min}} = 0.43B - k_1 H, \quad (2.2)$$

gdzie  $k_1$  to współczynnik z zakresu 0.5 — 0.72 określany na podstawie doświadczenia.

W latach 30 ubiegłego wieku Rahola [122] opracował podstawowe wymagania dotyczące stateczności na podstawie analizy wypadków statecznościowych. Kryteria te były szeroko stosowane w wielu krajach, aż do roku 1968 kiedy IMO wprowadziło międzynarodowe przepisy statecznościowe[48][49]<sup>1</sup>. Kryteria Rahola miały postać:

<sup>1</sup> Przepisy IMO wykorzystują podobne metody oceny stateczności, jak te zaproponowane przez Rahola.

- $GZ_{min} \geq 0.14m$  dla  $\varphi = 20^\circ$ ,
- $GZ_{min} \geq 0.20m$  dla  $\varphi = 30^\circ$ ,
- $\varphi_m \geq 35^\circ$ ,
- $\varphi_v \geq 60^\circ$ ,
- $\varphi_{fd} \geq 40^\circ$ ,
- $e_{35} = 0.08mrad$ .

gdzie:

- $GZ_{min}$  to minimalne ramię prostujące dla poszczególnych kątów przechyłu,
- $\varphi_m$  to kąt przy którym występuje maksymalne ramię prostujące,
- $e_{35}$  to pole pod krzywą ramion prostujących do kąta  $35^\circ$ .

Pierwszą oficjalną propozycję kryteriów przedstawił „American Marine Standardisation Committee” w roku 1926. Były one oparte o minimalną wysokość metacentryczną, szacowaną przy udziale momentu od wiatru, przemieszczających się pasażerów, a także brano pod uwagę moment przechylający generowany przez dwa zalane przedziały.

W 1947 ZSRR wprowadziło pierwsze przepisy statecznościowe. Oparte były one na momencie przechylającym wywołanym przez wiatr – tzw. „Kryterium pogody” oraz na momencie prostującym statku[78]. Prace nad tymi przepisami rozpoczęły się już w latach trzydziestych XX wieku. Do końca lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku podobne kryteria wprowadziło wiele krajów, między innymi Polska.

W latach 60 ubiegłego wieku Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) rozpoczęła prace nad międzynarodowymi kryteriami statecznościowymi. W roku 1960 podczas Konferencji SOLAS przyjęto Rekomendację nr 7, która zainicjowała prace nad przepisami statecznościowymi, co pociągnęło za sobą utworzenie podkomitetu IMO związanego ze statecznością, nazwanego STAB. Podkomitet ten zaczął właściwą pracę nad rozwojem międzynarodowych kryteriów statecznościowych. W roku 1964 Grupa Robocza ds. Stateczności przygotowała raport dotyczący kryteriów statecznościowych zawartych w przepisach poszczególnych państw. W raporcie [75] przedstawiono analizę przepisów statecznościowych 33 krajów. Pierwsza grupa zawierała sześć krajów, które nie posiadały żadnych wymagań dotyczących stateczności. Grupa druga zawierała kraje, które zaimplementowały przepisy zawarte w konwencji SOLAS. Krajów tych było szesnaście, przy czym pięć z nich zalecało stosowanie kryteriów opracowanych przez Rahl’ę. Ostatnia grupa zawierała siedem krajów, które miały własne przepisy dotyczące stateczności, wśród tych krajów była także Polska.

Pierwsze międzynarodowe przepisy statecznościowe zostały wprowadzone w roku 1968, jako rezolucja *A.167 (ES.IV)*[48] dla statków pasażerskich i towarowych mniejszych niż 100 m oraz rezolucja *A.168 (ES.IV)*[49] dla statków rybackich. Kolejną rezolucją dotyczącą stateczności była rezolucja *A.267 (VIII)*[50] z roku 1973, która wprowadziła zalecenia dotyczące dokładności obliczeń statecznościowych. Kodeks Stateczności w Stanie Nieuszkodzonym (IS Code) został wprowadzony jako rezolucja *A.749 (18)*[52] w roku 1993 oraz jako rezolucja *MSC.75 (69)* [53] w roku 1998. W ramach prac STAB

powstały także inne rezolucje dotyczące stateczności w stanie nieuszkodzonym, tj. Rezolucje A.469, A.373, MSC.36/63, A.414, A.649, A.534, A.491. Kryterium pogody zawarte jest w rezolucjach A.562 (14) [59] oraz A.685 (17)[51].

## 2.2. Współczesne przepisy statecznościowe

Obecnie przepisy statecznościowe zawarte są przede wszystkim w „Intact Stability Code” (IS Code) [65] zatwierdzonym przez IMO. Każda instytucja klasyfikacyjna posiada własne przepisy statecznościowe, które muszą być jednakże zgodne z IS Code.

### 2.2.1. Kodeks Statecznościowy — IS Code

Kodeks Statecznościowy IS Code 2008 (zaczął obowiązywać 1 lipca 2010 roku)[65] to połączenie dwóch rezolucji: A.167 (*ES.IV*)[48] oraz A.562 (14) [51]. Kodeks ten dzieli się na dwie części:

- Obowiązkową (część „A”) – część składowa Konwencji SOLAS oraz Międzynarodowej Konwencji o Liniach Ładunkowych,
- Nieobowiązkową (część „B”) – rekomendacje dla różnych typów statków.

Podstawowe wymagania statecznościowe dla statków towarowych i pasażerskich mają postać prostych reguł:

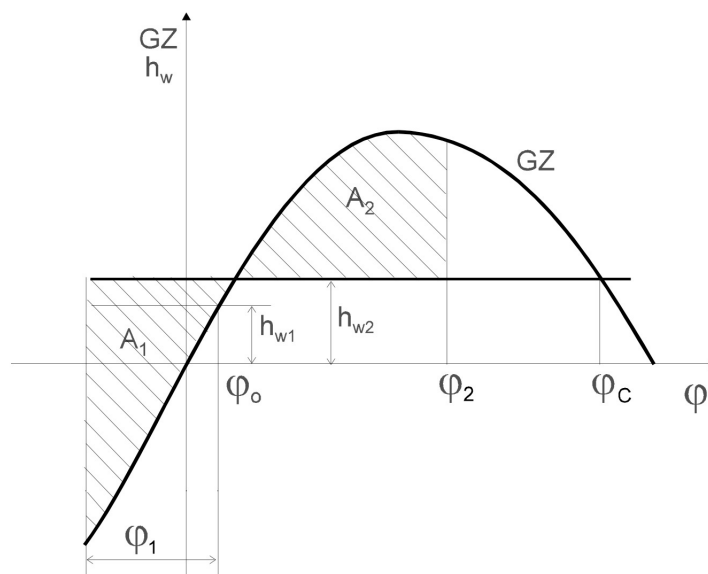
- Pole pod krzywą Reed’a dla kąta  $30^\circ$  nie może być mniejsze niż  $0.055$  [*mrad*].
- Dla kąta  $\varphi = 40^\circ$  pole pod krzywą nie może być mniejsze niż  $0.09$  [*mrad*].
- Dla kąta co najmniej  $30^\circ$  ramię prostujące powinno być nie mniejsze niż  $0.20$  [*m*].
- Maksymalne ramię prostujące powinno być co najmniej przy kącie  $20^\circ$ , jednakże zaleca się, aby wystąpiło ono przy kącie większym niż  $30^\circ$ .
- Początkowa wysokość metacentryczna powinna być nie mniejsza niż  $0.14$  [*m*].

Obecnie Kodeks Statecznościowy decyzją Komitetu Bezpieczeństwa Morskiego (MSC) Międzynarodowej Organizacji Morskiej z grudnia 2008 jest częścią Konwencji o Bezpieczeństwie Życia na Morzu (SOLAS 74).

### 2.2.2. Kryterium pogody w kodeksie statecznościowym

Kryterium pogody związane jest z możliwością przeciwdziałania falowaniu i oddziaływania wiatru, przy założeniu, że statek nie porusza się z prędkością postępową. Kryterium to jest częścią Kodeksu Statecznościowego, zaś od 1 lipca 2010 wraz z nim stało się obowiązkowe. Możliwość przeciwdziałania falowaniu i oddziaływania wiatru sprawdza się w następujących warunkach:

- na statek działa statycznie wiatr, który powoduje przechył statku do kąta  $\varphi_0$ , któremu odpowiada ramię momentu przechylającego  $h_{w1}$ ,
- następnie na statek oddziałuje fala, która przechyla statek o kąt  $\varphi_1$ ,
- na tak przechylony statek działa dynamiczny poryw wiatru, któremu odpowiada ramię momentu przechylającego  $h_{w2}$ .



Rysunek 2.2. Kryterium pogody w IS Code [76]

Te trzy warunki dla kryterium pogody pokazuje rysunek 2.2. Uznaje się, że statek spełnia kryterium pogody, jeżeli pole  $A_2$  jest większe od pola  $A_1$ .

Ramiona momentów przechylających mają stałe wartości niezależnie od kąta przechyłu statku i przyjmują następujące wartości:

$$h_{w1} = \frac{q_v A_w z_v}{1000 g \Delta}, \quad (2.3)$$

$$h_{w2} = 1.5 l_{w1}, \quad (2.4)$$

gdzie:

- $q_v$  to ciśnienie wiatru; dla konwencjonalnych statków przyjmuje się wartość 504 [Pa], zaś dla statków rybackich wartość ciśnienia zależy od położenia środka nawiewu,
- $A_w$  to powierzchnia nawiewu,
- $z_v$  to odległość od środka powierzchni nawiewu do środka bocznej powierzchni podwodnej.

Kąt  $\varphi_1$  oblicza się ze wzoru:

$$\varphi_1 = 109 k X_1 X_2 \sqrt{r s}, \quad (2.5)$$

gdzie:

- $X_1$  oraz  $X_2$  to współczynniki zależne od kształtu statku,
- $k$  to współczynnik dobierany ze względu na kształt kadłuba:
  - $k = 1.0$  to statki z obłem zaokrąglonym i płaską stępką, ale bez stępki antyprzechyłowej umieszczonej na oble,

- $k = 0.7$  to statki z ostrym obłem,
- dla pozostałych kształtów współczynnik  $k$  przyjmuje się z tabeli.
- $r$  wyznacza się ze wzoru 2.6:

$$r = 0.73 + 0.6 \frac{KG - T_{sr}}{T_{sr}}, \quad (2.6)$$

- $KG$  to odległość środka ciężkości od płaszczyzny podstawowej,
- $T_{sr}$  to średnie zanurzenie statku,
- $s$  to współczynnik dobierany tabelarycznie w zależności od okresu kołysań bocznych.

Parametr	Zakres stosowalności
stosunek $\frac{B}{T_{sr}}$	$< 3.5$
okres kołysań $T$	$< 20$ s
$\frac{OG}{T_{sr}}$	od $-0.3$ do $0.5$

Tabela 2.1. Zakres stosowalności kryterium pogody

Tabele i formuły wykorzystywane podczas sprawdzania kryterium pogody mają zastosowanie dla statków o parametrach mieszczących się w przyjętych zakresach[60], które zestawiono w Tabeli 2.1.

### Alternatywny sposób oceny kryterium pogody

Kiedy statek ma parametry odbiegające od zaprezentowanych w tabeli 2.1 to zgodnie z dokumentami MSC.1/Circ.1200[60] oraz MSC.1/Circ.1227[61] dopuszcza się stosowanie eksperymentu do wyznaczenia kąta kołysań bocznych  $\varphi_1$  oraz ramienia przechylającego od wiatru. Eksperyment można także zastosować dla wszystkich typów statków za zgodą Administracji Morskich[60].

### Eksperymentalne wyznaczenie kąta przechyłu

W metodach eksperymentalnych kąt  $\varphi_1$  można wyznaczyć przy użyciu poniższego wzoru:

$$\varphi_1 = 0.7\varphi_{lr}, \quad (2.7)$$

gdzie  $\varphi_{lr}$  to amplituda rezonansowych kołysań bocznych dla fali regularnej.

Kąt  $\varphi_{lr}$  wyznacza się eksperymentalnie przy zastosowaniu bardzo stromych fal bliskich załamaniu. Stromość fali w eksperymencie dobiera się w zależności od okresu własnego kołysań bocznych statku rzeczywistego.

### Eksperymentalne wyznaczenie ramienia przechylającego od wiatru

Eksperymentalne wyznaczenie ramienia przechylającego od wiatru składa się z 2 etapów:

- szacowanie momentu przechylającego od wiatru  $M_{wind}$ ,
- szacowanie momentu przechylającego wynikającego z dryfu  $M_{drif}$ .

Ramię przechylające  $l_{w1}$  wyznacza się zgodnie ze wzorem:

$$l_{w1}(\varphi) = \frac{M_{wind}(\varphi) + M_{drif}(\varphi)}{\Delta}. \quad (2.8)$$

W celu wyznaczenia momentu przechylającego wywołanego wiatrem, określa się poziomą siłę:

$$F_{wind}(\varphi) = \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 A_W C_D(\varphi), \quad (2.9)$$

gdzie  $\rho_{air}$  to gęstość powietrza,  $U$  to prędkość wiatru,  $A_W$  to powierzchnia nawiewu,  $C_D$  to współczynnik aerodynamiczny.

### Propozycje zmiany kryterium pogody

W 2002 roku podczas 45 sesji SLF [57] delegacja włoska zaproponowała modyfikacje kryterium pogody w odniesieniu do dużych statków pasażerskich.

Pierwsza zaproponowana modyfikacja polegała na zmianie w sposobie obliczania parametru  $r$ . Jeżeli wartość współczynnika  $r$  obliczonego ze wzoru 2.6 będzie większa niż 1 to przyjmuje się, że  $r = 1$ .

Drugą modyfikacją jest ograniczenie wartości współczynnika  $s$ , odpowiedzialnego za stromość fali. Dokument SLF 45/6/5 [57] przedstawia w sposób graficzny zakres wartości tego współczynnika.

Natomiast delegacja Niemiec w dokumencie SLF 45/6/3 [55] przedstawiła swoje uwagi co do kierunków modyfikacji i słabych stron obecnie obowiązującego kryterium pogody. Przedstawiciele rządu RFN wskazali następujące słabe punkty[55]:

- niezależność momentu przechylającego od wiatru w stosunku do kąta przechyłu,
- brak uwzględnienia okresu kołysań bocznych.

W następnym roku, podczas 46 sesji podkomitetu[58] delegacja niemiecka odniosła się do propozycji włoskiej w kontekście zmiany sposobu liczenia współczynników  $r$  i  $s$ . Dokument ten zawiera kilka uwag odnośnie tych modyfikacji:

- małe zmiany w sposobie obliczenia współczynników  $r$  i  $s$  zaproponowane przez delegację włoską mają wpływ na współczesne statki, ale mogą być nieadekwatne dla statków w przyszłości,
- małe zmiany kształtu kadłuba lub zmiany pozycji pływania (np. trym) powodują duże zmiany w wynikach poszczególnych obliczeń dla kryterium pogody. Ta uwaga wynika z dokumentu SLF 45/6/4 [56],
- dla dużych statków (np. kontenerowców) nie można wyznaczyć zakresu wysokości środka ciężkości  $KG$  w odniesieniu do kryterium pogody.



### 2.3. Propozycje przedstawione przez IMO odnośnie opracowania kryteriów nowej generacji

Obecnie istniejące przepisy statecznościowe zawarte w Kodeksie Statecznościowym oparte są przede wszystkim na danych statystycznych. Dopuszczalne limity (wartości) narzucane są poprzez analizę przypadków kiedy statki zatoneły lub nie. Przepisy te mają charakter retroaktywny, gdyż są odpowiedzią na wypadki.

Na 47 posiedzeniu podkomitetu SLF (Stability and Load Lines and on Fishing Vessels' Safety) delegacje wielu krajów zaproponowały stworzenie nowej generacji przepisów, które mają opierać się na bardziej fizycznym opisie poszczególnych scenariuszy (będą to kryteria oparte o osiągi). Jednakże nowa generacja przepisów ciągle ma charakter preskrypcyjny[77], mimo tego, że planuje się aby przepisy te były zgodne z koncepcją Standardów Opartych o Cele (Goal Based Standards)[17].

Aby móc przedstawić nowe podejście do stateczności, należy zdefiniować pojęcie defektu stateczności[64]:

**Definicja 2.1.** defekt stateczności to stan statku, w którym pozostaje on niezdolny do spełnienia limitów projektowych w odniesieniu do kołysań i przyspieszeń.

Defekt stateczności w stanie nieuszkodzonym dzieli się na dwie kategorie[64]:

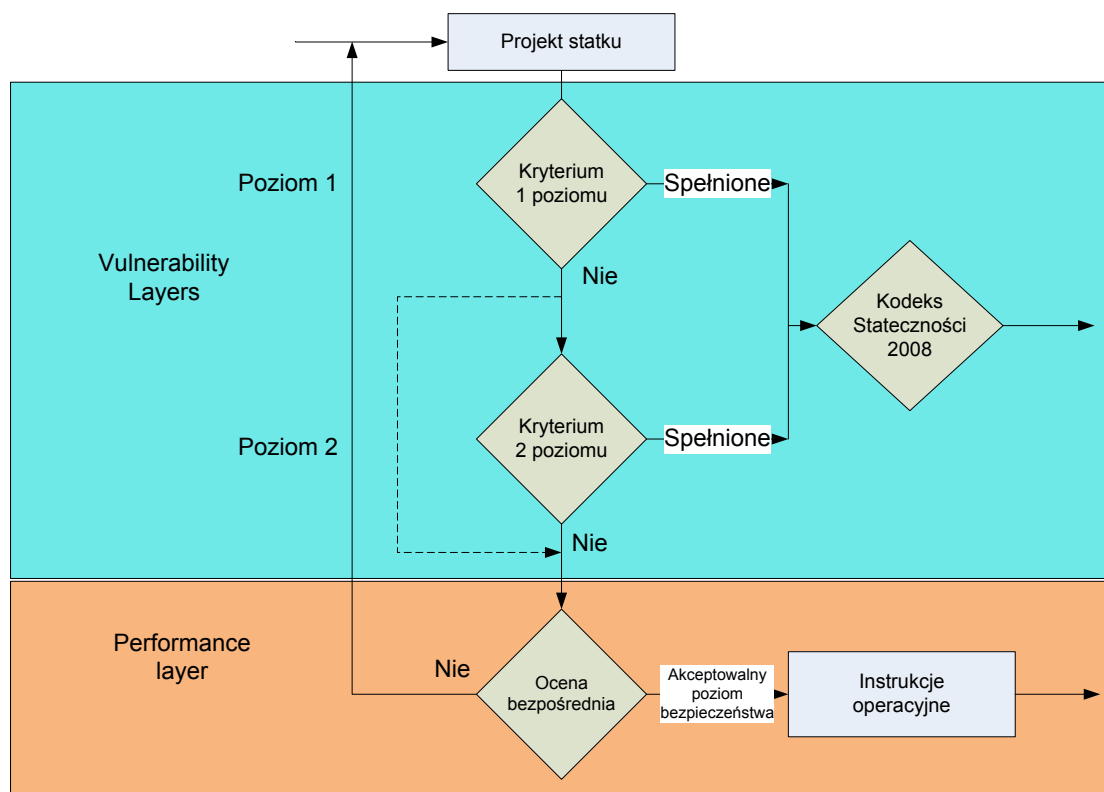
- częściowy defekt stateczności — częściowa utrata zdolności operacyjnych statku, dodatkowo związana z potencjalnymi niebezpieczeństwami dla ludzi, a także dla ładunku i wyposażenia,
- całkowity defekt stateczności — całkowita utrata statku dodatkowo związana z utratą życia.

Podczas pięćdziesiątej sesji podkomitetu SLF, IMO rozpoczęto proces określania kształtu nowych przepisów statecznościowych. Delegacje Japonii, Holandii, Stanów Zjednoczonych[64] oraz Włoch[63] przedstawiły swoje koncepcje dotyczące zmiany przepisów statecznościowych. Jako najważniejsze scenariusze wypadku statecznościowego wybrano[6]:

- zdarzenia związane ze zmianami ramienia prostującego – rezonans parametryczny oraz czysta strata stateczności,
- Dead Ship Condition — statek pozbawiony właściwości napędowo-manewrowych,
- problemy związane z manewrowością na fali – broaching.

Podczas prac podkomitetu SLF przedstawiono 4 definicje kryteriów, które w różny sposób podchodzą do oceny defektu stateczności:

1. probabilistyczne metody oparte o osiągi – „probabilistic performance-based” — kryterium to opiera się na fizycznym modelu defektu stateczności przy uwzględnieniu losowości tego zdarzenia,
2. deterministyczne metody oparte o osiągi – „deterministic performance-based” — kryterium to jest podobne do poprzedniego, z wyjątkiem tego, że zakłada się, iż to zdarzenie nie ma natury losowej, a tylko zdeterminowaną,



Rysunek 2.3. Proces oceny w nowej generacji kryteriów stateczności[6]

3. probabilistyczne kryteria parametryczne – „probabilistic parametric criterion” — kryterium to opiera się na mierzeniu wielkości związanej ze zjawiskiem, ale nie zawiera modelu fizyki zjawiska, wykorzystuje jedną lub więcej wartości stochastycznych,
4. deterministyczne kryteria parametryczne – „deterministic parametric criterion” — kryterium to również nie zawiera w sobie modelu fizycznego, a tylko bazuje na jednej lub więcej deterministycznych wartościach, które biorą udział w mierzeniu wielkości związanej ze zjawiskiem. To kryterium stosowane jest w obecnych przepisach.

Opracowanie nowej generacji przepisów statecznościowych będzie procesem wieloetapowym, powiązanim z dwoma typami kryteriów (dodatkowo wykorzystuje się IS Code):

- Kryteria oparte o osiągi – „performance based criteria” — mogą opierać się na badaniach modelowych lub symulacjach numerycznych, mogą one mieć charakter probabilistyczny lub deterministyczny.
- Kryteria podatnościowe – „vulnerability criteria” — związane są z podatnością statku na wystąpienie defektu stateczności dla danego scenariusza. Kryterium to może dzielić się na dwa lub więcej poziomów:
  - poziom 1 opiera się na prostym kryterium związanym z geometrią statku,
  - poziom 2 opiera się na prostym modelu fizyki zjawiska.

Rysunek 2.3 prezentuje schemat nowych przepisów statecznościowych. Dwa poziomy kryteriów podatnościowych oraz kryteria oparte o osiągi są różne dla różnych scenariuszy wypadku statecznościowego statku. W podrozdziale 2.4 zostaną szerzej przedstawione nowe kryteria dla scenariusza „Dead Ship Condition”. Scenariusz zakłada, iż statek pozbawiony jest właściwości napędowo –manewrowych bez prędkości postępowej, czyli nowego ujęcia kryterium pogody. Kryteria dla dwóch pozostałych scenariuszy można znaleźć w następujących dokumentach: [6][132][8][17].

## 2.4. Nowe przepisy dla kryterium pogody — scenariusz „Dead Ship Condition”

Na początku obecnego wieku na forum IMO rozpoczęła się dyskusja nad poprawą obecnego kryterium pogody. Jednym z głównych powodów rozpoczęcia prac nad zmianami było to, że kryterium pogody opierało się na systematycznych badaniach statków, które miały mniejsze wymiary główne. Także część nadwodna badanych statków była dużo mniejsza, niż mają obecne statki. Powstały nowe typy statków szczególnie popularne obecnie statki do przewozu kontenerów oraz statki typu RoPax.

IMO w nowej generacji przepisów statecznościowych jako jeden z głównych powodów wypadków statecznościowych podaje „Dead Ship Condition” — statek pozbawiony zdolności napędowych. Przypadek ten jest rozwinięciem dawnego kryterium pogody.

Aby móc powiedzieć szerzej o kryteriach związanych z tym przypadkiem na początku należy zdefiniować co rozumiane jest przez Dead Ship Condition. W dokumentach IMO oraz dokumentach towarzystw klasyfikacyjnych jest on zdefiniowany jako: **Stan bezengetyczny**, czyli stan, w którym urządzenia napędu głównego, kotły i mechanizmy pomocnicze nie pracują z powodu braku energii elektrycznej.[68]

Definicja ta jednak nie zawiera przypadków nie związanych z utratą zdolności energetycznych, takich jak problemy mechaniczne z układem napędowym i/lub sterowniczym. W nowych przepisach dotyczących DSC przyjmuje się, że taki statek nie ma prędkości postępowej, oraz dryfuje swobodnie pod wpływem działania wiatru i fal.

Podczas 45 i 46 sesji podkomitetu SLF delegacje Włoch i Japonia zgłosiły swoje propozycje dotyczące kryteriów drugiego poziomu. Zostały one przedstawione w załączniku A.

## 2.5. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale tym przedstawiono rys historyczny przepisów, stan obecny oraz kierunki rozwoju przepisów.

Obecnie obowiązujące przepisy oparte są o jedną charakterystykę statku jaką jest krzywa ramion prostujących. Natomiast współczesne kryteria opierają się o ocenę wybranych parametrów tej krzywej, takich jak:

- początkowa wysokość metacentryczna,
- położenie maksimum krzywej ramion prostujących,

- zakres krzywej ramion prostujących,
- pole pod krzywą ramion prostujących.

Kryterium pogody jest bardziej rozbudowane, gdyż bierze się pod uwagę momenty od fali i wiatru, ale wciąż opiera się ono o krzywą ramion prostujących.

Druga generacja przepisów opiera się na modelowaniu fizyki statku. Bierze pod uwagę właściwości morskie statku. Podejście takie umożliwia szerszą analizę zachowania się statku w wielu scenariuszach. Zastosowanie numerycznych modeli do oceny stateczności statku wpisuje się w światowy trend badań nad bezpieczeństwem żeglugi.

Druga generacja przepisów wciąż nie pokrywa całego zakresu wypadków statecznościowych. Międzynarodowa Organizacja Morska wybrała tylko kilka scenariuszy, które nie wyczerpują wszystkich przypadków. Kryteria podatnościowe mają bardziej złożony charakter od współczesnych kryteriów, jednakże nadal są to w miarę proste kryteria. Prostota szczególnie charakteryzuje kryterium podatności pierwszego poziomu. Przepisy drugiej generacji nic nie mówią o poziomie bezpieczeństwa. Z tego wynika potrzeba dalszych prac nad normowaniem stateczności. Nowa generacja przepisów powinna uwzględniać poziom bezpieczeństwa. Standardy oparte o Cel (GBS) są dobrym punktem wyjścia dla dalszych prac. W długiej perspektywie GBS mają się opierać o ocenę bezpieczeństwa. Ocenę bezpieczeństwa można oprzeć o analizę i ocenę ryzyka.

### 3. Alternatywne metody oceny bezpieczeństwa statku w oparciu o ocenę ryzyka

Dynamiczny rozwój technologii morskich w zakresie konstrukcji, eksploatacji statku oraz pozyskiwania i wymiany informacji pomiędzy statkami oraz ośrodkami lądowymi umożliwia realizowanie zadań eksploatacyjnych w transporcie morskim w wymiarze dotychczas niedostępnym. W połączeniu z wzrastającym zainteresowaniem rynkiem usług turystycznych powoduje to eksplorację nowych obszarów związanych z transportowaniem pasażerów na ogromną skalę. A co za tym idzie wzrost zarówno intensywności ruchu morskiego, jak i wzrost wymiarów jednostek do przewozu ładunków oraz pasażerów. Morskie systemy transportowe charakteryzuje złożoność, występowanie silnych interakcji na linii człowiek – technika – otoczenie (C-T-O), relatywnie wysokie w porównaniu z innymi systemami inżynierskimi[102][69][130][137][126][114][25] prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego – wypadku - oraz szeroki wachlarz potencjalnych konsekwencji wynikających z tego wypadku, skutkujących poważnymi stratami w środowisku morskim lub w społeczeństwie.

Aktualnie na świecie do oceny poziomu bezpieczeństwa w systemach inżynierskich wykorzystywana jest analiza ryzyka.

W świecie szeroko pojętej oceanotechniki, coraz częściej stosuje się różnego rodzaju metody opierające się na ocenie ryzyka. Metody takie są spotykane w ocenie bezpieczeństwa nawigacyjnego (kolizje[104][106][112][110][119], osiadanie na mieliźnie[119][111], projektowanie „autostrad morskich” [123][142]), w stateczności w stanie uszkodzonym[37][16], a także morskim przemyśle wydobywczym[136]. IMO również zaleca wykorzystanie Formalnej Oceny Bezpieczeństwa w procesie tworzenia nowych przepisów[54].

Jako dobry punkt startowy do dyskusji o użyciu ryzyka w ocenie bezpieczeństwa statecznościowego (a także w okrętownictwie czy żegludze morskiej w ogóle[108]), można przyjąć następujące podejście przedstawione w pracach Montewki[104] oraz Aven. Ryzyko przedstawione jest tam jako zestaw następujących elementów:

$$R = \{(S_i, L_i, C_i, U_i) | BK\}, \quad (3.1)$$

gdzie  $S$  to scenariusz niepożądanego zdarzenia w analizowanym systemie,  $L$  jest prawdopodobieństwem przypisywanym elementom składowym scenariusza,  $C$  to konsekwencje, opisujące jaki jest wyniki scenariusza, jeżeli on wystąpi, niepewności we wzorze przedstawiane są jako  $U$ , zaś  $BK$  to wiedza, w oparciu o którą tworzony jest

model ryzyka danego systemu. Z powyżej przedstawionej definicji można wyciągnąć wniosek, że niezmiernie trudno jest zaprezentować dokładny zestaw tych czterech elementów. Wynika to z naszej niepełnej wiedzy na temat systemu i jego działania[5]. Trudno jest uchwycić tą definicję w sposób ściśle matematyczny[107], gdyż ryzyko w niej nie jest ani liczbą, ani krzywą, a także nie jest wektorem liczb. Można wyróżnić trzy rodzaje analizy ryzyka[46]:

- Analizę jakościową — metoda ta stosowana jest wtedy kiedy częstotliwość i pewność mają charakter jakościowy.
- Analizę quasi-ilościową — metoda ta stosowana jest wtedy, kiedy częstotliwość można przybliżyć ilościowo w jakichś zakresach.
- Analizę ilościową — metoda ta stosowana jest wtedy kiedy częstotliwość i niepewność można określić w sposób liczbowy.

Wybór odpowiedniego rodzaju analizy ryzyka zależy od złożoności problemu, a także od poziomu dokładności w estymacji ryzyka.

Ogólnie, analiza ryzyka składa się z kilku etapów[46] (rysunek 3.1):

1. identyfikacja ryzyka,
2. ocena ryzyka wraz z jego rankingiem,
3. identyfikacja obszarów, w których można zmniejszyć ryzyko i podjąć stosowne działanie,
4. przegląd oceny ryzyka.

Na każdym z czterech pierwszych kroków można dodatkowo identyfikować obszary redukcji ryzyka.

W szeroko pojętej oceanotechnice (statki oraz platformy wydobywcze) istnieją dwie główne metodyki związane z ryzykiem:

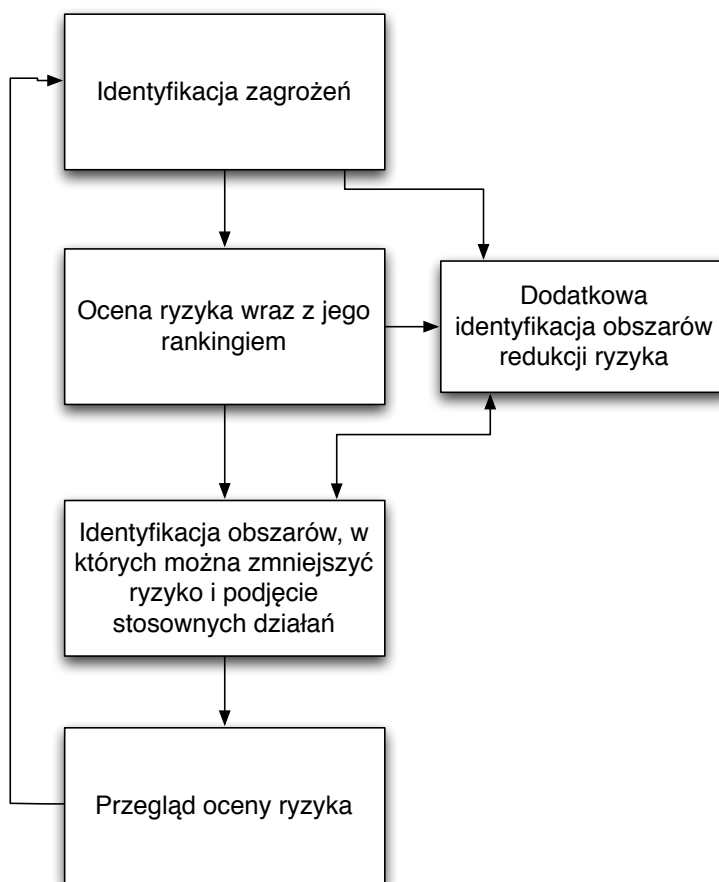
- Przypadki Bezpieczeństwa (Safety Case — SC).
- Formalna Ocena Bezpieczeństwa (Formal Safety Assessment — FSA).

Przy czym SC stosowane są częściej w morskim przemyśle wydobywczym, zaś FSA w przemyśle okrętowym.

### 3.1. Safety case

Pojęcie „Safety Case” (SC) wywodzi się z inżynierii systemów. Koncepcja ta opiera się na sposobach zarządzania bezpieczeństwem systemów lub urządzeń, o których wiemy niewiele[86]. Aby móc coś powiedzieć o bezpieczeństwie nowego systemu, Kuo[86] proponuje zadać pięć pytań, które całościowo określą system w kontekście bezpieczeństwa:

1. Jaka część systemu może nie zadziałać dobrze?
2. Jakie jest prawdopodobieństwo, że coś może nie zadziałać dobrze i jakie będą tego skutki?
3. Jak można zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń oraz ich skutków?



Rysunek 3.1. Schemat oceny ryzyka (na podstawie [46])

4. Jak będzie wyglądała reakcja, jeżeli jednak wypadek nastąpi?
5. Jak należy zarządzać systemem, aby zapewnić jego bezpieczeństwo?

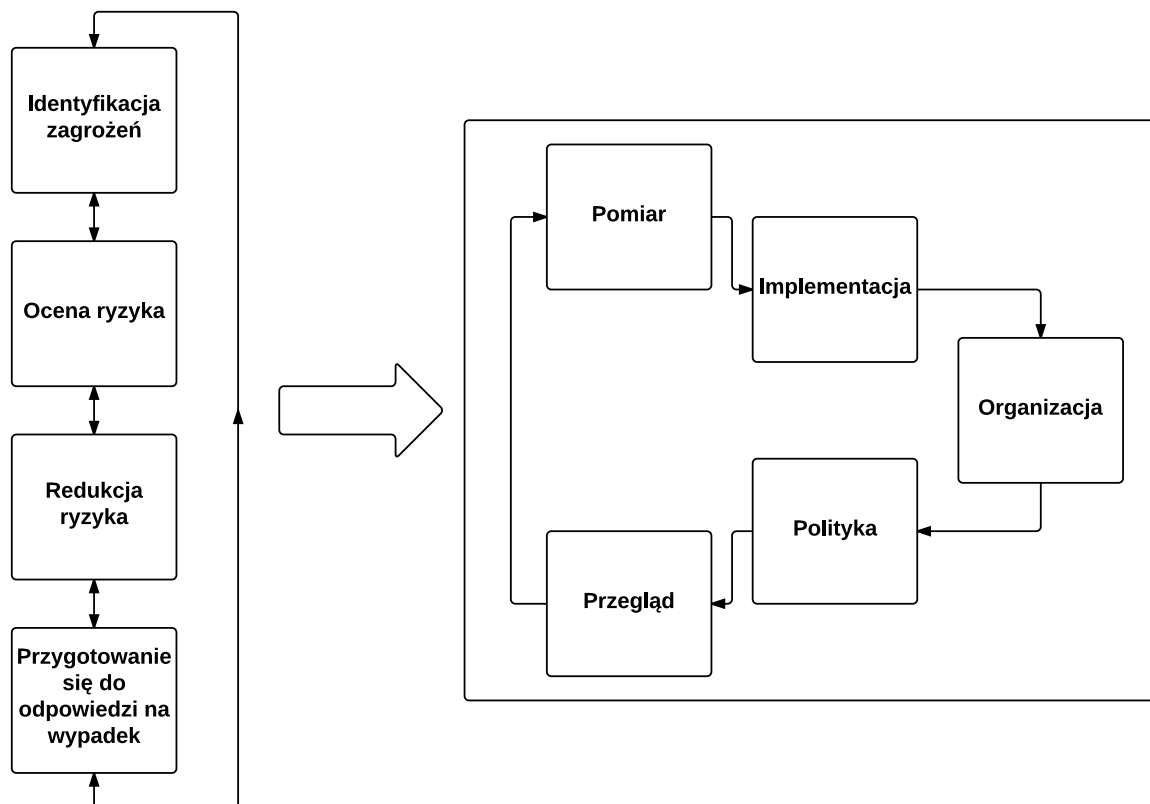
Odpowiedzi na te pięć pytań dają nam pewien obraz bezpieczeństwa systemu. Z każdym z tych pytań wiąże się określone zadanie do wykonania, które da odpowiedź na wyżej postawione pytania[86]:

1. Systematyczna identyfikacja zagrożeń – identyfikacja zagrożeń.
2. Ocena poziomu ryzyka dla każdego zagrożenia – ocena ryzyka.
3. Redukcja poziomu ryzyka wybranych zagrożeń – redukcja ryzyka.
4. Przygotowanie się do odpowiedzi na wypadek — plan bezpieczeństwa.
5. Zarządzania i kontrola poziomu ryzyka – system zarządzania bezpieczeństwem.

Rysunek 3.2 przedstawia w sposób graficzny powiązania pomiędzy elementami „Safety Case”. Wynika z niego, że System Zarządzania Bezpieczeństwem to najważniejszy element całej koncepcji. Składa się on z 5 komponentów[86]:

- pomiar,
- implementacja,

- organizacja,
- polityka,
- przegląd – przegląd przeprowadzonych działań i wprowadzenie stosownych poprawek.



Rysunek 3.2. Schemat powiązań elementów w Safety Case[138]

Pozostałe cztery elementy składowe koncepcji „Safety Case”[138]:

- identyfikacja zagrożeń,
- ocena ryzyka,
- redukcja ryzyka,
- plan bezpieczeństwa – przygotowanie się do odpowiedzi na wypadek.

### 3.2. Formalna Ocena Bezpieczeństwa — FSA

Metodyka Formalnej Oceny Bezpieczeństwa została przedstawiona przez Brytyjską Agencję Morską i Straż Wybrzeża, jako odpowiedź na raport ze śledztwa po katastrofie *m/s Herald of Free Enterprise*. Formalna Ocena Bezpieczeństwa jest nowym podejściem do bezpieczeństwa morskiego, biorącym pod uwagę ocenę ryzyka wraz z oceną kosztów i zysków jako narzędzia w procesie podejmowania decyzji.



W literaturze można znaleźć próby zastosowania Formalnej Oceny Bezpieczeństwa w ocenie bezpieczeństwa statecznościowego. Jednym z przykładów jest analiza ryzyka przesunięcia się ładunku na wzburzonym morzu[34].

Metodyka FSA składa się z pięciu kroków (rysunek 3.3) :

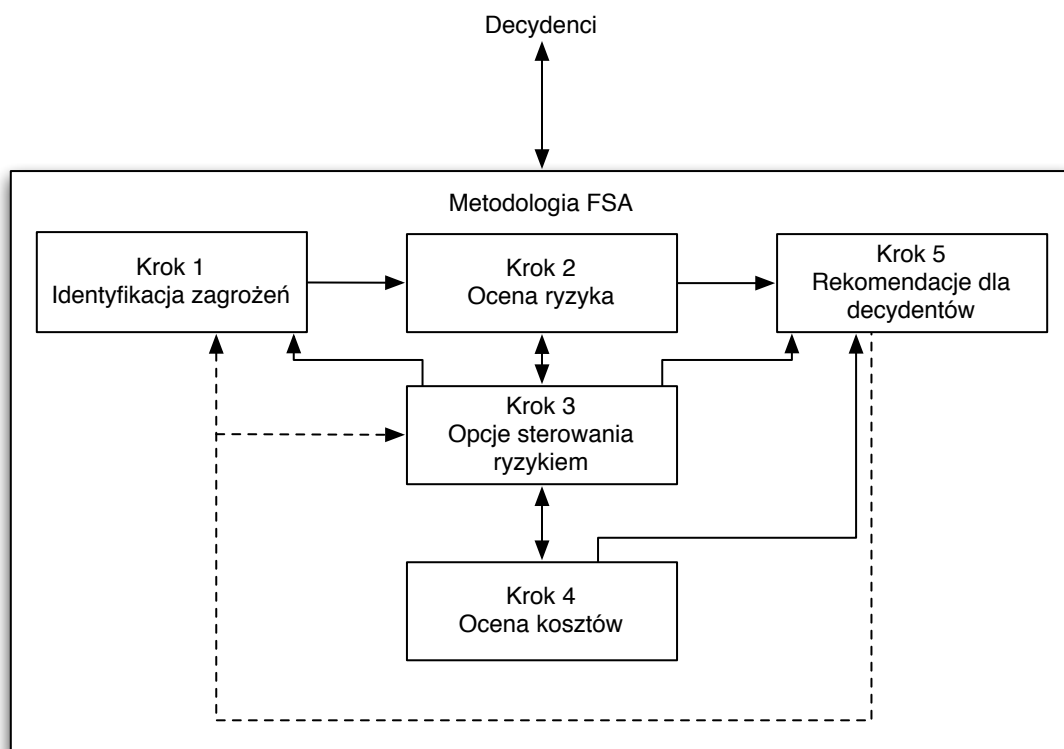
1. identyfikacja zagrożeń,
2. ocena ryzyka,
3. opcje sterowania ryzykiem,
4. oszacowanie kosztów,
5. rekomendacje dla decydentów.

Każdy z kroków można rozbić na poszczególne etapy [140]:

1. identyfikacja zagrożeń:
  - identyfikacja zagrożeń,
  - identyfikacja konsekwencji,
  - ranking zagrożeń.
2. ocena ryzyka:
  - struktura drzew udziału w ryzyku,
  - drzewo udziału ryzyka,
  - krzywa ilości ofiar (FN),
  - dystrybucja drzew udziału ryzyka,
  - przegląd kontroli ryzyka,
  - struktura współczynników wpływu,
  - ilościowe współczynniki wpływu.
3. Opcje sterowania ryzykiem:
  - wybór scenariuszy o najwyższym ryzyku,
  - opcje kontroli ryzyka.
4. Oszacowanie kosztów i korzyści:
  - ocena kosztów,
  - porównanie kosztów i zysków oraz ocena ich wrażliwości.
5. Rekomendacje dla decydentów:
  - ocena opcji kontroli ryzyka,
  - przegląd zainteresowanych stron i ich wymagań,
  - uzgodnienia pomiędzy zainteresowanymi stronami,
  - określenie rozbieżności,
  - wybór opcji kontroli ryzyka,
  - ponowny przegląd systemu.

### 3.2.1. Krok 1 – Identyfikacja zagrożeń

Głównym celem tego kroku jest zidentyfikowanie i ocena zagrożeń jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji statku. Zagrożenia te mogą wiązać się z utratą zdrowia i życia załogi oraz pasażerów, a także z zanieczyszczeniem środowiska, czy utratą statku i ładunku [83].



Rysunek 3.3. Schemat metody FSA (na podstawie [140])

Aby móc rozpocząć proces identyfikacji zagrożeń, należy zdefiniować problem, który będzie oceniany za pomocą Formalnej Oceny Bezpieczeństwa. W zależności od tego, czy oceniany będzie pojedynczy konkretny statek, czy też grupa statków jednego typu, w ramach definicji problemu należy opisać [83]:

- typ statku,
- funkcje realizowane przez statek,
- systemy wchodzące w skład statku,
- części składowe operacji statku,
- przepisy mające wpływ na statek i jego operacje,
- obszar żeglugi,
- stosowane miary ryzyka,
- typy i definicje kryteriów akceptacji ryzyka.

Kolejnymi dwoma czynnościami są: właściwa identyfikacja zagrożeń (defektów) oraz identyfikacja konsekwencji. Ich celem jest stworzenie listy możliwych zagrożeń, jakie mogą zdarzyć się na statku podczas jego żeglugi w ramach zdefiniowanego wcześniej problemu. Następnie wykonuje się identyfikację możliwych konsekwencji wynikających z defektów jakie mogą zaistnieć. Te dwa podkroki najczęściej wykonuje się w grupie ekspertów za pomocą techniki „burzy mózgów”. W procesie identyfikacji zagrożeń wykorzystuje się wiele metod. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć [140], [83], [136]:

- PHA – Preliminary Hazard Analysis — Wstępna Analiza Zagrożeń,
- CCA – Cause-Consequence Analysis — Analiza Przyczynowo-Skutkowa,
- FMECA – Failure Mode, Effects and Criticality Analysis — Krytyczna Analiza Rodzajów i Skutków Możliwych Defektów,
- HAZOP – Hazard and Operability analysis — Analiza Zagrożeń i Zdolności Operacyjnych,
- BRM – Boolean Representation Method — Metoda Odwzorowania Boole’a,
- SAFOP – Safe Operations — Bezpieczne Operacje.

Ostatnią czynnością wykonywaną w ramach identyfikacji zagrożeń jest wykonanie rankingu. Ranking zagrożeń można wykonać kilkoma metodami, na przykład:

- macierzy ryzyka,
- skumulowanych strat.

### 3.2.2. Krok 2 – Ocena ryzyka

W tym momencie na podstawie danych uzyskanych wcześniej (krok nr 1) wykonuje się identyfikację ryzyka. Przebiega ona w kilku etapach:

#### 1. Struktura Drzew Udziału w Ryzyku (RCT).

Drzewa udziału w ryzyku zbudowane są z dwóch części. Część poniżej wypadku jest graficznym przedstawieniem podkategorii defektu oraz czynników mających wpływ na sam wypadek. Ta część nazywana jest Drzewem Uszkodzeń. Druga część RCT,

która znajduje się ponad wypadkiem, przedstawia graficznie przebieg wypadku w stronę ostatecznych konsekwencji. Ta część nazywana jest Drzewem Zdarzeń. Są one budowane na podstawie danych uzyskanych podczas realizacji pierwszego kroku. Ten etap jest częścią analizy ryzyka w ujęciu jakościowym.

## 2. Diagramy wpływu.

Diagramy wpływu służą do identyfikacji czynników mających wpływ na powstanie wypadku oraz mających wpływ na prawdopodobieństwo takiego wypadku. Przy konstruowaniu diagramu wpływu bierze się pod uwagę trzy typy czynników[140]:

- defekty sprzętu,
- zranienia i śmierć ludzi,
- zdarzenia zewnętrzne.

Dodatkowo każdy z diagramów opiera się o projekt, aspekty operacyjne, a także zawiera wyjścia z sytuacji zagrożenia[140].

## 3. Drzewa wpływu na ryzyko w ujęciu ilościowym oraz krzywa FN.

W tej części na podstawie danych historycznych, baz danych, danych niezawodnościowych, a także opinii ekspertów próbuje się zbudować drzewa wpływu na ryzyko w ujęciu ilościowym, czyli wykorzystującym prawdopodobieństwa wystąpienia danych zdarzeń i konsekwencji. Wynikiem tego etapu jest stworzenie krzywej FN (częstotliwość-defekt). Uzyskuje się także krzywą PLL (potencjalna utrata życia) [140][83].

### 3.2.3. Krok 3 – Opcje kontroli ryzyka

Następny krok związany jest z obszarami, na które należy zwracać uwagę ze względu na duże ryzyko lub inne ważne czynniki [83]. Krok ten nazywany jest też zarządzaniem ryzykiem, gdyż ma wpływ na zarządzanie ryzykiem w systemie. Opcje kontroli ryzyka nie odnoszą się tylko i wyłącznie do ryzyka historycznego, wynikającego ze statystyk, ale także ryzyka przyszłościowego, wynikającego z nowych projektów, nowych technik wytwarzania i nowych zasad operacyjnych.

Krok ten dzielony jest na 2 etapy:

#### Wybór scenariuszy o najwyższym ryzyku

Kristansen w swojej książce [83] przedstawia pięć głównych aspektów mających wpływ na obszary objęte opcjami kontroli ryzyka:

- Nieakceptowalny poziom ryzyka – opcje kontroli ryzyka muszą być zastosowane, jeżeli w pewnych obszarach ryzyko jest nie do zaakceptowania i wyszło poza obszar ALARP. ALARP jest to obszar o ryzyku na tyle małym, że można je zaakceptować z praktycznego punktu widzenia[83], [140].
- Ryzyko w obszarze ALARP – jeżeli ryzyko znajduje się w obszarze ALARP, opcje kontroli ryzyka mogą być stosowane, jeżeli spełniają kryteria ekonomiczne.
- Duże prawdopodobieństwo – jeżeli prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia jest duże, zaś konsekwencje są małe, może być ono nieakceptowane z operacyjnego punktu widzenia. Aby zidentyfikować takie obszary może nie być wystarczająca analiza jakościowa, należy wykonać także analizę ilościową.

- Duże konsekwencje – jeżeli z danym zagrożeniem związane są duże konsekwencje, ryzyko może być nieakceptowane, mimo tolerowanego poziomu.
- Duża niepewność w ocenach – jeżeli materiał statystyczny jest niedostateczny i trudno wyciągnąć z niego jednoznaczne wnioski, należy przedsięwziąć dodatkowe opcje kontroli ryzyka.

### Właściwe opcje kontroli ryzyka

Opcje kontroli ryzyka mogą przyjmować różne formy, w zależności do czego są stosowane. Opcje kontroli ryzyka mogą być związane z:

- minimalizacją występowania zagrożeń i wypadków,
- minimalizacją skutków zdarzeń.

Pillay i Wang w swojej książce [140] na podstawie pracy Kuo[86] prezentują trzy główne metody redukcji ryzyka:

- Zarządzanie — ta metoda związana jest z zarządzaniem organizacją; wiąże się ona z rozwojem kultury bezpieczeństwa, na którą składa się między innymi efektywna komunikacja między projektantami, właścicielami i operatorami statku oraz załogą i innymi osobami biorącymi czynny i bierny udział w procesie żeglugi.
- Inżynieria — metoda ta opiera się na projekcie statku, który minimalizuje występowanie zdarzeń niebezpiecznych.
- Organizacja — metoda ta opiera się na procedurach związanych z ryzykownymi sytuacjami na morzu. Mają one usprawnić pracę personelu w czasie żeglugi. W skład tych procedur mogą wchodzić:
  - procedury bezpieczeństwa,
  - bezpieczna praktyka pracy,
  - ćwiczenia bezpieczeństwa,
  - plany awaryjne.

#### 3.2.4. Krok 4 – Ocena kosztów

Wybrane opcje kontroli ryzyka muszą być sprawdzone również pod względem efektywności kosztów, tzn. muszą dawać większy zysk niż nakłady „wywołane” skutkami zdarzeń[86].

Do kosztów należy zaliczać wszystkie koszty, jakie pojawiają się przez całe życie danego statku czy grupy.

Dla każdej opcji kontroli ryzyka powinno się wyznaczyć koszty jednostkowe przypadające na redukcję ryzyka ( CURR — Cost per Unit Reduction in Risk)[140] . Równanie 3.2 przedstawia sposób wyliczenia CURR:

$$CURR = \frac{\text{koszt} - \text{zysk}}{\text{redukcja ryzyka}}. \quad (3.2)$$

Rezultatem tego kroku są wykazy kosztów i zysków w rozbiciu na poszczególne jednostki, a także ranking opcji kontroli ryzyka w ujęciu kosztowym [140].

### 3.2.5. Krok 5 – Rekomendacje dla decydentów

Rekomendacje te powinny być oparte na informacjach zebranych i opracowanych w ramach poprzednich czterech kroków. Rekomendacje te powinny sugerować taką redukcję ryzyka, aby była ona jak najbliższa koncepcji ALARP, przy jednoczesnym spełnieniu kryteriów akceptacji ryzyka, które wynikają z wytycznych towarzystw klasyfikacyjnych i administracji morskich poszczególnych państw.

Z kroku czwartego można niemalże wprost przejść do zaprezentowania listy rankingowej opcji kontroli ryzyka. Ranking ten powinien pokazywać wszystkie możliwości redukcji ryzyka uwzględniając koszty, oraz wszystkie niejednoznaczności wynikające z analizy metodą FSA. Rekomendacje dla każdego z decydentów powinny być jak najbardziej równe i nie powinny faworyzować żadnej ze stron [83].

Rekomendacje takie, mogą też zawierać sugestie mające wpływ na usprawnienie procesu analizy ryzyka.

## 3.3. Podsumowanie

W obszarze techniki jaką jest oceanotechnika istnieją dwie główne metody oceny ryzyka: przypadki bezpieczeństwa i formalna ocena bezpieczeństwa. Przypadki Bezpieczeństwa stosowane są szczególnie w obszarze jednostek wydobywczo-przetwórczych, a także do pojedynczych statków, zaś Formalną Ocenę stosuje się głównie dla statków. FSA stosowane jest nie tylko dla pojedynczych typów statku [89, 139], ale także dla systemów transportowych [108][142].

Analiza i ocena ryzyka powoli zaczyna być stosowana także w procesie projektowania statków [16][21]. Najczęściej te prace odnoszą się do stateczności w stanie uszkodzonym. W następnych dwóch rozdziałach zostanie przedstawiony model ryzyka zbudowany przy użyciu sieci Bayes'a wraz z jego zastosowaniem do statku typu RoPax.

## 4. Model ryzyka wypadku statecznościowego statku w stanie nieuszkodzonym

Rozdział 4 zawiera opis modelu ryzyka wypadku statecznościowego oraz jego elementy składowe. Model ryzyka prezentowany w niniejszej pracy można zastosować w procesie projektowania statku w dwóch sytuacjach:

- w procesie optymalizacji projektu - porównanie wariantów projektu,
- w procesie weryfikacji projektu.

Głównym celem proponowanej metody jest estymacja ryzyka wypadku statecznościowego w stanie nieuszkodzonym, ze szczególnym naciskiem na scenariusz „Dead Ship Condition”. W scenariuszu tym statek pozbawiony jest właściwości napędowo–manewrowych, co skutkuje wejściem statku w dryf, zwiększonymi kołysaniami, co w konsekwencji może doprowadzić do przewrócenia się statku i związaną z tym utratą życia przez pasażerów.

Dla danych warunków meteorologicznych wyznacza się prawdopodobieństwo przekroczenia limitów ruchu przy użyciu modelu LaiDyn (zobacz 4.3.3). W tym celu bierze się pod uwagę następujące czynniki: warunki meteorologiczne, dynamikę okrętu, stany załadowania.

Ostatecznie łączna liczba ofiar śmiertelnych ( $N$ ) w wyniku wypadku modelowana jest przy użyciu koncepcji współczynnika zgonów. Współczynnik ten jest wyznaczany przy udziale czasu ewakuacji i czasu przewracania się statku. Liczba pasażerów na pokładzie modelowana jest na podstawie danych od operatorów RoPax z Zatoki Fińskiej[104]. Wszystkie te elementy wraz z towarzyszącymi im prawdopodobieństwami ( $P$ ) dla danej liczby ofiar przedstawiono ostatecznie na wykresie FN. W niniejszej pracy przyjęto grupową miarę ryzyka, przedstawioną w postaci krzywej FN.

Do analizy ryzyka został wybrany statek typu RoPax[90], jako jednostka do przewozu samochodów oraz pasażerów. Tabela 4.1 przedstawia dane statystyczne dotyczące światowej floty statków typu RoPax na marzec 2006. W tabeli 4.2 znajdują się dane na temat miejsc dla pasażerów we flocie RoPax pogrupowane ze względu na długość statku.

W niniejszej pracy, przyjęto następujący zapis ryzyka, w oparciu o który skonstruowano model:

$$R = \{S, L, C, U \mid BK\}, \quad (4.1)$$

gdzie  $S$  to scenariusz niepożądanego zdarzenia w analizowanym systemie,  $L$  jest prawdopodobieństwem przypisywanym elementom składowym scenariusza,  $C$  to konsekwencje, opisujące jaki jest wyniki scenariusza, jeżeli on wystąpi, niepewności we wzorze

Tonaż	Przebudowy	Remonty	Pływające	Zniszczone	Nowe	Inne	Wszystkie
do 1000	2	4	1163	2	17	8	1196
1000 – 4000	0	2	656	0	16	7	687
ponad 4000	1	12	864	2	65	6	950
Wszystkie	3	24	2683	4	98	21	2833

Tabela 4.1. Światowa flota statków typu RoPax [80]

Długość	Ilość pasażerów w odniesieniu do długości statku					Łącznie
	<500	500–1000	1000–1500	1500–2000	>2000	
< 100	162	192	56	4	1	415
100–120	33	67	62	15	7	184
120–150	22	93	100	53	23	291
150–180	23	49	25	33	31	161
> 180	7	34	26	18	17	102
Wszystkie	247	425	269	123	79	1153

Tabela 4.2. Miejsca dla pasażerów w statkach typu RoPax [80]

przedstawiane są jako  $U$ , zaś  $BK$  to wiedza, w oparciu o którą tworzony jest model ryzyka danego systemu.

W celu określenia poziomu bezpieczeństwa przy pomocy modelu ryzyka wypadku statecznościowego należy znaleźć odpowiednie miary ryzyka. Istnieją dwie grupy miar ryzyka[40], które można zastosować w procesie porównania i akceptacji:

- Indywidualne miary ryzyka:
  - liczba wypadków śmiertelnych w wyniku katastrofy na rok na milion mieszkańców,
  - spodziewany czas utraty życia,
  - ilość wypadków na godzinę,
  - ilość wypadków na jednostkę żeglugi
- Grupowe miary ryzyka:
  - częstość funkcji skutków - krzywa ryzyka (FN).

Ryzyko indywidualne związane z pierwszą grupą dotyczy z reguły osób zawodowo związanych ze statkiem, zaś druga grupa odnosi się do większej populacji i dotyczy osób przebywających na statku w charakterze pasażerów. Miary te wykorzystywane są często jako podstawy regulacji państwowych i międzynarodowych odnoszących się do akceptowanego poziomu ryzyka[72].

Jako miarę ryzyka przyjęto prawdopodobieństwo wystąpienia określonej liczby ofiar w wyniku wypadku, określoną wzorem:

$$R = P(N) = P_{DSC} \times P_{caps|DSC} \times P_{fatalities|caps,DSC}, \quad (4.2)$$

gdzie:



- $P(N)$  to prawdopodobieństwo wystąpienia  $N$  ofiar w wyniku wypadku
- $P_{DSC}$  to prawdopodobieństwo utraty własności manewrowo-napędowych (dead ship condition),
- $P_{caps|DSC}$  to prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku statecznościowego jako skutek stanu DSC oraz warunków hydrometeorologicznych,
- $P_{fatalities|caps,dsc}$  to prawdopodobieństwo wystąpienia  $N$  ofiar w wyniku *caps* i *DSC*.

Wzór 4.2 można podzielić na dwie części;

- część pierwszą:  $P_{DSC}$  — otrzymuje się ze statystyk albo modelu uszkodzenia układu manewrowo-napędowego (patrz punkt 4.3.1),
- część drugą:  $P_{caps|DSC} \times P_{fatalities|caps,DSC}$  — otrzymuje się z sieci Bayes'a (patrz punkt 4.2).

## 4.1. Sieci Bayes'a

Sieci Bayes'a są narzędziem do przedstawiania wiedzy i efektywnego dwukierunkowego rozumowania w warunkach niepewności[32][27][42]. Przepływ informacji w sieci Bayes'a realizowany jest w oparciu o twierdzenie Bayes'a[84]:

$$P(H|D) = \frac{P(D|H)P(H)}{P(D)}, \quad (4.3)$$

gdzie  $H$  to hipoteza, zaś  $D$  to dane. Prawdopodobieństwo  $P(D)$  trudno jest ocenić bezpośrednio bez informacji o prawdziwości hipotezy  $H$ , która się do tych danych  $D$  odnosi. Aby móc oszacować prawdopodobieństwo  $P(D)$  należy wziąć pod uwagę wszystkie hipotezy  $H_i$ :

$$P(D) = \sum_i P(D|H_i)P(H_i) \quad (4.4)$$

Podstawiając wyrażenie 4.4 do równania 4.3 otrzymamy wzór wyrażający twierdzenie Bayes'a:

$$P(H_k|D) = \frac{P(D|H_k)P(H_k)}{\sum_i P(D|H_i)P(H_i)}, \quad (4.5)$$

Sieci Bayes'a to probabilistyczny model graficzny, w którym elementy grafu reprezentowane są przez zmienne losowe, natomiast relacje między zmiennymi reprezentowane są połączeniami o określonym kierunku. Zmienne nazywane są węzłami, natomiast połączenia krawędziami. Skierowanie krawędzi określa typ i kierunek relacji między zmiennymi. Zmienne w modelu mają charakter probabilistyczny, mogą być zmiennymi niezależnymi lub zależnymi. Zmienne niezależne definiowane są w postaci prawdopodobieństw i są nazywane także 'rodzicami' zmiennych zależnych. Wartości zmiennych zależnych definiowane są w oparciu o wartości prawdopodobieństw warunkowych (Conditional Probability Tables (CPT)), łączących ze sobą 'rodziców' danej zmiennej zależnej. Przykład prostej, trzyelementowej sieci Bayes'a przedstawiono na rysunku 4.1. Na wykresie znajdują się

dwie zmienne niezależne („Wysokość metacentryczna”, „Amplituda falowania”) i jedna zmienna zależna („Przewrócenie się statku”). Zmienne niezależne opisane są rozkładami prawdopodobieństwa. Zmienna „Wysokość metacentryczna” przyjmuje cztery stany, do których przypisane są odpowiednie prawdopodobieństwa. Ilość stanów oraz odpowiadające im prawdopodobieństwa definiowane są na początkowym etapie budowy sieci Bayes’a. Zmienna „Amplituda falowania” posiada trzy stany, oraz odpowiadające im prawdopodobieństwa. Zmienna zależna („Przewrócenie się statku”) zdefiniowana jest w oparciu o tabelę prawdopodobieństw warunkowych, i przedstawiona jest w tabeli 4.4.



Rysunek 4.1. Przykład sieci Bayes’a

Tabela 4.3 zawiera opis zmiennych zawartych na rysunku wraz ze stanami, ich zakresami oraz poszczególnymi prawdopodobieństwami.

Sieci Bayes’a mogą być stosowane do szacowania prawdopodobieństw pewnych zdarzeń kiedy ich nie posiadamy lub gdy obserwacja bezpośrednia jest zbyt kosztowna. Metoda ta umożliwia jednoczesne użycie danych z obserwacji i opinii ekspertów [106].

Sieci Bayes’a mogą efektywnie szacować efekty ograniczonej wiedzy, a także niedoskonałego zrozumienia szacowanego systemu.

Tabela 4.3. Opis zmiennych przedstawionych na rysunku 4.1

Nazwa zmiennej	Symbol	Jedno.	Stan	Opis	Prawdopodobieństwo
Amplituda falowania	Ampl	[m]	A1	$Ampl < 1.66$	0.70
			A2	$1.66 < Ampl < 3.67$	0.27
			A3	$Ampl > 3.67$	0.02
Wysokość metacentryczna	GM	[m]	GM1	$GM = 0.30$	0.23
			GM2	$GM = 0.98$	0.17
			GM3	$GM = 1.11$	0.18
			GM4	$GM = 2.29$	0.42
Przewrócenie się statku			Nie	Nie	0.96
			Tak	Tak	0.04

Tabela 4.4. Tabela prawdopodobieństw warunkowych

Ampl		A1		
GM	GM1	GM2	GM3	GM3
F	0.93	0.86	0.80	0.96
T	0.07	0.14	0.20	0.04
Ampl		A2		
GM	GM1	GM2	GM3	GM3
F	0.92	0.89	0.96	0.92
T	0.08	0.11	0.04	0.08
Ampl		A3		
GM	GM1	GM2	GM3	GM3
F	0.91	1.00	1.00	0.93
T	0.09	0.00	0.00	0.07

#### 4.1.1. Tworzenie sieci Bayes'a w oparciu o wiedzę ekspercką

Budowanie sieci Bayes'a jest zadaniem złożonym i pracochłonnym, szczególnie, gdy sieć budowana jest na podstawie opinii ekspertów. Można zdefiniować pięcioetapową procedurę definiowania modelu ryzyka przy użyciu Sieci Bayes'a[87, 104]:

1. definiowanie modelu,
2. definiowanie zmiennych,
3. tworzenie jakościowej części struktury,
4. tworzenie ilościowej części struktury,
5. walidacja struktury.

## Definiowanie modelu

Pierwszym etapem budowy modelu jest zdefiniowanie granic modelu. Definicja granic pozwoli ocenić jakie elementy wchodzi w skład modelu, a jakie są poza jego granicami[87].

## Definiowanie zmiennych

Po określeniu granic modelu i elementów składowych, można przystąpić do kolejnego etapu, którym jest definiowanie zmiennych[87], które są najważniejsze do określenia ryzyka. Zmienne modelujące mogą być ciągłe albo dyskretne. Na tym etapie określa się także zakresy zmiennych ciągłych oraz stany zmiennych dyskretnych.

## Tworzenie jakościowej części struktury

Po określeniu zmiennych definiujących model ryzyka należy stworzyć graficzną strukturę sieci Bayes'a łączącą poszczególne zmienne. Model jakościowy może być tworzony przy udziale ekspertów, ale także analizy wypadków. Na tym etapie można zacząć również budować połączenia pomiędzy zmiennymi. Eksperti mogą proponować odpowiednie zależności pomiędzy zmiennymi, a także określić które ze zmiennych są od siebie niezależne. Jednakże opieranie się tylko i wyłącznie na wiedzy ekspertów nie jest praktyczne, gdyż mają oni tendencję do tworzenia zbyt dużej ilości połączeń pomiędzy elementami modelu[104]. Najlepiej aby zespół ekspertów składał się ze specjalistów wielu dziedzin.

## Tworzenie ilościowej części struktury

Podczas definiowania ilościowej części, należy w pierwszej kolejności wybrać typy rozkładów dla wszystkich zmiennych. Jeśli struktura sieci Bayes'a nie została dokładnie określona, to ta część budowy modelu może być trudna do wykonania. Ilość prawdopodobieństw do oszacowania potrzebnych do zbudowania Sieci Bayes'a rośnie wykładniczo wraz z liczbą zmiennych stanów jakie te zmienne przyjmują.

## Walidacja struktury

Walidacja modelu może być przeprowadzona w oparciu o czułości, wartości informacji oraz ich wpływ przy wykorzystaniu znanych scenariuszy. Zazwyczaj, ten etap prowadzi do przedefiniowania na nowo modelu. Walidację należy wykonywać tak długo aż kolejna zmiana nie daje już znaczącej poprawy jakości modelu. Ten etap jest bardzo ważny w kontekście niepewności modelu, rozkładu wiedzy w nim zawartej[3][87]. Druzdzel i van Gaag[32] zauważyli, że zmiana struktury modelu ma bardzo duży wpływ na wyniki modelu, to jest czułość modelu jest bardzo duża w odniesieniu do struktury.

### 4.1.2. Tworzenie sieci Bayes'a w oparciu o zestaw danych uczących

Sieci Bayes'a można budować także przy pomocy zestawu danych uczących. Na podstawie danych można stworzyć strukturę sieci wraz z parametrami, albo tylko same parametry jeżeli znamy strukturę sieci.

**Stwierdzenie 4.1.** *Klasyfikatorem jest funkcja  $f$  która przyporządkowuje klasę  $s$  do zbioru danych.*

W klasyfikacji, celem algorytmów uczących jest stworzenie klasyfikatora dla danego zbioru danych z odpowiednimi klasami. Istnieje wiele klasyfikatorów, które można użyć przy budowie sieci Bayes'a[24][109]:

- Naive-Bayes (NB),
- klasyfikator PC,
- Tree Augmented Naive-Bayes (TANs),
- Bayesian Network Augmented Naive Bayes (BANs),
- Bayesian Multi-Nets,
- General Bayesian Networks (GBNs);

W niniejszej pracy użyto dwóch z wyżej wymienionych klasyfikatorów BBN, tj Naive-Bayes oraz PC.

#### Naiwny klasyfikator bayesowski[24][109]

Klasyfikator NB stosowany jest w sytuacji gdy mamy zdefiniowany problem i jego strukturę. Algorytm służy do estymacji parametrów[109].

Zgodnie z twierdzeniem Bayes'a, prawdopodobieństwo tego, że zbiór danych  $D = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  należy do klasy  $s$  wynosi:

$$P(s | D) = \frac{p(D | s) p(s)}{p(D)}. \quad (4.6)$$

Zbiór danych  $D$  przynależy do klasy  $s = 1$  wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$f_B(D) = \frac{p(s = 1 | D)}{p(s = 0 | D)} \geq 1, \quad (4.7)$$

gdzie,  $f_B(D)$  to klasyfikator bayesowski.

Naiwnym klasyfikatorem bayesowskim może być funkcja  $f_{NB}(D)$  (zob. 4.8), przy założeniu, że wszystkie atrybuty są od siebie niezależne.

$$f_{NB}(D) = \frac{p(s = 1)}{p(s = 0)} \prod_{i=1}^n \frac{p(x_i | s = 1)}{p(x_i | s = 0)}. \quad (4.8)$$

$$classify(x_1, x_2, \dots, x_i) = \max_s p(S = s) \prod_{i=1}^n p(X_i = x_i | S = s). \quad (4.9)$$

#### Klasyfikator PC[2][109]

W przeciwieństwie do NB, klasyfikator PC bazuje na testach niezależności, co czyni go ogólnym algorytmem uczenia sieci Bayes'a. W algorytmie PC możliwe jest zastosowanie dodatkowo wiedzy na temat systemu. Wiedza ta może być użyta jako ograniczenia w procesie poszukiwań. Może umożliwić wprowadzenie informacji na temat istnienia lub nieistnienia połączeń pomiędzy elementami.

Podstawowy algorytm PC tworzy się w następujący sposób[128][109]:

1. Stworzenie nieskierowanego grafu z wszystkimi zmiennymi tworzącymi model. Zmienne łączy się ze sobą.
2. Wykonanie testów warunkowej niezależności aby usunąć krawędzie z grafu:
  - a) sprawdzenie niezależności parami, po przejściu wszystkich kiedy każda krawędź jest sprawdzona, zwiększa się zbiór warunkowy
  - b) test niezależności wykonuje się warunkowo na jednej zmiennej zwiększając następnie ilość zmiennych o jeden,
  - c) jeżeli algorytm znajdzie dwa elementy które są niezależne, zapisuje je oddzielnie poza zbiorem warunkowym.
3. Kiedy istnieje już wstępny szkielet sieci, wyszukuje się kierunek połączeń. Wstępnie algorytm wyszukuje strukturę typu  $v$ : gdzie  $a$  i  $c$  skierowane są do  $b$  –  $a \rightarrow b \leftarrow c$ , szukając trójki  $(a, b, c)$ , gdzie:
  - a) istnieje krawędź pomiędzy  $a$  i  $b$  oraz  $c$  i  $b$ ,
  - b) nie ma krawędzi pomiędzy  $a$  i  $c$ ,
  - c)  $b$  nie jest oddzielnym zbiorem  $a$  i  $c$ .
4. Kiedy wyznaczy się skierowane i nieskierowane połączenia, algorytm stara się zorientować pozostałe niezorientowane połączenia, poprzez zastosowanie zasad, dopóki niektóre z nich nie zostaną odrzucone:
  - a) jeżeli istnieje skierowane połączenie pomiędzy  $x$  i  $y$ , oraz, że  $y$  jest połączone z  $z$ , ale bez kierunku, należy zorientować  $x \rightarrow y - z$  jako  $x \rightarrow y \rightarrow z$ ,
  - b) zorientuj  $x - z$  jako  $x \rightarrow z$  jeżeli istnieje łańcuch połączeń pomiędzy  $x$  oraz  $z$  –  $x \rightarrow \dots \rightarrow z$ .
5. Na tym etapie sieć Bayes'a może mieć postać skierowanego acyklicznego grafu. Pozostałe niezorientowane krawędzie można ukierunkować ręcznie lub losowo.

## 4.2. Definiowanie modelu ryzyka

Model ryzyka wypadku DSC dla statku RoPaX zbudowany został przy pomocy probabilistycznego modelu przyczynowego jakim jest sieć Bayes'a. Struktura sieci Bayes'a została zbudowana przy udziale opinii ekspertów, zaś parametry zostały stworzone przy udziale klasyfikatora PC na podstawie danych uczących. Została ona stworzona przy użyciu oprogramowania GeNie[31] rozwijanego na Uniwersytecie w Pittsburgh'u pod kierunkiem prof. Marka Drużdżela.

### 4.2.1. Definiowanie zmiennych

Metodologia przedstawiona tutaj pokazuje przyczynowość wypadku statecznościowego na otwartym morzu, poprzez określenie odpowiednich zmiennych i zbudowanie związków logicznych pomiędzy nimi. Metodologia składa się z trzech głównych części, obejmujących następujące obszary: związane z przewracaniem się statku, odpowiedzią na wypadek, wartościowaniem konsekwencji. Wymienione grupy są przedstawione w punkcie 4.3 i zobrazowane na rysunku 4.2. Przewracanie się statku jest zależne od wielu zdarzeń, tj. od warunków meteorologicznych oraz stanów załadowania, maksymalnego kąta kołysania, czasu do osiągnięcia maksymalnego kąta oraz czasu naprawy układu

napędowo–manewrowego. Wszystkie elementy uzyskuje się z wyników symulacji ruchu statku, literatury, rozmów z ekspertami, a także przy użyciu przekształceń numerycznych (patrz tabela 4.5). Odpowiedź na wypadek to przede wszystkim czas potrzebny na ewakuację. W modelu przyjmuje się, że nie występuje możliwość odholowania statku. Konsekwencje wypadku modelowane są przy użyciu koncepcji współczynnika wypadku, który został opisany w podrozdziale 4.3.4.

Wszystkie zmienne użyte w modelu zaprezentowane są na rysunku 4.2 oraz w tabeli 4.5.

#### 4.2.2. Tworzenie jakościowej części modelu

W odniesieniu do wypadku statecznościowego istnieje skąpy materiał statystyczny. Taki stan rzeczy powoduje, że trudno jest zbudować strukturę modelu ryzyka. Jedną z metod jest burza mózgów przy udziale ekspertów z wielu dziedzin. W niniejszej rozprawie przyjęto inną metodę tworzenia modelu ryzyka. Model ryzyka początkowo zbudowany był przeze mnie osobiście na podstawie mojej wiedzy jako projektanta statków. Następnie pierwotną strukturę zmodyfikowano po rozmowach ze specjalistami z dziedziny projektowania statków, oficerami marynarki handlowej oraz specjalistami od ryzyka w transporcie morskim. Na podstawie sugestii ekspertów dokonano modyfikacji struktury. Strukturę modelu ryzyka przedstawiono na rysunku 4.2. Gdy już powstała struktura modelu, należało zdefiniować jakościową część modelu.

Analizowany system jest dosyć szeroki oraz multidyscyplinarny, dlatego też model został podzielony na części: (i) związane ze statecznością, (ii) układem napędowo-manewrowym oraz (iii) konsekwencjami wypadku.

#### 4.2.3. Tworzenie ilościowej części modelu

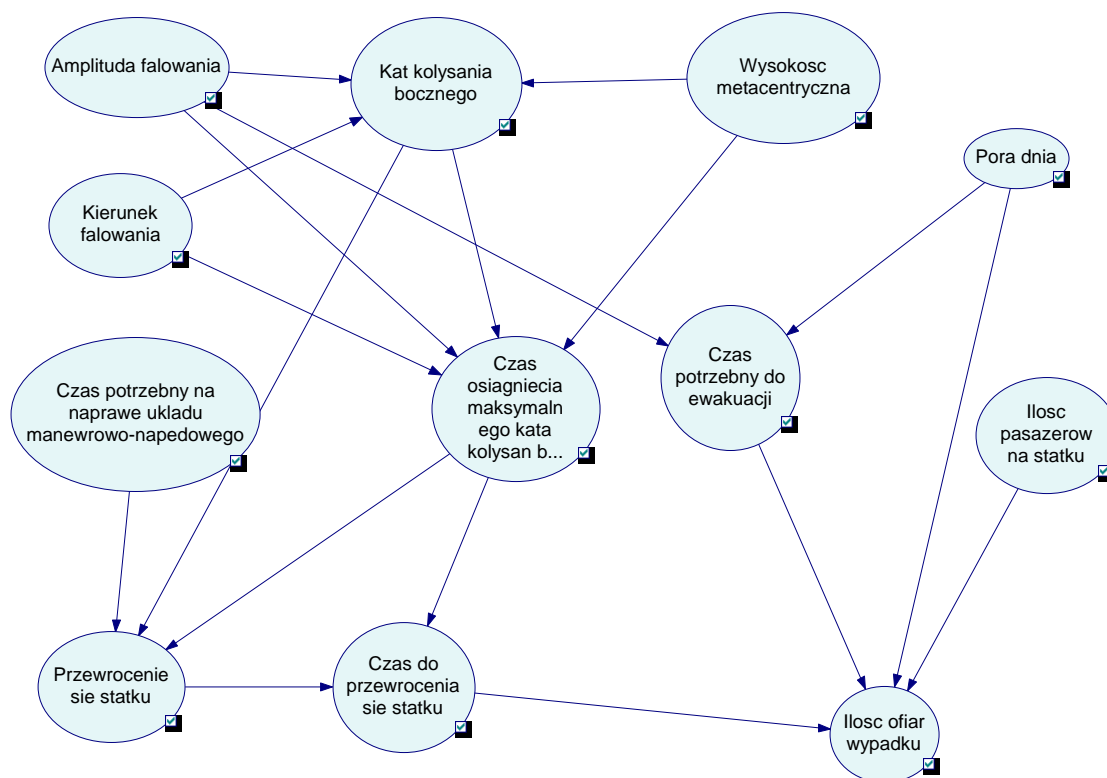
Ilość prawdopodobieństw wymaganych do zbudowania sieci Bayes'a zależy od struktury sieci, ilości zmiennych i ich stanów.

Tabela 4.5 zawiera wszystkie zmienne zawarte w modelu. Jeżeli zmienna wyznaczana jest przy pomocy literatury zaznaczona jest ona poprzez referencje. Zmienne oznaczone jako E wyznaczone są przy pomocy ekspertów. Symulacje zostały wykorzystane dla zmiennych oznaczonych literą S. Litera N przy opisie zmiennej oznacza, że została ona uzyskana poprzez analizę numeryczną.

Dwanaście zmiennych przedstawionych w tabeli 4.5 ma charakter dyskretny, który opisany jest stanami wynikającymi z wiedzy na temat systemu. Stany te są przedstawione w tabeli 4.6. Tabela ta zawiera także zakresy wartości ciągłych dla poszczególnych stanów zmiennych zastosowanych w modelu.

Tabela 4.6 zawiera także prawdopodobieństwa łączne poszczególnych zmiennych i stanów.

Podrozdział 4.3 zawiera informacje o parametrach modelu ryzyka i sposobach ich szacowania.



Rysunek 4.2. Struktura modelu ryzyka wypadku statku RoPax w stanie bezenergetycznym (DSC)

#### 4.2.4. Walidacja modelu

Walidację modelu ryzyka można przeprowadzić przy użyciu następujących metod[43][104]:

1. Analiza krzyżowa.
2. Analiza czułości modelu w odniesieniu do parametrów stochastycznych.
3. Analiza niepewności w modelu.
4. Analiza wpływu.

Jeżeli istnieje możliwość zbadania zgodności modelu z rzeczywistymi warunkami należy ją przeprowadzić. W przypadku wypadku statecznościowego ciężko jest jednak zebrać szczegółowy materiał porównawczy. Dlatego takie porównanie nie będzie przeprowadzone w niniejszej rozprawie.

Walidacja modelu jest istotnym etapem budowy modelu zwłaszcza w kontekście wiarygodności modelu, a także rozkładu wiedzy i analizy niepewności modelu i jego wyników[4][3].

Brak wiedzy o analizowanym systemie powoduje niepewność w parametrach a także wzajemnych relacjach pomiędzy zmiennymi. Istnieje wiele sposobów wyrażenia niepewności w modelu[117]. Metodologia, która została tutaj zaprezentowana pozwala



Tabela 4.5. Opis zmiennych w modelu

Grupa	Nazwa	Symbol	Źródło danych
	Amplituda falowania	$Ampl$	[67]
	Kierunek falowania	$Beta$	E
	Kąt kołysania bocznego	$Roll_{max}$	S
	Wysokość metacentryczna	$GM$	E
	Pora dnia	$DAY$	E
	Czas potrzebny na naprawę układu manewrowo-napędowego	$TTRep$	[124]
	Czas potrzebny do ewakuacji	$TTE$	[104]
	Czas osiągnięcia maksymalnego kąta kołysań bocznych	$TTR$	S
	Przewrócenie się statku	$Capsize$	N
	Czas do przewrócenia się statku	$TTC$	S,N
	Ilość pasażerów na statku	$N_{PASS}$	[104], E
	Ilość ofiar wypadku	$N_{LOSA}$	N

na ocenę niepewności w odniesieniu do wiedzy o systemie na dwa sposoby. Po pierwsze, poprzez analizę niepewności parametrów. W tym celu odpowiednie zmienne uważane są za rozkłady prawdopodobieństwa i przeprowadzana jest analiza dla zakresu parametrów, które mogą przyjmować te przedziały. Po drugie, niepewności związane ze strukturą analizowane są poprzez testowanie alternatywnych hipotez. W tym celu model rozwijany jest przy stałym zestawie zmiennych, ale sprawdza się alternatywne powiązania pomiędzy zmiennymi.

### 4.3. Parametry modelu ryzyka

Podrozdział ten opisuje metody przyjęte w celu określenia parametrów modelu ryzyka.

Analizowany scenariusz wypadku, obejmuje statek RoPax, który w wyniku różnych przyczyn traci swoje własności napędowo-manewrowe i przechodzi w stan bezenergetyczny. Przejście to może wynikać z samoistnej awarii układów jak też i działania środowiska (duże ruchy).

Podstawowymi elementami modelu są:

- prawdopodobieństwo pozostawania statku w stanie bezenergetycznym oraz czas potrzebny na wyjście z tego stanu (podrozdział 4.3.1),
- parametry falowania (podrozdział 4.3.2),
- własności hydrostatyczne i stany załadowania statku (podrozdział 5.1.1),
- odpowiedź statku na falowanie (załącznik 4.3.3),
- prawdopodobieństwo przewrócenia się statku w DSC (podrozdział 4.3.3),

Tabela 4.6. Stany poszczególnych zmiennych wraz z ich dyskretyzacją

Symbol zmiennych	Stan		Opis	Prawdopodobieństwo
$Roll_{max}$	ponizej_30	[deg]	$Roll_{max} < 30$	0.91
	pomiedzy_30_60	[deg]	$30 < Roll_{max} < 60$	0.05
	ponad_60	[deg]	$Roll_{max} > 60$	0.04
$Beta$	bn90	[deg]	$Beta < -90$	0.25
	b0	[deg]	$-90 < Beta < 0$	0.24
	b90	[deg]	$0 < Beta < 90$	0.25
	b180	[deg]	$Beta > 90$	0.26
$TTR$	ponizej_15	[min]	$TTR < 15$	0.70
	pomiedzy_15_30	[min]	$15 < TTR < 30$	0.10
	pomiedzy_30_45	[min]	$30 < TTR < 45$	0.12
	ponad_45	[min]	$TTR > 45$	0.08
$TTE$	ponizej_30	[min]	$TTE < 30$	0.22
	pomiedzy_30_40	[min]	$30 < TTE < 40$	0.50
	pomiedzy_40_50	[min]	$40 < TTE < 50$	0.21
	powyzej_50	[min]	$TTE > 50$	0.07
$DAY$	Noc		Noc	0.51
	Dzien		Dzień	0.49
$TTRep$	ponizej_25	[min]	$TTRep < 25$	0.65
	pomiedzy_25_75	[min]	$25 < TTRep < 75$	0.19
	ponad_75	[min]	$TTRep > 75$	0.16
$TTC$	bez_przewrocenia		$TTC < 0^1$	0.96
	ponizej_1	[min]	$0 < TTC < 1$	0.01
	powyzej_1	[min]	$TTC > 1$	0.02
$N_{PASS}$	ponizej_750	[osoby]	$N_{PASS} < 750$	0.15
	pomiedzy_750_1500	[osoby]	$750 < N_{PASS} < 1500$	0.47
	pomiedzy_1500_2250	[osoby]	$1500 < N_{PASS} < 2250$	0.29
	ponad_2250	[osoby]	$N_{PASS} > 2250$	0.09
$N_{LOSA}$	brak_ofiar	[osoby]	$N_{LOSA} = 0$	0.96
	ponizej_200	[osoby]	$0 < N_{LOSA} < 200$	0.00
	ponizej_750	[osoby]	$200 < N_{LOSA} < 750$	0.01
	ponizej_1500	[osoby]	$750 < N_{LOSA} < 1500$	0.02
	ponizej_2500	[osoby]	$1500 < N_{LOSA} < 2500$	0.01
	ponizej_3000	[osoby]	$2500 < N_{LOSA} < 3000$	0.00

- elementy związane z ratowaniem pasażerów, ładunku i statku - w niniejszej pracy ograniczono się tylko i wyłącznie do ratowania pasażerów (podrozdział 4.3.4),
- ilość ofiar wypadku statecznościowego (podrozdział 4.3.4);

Elementy modelu przedstawione w tej pracy dotyczą statku RoPax dla nieograniczonego rejonu żeglugi. Jednakże sposób stosowania i modułowość metodologii umożliwiają jego stosowanie także dla innych typów statków, a także dla ograniczonych rejonów żeglugi.

Zachowanie się statku na fali badane było przy użyciu modelu matematycznego rozwijanego na Uniwersytecie Aalto przez prof. Jerzego Matusiaka.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono poszczególne elementy modelu ryzyka.

#### 4.3.1. Modelowanie awarii układów napędowego i sterowniczego

Niniejszy model odnosi się do wypadku statecznościowego w stanie „Dead Ship Condition”, dlatego w pierwszej kolejności należy zamodelować elementy związane z awariami układu napędowo–manewrowego. W proponowanym modelu brane pod uwagę są dwie zmienne: prawdopodobieństwo wystąpienia awarii, oraz czas potrzebny do naprawy awarii.

W projekcie SAFEDOR opracowano raport na temat modelowania prawdopodobieństwa uszkodzenia układu napędowego i sterowniczego[124]. Raport ten bazuje przede wszystkim na danych Offshore Reliability Data Handbook[124]:

$$P(f) = 1 - e^{-\lambda dt}, \quad (4.10)$$

gdzie  $f$  to ilość uszkodzeń w czasie  $dt$ , zaś  $\lambda$  określa ilość krytycznych uszkodzeń podczas 1000000 godzin pracy;

Na podstawie prac Brandowskiego przyjęto współczynnik  $\lambda = 21.7 \times 10^{-6}$ [15][14]. Przy założeniu opartym na rozmowach z ekspertami przyjęto, że statek rocznie przebywa 80% czasu w morzu, co przy współczynniku  $\lambda = 21.7 \times 10^{-6}$  daje prawdopodobieństwo awarii układu w ciągu jednego roku na poziomie  $P(f) = 0.138$ .

Jak wspomniano wyżej drugim elementem modelu ryzyka wypadku statecznościowego w stanie „Dead Ship Condition” jest czas potrzebny na naprawę układu napędowo-sterowniczego. Do dalszych prac zaadaptowany został model czasu naprawy systemu z raportu z projektu SAFEDOR. Według tego raportu czas naprawy można zapisać tabelarycznie [124] (patrz tabela 4.7):

Tabela 4.7. Rozkład czasu naprawy układu manewrowo-napędowego[124]

Czas napraw [godz]	Prawdopodobieństwo
0 – 5	0.17
5 – 12	0.22
12 – 24	0.26
24 – inf	0.35

Obie zmienne związane z awarią układu napędowo-manewrowego są ważnymi elementami modelu. Pierwszy z nich wpływa na określenie czy statek jest w stanie bezenergetycznym. Model ryzyka wypadku statecznościowego został ograniczony tylko i wyłącznie do przypadku DSC, tak więc w przypadku kiedy nie występuje stan DSC, należy użyć innego modelu ryzyka. Druga zmienna 'Czas potrzebny na naprawę układu napędowo-manewrowego' odgrywa równie ważną rolę. Przy tworzeniu modelu założono, że jeżeli kołysanie statku osiągnie wartość kąta maksymalnego krytycznego (patrz 4.3.3), a jednocześnie czas naprawy będzie krótszy niż czas osiągnięcia kąta krytycznego, to statek przestaje być w stanie bezenergetycznym i nie nastąpi wypadek statecznościowy. Jest to w pewnym sensie uproszczenie. Wynika ono z tego, że model ryzyka został ograniczony tylko i wyłącznie do przypadku utraty własności napędowo-manewrowych. W rzeczywistości statek wciąż jest poddawany oddziaływaniu środowiska, co może doprowadzić do przewrócenia się statku i utraty życia przez pasażerów. Dlatego też, w procesie projektowania statku należałoby przedstawić tutaj model dostosować do całego spektrum wypadków statecznościowych.

#### 4.3.2. Modelowanie właściwości środowiska

Aby móc wyznaczyć ruchy statku na fali należy odpowiednio zamodelować oddziaływanie środowiska, tj.:

- falowanie,
- wiatr,
- prąd.

Z uwagi, iż przeprowadzone symulacje zakładały warunki środowiskowe zbliżone do tych występujących na północnym Atlantyku, oddziaływanie prądu pominięto.

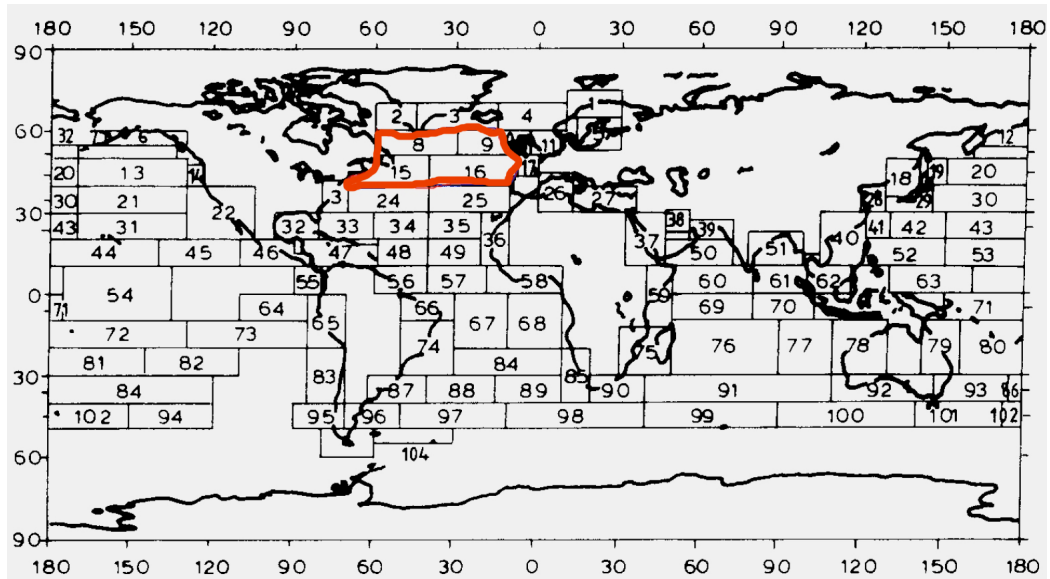
#### Modelowanie falowania morskiego

Falowanie w krótkim okresie czasu można scharakteryzować przy pomocy znaczącej wysokości fali  $H_S$  oraz okresu przekroczenia zerowej wartości (*zero crossing period*)  $T_Z$ .

W modelowaniu długookresowym wykorzystuje się diagramy falowania, zawierające prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych kombinacji znaczącej wysokości i okresu fali. Dokumenty IMO[67][66] zalecają używanie Rekomendacji nr 34 Stowarzyszenia Towarzystw Klasyfikacyjnych (IACS)[47]. Zalecenie 34 zawiera statystykę falowania dla północnej części Oceanu Atlantyckiego. Tabela 4.8 zawiera prawdopodobieństwa falowania, zastosowane w niniejszej pracy.

Północny Atlantyk w rozumieniu Rekomendacji 34 [47] przedstawiony jest na rysunku 4.3 i odpowiada czterem obszarom z Global Wave Statistics.

W rozprawie założono, że kierunek falowania morskiego będzie rozłożony równomiernie w zakresie od  $-180$  do  $180$ . Falowanie to ma charakter falowania regularnego. Takie założenie wynika z rozmów z ekspertami[19], z analizy obecnie przyjętego kryterium pogody, a także czasu potrzebnego do wykonania symulacji. Dla fali regularnej zastosowanej w tej pracy znaczącą wysokość fali zamienia się na wysokość fali regularnej[19]:



Rysunek 4.3. Obszar Północnego Atlantyku[47]

$$H_{wave} = H_{1/3} \quad (4.11)$$

Podobnie przekształca się okres falowania nieregularnego na okres falowania regularnego[19].

$$\lambda_{wave} = \frac{2\pi g}{\omega^2} \quad (4.12)$$

Tabela 4.8. Tabela prawdopodobieństw falowania na północnym Atlantyku

Hs/Tz	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM:	
0.5	0.0	0.0	1.2	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.6	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	0.0	23811
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	0.1	123
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	20
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1
SUM:	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1		

### Modelowanie wiatru

Aby móc modelować oddziaływanie wiatru należy zdefiniować 3 parametry [129] - kierunek, prędkość wiatru, współczynnik porywistości;

Prędkość wiatru można zapisać w formie:

$$V_A(t) = \bar{V}_A + u_A(t), \quad (4.13)$$

gdzie  $\bar{V}_A$  to średnia prędkość wiatru [m/s],  $u_A(t)$  to składowa pulsacji prędkości [129];

Średnią prędkość wiatru można wyznaczyć ze wzoru 5.5 [67]:

$$V_A = \left( \frac{H_S}{0.06717} \right)^{\frac{1}{1.5}}. \quad (4.14)$$

$$u_a(t) = \int_0^{\infty} \sqrt{4S_A(\omega) \cos \left[ \frac{2\pi}{t} \epsilon(\omega) \right]}, \quad (4.15)$$

gdzie:  $S_A(\omega)$  to funkcja gęstości widmowej prędkości wiatru,  $\epsilon(\omega)$  to przesunięcie fazowe. W literaturze można znaleźć kilka funkcji gęstości widmowej, np [103][129][30]: widmo Davenporta, widmo Karmana, widmo Harrisa, widmo American Petroleum Institute.

W niniejszej pracy, do obliczenia obciążeń od wiatru statku w statnie Dead Ship Condition użyto widmo Davenport'a [30], jako standardowego w obliczeniach dla kryterium drugiego poziomu dla wypadku DSC [67].

$$S_A(\omega) = 4K \frac{U_W^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{\frac{3}{4}}}, \quad (4.16)$$

gdzie  $K$  to współczynnik widma, przyjmuje się  $K = 0.003$ ,  $X_D$  to bezwymiarowa częstotliwość,  $X_D = 600 \frac{\omega}{\pi V_A}$

#### 4.3.3. Przewracanie się statku w stanie nieuszkodzonym

Prawdopodobieństwo przewrócenia się statku nieuszkodzonego jest główną częścią kryteriów probabilistycznych, a także centralnym elementem modelu ryzyka.

Do obliczenia prawdopodobieństwa przewrócenia się statku oraz czasu w jakim to nastąpi należy wykonać symulacje ruchu statku pozbawionego napędu na fali. W literaturze można znaleźć wiele modeli ruchu statku na fali [141][44][10][127][1]. Metoda oceny ryzyka jest niezależna od zastosowanego modelu ruchu.

W niniejszej pracy zastosowano oprogramowanie LaiDyn (program LaiDyn - wersja 10 z 8.1.2008), które wykorzystuje model o tej samej nazwie. Model ten został wielokrotnie zwalidowany [90][96][95], brał także udział w międzynarodowym projekcie porównywania modeli matematycznych ruchu statku na fali [127]. Jest on także odkładnie opisany w literaturze przedmiotu [93][94][96].

### Model matematyczny ruchu statku na fali - „Laidyn”

Model „Laidyn” (program Laidyn - wersja 10 z 8.1.2008) użyty w tej pracy jest modelem dwuetapowym ograniczonym do fali regularnej. Metodę tą opracował prof. Jerzy Matusiak z Aalto University. Jest ona opisana w wielu publikacjach [91][92][94]. Program wykorzystujący tą metodę brał udział w benchmarkach programów obliczeniowych.

Metoda LAIDYN w wersji dla fali regularnej opiera się na założeniu, że całkowita odpowiedź statku jest sumą części liniowej i nieliniowej [92]:

$$X = x_L + x, \quad (4.17)$$

gdzie  $x$  to część liniowa odpowiedzi, zaś  $x_L$  to część nieliniowa odpowiedzi.

Taki podział wynika z tego, że liniowe metody obliczeniowe są dobrze znane, co powoduje, że hydromechaniczne siły radiacyjne i dyfrakcyjne są w miarę dobrze prezentowane przez liniowe przybliżenie. W metodzie LAIDYN główna część obciążeń pierwszego rzędu obliczana jest z przybliżeniem liniowym, z uwzględnieniem aktualnego kąta kursowego i położenia względem fali. Jako części nieliniowe brane są pod uwagę: nieliniowości wynikające z kształtu statku, hydrostatyka, siły od fali, napór śruby, siły generowane na sterze, nieliniowa część obciążeń pierwszego rzędu, a także siły od manewrowości przy małych prędkościach.

Metodę najłatwiej przedstawić na przykładzie równania o jednym stopniu swobody (rów. 4.18)[94]:

$$m\ddot{X} + g(\dot{x}) + h(x) = F(X; t). \quad (4.18)$$

Jak zostało napisane wyżej (rów. 4.17), całkowita odpowiedź jest sumą części liniowej i nieliniowej. Z tego wynika, że równanie 4.18 ma swoją część liniową:

$$m\ddot{x}_L + c\dot{x}_L + kx_L = F_L(t). \quad (4.19)$$

Odejmując od równania 4.18 równanie 4.19 otrzymamy nieliniową część równania 4.18.

$$m\ddot{x} + [g(\dot{x}_L + \dot{x}) - c\dot{x}_L] + [h(x_L + x) - kx_L] = F(X; t) - F_L(t). \quad (4.20)$$

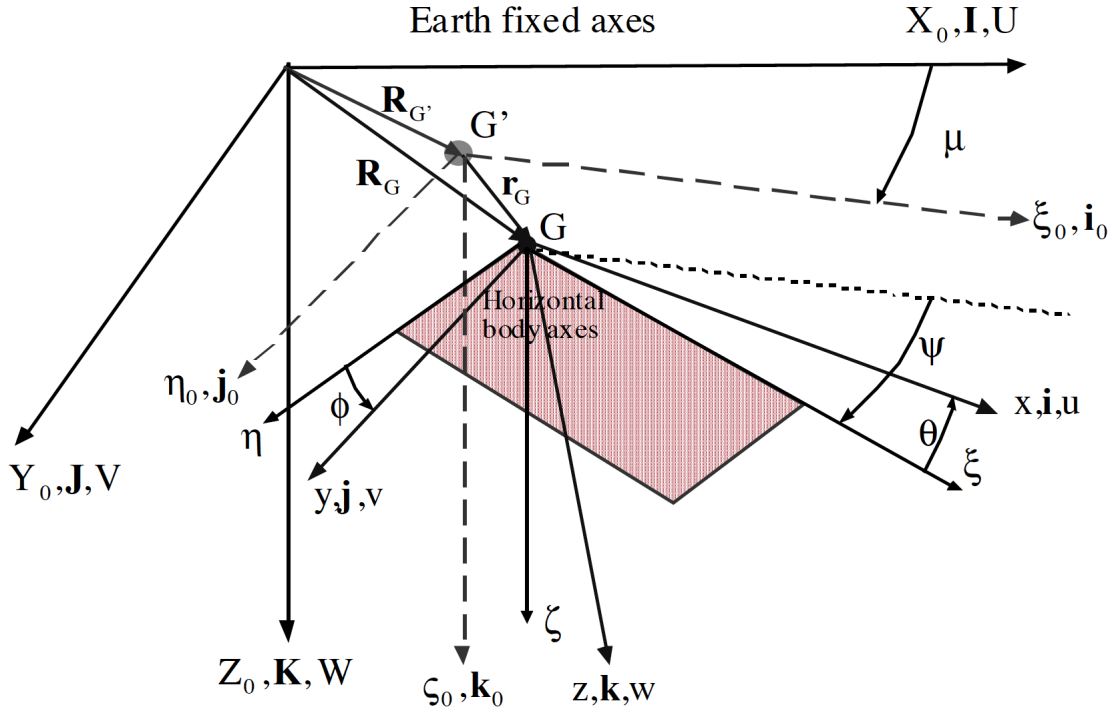
W podejściu dwuetapowym w celu rozwiązania równania różniczkowego najpierw rozwiązuje się równanie liniowe 4.19, następnie zaś rozwiązuje się część nieliniową z równania 4.20 ze znaną częścią liniową. Następnie ze wzoru 4.17 oblicza się całościowe rozwiązanie.

Metodę tą można rozszerzyć dla układu równań różniczkowych o 6 stopniach swobody.

Układ współrzędnych stosowany w metodzie LAIDYN prezentowany jest na rysunku 4.4.

Pełen układ równań ruchu dla sześciu stopni swobody jest bardzo rozbudowany. Poniżej pokazane są tylko trzy równania dotyczące oddziaływań związanych z siłami. Wszystkie sześć równań można znaleźć w pracy prof. Matusiaka [94].





Rysunek 4.4. Układ współrzędnych [91]

$$\begin{aligned}
 m [\dot{u} + (Q_L + Q) (w_L + w) - (R_L + R) (v_L + v) + g \sin (\theta_L + \theta)] &= X_L + x \\
 m [\dot{v} + (R_L + R) u - (P_L + P) (w_L + w) \\
 - g \cos (\theta_L + \theta) \sin (\phi_L + \phi)] &= Y_L + Y \quad (4.21) \\
 m [\dot{w} + (P_L + P) (v_L + v) - (Q_L + Q) u \\
 - g \cos (\theta_L + \theta) \sin (\phi_L + \phi)] &= Z_L + Z.
 \end{aligned}$$

Liniową część układu równań ruchu statku można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned}
 m\dot{u}_L = X_L &= X_{rad} + X_{diff} + X_{FK,L} \\
 m\dot{v}_L = Y_L &= Y_{rad} + Y_{diff} + Y_{FK,L} \\
 m\dot{w}_L = Z_L &= Z_{rad} + Z_{diff} + Z_{FK,L} + Z_{restoring,L} \\
 I_X \dot{P}_L - I_{xz} \dot{R}_L = K_L &= K_{rad} + K_{diff} + K_{FK,L} + K_{restoring,L} \\
 I_Y \dot{Q}_L = M_L &= M_{rad} + M_{diff} + M_{FK,L} + M_{restoring,L} \\
 I_Z \dot{R}_L - I_{ZX} \dot{P}_L = N_L &= N_{rad} + N_{diff} + N_{FK,L}.
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Nieliniowa część sił i momentów ma postać[94]:

$$\begin{aligned}
X &= X_{FK} - X_{FK,L} + X_{resistance} + X_{prop} + X_{rudder} + X_{rad} \\
Y &= Y_{FK} - Y_{FK,L} + Y_{rudder} + Y_{man} + Y_{rad}Y_W \\
Z &= Z_{restoring} + Z_{FK} - (Z_{restoring,L} + Z_{F,K,L}) + Z_{rad} \\
K &= K_{restoring} + K_{FK} - (K_{restoring,L} + K_{FK,L}) + K_{rudder} + K_{damp} + K_{rad} + K_W \\
M &= M_{restoring} + M_{FK} - (M_{restoring,L} + M_{FK,L}) + M_{rad} \\
N &= N_{FK} - N_{FK,L} + N_{rudder} + N_{man} + N_{rad} + N_W.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

**Część liniowa modelu — „Sealoads”** Program „Sealoads” oparty jest na metodzie paskowej. Współczynniki liczone są przy użyciu metody źródeł Franka. Metoda ta jest szeroko znana i dokładnie opisana w wielu publikacjach [121][70]. Z wyników obliczeń tego programu wykorzystywane są współczynniki tłumienia i masa wody towarzyszącej.

**Część nieliniowa modelu — „Laidyn”** Model LAIDYN w nieliniowej części wykonuje obliczenia z wykorzystaniem dwóch modeli hydromechanicznych:

- modelu właściwości morskich,
- modelu manewrowości.

**Model właściwości morskich** Obliczenia sił hydrostatycznych oraz sił Frouda-Krylova wykonuje się przy użyciu modelu panelowego. Zaś siły radiacyjne i dyfrakcyjne (masa wody towarzyszącej i współczynniki tłumienia) wyznacza się metodą Cummins’a.

Opis panelowy kadłuba zapożyczany jest z programu NAPA. Program ten generuje panele czworokątne, które następnie dzielone są na dwa panele trójkątne.

Do najważniejszych parametrów paneli należą:

- środek (punkt kontrolny na panelu),
- powierzchnia,
- wektor normalny.

Parametry te obliczane są z użyciem następujących wzorów:

$$\begin{aligned}
x_C &= \frac{(x_1 + x_2 + x_3)}{3} \\
y_C &= \frac{(y_1 + y_2 + y_3)}{3} \\
z_C &= \frac{(z_1 + z_2 + z_3)}{3},
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\Delta S = \frac{1}{2} \sqrt{\left| \begin{array}{ccc} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{ccc} x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{ccc} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{array} \right|^2}, \tag{4.25}$$

$$\vec{c} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ (x_1 - x_3) & (y_1 - y_3) & (z_1 - z_3) \\ (y_2 - y_3) & (y_2 - y_3) & (z_2 - z_3) \end{vmatrix}, \quad (4.26)$$

$$\vec{n} = \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|}. \quad (4.27)$$

**Siły radiacyjne** Siły radiacyjne dla modelu nieliniowego oblicza się z wykorzystaniem współczynników mas towarzyszących obliczonych w modelu liniowym, ale dla częstotliwości zmierzającej do nieskończoności  $\omega = \infty$  [94]. Takie podejście jest zaczerpnięte z pracy Cummins'a[26]. Wzór na siłę radiacyjną ma postać:

$$X_{rad}(t) = -A_\infty \ddot{x}(t) - \int_{-\infty}^t k(t-\tau) \dot{x}(\tau) d\tau, \quad (4.28)$$

gdzie  $A_\infty$  to masa wody towarzyszącej dla nieskończonej częstotliwości.

Współczynnik  $k$  wyznacza się ze wzoru 4.29, który zaproponował Cummins[26].

$$k(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b(\omega) \cos(\omega t) d\omega, \quad (4.29)$$

gdzie  $b(\omega)$  jest tłumieniem dla częstotliwości  $\omega$ .

**Siły hydrostatyczne i Frouda-Krylova** Siły Frouda-Krylova obliczane są według następującego algorytmu [94]:

1. Na początku wyznacza się profil fali dla ustalonego punktu kontrolnego w przestrzeni za pomocą wzoru 4.30

$$\zeta(t) = A \cos[k(X_C \cos \mu - Y_C \sin \mu) - \omega t], \quad (4.30)$$

2. z profilu fali wyznacza się ciśnienie (wzór 4.31) dla danego punktu kontrolnego

$$p = \rho g \left[ \zeta e^{-k(Z_1 - \zeta)} + Z_1 \right], \quad (4.31)$$

3. mając już rozkład ciśnień na zwilżonych panelach należy wyznaczyć siłę (rów. 4.32) i moment (rów. 4.33) Froud-Krylova

$$F_{F,k} = \sum_{i=1}^N p_i \Delta S_i n_i, \quad (4.32)$$

$$M_{F,k} = \sum_{i=1}^N r_i \times p_i \Delta S_i n_i. \quad (4.33)$$

**Obciążenia od wiatru** Model obciążeń od wiatru został zaczerpnięty z prac K. McTaggart'a. Ten sam model obciążeń jest zastosowany w programie FREDYN [99]:

$$Y_W = -\frac{1}{2}\rho_a C_{Dwy} (LF_{av} + A_W) v_W^2 (0.25 + 0.75 \cos^3 \phi) \sin \mu_{ws}, \quad (4.34)$$

$$K_W = -z_{wo} Y_W, \quad (4.35)$$

$$N_W = -\frac{1}{2}\rho_a C_{Dwy} (LF_{av} + A_W) v_W^2 (0.25 + 0.75 \cos^3 \phi) x [x_{wo} \sin \mu_{ws} - 0.125L \sin (2\mu_{ws})], \quad (4.36)$$

gdzie  $Y_W$  to siła na kierunku  $Y$ ,  $K_W$  to moment wokół osi  $X$ ,  $N_W$  to moment wokół osi  $Z$ ,  $\rho_a$  to gęstość powietrza,  $L$  to długość statku,  $F_{av}$  to wysokość wolnej burty,  $A_{sup}$  to powierzchnia nawodnej części statku,  $v_W$  to prędkość wiatru,  $z_{wo}$  to pionowe położenie środka naporu wiatru,  $x_{wo}$  to wzdłużne położenie środka naporu w stosunku to środka ciężkości statku,  $C_{Dwy}$  to współczynnik aerodynamiczny nawodnej części statku.

### Prawdopodobieństwo przewrócenia się statku

Prawdopodobieństwo przewrócenia się statku nieuszkodzonego jest główną częścią kryteriów probabilistycznych, a także centralnym elementem modelu ryzyka.

W literaturze można znaleźć szereg metod wyznaczania prawdopodobieństwa przewrócenia się statku w stanie DSC, jedną z metod zaproponował Belenky w oparciu o autorską metodę linearyzacji odcinkami krzywej ramion prostujących[9] [7], kolejną metodę zaproponował Paroka z Umeda'ą[116]. Również w Europie pracuje się nad sposobami obliczania prawdopodobieństwa przewrócenia się statku. Jednymi z prac na ten temat są niemieckie prace Blome i Krueger'a[13], a także Bulian'iego i Francescutto z Uniwersytetu w Trieście[20][17].

W rozprawie zastosowano wzór na prawdopodobieństwo zaproponowany przez McTaggart'a [99][100][101][88].

$$\begin{aligned} P(C_{annual}) &= \sum_{i=1}^{Nv_s} \sum_{j=1}^{N\beta} \sum_{k=1}^{N\widehat{H/\lambda}} \sum_{l=1}^{N\chi} \frac{1}{N_\chi} p_{v_s}(V_{s-i}) \\ &\times p_\beta(\beta_j) p_{\widehat{H/\lambda}}(\widehat{H/\lambda}) \\ &\times [Q_{H_{s,annual}}(H_C|V_s, \beta\widehat{H/\lambda}, \chi)], \end{aligned} \quad (4.37)$$

gdzie  $P(C_{annual})$  to prawdopodobieństwo przewrócenia się statku,  $v_s$  to prędkość statku,  $\beta$  to kąt kursowy,  $\widehat{H/\lambda}$  to stromość fali,  $H_{s,annual}$  to maksymalna znacząca wysokość fali,  $Q_{H_{s,annual}}$  to prawdopodobieństwo wystąpienia danej znaczącej wysokości fali podczas sztormu,  $H_C|V_s, \beta\widehat{H/\lambda}, \chi$  to minimalna znacząca wysokość fali powodująca przewrócenie przy danych parametrach.

Po wyeliminowaniu ze wzoru 4.37 elementów związanych z prędkością otrzymamy wzór na prawdopodobieństwo przewrócenia się statku nieuszkodzonego w stanie Dead Ship Condition[45].

$$\begin{aligned}
P(C_{annual}) &= \sum_{j=1}^{N_\beta} \sum_{k=1}^{N_{\widehat{H}/\lambda}} \sum_{l=1}^{N_\chi} \frac{1}{N_\chi} \\
&\times p_\beta(\beta_j) p_{\widehat{H}/\lambda}(\widehat{H}/\lambda) \\
&\times \left[ Q_{H_s, annual}(\widehat{H}_C | \beta \widehat{H}/\lambda, \chi) \right]
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Oprócz wyznaczenia prawdopodobieństwa przewrócenia się statku, jako kryterium można także przyjąć prawdopodobieństwo przekroczenia pewnego kąta przechyłu boczno-ego[101].

$$\begin{aligned}
Q_{\phi_{max,D}}(\phi_{max,D}) &= \sum_{i=1}^{N_{V_s}} \sum_{j=1}^{N_\beta} \sum_{k=1}^{N_{H_s}} \sum_{l=1}^{N_{T_P}} p_{v_s|H_s}(v_{s-i}|H_s) \\
&\times p_{\beta|H_s}(\beta_j|H_s) p_{H_s, T_P}(H_{s-k}, T_{p-l}) \\
&\times Q_{\phi_{max,D}}(V_s, \beta, H_s, T_P)(\phi_{max,D}, \beta, H_s, T_P)
\end{aligned} \tag{4.39}$$

gdzie  $Q_X(X)$  to prawdopodobieństwo przekroczenia zmiennej  $X$ . Przy takim podejściu prawdopodobieństwo przewrócenia się statku można obliczyć ze wzoru 4.40:

$$P(C_D) = Q_{\phi_{max}}(\phi_C) \tag{4.40}$$

Do wyznaczenia prawdopodobieństwa przewrócenia się statku dla scenariusza Dead Ship Condition została zastosowana metoda Monte Carlo (zobacz równanie 4.41 oraz załącznik B), w odniesieniu do prawdopodobieństwa osiągnięcia założonego kąta przechyłu boczno-ego. Z równania 4.40 wyznaczono zaś prawdopodobieństwo przewrócenia się, po wyrugowaniu członów związanych z prędkością z równania 4.39.

$$Q_{\phi_{max}}(\phi_C) = \frac{N_{\phi_C}}{N_s} \tag{4.41}$$

gdzie:  $N_{\phi_C}$  to ilość symulacji w których osiągnięto założony kąt,  $N_s$  to ilość wszystkich symulacji.

Podejście zaproponowane przez McTaggart'a zostało zastosowane, ponieważ opiera się ono na osiągnięciu lub przekroczeniu założonego kąta krytycznego. Kąt ten jest zdecydowanie mniejszy niż kąt pełnego przewrócenia się statku, czyli  $180^\circ$ . Kąt krytyczny może zależeć od zakresu dodatnich ramion prostujących, wyjścia obła z wody, wejścia pokładu do wody, czy zalania otworów wodoszczelnych. Dla statków pasażerskich takim kątem może być kąt przy którym bezpieczna ewakuacja pasażerów staje się niemożliwa.

Ze wzoru 4.40 wynika konieczność zastosowania narzędzia do wykonania symulacji ruchu statku na fali.

Wyniki symulacji zostały wykorzystane do szacowania prawdopodobieństwa przekroczenia kąta, który uznaje się za kąt przewrotki. Z wyników symulacji wykorzystano także czas w jakim statek osiągnie kąt przewrócenia. Więcej na temat przeprowadzonych symulacji znajduje się w części 5.2.

### Szacowanie czasu do przewrócenia się statku

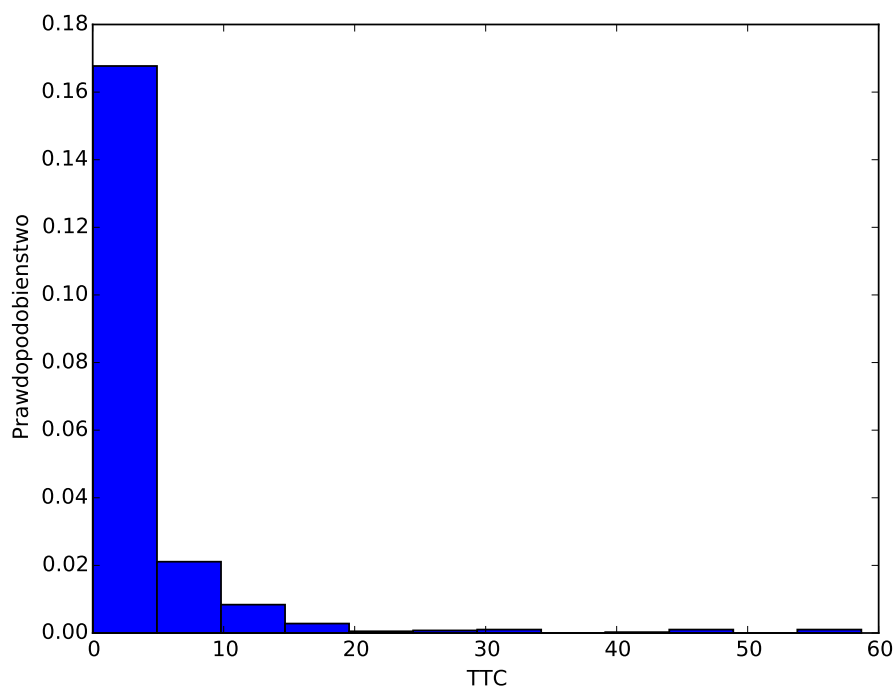
Istotnym elementem modelu ryzyka jest czas potrzebny do przewrócenia ( $TTC$ ). Parametr ten umożliwia szacowania konsekwencji wypadku statecznościowego, gdyż

bezpośrednio determinuje czas ewakuacji oraz wpływa na wielkość strat społecznych. Szacowanie czasu do przewrótki opiera się na analizie wyników obliczeń ruchu statku na fali. Parametr ten jako zależny od ruchów statku na fali jest wprost determinowany przez parametry środowiska (*ENV*), stanu załadowania (*LC*). Dlatego też należy wyznaczyć odpowiednią krzywą rozkładów prawdopodobieństw dla każdego zestawu wyżej wymienionych cech.

$$TTC = TTC(ENV, LC). \quad (4.42)$$

W literaturze przedmiotu można znaleźć przykładowe postacie tej funkcji. Są one jednak wyznaczane przede wszystkim dla statku w stanie uszkodzonym. Brakuje odpowiedniego modelu TTC dla stanu nieuszkodzonego.

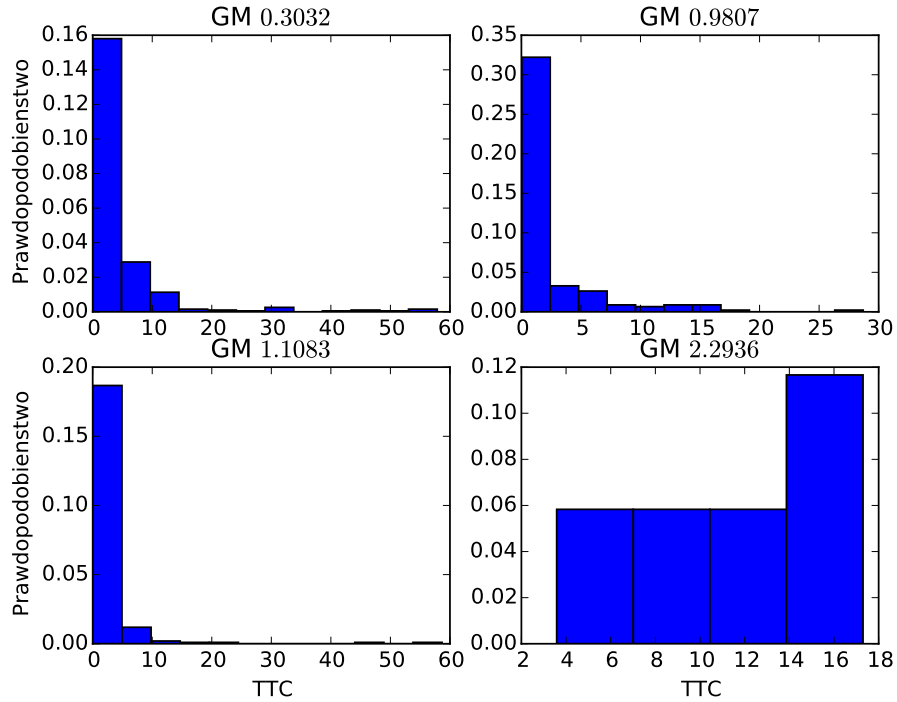
W niniejszej pracy zastosowano czasy do przewrócenia uzyskane z symulacji komputerowej. Rysunek 4.5 przedstawia zagregowany rozkład prawdopodobieństw do przewrócenia się statku dla wszystkich stanów załadowania. Rozkłady dla każdego stanu załadowania znajdują się na rysunku 4.6.



Rysunek 4.5. Zagregowany czas do przewrócenia się statku dla wszystkich wysokości metacentrycznych

#### 4.3.4. Szacowanie konsekwencji wypadku statecznościowego

Główną konsekwencją wypadku statecznościowego dla statków typu RoPax jest utrata życia wyrażona ilością ofiar wypadku, wyznaczana na podstawie wzoru:



Rysunek 4.6. Czasy do przewrócenia się statku dla poszczególnych GM

$$N_{LOSA} = F_{LOSA} * N_{PASS}, \quad (4.43)$$

gdzie  $N_{PASS}$  to ilość pasażerów na statku,  $F_{LOSA}$  to miara utraty życia (zdefiniowana we wzorze 4.44), zaś  $N_{LOSA}$  to ilość ofiar w danym wypadku.

Relacja pomiędzy czasem wystawienia na zagrożenie ( $haz$ ) i czasem przeciwdziałania ( $resp$ ) to także miara utraty życia ( $F_{LOSA}$ ), którą można zdefiniować w następujący sposób[104].

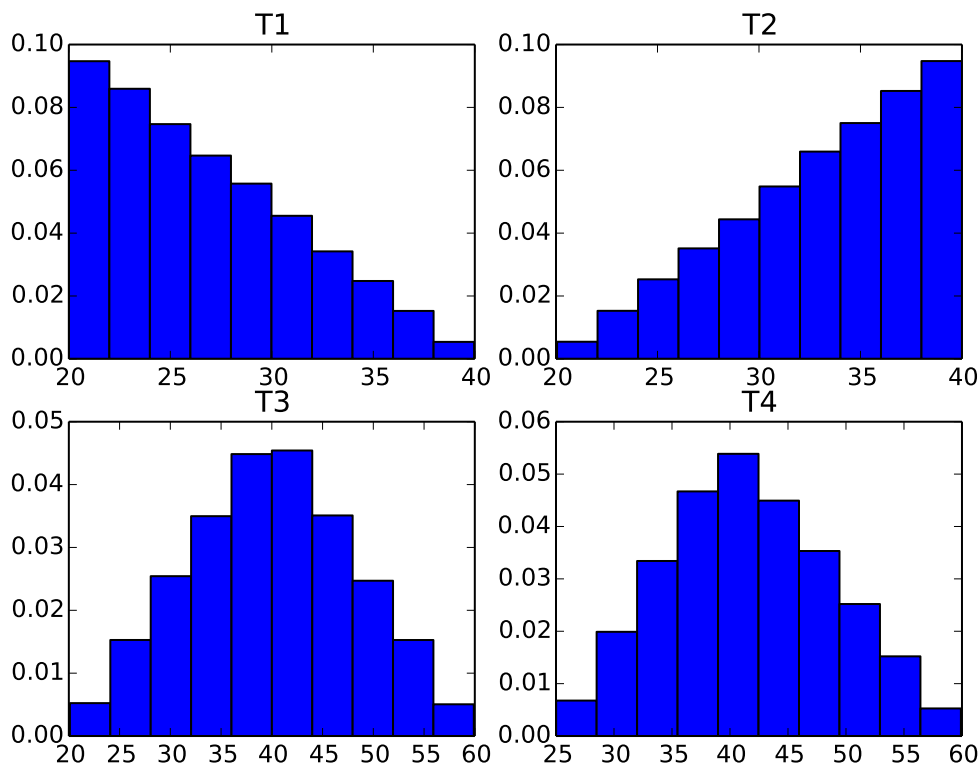
$$F_{LOSA} = \begin{cases} 0, & \frac{haz}{resp} > 1 \\ 1, & \frac{haz}{resp} < 1 \end{cases}. \quad (4.44)$$

W niniejszym modelu czas ekspozycji na zagrożenie to czas do przewrotki, natomiast przeciwdziałaniem jest ewakuacja statku i czas jej trwania.

Na potrzeby modelu ryzyka opracowano uproszczony model ewakuacji statku typu RoPaX, w oparciu o zalecenia IMO[62]. Model ten zależy od pogody oraz pory dnia.

$$TTE = \begin{cases} T1, & \text{Dzień } i \ H_S < 3m \\ T2, & \text{Noc } i \ H_S < 3m \\ T3, & \text{Dzień } i \ H_S > 3m \\ T4, & \text{Noc } i \ H_S > 3m. \end{cases} \quad (4.45)$$

gdzie:  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  i  $T4$  mają rozkład trójkątny o postaci - rysunek 4.7:  $T1 = [20, 20, 40]$ ,  $T2 = [20, 40, 40]$ ,  $T4 = [25, 40, 60]$ ;



Rysunek 4.7. Rozkłady czasów ewakuacji

Czasy do przewrócenia się statku w wypadkach statecznościowych są na tyle małe, że można by z powodzeniem założyć, że z katastrofy nikt się nie ratuje i zawsze ginie 100% pasażerów statku typu RoPax. Takie podejście zwiększałoby szacowaną ilość ofiar, co skutkuje zwiększeniem konsekwencji i w rezultacie zwiększa miarę ryzyka  $R$ . Dlatego, też bardziej rzeczywistości odpowiada, zastosowanie modelu ewakuacji. Model zastosowany w pracy jest bardzo uproszczony.

Prawdopodobieństwo utraty życia wraz z liczbą zgonów umożliwia wyznaczenie krzywej F-N. Krzywa F-N pokazuje relację pomiędzy prawdopodobieństwem wypadku  $F$  a liczbą ofiar[36]. Krzywa F-N jest miarą ryzyka i może także służyć do oceny poziomu ryzyka[22]. Na krzywej F-N zostaną zaprezentowane wyniki analizy ryzyka dla statku w stanie Dead Ship Condition.



#### 4.4. Walidacja modelu ryzyka

Walidacja modelu ryzyka została przeprowadzona w pięciu krokach. Celem jest określenie siły predykcji modelu ryzyka, określenie wrażliwych (najbardziej czułych) elementów modelu oraz wskazanie elementów modelu determinujących poziom niepewności modelu ryzyka.

##### 4.4.1. Walidacja krzyżowa

W celu oceny zgodności modelu z danymi z eksperymentu przeprowadzono  $k$ -krotną walidację krzyżową stosując procedurę[109]:

1. losowe dzielenie zbioru danych na  $K$  podzbiorów,
2. dla każdego podzbioru  $S$ :
  - a) uczenie sieci z danych, ale z wyłączeniem podzbioru  $S$ ,
  - b) testowanie modelu na podzbiórze  $S$ ,
3. obliczanie średniego błędu ze wszystkich podzbiorów.

Wyniki walidacji krzyżowej dla modelu ryzyka wypadku DSC zaprezentowanego w tej pracy, przedstawione są w tabelach 4.9 i 4.10.

Tabela 4.9. Wyniki walidacji krzyżowej - zmienna objaśniana: ilość ofiar

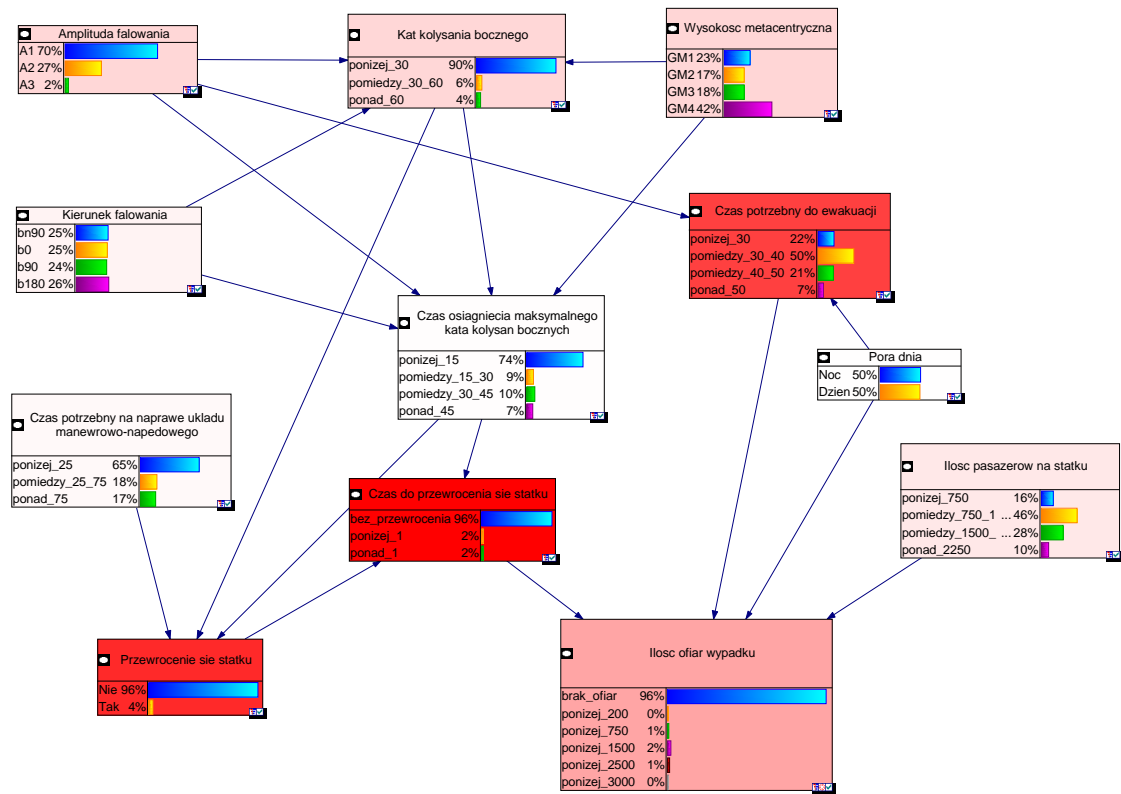
		Model					
		0	200	750	1500	2500	3000
Dane uczące	0	<b>0.9999</b>	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
	200	0.0000	<b>0.0000</b>	0.0000	0.5000	0.5000	0.0000
	750	0.0510	0.0000	<b>0.8163</b>	0.1122	0.0204	0.0000
	1500	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.9611</b>	0.0389	0.0000
	2500	0.0101	0.0000	0.0050	0.0000	<b>0.9246</b>	0.0603
	3000	0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.7200	<b>0.2000</b>

Tabela 4.10. Wyniki walidacji krzyżowej - zmienna objaśniana: przewracanie się

		Model	
		Capsize	
		F	T
Dane	F	<b>1.0000</b>	0.0000
uczące	T	0.00	<b>1.0000</b>

Tabela 4.9 zawiera wyniki walidacji dla zmiennej 'Ilość ofiar'. Dla zmiennej tej prawdopodobieństwo uzyskania poprawnej odpowiedzi waha się w granicach 0.8163 oraz 0.9999. Dla dwóch klas, tj.  $n_{fat} 200$  oraz  $n_{fat} 3000$ , walidacja krzyżowa wykazała bardzo niskie prawdopodobieństwo uzyskania poprawnych wyników.

Wyniki walidacji zmiennej 'Przewracanie się statku' znajdują się w tabeli 4.10. Prawdopodobieństwo uzyskania poprawnej odpowiedzi dla tej zmiennej jest bardzo



Rysunek 4.8. Analiza czułości sieci Bayes'a dla modelu ryzyka - zmienna 'Ilość ofiar wypadku'

wysokie i wynosi dokładnie 1. Model równie dobrze klasyfikuje sytuacje skutkujące przewrótka jak i przetrwaniem.

Dla najważniejszych zmiennych w modelu jakimi są 'Przewracanie się statku' i 'Ilość ofiar' wyniki walidacyjne są dobre i można je uznać za akceptowalne.

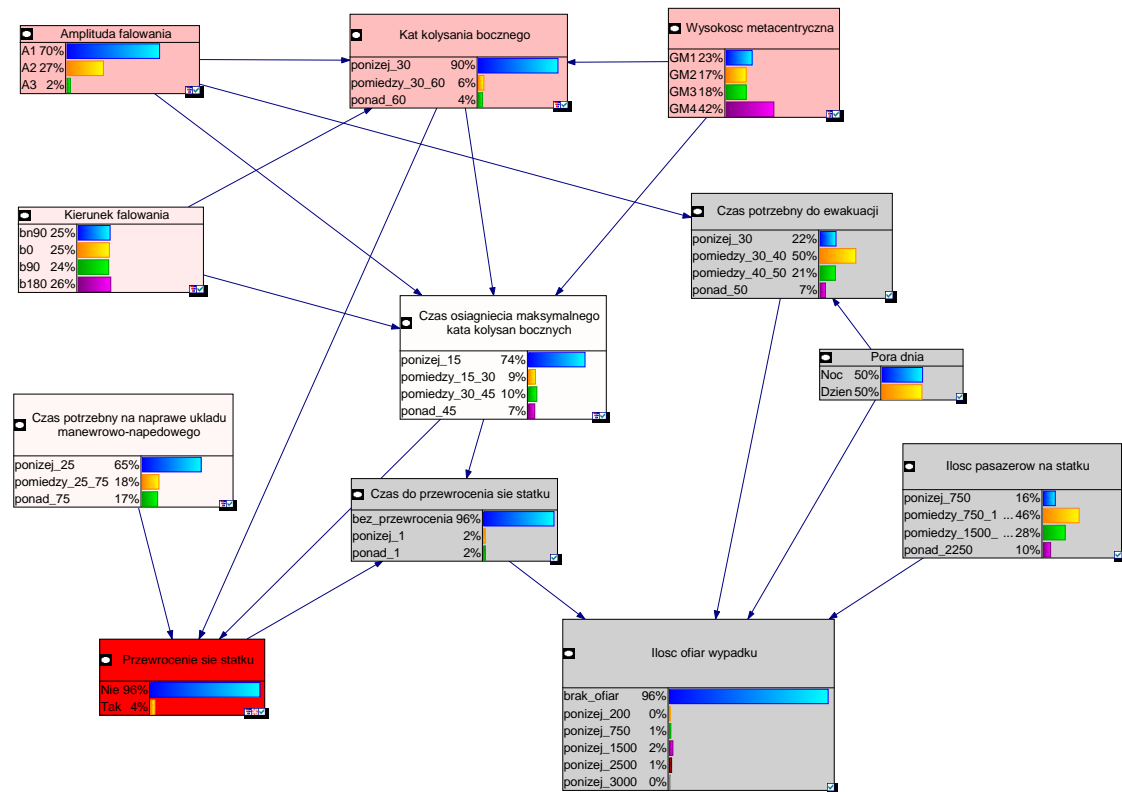
#### 4.4.2. Analiza czułości

Analiza czułości umożliwia zbadanie jak czułe są wyniki uzyskane z modelu ryzyka na zmianę poszczególnych zmiennych[105]. W tym celu należy wyznaczyć funkcję czułości dla każdego pojedynczego węzła w sieci[23]:

$$f(t) = \frac{(c_1 t + c_2)}{(c_3 t + c_4)}, \quad (4.46)$$

gdzie  $f$  jest wyjściowym prawdopodobieństwem dla danych obserwacji (wejść),  $c_1, c_2, c_3$  oraz  $c_4$  są stałymi. Wpływ małych zmian parametrów wejściowych na wynik nazywany jest czułością. Czułość wyznacza się z pierwszej pochodnej funkcji czułości (zobacz 4.46).

Rysunek 4.8 zawiera graficzny wynik analizy czułości modelu przy założeniu, że wynikową zmienną jest 'Ilość ofiar wypadku'.



Rysunek 4.9. Analiza czułości sieci Bayes'a dla modelu ryzyka - zmienna 'Przewrócenie się statku'

Z zamieszczonej grafiki wynika, że największy wpływ na wyniki z modelu ryzyka mają zmienne 'Przewrócenie się statku', 'Czas do przewrócenia się statku' oraz 'Czas potrzebny do ewakuacji'. Zmienne 'Przewrócenie się statku' oraz 'Czas do przewrócenia się statku' uznajemy za jedne z najważniejszych w modelu modelowanego przy użyciu symulacji oraz dodatkowych przekształceń. Zmienna 'Czas potrzebny do ewakuacji' została zamodelowana przy użyciu danych z literatury. Jest to słabość tego modelu. Jeżeli sieć Bayes'a miałyby być zastosowana w praktyce, należałoby pogłębić i przygotować lepszy model ewakuacji.

Podobną analizę wykonano dla zmiennej objaśnianej 'Przewrócenie się statku', co pokazuje rysunek 4.9.

W przypadku gdy analizowaną zmienną jest 'Przewrócenie się statku' nie da się zaobserwować żadnej silnie dominującej zmiennej. Średnio dominującymi zmiennymi są 'Amplituda falowania', 'Kąt kołysania bocznego' oraz 'Wysokość metacentryczna'.

#### 4.4.3. Analiza „wartości informacji”

Analiza wartości informacji identyfikuje najbardziej informacyjne zmienne, z uwzględnieniem zmiennych wyjściowych[109]. Metoda „wartości informacji” opiera się na wyznaczeniu entropii Shannon’a –  $H(X)$ , jako miary wielkości informacji związanej z daną zmienną. Entropia ta jest obliczana przy pomocy wzoru[73]:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \ln p(x_i), \quad (4.47)$$

gdzie  $X$  to zmienna losowa o  $n$  stanach oraz gdzie  $p(x_i)$  jest prawdopodobieństwem uzyskania  $x_i$ .

Zerowa entropia oznacza, że wyniki modelu są w pełni przewidywalne. Maksymalna entropia opisuje przypadek pełnej nieprzewidywalności wyników, a każde wywołanie modelu dostarcza nowych informacji, które nie są dostępne bez wywołania modelu.

Dla zmiennych, które są warunkowo zależne od innych należy wyznaczyć miarę niepewności przy pomocy wzoru na warunkową entropię  $H(XY)$ :

$$H(XY) = \sum p(x_i, y_i) \ln \frac{p(x_i)}{p(x_i, y_i)}, \quad (4.48)$$

gdzie  $p(x_i, y_i)$  jest prawdopodobieństwem, że zmienne  $X$  i  $Y$  są odpowiednio w stanie  $x_i$  oraz  $y_i$ .

Warunkowa entropia jest obliczana dla każdej pary zmiennych ( $XY$ ) występujących w modelu. Wyniki analizy „wartości informacji” dla przedstawionego modelu ryzyka zamieszczono w Tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Analiza „Wartości informacji”

<b>Zmienna</b>	<b>Entropia</b>
Czas do przewrotki	0.15
Przewrócenie się statku	0.15
Kąt kołysań bocznych	0.14
Ilość pasażerów na statku	0.03
Wysokość metacentryczna	0.02
Czas osiągnięcia kąta	$6.98E - 3$
Amplituda falowania	$2.32E - 3$
Kierunek falowania	$1.42E - 3$
Czas potrzebny na naprawę	$1.65E - 4$
Czas potrzebny do ewakuacji	$1.29E - 4$
Pora dnia	$7.42E - 6$
<b>Ilość ofiar</b>	<b>0.2</b>

Entropia dla zmiennej „Ilość ofiar wypadku” wynosi  $H = 0.2$ , taka wartość wskazuje, że wyniki modelu są w miarę przewidywalne. Tabel 4.11 zawiera także informacje na temat entropii krzyżowych.

## 4.5. Podsumowanie

W rozdziale tym przedstawiono model ryzyka wypadku statecznościowego statku w stanie bezenergetycznym. Zaprezentowano podstawowe narzędzia wykorzystane do zbudowania modelu jakim jest sieć Bayes'a. Pokazano metody budowy tej sieci wraz z jej walidacją. Przedstawiono opis parametrów sieci wraz z narzędziami użytymi do ich stworzenia. Model ryzyka zaprezentowany w tym rozdziale zostanie użyty w kolejnym rozdziale. Jednym ze słabiej udokumentowanych elementów modelu jest zmienna „Czas ewakuacji”. Model ten jest bardzo prosty i wymaga dalszych prac nad nim. Jeżeli model ryzyka miałby być używany podczas eksploatacji należałoby dokonać analizy ewakuacji przy użyciu symulacji [133][74][38] [125]. Kolejnym elementem modelu ryzyka, który można ulepszyć jest szacowanie prawdopodobieństwa uszkodzenia układu napędowo-manewrowego [124]. Parametry związane z ruchem statku na fali zostały oszacowane przy użyciu symulacji na fali regularnej.

## 5. Zastosowanie modelu ryzyka wypadku Dead Ship Condition do statku RoPax

W niniejszym rozdziale dokonano porównania obecnie stosowanych metod oceny bezpieczeństwa statecznościowego z wynikami otrzymanymi z metody opartej na analizie ryzyka.

Porównanie dwóch metod ma posłużyć do pokazania możliwości zastosowania ryzyka do oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku. Porównanie takie może pokazać jak bezpieczne są statki budowane zgodnie ze współczesnymi przepisami.

Do porównania wykorzystano statek typu RoPax opisany w podrozdziale 5.1[90].

### 5.1. Projekt statku typu RoPax

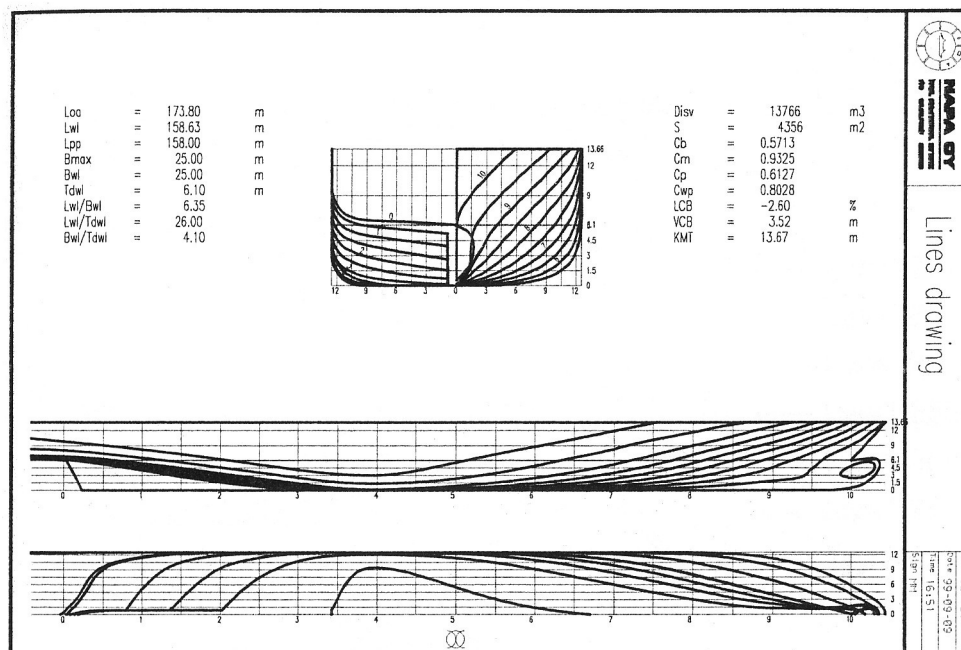
Tabela 5.1 zawiera podstawowe wymiary i właściwości hydrostatyczne kadłuba, który został użyty w analizie ryzyka. Linie teoretyczne kadłuba pokazane są na rysunku 5.1, rysunek 5.3 przedstawia profil kadłuba wraz z częścią nadwodną.

Nazwa	symbol	jednostka	
Długość między pionami	$L_{PP}$	[m]	158
Szerokość	$B$	[m]	25
Zanurzenie	$T$	[m]	6.1
Wysokość boczna	$H$	[m]	15
Wypór	$\nabla$	[m <sup>3</sup> ]	13766
Powierzchnia zwilżona	$S$	[m <sup>2</sup> ]	4356
Współczynnik pełnotliwości	$C_B$	—	0.571

Tabela 5.1. Podstawowe parametry statku typu RoPax[90]

Do wykonania klasycznych obliczeń statecznościowych oraz do badania zgodności projektu statku z obowiązującymi przepisami użyto modelu zaprezentowanego na rysunku 5.2. Model ten nie zawiera żadnych redukcji wynikających z zastosowania dziobowych pędników oraz innych elementów zmniejszających objętość kadłuba. W obliczeniach ruchu statku na fali użyto modelu hydrodynamicznego pokazanego na rysunku 5.4.

W scenariuszu Dead Ship Condition ważnym elementem jest profil statku, który użyty jest w procesie sprawdzania kryterium pogody, a także badania wpływu obciążeń



Rysunek 5.1. Linie teoretyczne statku RoPax[90]

od wiatru na ruch statku. Profil użyty w obliczeniach zaprezentowany został na rysunku 5.3.

### 5.1.1. Hydrostatyka i stany załadowania

Podstawowe własności hydrostatyczne statku, użytego jako przykład w niniejszej rozprawie przedstawiono w Tabeli 5.2.

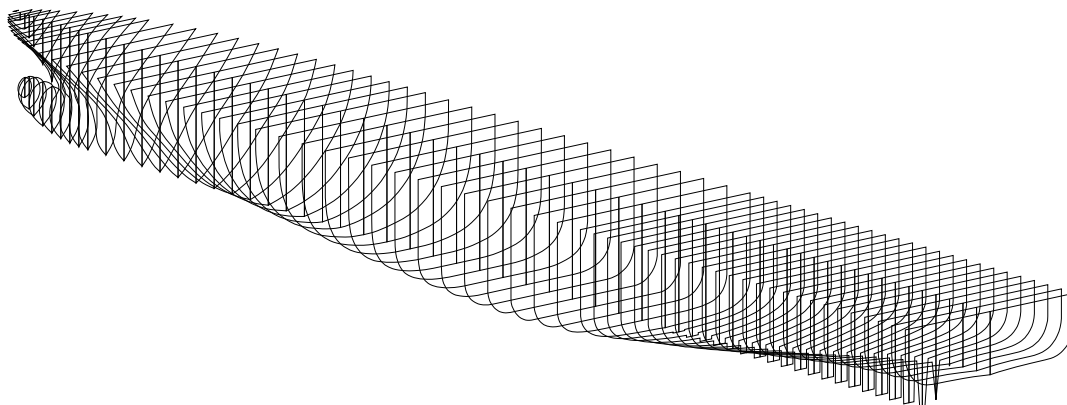
Do obliczeń przyjęto 4 stany ładunkowe, dla zanurzenia 6.1.

Stan załad.	Zanurzenie	Wyporność	GM	$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$
LC01	6.10	13766	0.3032	$0.2095E + 10$	$0.2126E + 11$	$0.2126E + 11$
LC02	6.10	13766	0.9807	$0.2095E + 10$	$0.2126E + 11$	$0.2126E + 11$
LC03	6.10	13766	1.1083	$0.2095E + 10$	$0.2126E + 11$	$0.2126E + 11$
LC04	6.10	13766	2.2936	$0.2095E + 10$	$0.2126E + 11$	$0.2126E + 11$

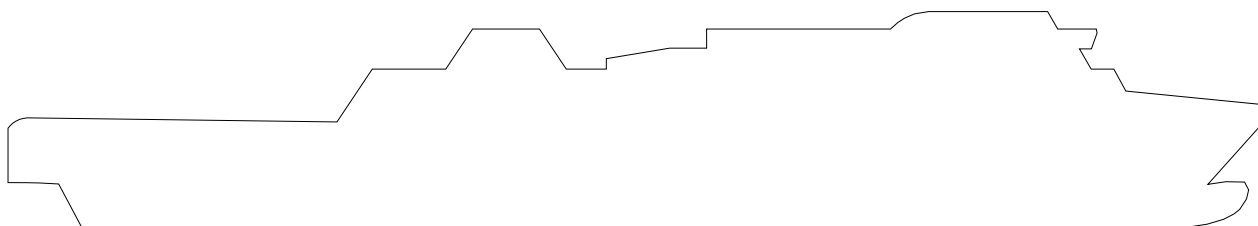
Tabela 5.2. Stany załadowania użyte w analizie stateczności i ryzyka

Do wyznaczenia momentów bezwładności użyto wzorów[71]:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= k_{xx}^2 \rho \nabla \\
 I_{yy} &= k_{yy}^2 \rho \nabla \\
 I_{zz} &= k_{zz}^2 \rho \nabla.
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$



Rysunek 5.2. Kadłub zastosowany do obliczeń statecznościowych

Rysunek 5.3. Profil kadłuba statku *RoPax*

Współczynniki  $k_{xx}$   $k_{yy}$   $k_{zz}$  zależą od rozkładu masy. Jednak dla kształtu zastosowanego do analizy nie istnieje podział przestrzenny i dlatego też nie da się wyznaczyć dokładnego rozkładu masy. W związku z tym zastosowano podejście przedstawione w pracy Journee i Massie[71]:

$$k_{xx} \approx 0.3 \times B \text{ do } 0.4 \times B, \quad (5.2)$$

$$k_{yy} \approx 0.22 \times L \text{ do } 0.28 \times L, \quad (5.3)$$

$$k_{zz} \approx 0.22 \times L \text{ do } 0.28 \times L, \quad (5.4)$$

Wartości momentów bezwładności przedstawione są w Tabeli 5.2.

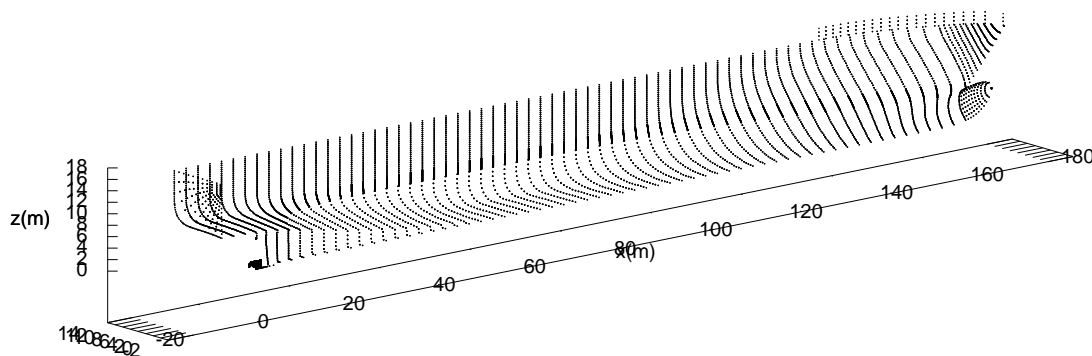
### 5.1.2. Analiza stateczności zgodnie z Kodeksem Statecznościowym

Do oceny stateczności statku w stanie nieuszkodzonym zastosowano następujące przepisy:

- Kodeks statecznościowy[65],
- Przepisy DNV dla statków[28];

Statek będący na otwartym morzu musi spełnić następujące standardy dotyczące stateczności w stanie nieuszkodzonym:





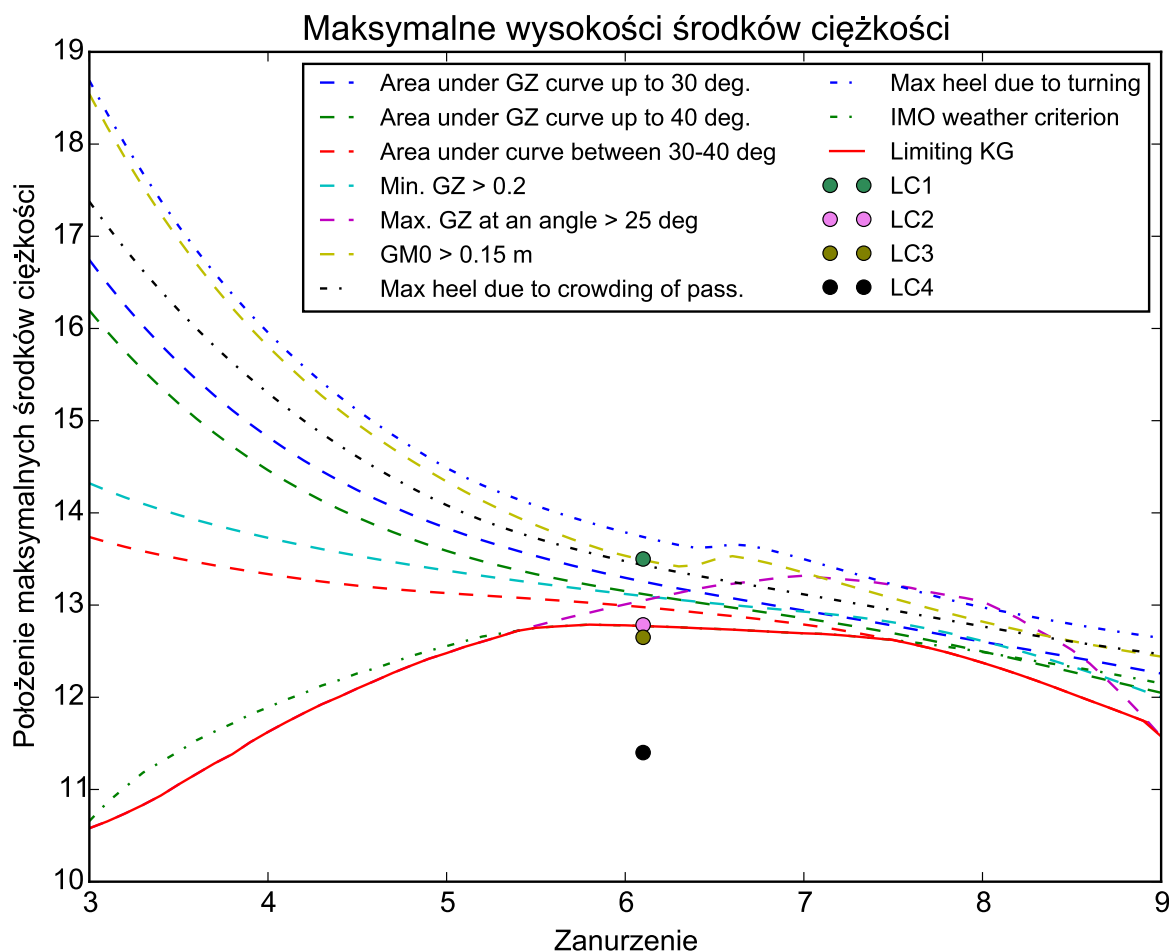
Rysunek 5.4. Model do obliczeń w programie Laidyn

- Rezolucja IMO A.749,
- Przepisy DNV dla statków, część 3, rozdział 3, podrozdział 9, punkt D101 (przepisy wymienione powyżej są identyczne):
  - pole pod krzywą ramion prostujących nie może być mniejsze niż:
    - 0.055 metro-radianów przy kątach przechyłu do  $30^{\circ}$ ,
    - 0.09 metro-radianów przy kątach przechyłu do  $40^{\circ}$ , lub do kąta dolnej krawędzi każdego z otworów w kadłubie, nadbudówce, nie będącego otworem wodoszczelnym ( $Q_f$ ),
    - 0.030 metro-radianów dla kątów pomiędzy 30 i 40 stopni lub pomiędzy kątem 30 oraz kątem  $Q_f$ ,
  - ramię prostujące powinno być nie mniejsze niż 0.20 metra dla kąta równego lub większego od 30 stopni,
  - zaleca się aby maksymalne ramię prostujące występowało conajmniej dla 30 stopni przechyłu, ale nie mniej niż 25 stopni,
  - początkowa wysokość metacentryczna nie może być mniejsza niż 0.15 metra.

Do analizy stateczności użyto oprogramowania NAPA w wersji 2014.1 wraz z zaimplementowanymi kryteriami.

Standardowy dokument statecznościowy tworzony w procesie projektowania statku to krzywa minimalnych wysokości metacentrycznych oraz maksymalnych środków ciężkości. Pokazuje on dla jakich stanów załadowania statek spełnia kryteria zawarte w Kodeksie a dla jakich kryteria nie są spełnione. Krzywa minimalnych GM znajduje się na rysunku 5.6, zaś rysunek 5.5 prezentuje krzywą maksymalnych środków ciężkości. Rysunki 5.5 oraz 5.6 przedstawiają także stany załadowania użyte w symulacji.

Z analizy rysunków 5.6 i 5.5 wynika, że stan LC1 nie spełnia obecnie obowiązujących przepisów. Pozostałe stany załadowania spełniają kryteria przy czym stan LC2 leży dokładnie na krzywej limitującej. Zgodnie z obowiązującym współcześnie podejściem stanu LC1 nie można uznać za bezpieczny, zaś pozostałe stany są uważane za bezpieczne.

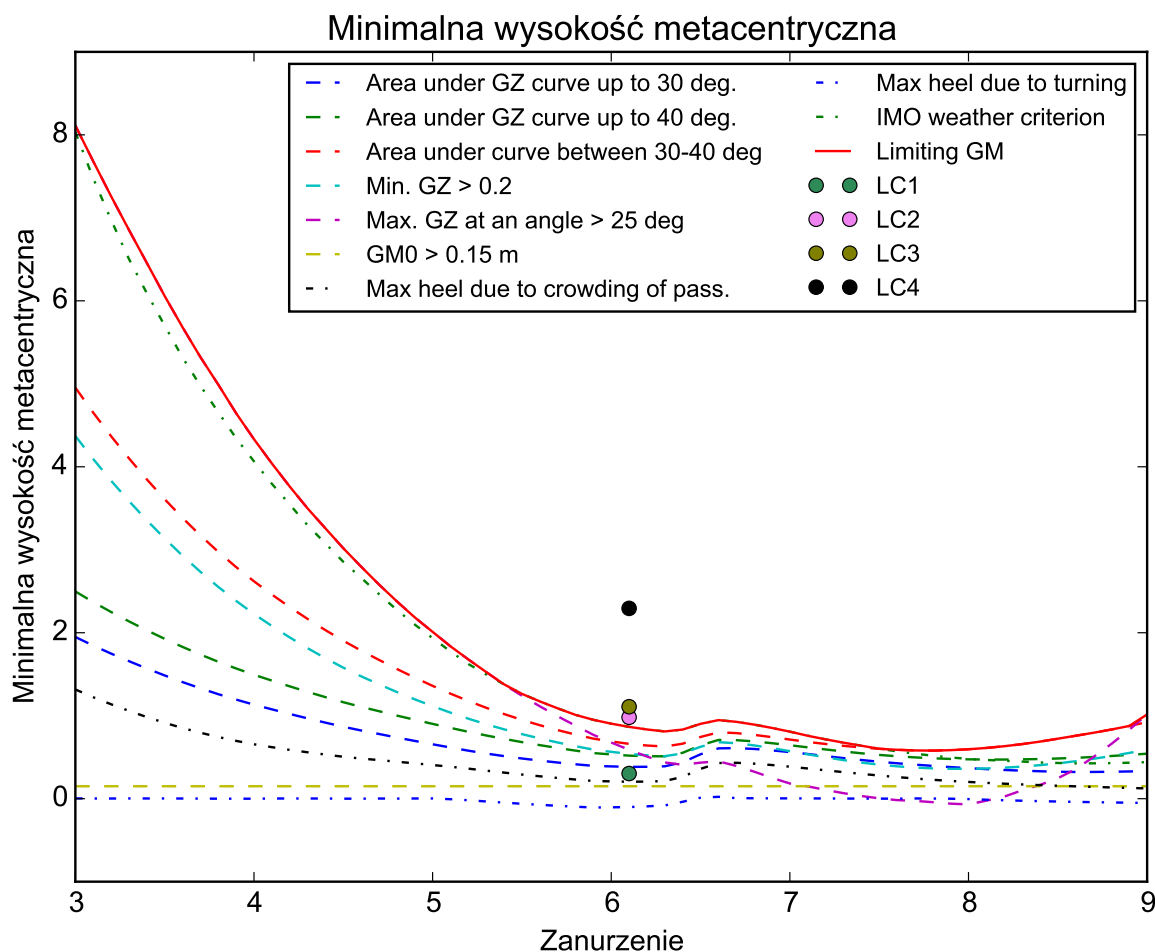


Rysunek 5.5. Krzywe graniczne dla maksymalnych wysokości środków ciężkości (max KG)

## 5.2. Analiza ryzyka wypadku statecznościowego

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano numeryczny model ruchu statku na fali. Przeprowadzono 17388 symulacji ruchu statku na fali. Każda symulacja odpowiadała jednej godzinie w czasie rzeczywistym. W symulacjach wykorzystano cztery stany załadowania, które użyto także w badaniach stateczności zgodnie z Kodeksem Statecznościowym. W niniejszym przykładzie przyjęto, że wysokość metacentryczna jest dobrą charakterystyką stanu załadowania, jeżeli przyjmie się niezmiennosc zanurzenia. Przyjęto pewien rozkład prawdopodobieństwa pływania w danym stanie załadowania. Rozkład ten jest przedstawiony w tabeli 5.3.

Kolejnym ważnym parametrem symulacji jest kierunek falowania. W procesie projektowania przyjmuje się często, że każdy z kierunków falowania jest równo prawdopodobny.



Rysunek 5.6. Krzywe graniczne dla minimalnych wysokości metacentrycznych (min KG)

Takie samo założenie przyjęto również w symulacjach w niniejszej pracy. Tabela 5.4 zawiera rozkład prawdopodobieństw dla poszczególnych kierunków falowania.

Wysokości i okresy fali regularnej brane były z prawdopodobieństwem zgodnym z danymi z Tabeli 4.8, która została zaprezentowana w części 4.3.2. Na podstawie znaczącej wysokości fali określono także prędkość wiatru na podstawie wzoru (patrz także część 4.3.2 oraz wzory 5.5 i 4.15)[67]. W obliczeniach związanych z kryterium pogody, oraz w drugiej generacji przepisów statecznościowych zakładada się, że statek nie ma prędkości postępowej. W niniejsze pracy zastosowano identyczne założenie. Statek na początku symulacji ma prędkość 0 węzłów.

W podrozdziale 4.3.3 przedstawiono strukture modelu ruchu statku na fali „LaiDyn”. Z części liniowej otrzymano masy wody towarzyszącej, tłumienie, a także odpowiedzi statku na falę o jednostkowej amplitudzie (RAO). Rysunki od 5.7 do 5.10 przedstawiają

Tabela 5.3. Prawdopodobieństwo pływania z danym GM

<b>GM</b>	<b>Prawdopodobieństwo</b>
0.3032	0.1919
0.9807	0.1269
1.1083	0.1305
2.2936	0.5507

Tabela 5.4. Prawdopodobieństwo falowania z danego kierunku

<b>Beta</b>	<b>Prawdopodobieństwo</b>
−180 — −90	0.25
−90 — 0	0.25
0 — 90	0.24
90 — 180	0.26

wykresy RAO dla czterech stanów dla ruchu „Kołysania bocznego”. Każdy z wykresów zawiera linie dla każdego z kątów kursowych.

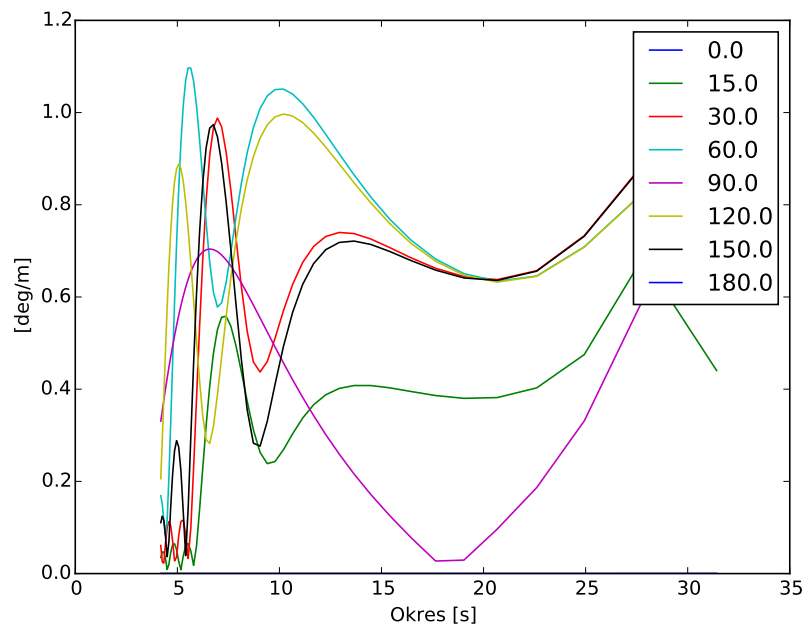
Ze struktury modelu ryzyka zaprezentowanego na rysunku 5.11 wynika, że cztery zmienne, tj:

- kąt kołysania bocznego,
- czas osiągnięcia maksymalnego kąta kołysań bocznych,
- przewrócenie się statku,
- czas do przewrócenia się statku;

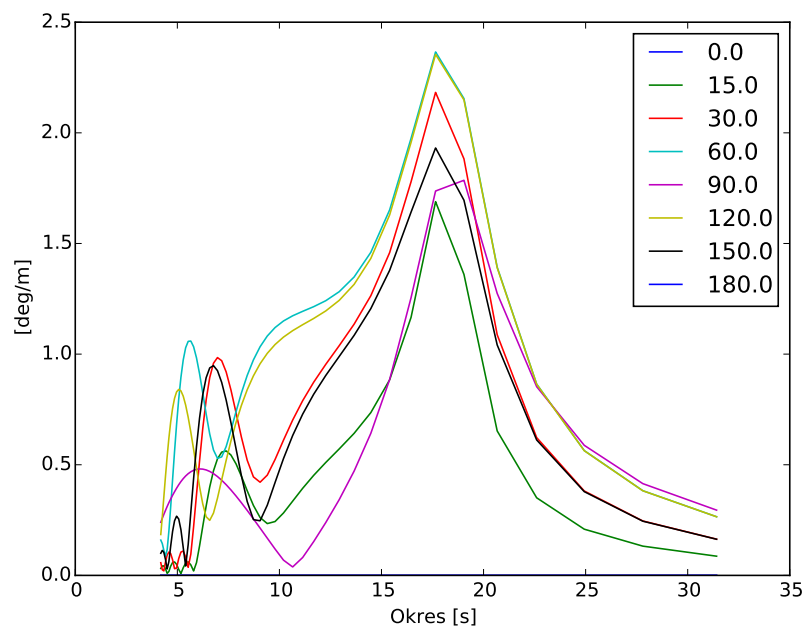
uzyskuje się bezpośrednio lub pośrednio w wyniku badania zachowania się statku na fali.

$$V_A = \left( \frac{H_S}{0.06717} \right)^{\frac{1}{1.5}}. \quad (5.5)$$

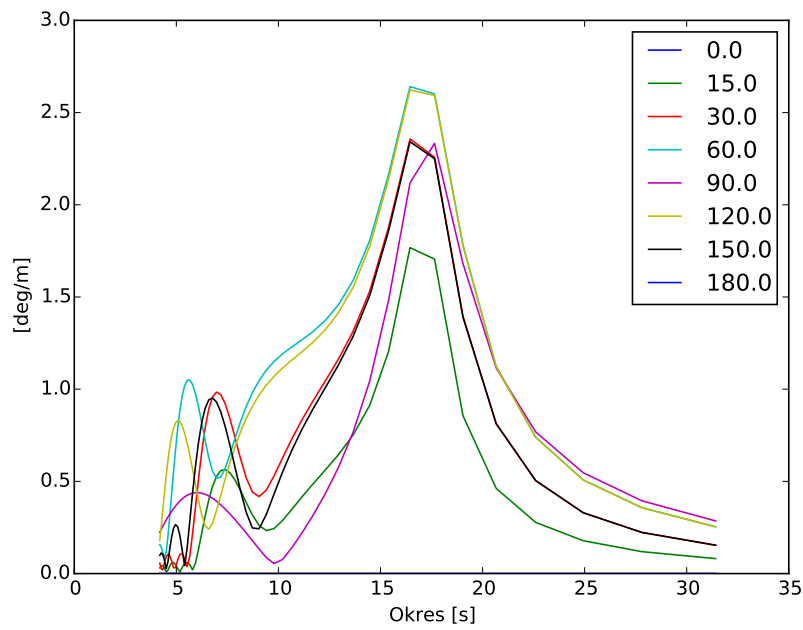
Rozkłady prawdopodobieństw poszczególnych klas w modelu ryzyka można zobaczyć na rysunku 5.11.



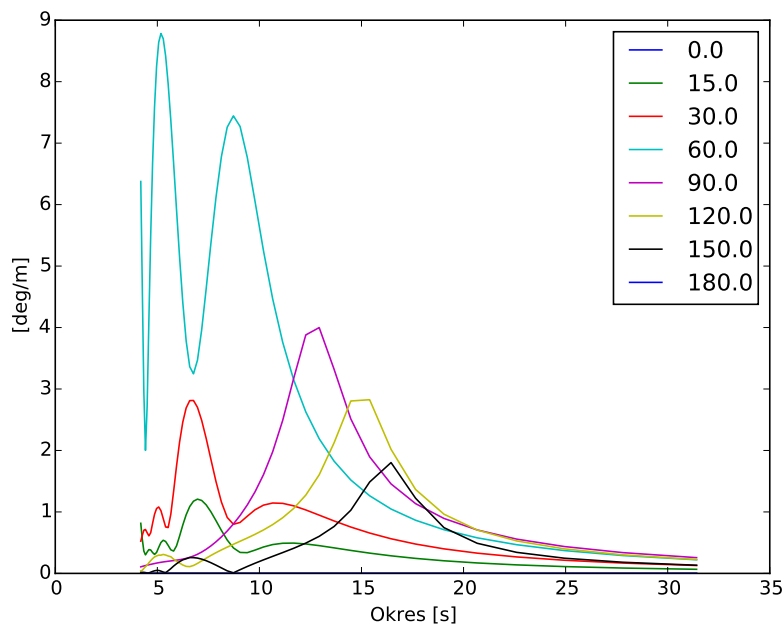
Rysunek 5.7. Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC1 - ruch „Kołysanie boczne”



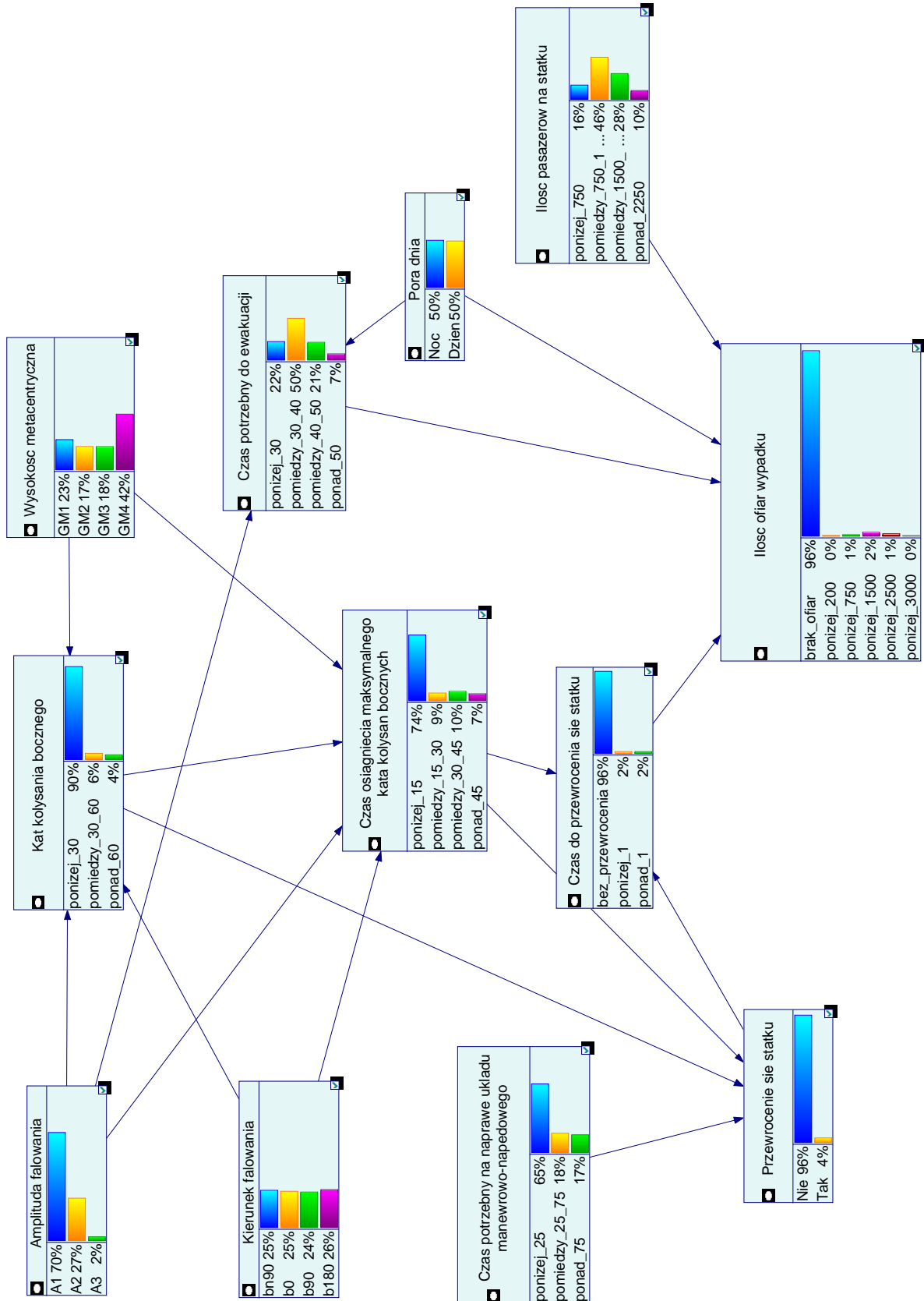
Rysunek 5.8. Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC2 - ruch „Kołysanie boczne”



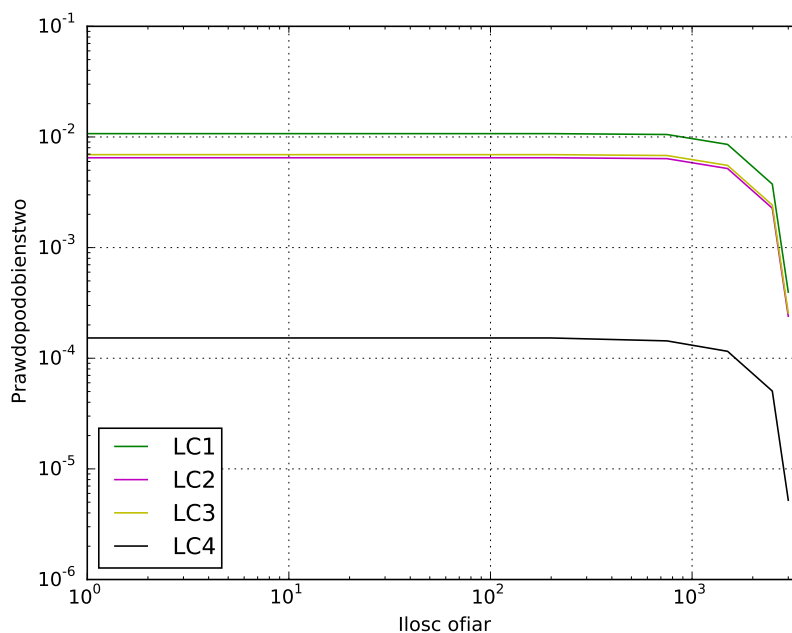
Rysunek 5.9. Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC3 - ruch „Kołysanie boczne”



Rysunek 5.10. Wykres odpowiedzi statku dla stanu załadowania LC4 - ruch „Kołysanie boczne”



Rysunek 5.11. Ogólna struktura modelu ryzyka



Rysunek 5.12. Krzywe FN dla analizowanego statku *RoPax* w stanie *DSC* dla różnych stanów załadowania

Parametry modelu ryzyka zaprezentowanego w tabeli 5.5 przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 5.13. Na przekątnej znajdują się histogramy poszczególnych zmiennych, zaś elementy powyżej i poniżej głównej przekątnej prezentują relacje między każdą z par dwóch zmiennych. Rozkłady prawdopodobieństw z Tabeli 5.5 pokrywają się z histogramami na przekątnej z rysunku 5.13.

Jak wspomniano wcześniej wynikiem analizy ryzyka wypadku statecznościowego są krzywe FN.

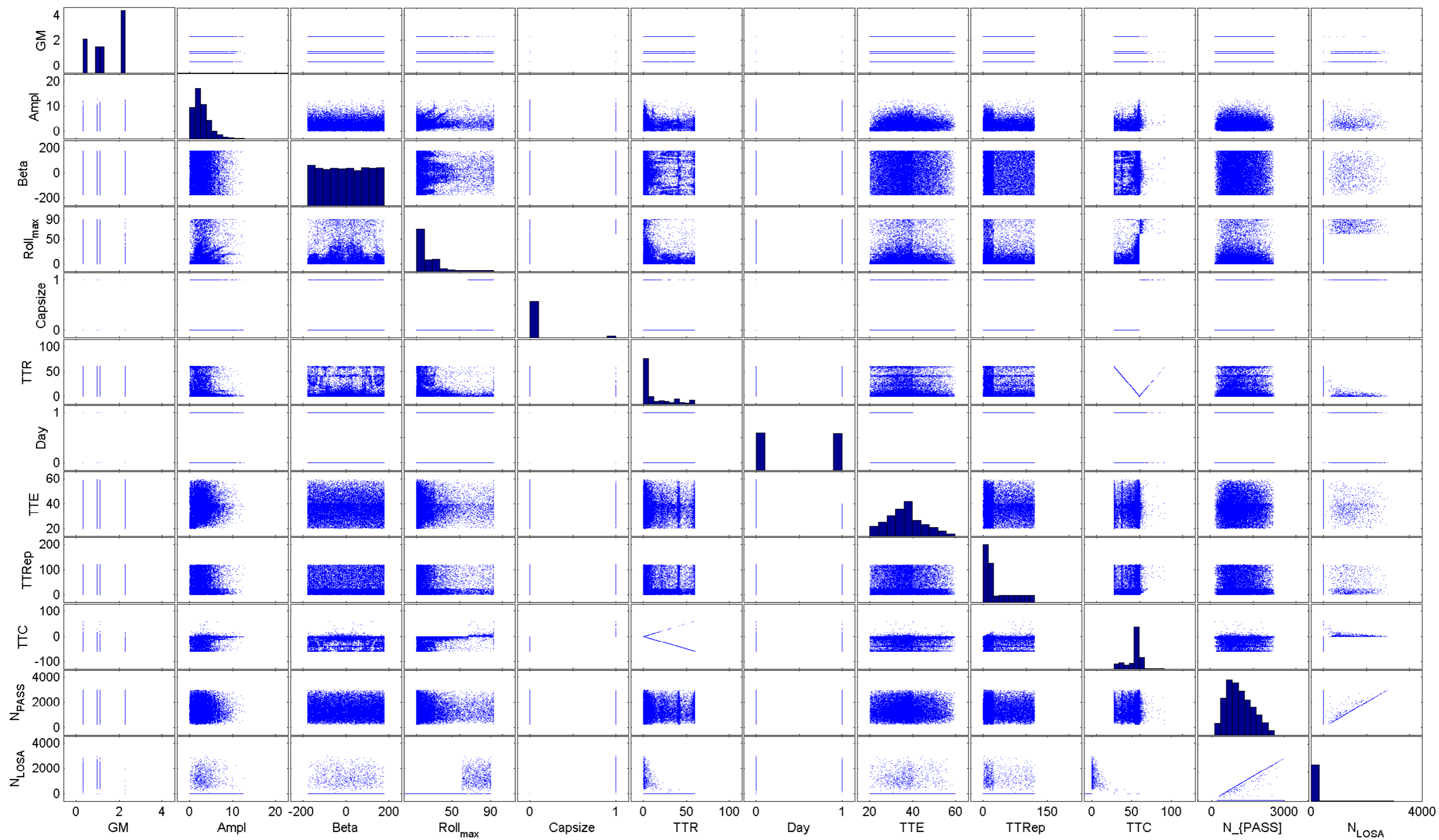
Poszczególne krzywe FN na rysunku 5.12 odpowiadają poszczególnym stanom załadowania (*LC1*—*LC4*) przedstawionym w podrozdziale 5.1.1. Położenie poziome poszczególnych krzywych pokazuje, że im *GM* wyższe tym potencjalnie będzie mniej ofiar wypadku.

Stan załadowania oznaczony kodem *LC4* ma najwyższe *GM*. Stan ten spełnia obecne wymagania statecznościowe z nawiązką. Wykres FN też to potwierdza.

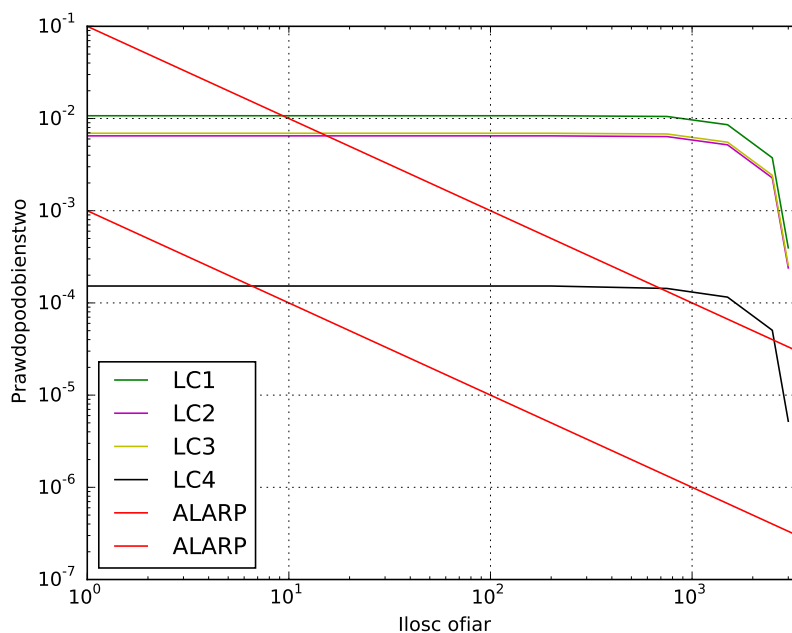


Tabela 5.5. Rozkłady prawdopodobieństw poszczególnych zmiennych w modelu

<b>Symbol zmiennych</b>	<b>Stan</b>	<b>Prawdopodobieństwo</b>
$Roll_{max}$	$Roll_{max} < 30$	0.91
	$30 < Roll_{max} < 60$	0.05
	$Roll_{max} > 60$	0.04
$Beta$	$Beta < -90$	0.25
	$-90 < Beta < 0$	0.24
	$0 < Beta < 90$	0.25
	$Beta > 90$	0.26
$TTR$	$TTR < 15$	0.70
	$15 < TTR < 30$	0.10
	$30 < TTR < 45$	0.12
	$TTR > 45$	0.08
$TTE$	$TTE < 30$	0.22
	$30 < TTE < 40$	0.50
	$40 < TTE < 50$	0.21
	$TTE > 50$	0.07
$DAY$	Noc	0.51
	Dzień	0.49
$TTRep$	$TTRep < 25$	0.65
	$25 < TTRep < 75$	0.19
	$TTRep > 75$	0.16
$TTC$	$TTC < 0$	0.96
	$0 < TTC < 1$	0.01
	$TTC > 1$	0.02
$N_{PASS}$	$N_{PASS} < 750$	0.15
	$750 < N_{PASS} < 1500$	0.47
	$1500 < N_{PASS} < 2250$	0.29
	$N_{PASS} > 2250$	0.09
$N_{LOSA}$	$N_{LOSA} = 0$	0.96
	$0 < N_{LOSA} < 200$	0.00
	$200 < N_{LOSA} < 750$	0.01
	$750 < N_{LOSA} < 1500$	0.02
	$1500 < N_{LOSA} < 2500$	0.01
	$2500 < N_{LOSA} < 3000$	0.00



Rysunek 5.13. Wykres danych wejściowych użytych w modelu ryzyka



Rysunek 5.14. Krzywa FN dla analizowanego statku *RoPax* w stanie *DSC* z zaznaczonym obszarem *ALARP*

### 5.3. Podsumowanie

W rozdziale tym przedstawiono analizę stateczności przy wykorzystaniu obecnie obowiązujących przepisów. Do analizy wykorzystano cztery stany załadowania statku. Trzy z nich spełniają obecnie obowiązujące kryteria. Z analizy ryzyka natomiast wynika, że tylko jeden ze stanów załadowania można uznać za bezpieczny.

Dla obecnie obowiązujących przepisów nie wykonano oceny poziomu bezpieczeństwa. Nie wiadomo więc jak bardzo bezpieczne są statki budowane z ich użyciem. Jedynie analiza ryzyka potrafi pokazać jak bardzo statek jest bezpieczny. Miarą bezpieczeństwa jest krzywa FN.

Rysunek 5.14 jest rozwinięciem wykresu z rysunku 5.12 i zawiera dodatkowo obszar *ALARP*. Z analizy wykresu FN nałożonego na obszar *ALARP* wynika, że tylko stan załadowania *LC4* zawiera się praktycznie w całości w tym obszarze, albo jest poniżej tego obszaru. Pozostałe stany załadowania wychodzą poza ten obszar. Należy przyjąć, że stany te nie są bezpieczne. Dla rzeczywistego projektu, należałoby w gronie ekspertów wykonać trzeci etap Formalnej Oceny Bezpieczeństwa dla tego statku, tj. wyznaczyć opcje kontroli ryzyka. Z doświadczenia projektowego wynika, że należałoby dokonać sprawdzenia stanów załadowania, tj. sprawdzenia, czy takie stany są realne. W dalszej kolejności można by dokonać weryfikacji szacowania masy, w przypadku kiedy jeszcze nie istnieją wyniki próby przechyłu. Jeżeli poprzednie czynności nie dałyby odpowiednich rezultatów należałoby dokonać modyfikacji kształtu kadłuba. Można by

także opracować instrukcję operacyjną z podstawowymi informacjami o ograniczeniach w stanie załadowania i rejonach pływania.

## 6. Wnioski i rekomendacje dla dalszych prac

Stateczność w stanie nieuszkodzonym jest jedną z głównych właściwości eksploatacyjnych statku. Jest to też jeden z głównych elementów determinujących bezpieczeństwo statku. Stąd też jest ona również jednym z głównych elementów konwencji międzynarodowych dotyczących okrętownictwa, a także przepisów poszczególnych towarzystw klasyfikacyjnych. Wobec tego, nie da się projektować statków bez uwzględnienia stateczności.

Rozwój przepisów statecznościowych odbywał się na przestrzeni wielu dziesięcioleci. Dzięki temu wypadki statecznościowe nie pojawiają się bardzo często, ale nadal ich skutki są bardzo poważne i mają wpływ na ludzi, środowisko, a także na przewożony ładunek.

W niniejszej pracy przedstawiłem możliwość zastosowania analizy ryzyka wypadku DSC do oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku. Takie podejście jest możliwe do zastosowania, zwłaszcza w przypadku nowatorskich konstrukcji, odbiegających od współcześnie budowanych statków.

Ryzyko odnosi się do przyszłych zdarzeń. W jego opisie jednak stosuje się doświadczenie wynikające ze zdarzeń z przeszłości. Doświadczenie to wynika z naszej wiedzy w zakresie projektowania statku, jego eksploatacji oraz własności hydrodynamicznych.

W pracy potwierdzono hipotezę, iż możliwe jest zastosowanie analizy ryzyka do oceny bezpieczeństwa statecznościowego. Hipotezę potwierdziły wyniki badań przedstawione w rozdziałach 4 i 5. W pracy przedstawiono koncepcję modelu ryzyka DSC, sposoby określenia struktury modelu i jego parametryzacji.

Pierwotna koncepcja pracy powstała pod wpływem studiów literaturowych tematu. Studia te dały bazę, która rozwinęła się pod wpływem rozmów z ekspertami z zakresu analizy ryzyka oraz stateczności. Literatura i opinie ekspertów pozwoliły zbudować strukturę modelu. Struktura modelu została wypełniona danymi z literatury, symulacji oraz obliczeń. Model ryzyka stworzony w ramach niniejszej rozprawy jest ciekawym narzędziem, które może być stosowane do przewidywania prawdopodobieństwa wypadku statecznościowego. Model też w miarę dobrze przewiduje ilość ofiar takiego wypadku.

Analiza ryzyka jako narzędzie do oceny bezpieczeństwa statecznościowego statku w stanie nieuszkodzonym ma swoje zalety, ale także wady.

Dużą zaletą stosowania metod opartych o analizę ryzyka jest możliwość zastosowania ich w projektach nowych, czy wręcz nowatorskich, które nie mogą być oparte o dane z poprzednich projektów. W projektowaniu bardzo nowoczesnych statków czy obiektów oceanotechnicznych można stosować badania modelowe czy symulacje komputerowe. Takie podejście umożliwi szacowanie pewnych właściwości w sposób dużo dokładniejszy niż przy zastosowaniu prostych wzorów empirycznych opartych na doświadczeniach.

Przy zastosowaniu przepisów preskrypcyjnych w projektowaniu statków projektant jest przez nie ograniczony. Natomiast analiza ryzyka umożliwia daleko idące modyfikacje projektów, które dają wolną rękę projektantowi. Projektant nie jest ograniczony przepisami, które często bazują na danych z minionych dziesięcioleci. Dla statków nowatorskich często ciężko spełnić obecnie obowiązujące przepisy. Ten sam problem występuje także dla statków o nietypowym profilu operacyjnym, np. dla statków do układania kabli, czy jednostek zaopatrujących platformy wiertnicze. Często w procesie projektowania statków wycieczkowych, promów, czy też statków typu RoPax występuje problem ze spełnieniem kryterium pogody. Dla statków o klasycznej budowie, istniejące przepisy są wystarczające, nie występują żadne specjalne problemy ze spełnieniem przepisów znajdujących się w Kodeksie Statecznościowym.

Analiza ryzyka w ocenie tylko jednego ze scenariuszy może być stosowana z tym, że takie zawężenie nie jest praktyczne. Dużo lepsze efekty daje zastosowanie całościowego podejścia z wykorzystaniem różnych scenariuszy. Analiza ryzyka może dać całościowy pogląd na przyczyny i skutki wypadku, a także badać wpływ RCO na ryzyko.

Analiza ryzyka wraz z jego szacowaniem, może być w prosty sposób dołączona do procesu projektowania. Poprzez zastosowanie odpowiedniego oprogramowania, analiza ryzyka może stać się częścią procesu optymalizacyjnego. Coraz częściej spotykane są projekty statków w całości lub częściowo stworzone przy użyciu oceny i analizy ryzyka[115][85][134][79].

Do wad analizy ryzyka można zaliczyć przede wszystkim duże koszty związane z czasochłonnym eksperymentem czy to badaniami modelowymi, ale także eksperymentem numerycznym. Nie chodzi tu tylko o pieniądze, ale także o czas i personel. Aby móc wykonać dokładną analizę ryzyka należy skompletować grupę ekspertów, co może być trudne do zrealizowania w niedużym biurze projektowym.

Brak dobrych modeli prawdopodobieństwa przewrócenia się statku utrudnia dokładne szacowanie ryzyka. W wielu dziedzinach techniki brak modeli prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku zastępowany jest bogatym materiałem statystycznym. Dla wypadków statecznościowych takie podejście nie może być stosowane, gdyż materiał statystyczny jest ubogi a analizowane wypadki nie mają cech powtarzalności.

Obecnie w wielu ośrodkach naukowych trwają prace nad zastosowaniem analizy i oceny ryzyka w okrętownictwie. Niniejsza praca wpisuje się w ten trend. Praca jest jedną z nielicznych w dziedzinie stateczności dotycząca stanu nieuszkodzonego, gdyż obecnie najczęściej pracuje się nad zastosowaniami analizy i oceny ryzyka kolizji[105], osiadania na mieliźnie[97][98], pożarów[39] oraz stateczności w stanie uszkodzonym[135]. Takie ukierunkowanie wpływa na szersze zainteresowanie statecznością w stanie uszkodzonym. Dlatego istnieje więcej modeli ryzyka z tego zakresu.

Model ryzyka zaprezentowany w pracy jest na tyle ogólny, że po nieznacznej jego rozbudowie można go zastosować także dla innych scenariuszy wypadku statecznościowego. Wskazane jest dalsze prowadzenie badań w kierunku rozszerzenia modelu o dodatkowe elementy, tak aby móc go zastosować do innych scenariuszy, tj: oblodzenia statku, rezonansu parametrycznego, ryzykownych manewrów oraz przesuwania się ładunku.

Czasochłonność i duże koszty powodują, że metoda ta nie sprawdzi się w procesie projektowania klasycznych statków o nieskomplikowanej budowie. Konwencja SOLAS

zezwała na zastosowanie metod alternatywnych w tym zakresie projektowania statków. Dla kryterium pogody można stosować badania modelowe. W zakresie bezpieczeństwa przeciwpożarowego konwencja SOLAS zezwala na użycie analizy ryzyka, podobnie jest dla środków związanych z ochroną życia oraz ewakuacją pasażerów. Analiza ryzyka może być ciekawym narzędziem w przypadku nowatorskich projektów, szczególnie gdy istnieje problem ze spełnieniem obecnie obowiązujących przepisów, czy przepisów drugiej generacji, które mają być dopiero zatwierdzone. Należałoby zacząć na forum IMO, w szczególności podczas posiedzeń komitetu SDS, dyskusję nad możliwością wprowadzenia alternatywnych metod oceny bezpieczeństwa statecznościowego. Na wstępnym etapie jeszcze trudno jednoznacznie umiejscowić możliwość stosowania analizy ryzyka w kontekście przepisów IMO, szczególnie w zakresie bezpieczeństwa statecznościowego.

# Bibliografia

- [1] M. Acanfora and J. Matusiak, *Quantitative Assessment of Ship Behaviour in Critical Stern Quartering Seas*, 14th international ship stability workshop, September 2014, pp. 19–27.
- [2] S. Acid, L. M de Campos, J. M Fernández-Luna, S. Rodríguez, J. María Rodríguez, and J. Luis Salcedo, *A comparison of learning algorithms for Bayesian networks: a case study based on data from an emergency medical service*, *Artificial Intelligence in Medicine* **30** (March 2004), no. 3, 215–232.
- [3] T. Aven, *A conceptual framework for linking risk and the elements of the data–information–knowledge–wisdom (DIKW) hierarchy*, *Reliability Engineering & System Safety* **111** (March 2013), no. C, 30–36.
- [4] T. Aven and B. Heide, *Reliability and validity of risk analysis*, *Reliability Engineering & System Safety* **94** (July 2009), no. 11, 1862–1868.
- [5] T. Aven and E. Zio, *Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making*, *Reliability Engineering & System Safety* **96** (January 2011), no. 1, 64–74.
- [6] C. C Bassler, V. L Belenky, G. Bulian, K. J Spyrou, and N. Umeda, *A Review of Available Methods for Application to Second Level Vulnerability Criteria*, 10th international conference on stability of ships and ocean vehicles, 2009, pp. 111–128.
- [7] V. L Belenky, *A Capsizing Probability Computation Method*, *Journal of Ship Research* **37** (September 1993), 200–207.
- [8] V. L Belenky, C. C Bassler, and K. J Spyrou, *Dynamic Stability Assessment in Early-Stage Ship Design*, 10th international conference on stability of ships and ocean vehicles, 2009, pp. 141–154.
- [9] V. L Belenky and N. B Sevastianov, *Risk of Capsize*, 2nd ed. (R Bhattacharyya and M E McCormic, eds.), *Stability and Safety of Ships*, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2007.
- [10] L. Bergdahl, *Wave-induced loads and ship motions*, Ph.D. Thesis, Geteborg, Sweden, 2009.
- [11] A. Biran, *Ship Hydrostatics and Stability*, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [12] A. Biran and R. L. Pulido, *Ship Hydrostatics and Stability*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 2012.
- [13] T. Blome and S. Krueger, *Evaluation of the IMO Weather-Criterion for Passenger Ships by Direct Calculation of Capsizing Frequencies*, *Passenger Ship Safety*, 2003, pp. 1–9.
- [14] A. Brandowski, A. Mielewczyk, H. Nguyen, and W. Frackowiak, *A Fuzzy - Neuron Model of the Ship Propulsion Risk Prediction*, *Journal of Konbin* **13** (2010), no. 1.
- [15] A. Brandowski, A. Mielewczyk, H. Nguyen, and W. Frackowiak, *PROPULSION RISK OF A SEAGOING SHIP PREDICTION BASED ON EXPERT OPINIONS*, *Journal of Polish CIMAC* **5** (November 2010), no. 2, 1–12.
- [16] C. Breinholt, K.-C. Ehrke, A. Papanikolaou, P. C Sames, R. Skjong, T. Strang, D. Vassalos, and T. Witolla, *SAFEDOR–The Implementation of Risk-based Ship Design and Approval*, *Procedia-Social and Behavioral Sciences* **48** (2012), 753–764.
- [17] G. Bulian, *Checking vulnerability to pure loss of stability in long crested following waves: A probabilistics approach*, *Ocean Engineering* **37** (August 2010), no. 11-12, 1007–1026.
- [18] G. Bulian and A. Francescutto, *An Approach for 2nd Level Vulnerability Criteria for Dead Ship Condition*, International workshop on dynamic stability considerations in ship design, September 2009, pp. 1–54.



- [19] G. Bulian and A. Francescutto, *An assessment methodology for 1st level vulnerability check with respect to parametric rolling*, International workshop on dynamic stability considerations in ship design, 2009.
- [20] G. Bulian and A. Francescutto, *Considerations on Parametric Roll and Dead Ship Conditions for the Development of Second Generation Intact Stability Criteria*, 12th international ship stability workshop, June 2011, pp. 1–12.
- [21] W. Cai, D. Konovessis, and D. Vassalos, *Integration of Damage Stability into a Risk Management Framework*, 12th international ship stability workshop, May 2011, pp. 1–6.
- [22] Center for Chemical Process Safety, *Understanding and Using F-N Diagrams*, Guidelines for developing quantitative safety risk criteria, August 2009.
- [23] H. Chan and A. Darwiche, *When do Numbers Really Matter?*, Journal of Artificial Intelligence Research **17** (September 2002), 265–287.
- [24] J. Cheng and R. Greiner, *Learning Bayesian Belief Network Classifiers: Algorithms and System*, Advances in Artificial Intelligence **2056** (2001), 141–151.
- [25] K. Chruzik, L. Gućma, K. Jamroz, J. Skorupski, and A. Szymanek, *Założenia do integracji metod zarządzania ryzykiem w transporcie*, Materiały XXXVIII Zimowej Szkoły Niezawodności PAN, 2010, pp. 25–34.
- [26] W. E. Cummins, *The Impulse Response Function and Ship Motions*, Symposium on ship theory, January 1962.
- [27] A. Darwiche, *Modeling and Reasoning with Bayesian Networks*, 1st ed., Cambridge University Press, 2009 (English).
- [28] Det Norske Veritas, *Hull Equipment and Safety*, Det Norske Veritas (September 1999), 1–135.
- [29] I. T. Dimov, *Monte Carlo methods for applied scientists*, World Scientific Publishing, 2008.
- [30] DNV, *RECOMMENDED PRACTICE. DNV-RP-C205*, Technical Report DNV-RP-C205, 2010.
- [31] M. J Druzdzel, *GeNIe: A Development Environment for Graphical Decision-Analytic Models*, 1999 annual symposium of the american medical informatics association, November 1999, pp. 1206.
- [32] M. J Druzdzel and L. C van der Gaag, *Building Probabilistic Networks: 'Where Do the Numbers Come From?' Guest Editors' Introduction*, 2000.
- [33] J. Dudziak, *Teoria Okrętu*, Biblioteka Okrętownictwa, vol. 63, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, Polska, 1988.
- [34] A. Ericson, J. Persson, O. Rutgersson, and T. Thedeen, *On the Use of Formal Safety Assessment When Analysing the Risk for Cargo Shift in Rough Seas*, International conference of design and operation for abnormal conditions, 1997, pp. 1–15.
- [35] L. D Ferreiro, *Ships and Science. The birth of Naval Architecture in the Scientific Revolution 1600-1800*, MIT Press, London, UK, 2007.
- [36] M. Gerigk, *Kompleksowa Metoda Oceny Bezpieczeństwa Statku W Stanie Uszkodzonym z Uwzględnieniem Analizy Ryzyka*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Polska, 2010.
- [37] M. Gerigk, *Quantitative risk assessment of new ship designs in damage conditions*, Proceedings of the European Safety and Reliability Conference - Safety and Reliability: Methodology and Applications, 2015.
- [38] A. I. Ginnis, K. V. Kostas, C. G. Politis, and P. D. Kaklis, *VELOS: A VR platform for ship-evacuation analysis*, Computer-Aided Design **42** (November 2010), no. 11, 1045–1058.
- [39] L. Guarin, J. Logan, J. Majumder, R. Puisa, A. Jasionowski, and D. Vassalos, *Design for fire safety*, 3rd international conference on design for safety, 2009, pp. 1–9.
- [40] L. Gućma, *Modelowanie czynników ryzyka zderzenia jednostek pływających z konstrukcjami portowymi i pełnomorskimi*, Akademia Morska w Szczecinie, 2007.
- [41] J. H Halton, *A retrospective and prospective survey of the Monte Carlo method*, Siam Review **12** (1970), no. 1, 1–63.
- [42] M. Hänninen, *Bayesian networks for maritime traffic accident prevention: Benefits and challenges*, Accident Analysis & Prevention **73** (December 2014), 305–312.
- [43] M. Hänninen and P. Kujala, *Influences of variables on ship collision probability in a Bayesian belief network model*, Reliability Engineering & System Safety **102** (March 2012), 27–40.

- [44] T. Hinz, *Mathematical models in description of capsizing scenarios*, Archives of Civil and Mechanical Engineering **7** (2007), no. 3, 125–134.
- [45] T. Hinz and J. Matusiak, *Fuzzy Monte Carlo Method for Probability of Capsizing Calculation Using Regular and Non-Regular Wave*, 19th symposium on theory and practice of shipbuilding - sorta, October 2010, pp. 1–8.
- [46] HSE, *Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations*, Technical Report 3/2006, HSE, London, UK, 2006.
- [47] IACS, *Standard Wave Data*, Technical Report Rec No.34, 2001.
- [48] IMO, *Resolution A.167 (ES.IV) recommendation on intact stability for passenger and cargo ships under 100 meters in length*.
- [49] IMO, *Resolution A.168 (ES.IV) - Recommendation on Intact Stability for Fishing Vessels*, Technical Report IMO A.168 (ES.IV), 1968.
- [50] IMO, *Resolution A.267 (VIII) - Code of Practice Concernin the Accuracy of Stability Information for Fising Vessels*, Technical Report IMO A.267 (VIII), London, UK, 1973.
- [51] IMO, *Resolution A.685 (17) - Weather Criterion for Fishing Vessels of 24 meters in length and over* (November 1991), 1–6.
- [52] IMO, *Resolution A.749 (18) - Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments* (November 1993), 1–77.
- [53] IMO, *Resolution MSC.75(69) - Adoption of Amendments to the Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments (Resolution A.749 (18))*, Technical Report MSC.75(69), 1998.
- [54] IMO, *MSC/Circ.1023, MEPC/Circ.392 - GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS*, International Maritime Organization, 2002.
- [55] IMO, *SLF 45/6/3 - REVIEW OF THE INTACT STABILITY CODE. Remarks concerning the weather criterion (Germany)* (April 2002), 1–4.
- [56] IMO, *SLF 45/6/4 - REVIEW OF THE INTACT STABILITY CODE. Design for safety in a seaway (Germany)* (May 2002), 1–9.
- [57] IMO, *SLF 45/6/5 - REVIEW OF THE INTACT STABILITY CODE . Weather criterion for large passenger ships (Italy)* (May 2002), 1–6.
- [58] IMO, *SLF 46-6-7 - Calculations using the proposed factors s and r for the weather criterion (Germany)* (July 2003), 1–7.
- [59] IMO, *Resolution A.562 (14) - Recommendation on a Severe Wind and Rolling Criterion (Weather Criterion) for the Intact Stability of Passenger and Cargo Ships of 24 metres in length and over*, Technical Report IMO A.562 (14), 2005.
- [60] IMO, *Interim Guidelines for Alternative Assessment of the Weather Criterion* (May 2006), 1–17.
- [61] IMO, *Explanatory Notes to the Interim Guidelines for Alternative Assessment of the Weather Criterion* (January 2007), 1–23.
- [62] IMO, *MSC.1/Circ.1238 - GUIDELINES FOR EVACUATION ANALYSIS FOR NEW AND EXISTING PASSENGER SHIPS* (October 2007), 1–46.
- [63] IMO, *SLF 50/4/12 - Comments on the development of new generation intact stability criteria (Italy)*, Technical Report SLF 50/4/12, 2007.
- [64] IMO, *SLF 50/4/4 - Framework for the Development of New Generation Criteria for Intact Stability. Submitted by Japan, Netherlands and USA*, Technical Report SLF 50/4/4, 2007.
- [65] IMO, *Resolution MSC.267(85) - Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008 2008 IS Code* (December 2008), 1–94.
- [66] IMO, *SLF 52/INF.2 - DEVELOPMENT OF NEW GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA - Information collected by the intersessional Correspondence Group on Intact Stability (Japan)* (November 2009), 1–138.
- [67] IMO, *SDC 1/INF.6 - DEVELOPMENT OF SECOND-GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA Vulnerability assessment for dead-ship stability failure mode Submitted by Italy and Japan*, Technical Report SDC 1/INF.6, London, UK, 2013.

- [68] IMO and PRS, *Machinery*, Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu, 2006.
- [69] K. Jamroz, *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej*, Habilitacja, 2011.
- [70] J M J Journée and L J M Adegeest, *Theoretical Manual of Strip Theory Program "SEAWAY for Windows"*, Technical Report 1370, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands, 2003.
- [71] J. M. J. Journée and W. W. Massie, *Offshore Hydrodynamics*, Delft University of Technology, Delft, NL, 2001.
- [72] P. Kafka, *How safe is safe enough? An unresolved issue for all technologies*, Safety and reliability, 1999.
- [73] U. B. Kjærulff and A. L. Madsen, *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*, 2nd ed., Information Science and Statistics, vol. 22, Springer, 2013.
- [74] H. Klupfel, *Ship Evacuation – Guidelines, Simulation, Validation, and Acceptance Criteria*, Pedestrian and evacuation dynamics 2008, 2010, pp. 1–6.
- [75] L. Kobyliński, *Międzynarodowe standardy stateczności statków*, Budownictwo Okrętowe **8-9** (1964).
- [76] L. Kobyliński, *Stability of Ships: Risk Assessment Due Hazards Created by Forces of the Sea*, Archives of Civil and Mechanical Engineering **8** (2008), no. 1, 1–9.
- [77] L. Kobyliński, *Remarks on Future Generation Stability Safety Norms*, International workshop on dynamic stability considerations in ship design, September 2009.
- [78] L. Kobyliński and S. Kastner, *Stability and Safety of Ships. Regulation and Operation*, Elsevier Ocean Engineering Books, vol. 1, Elsevier, 2003.
- [79] D. Konovessis, W. Cai, and D. Vassalos, *Development of Bayesian network models for risk-based ship design*, Journal of Marine Science and Application **12** (May 2013), no. 2, 140–151 (English).
- [80] D. Konovessis and D. Vassalos, *Risk evaluation for RoPax vessels*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment **222** (March 2008), no. 13, 1–15.
- [81] P. Krata, *Dynamic component of ship's heeling moment due to sloshing vs. IMO IS-code recommendations*, Marine navigation and safety of sea transportation, 2009, pp. 775–780.
- [82] P. Krata and W. Wawrzyński, *Ship's rolling amplitude as a significant factor influencing liquid sloshing in partly filled tanks*, Journal of Konbin **21** (2012), no. 1, 63–76.
- [83] S. Kristiansen, *Maritime Transportation. Safety Management and Risk Analysis*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, 2005.
- [84] J. Kruschke, *Doing Bayesian Data Analysis*, 1st ed., Academic Press, Burlington, MA, USA, 2010.
- [85] H. Kulovaara, *Trends in Passenger Ship Design*, Imo symposium on the future of ship safety, 2013.
- [86] C. Kuo, *Managing ship safety*, LLP Professional Publishing, Londok, UK, 1998.
- [87] H. Langseth and L. Portinale, *Bayesian networks in reliability*, Reliability Engineering & System Safety **92** (2007), no. 1, 92–108.
- [88] S.-K. Lee, Z.-J. Long, J.-H. Jeong, and S.-J. Cheon, *Risk assessment method of simulation-based for the intact ship stability*, Icces, 2009.
- [89] P. Lois, Jin. Wang, A. Wall, and T. Ruxton, *Formal safety assessment of cruise ships*, Tourism Management **25** (February 2004), no. 1, 93–109.
- [90] M. Mattila, *Experimental study on transverse stability of fast Ropax vessels in waves*, Ph.D. Thesis, Espoo, Finland, 1999.
- [91] J. Matusiak, *Towards an unified theoretical model of ship dynamics*, Maritime research seminar, July 2002, pp. 1–18.
- [92] J. Matusiak, *On certain types of ship responses disclosed by the two-stage approach to ship dynamics*, Archives of Civil and Mechanical Engineering **7** (2007), no. 4, 151–166.
- [93] J. Matusiak, *On the non-linearities of ship's restoring and the Froude-Krylov wave load part*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering **3** (March 2011), no. 1, 111–115 (English).
- [94] J. Matusiak, *Ship Dynamics*, Aalto University, Espoo, Finland, 2012.

- [95] J. Matusiak and C. Stigler, *Ship Motion in Irregular Waves During a Turning Circle Manoeuvre*, 19th international conference on hydrodynamics in ship design, September 2012.
- [96] J. Matusiak and C. Stigler, *Ship Roll Motion in Irregular Waves During a Turning Circle Maneuver*, 11th international conference on the stability of ships and ocean vehicles, September 2012.
- [97] A. Mazaheri, J. Montewka, and P. Kujala, *Correlation between the Ship Grounding Accident and the Ship Traffic – A Case Study Based on the Statistics of the Gulf of Finland*, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation **7** (2013), no. 1, 119–124.
- [98] A. Mazaheri, J. Montewka, J. Nisula, and P. Kujala, *Extensive Analysis of Ship Grounding Accident and Incident Reports*, Safety Science **76** (2015), Paper accepted.
- [99] K. A. McTaggart, *Wind Effects on Ship Capsize Risk*, Technical Report 95/204, Defence Research and Development Canada, Dartmouth, N.S., Canada, 1995.
- [100] K. A. McTaggart, *Ongoing Work Examination Capsizing Risk of Intact Frigates Using Time Domain Simulation*, 4th international stability workshop, September 1998, pp. 47–51.
- [101] K. A. McTaggart, *Improved Modelling of Capsize Risk in Random Seas*, 2000.
- [102] M. F. Milazzo and T. Aven, *An extended risk assessment approach for chemical plants applied to a study related to pipe ruptures*, Reliability Engineering & System Safety **99** (March 2012), 183–192.
- [103] K. Mø and S.-A. Reinhikdtsen, *Methods for Generating Non-Stationary Current, Wind and Wave Time Series in the Time Domain*, 13th international offshore and polar engineering conference, May 2003, pp. 1–9.
- [104] J. Montewka, S. Ehlers, F. Goerlandt, T. Hinz, K. Tabri, and P. Kujala, *A framework for risk assessment for maritime transportation systems - a case study for open sea collisions involving RoPax vessels*, Reliability Engineering & System Safety **124** (April 2014), 142–157.
- [105] J. Montewka, F. Goerlandt, S. Ehlers, P. Kujala, S. Erceg, D. Polic, A. Klanac, T. Hinz, and K. Tabri, *A model for consequence evaluation of ship–ship collision based on Bayesian belief network*, Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, 2011, pp. 721–728.
- [106] J. Montewka, F. Goerlandt, S. Ehlers, T. Hinz, and P. Kujala, *A Risk Framework for Maritime Transportation Systems*, 13th international ship stability workshop, September 2013, pp. 1–12 (English).
- [107] J. Montewka, F. Goerlandt, and P. Kujala, *On a risk perspective for maritime domain*, Journal of Polish Safety and Reliability Association **4** (May 2013), no. 1, 101–108.
- [108] J. Montewka, F. Goerlandt, and P. Kujala, *On a Systematic Perspective on Risk for Formal Safety Assessment (FSA)*, Reliability Engineering & System Safety (April 2014), 1–33.
- [109] J. Montewka, F. Goerlandt, P. Kujala, and M. Lensu, *Towards Probabilistic Models for the Prediction of a Ship Performance in Dynamic Ice*, Cold Regions Science and Technology (2014), 1–37.
- [110] J. Montewka, T. Hinz, P. Kujala, and J. Matusiak, *Probability Modelling of Vessel Collisions*, Reliability Engineering & System Safety **95** (February 2010), no. 5, 573–589.
- [111] J. Montewka, P. Krata, F. Goerlandt, and P. Kujala, *A model for risk analysis of oil tankers*, Archives of Transport **22** (2010), no. 4, 423–445.
- [112] J. Montewka, P. Krata, F. Goerlandt, A. Mazaheri, and P. Kujala, *Marine traffic risk modelling - an innovative approach and a case study*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability **225** (2011), no. 3, 307–322.
- [113] H. Moseley, *On the Dynamical Stability and on the Oscillations of Floating Bodies*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London **140** (1850), 609–643.
- [114] F. Netjasov, *Risk Analysis and Safety Assessment of Air Traffic Control System*, PhD Thesis, 2010.
- [115] A. D Papanikolaou (ed.), *Risk-Based Ship Design*, Springer, 2009.

- [116] D. Paroka and N. Umeda, *Capsizing Probability Prediction for a Large Passenger Ship in Irregular Beam Wind and Waves: Comparison of Analytical and Numerical Methods*, Journal of Ship Research **50** (December 2006), no. 4, 371–377.
- [117] E. M. Paté-Cornell, *Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment*, Reliability Engineering & System Safety **54** (1996), no. 2, 95–111.
- [118] M. Pawłowski, *The Stability of a Freely Floating Ship*, Technical Report 72, Gdańsk, Polska, 2013.
- [119] P. T. Pedersen, *Review and Application of Ship Collision and Grounding Analysis Procedures*, Marine Structures **23** (July 2010), no. 3, 241–262 (English).
- [120] A. Plucińska and E. Pluciński, *Elementy Probabilistyki. Matematyka dla Politechnik*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1979.
- [121] J. Prpic-Orsic and V. Coric, *Pomorstvenost Plovnih Objekata*, 1st ed., Zigo, Rijeka, Croatia, 2006.
- [122] J. Rahola, *The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability*, Ph.D. Thesis, Helsinki, Finland, 1939.
- [123] Ramboll Denmark A/S, *Navigational safety in the Sound between Denmark and Sweden ( Øresund ) Navigational safety in the Sound between Denmark and Sweden ( Øresund )*, Technical Report August, The Royal Danish Administration of Navigation and Hydrography, The Danish Maritime Authority and The Swedish Maritime Administration, 2006.
- [124] E. Ravn, *Risk based model for failure of the propulsion system and the steering gear systems*, Technical Report D.02.04.07, 2006.
- [125] M.-I. Roh and S. Ha, *Advanced ship evacuation analysis using a cell-based simulation model*, Computers in Industry **64** (January 2013), no. 1, 80–89.
- [126] W. Slob, *Determination of risks on inland waterways*, Journal of Hazardous Materials **61** (August 1998), no. 1-3, 363–370.
- [127] D. A. Spanos and A. D. Papanikolaou, *Benchmark Study on Numerical Simulation Methods for the Prediction of Parametric Roll of Ships in Waves*, 10th international conference on stability of ships and ocean vehicles, 2009.
- [128] P. Spirtes, C. Glymour, and R. Scheines, *Causation, Prediction, and Search*, Lecture Notes in Statistics, vol. 81, MIT Press, New York, NY, 2001.
- [129] T. Szelangiewicz, *Podstawy teorii projektowania kotwicznych systemów utrzymywania pozycji jednostek pływających*, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk, Polska, 2003.
- [130] A. Szymanek, *Teoria i metodologia zarządzania ryzykiem w ruchu drogowym*, Politechnika Radomska, Radom, Polska, 2012.
- [131] N. Umeda, *Current Status of Second Generation Intact Stability Criteria Development and Some Recent Efforts*, 13th international ship stability workshop, September 2013, pp. 1–20.
- [132] N. Umeda, A. Maki, S. Izawa, H. Sano, Y. Sogawa, E. Maeda, and I. Tsukamoto, *New Generation Intact Stability Criteria: a Step Forward*, 10th international conference on stability of ships and ocean vehicles, 2009, pp. 129–140.
- [133] E. Vanem and R. Skjong, *Designing for safety in passenger ships utilizing advanced evacuation analyses—A risk based approach*, Safety Science **44** (February 2006), no. 2, 111–135.
- [134] D. Vassalos, *Design for Safety & Energy Efficiency*, Maritime institue @ ntu public seminar, 2013.
- [135] D. Vassalos, A. Jasionowski, and L. Guarin, *Design For Damage Survivability Of Passenger Ships*, Design and operation of passenger ships, 2007.
- [136] J. E. Vinnem, *Offshore Risk Assessment*, 2nd ed. (H. Pham, ed.), Springer Series in Reliability Engineering, Springer, 2007.
- [137] J. Wachnicka and L. Smolarek, *Model of Multilevel Stochastic Analysis of Road Safety on Regional Level*, Reliability: Theory & Applications **8** (2013), no. 29, 39–48.
- [138] J. Wang, *Offshore safety case approach and formal safety assessment of ships*, Journal of Safety Research **33** (2002), no. 1, 81–115.
- [139] J. Wang and P. Foinikis, *Formal safety assessment of containerships*, Marine Policy **25** (December 2000), no. 2, 143–157.
- [140] J. Wang and A. Pillay, *Technology and Safety of Marine Systems* (R. Bhattacharyya and M. E. McCormic, eds.), Elsevier Ocean Engineering Book Series, Elsevier, 2003 (English).

- [141] M. Wu and O. A. Hermundstad, *Time-domain simulation of wave-induced nonlinear motions and loads and its applications in ship design*, *Marine Structures* **15** (2002), no. 6, 561–597.
- [142] D. Zhang, X. P. Yan, Z. L. Yang, A. Wall, and J. Wang, *Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River*, *Reliability Engineering & System Safety* **118** (October 2013), 93–105.

# A. Propozycje normowania wypadku statecznościowego w stanie DSC

## A.1. Propozycja włoska

### Drugi poziom

W propozycji włoskiej drugi poziom kryterium oparty jest o jedno równanie kołysania bocznego[18]:

$$(J_{xx} + J_{add}) \ddot{\phi} + D(\dot{\phi}) + \Delta \overline{GZ}(\phi) = M_{wind,tot}(\phi, t) + M_{waves}(t). \quad (A.1)$$

Równanie A.1 można przekształcić z zastosowaniem analitycznej postaci współczynnika tłumienia w kolejną postać równania ruchu.

$$\ddot{\phi} + 2\mu\dot{\phi} + \beta\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \delta\dot{\phi}^3 + \omega_0^2 c(\phi) = \omega_0^2 (\overline{m}_{wind,tot} + \delta m_{wind,tot}(t) + m_{waves}(t)), \quad (A.2)$$

gdzie:

$$\overline{m}_{wind,tot} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{air} \overline{V}^2 (H_w + H_{yd}) C_y A_L}{\Delta \overline{GZ}}. \quad (A.3)$$

Obliczenia w kryterium drugiego poziomu wykonuje się według algorytmu[18]:

1. wyznaczenie statycznego kąta równowagi  $\phi_s$  i kąta zaniku stateczności strony nawietrznej i zawietrznej - efekt wiatru:

$$\overline{M}_{wind,tot} = \frac{1}{2} \rho_{air} \overline{V}^2 (H_w + H_{yd}) C_y A_L, \quad (A.4)$$

$$\bar{l}_{wind,tot} = \frac{\overline{M}_{wind,tot}}{\Delta}; \quad (A.5)$$

2. obliczenie zlinearyzowanego ramienia prostującego i korekty naturalnej częstości kołysań bocznych:

$$\overline{GZ}_{res}(\phi_s) = \frac{d(\overline{GZ} - \bar{l}_{wind,tot})}{d\phi}, \quad (A.6)$$

$$\omega_{0,e}(\phi_s) = \omega_o \sqrt{\frac{GZ_{res}(\phi_s)}{GM}}, \quad (\text{A.7})$$

3. obliczanie łącznego spectrum od fali i wiatru,
4. rozwiązanie równania kołysania bocznego w domenie częstości i wyznaczenie spectrum kołysań bocznych:
  - wyznaczenie relatywnego kąta w stosunku do kąta  $\phi_s$

$$x = \phi - \phi_s, \quad (\text{A.8})$$

- model liniowy kołysań bocznych

$$\ddot{x} + 2\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) + \omega_{0,e}^2(\phi_s)x = \omega_0^2 m(t), \quad (\text{A.9})$$

- liniowy współczynnik tłumienia zależny od standardowego odchylenia prędkości kołysań bocznych

$$\mu_e(\sigma_{\dot{x}}) = \mu + \sqrt{\frac{2}{\pi}}\beta\sigma_{\dot{x}} + \frac{3}{2}\delta\sigma_{\dot{x}}^2, \quad (\text{A.10})$$

- spectrum kołysań bocznych:

$$S_x(\omega) = \frac{\omega_0^4}{(\omega_{0,e}^2 - \omega^2)^2 + (2\mu_e(\sigma_{\dot{x}})\omega)^2} \frac{S_M(\omega)}{(\Delta GM)^2}; \quad (\text{A.11})$$

5. wyznaczenie odchylenia standardowego dla kołysań bocznych i częstotliwości miejsc zerowych:
  - odchylenie standardowe kołysań bocznych

$$\sigma_\Phi = \sqrt{m_0}, \quad (\text{A.12})$$

- częstotliwość miejsc zerowych

$$\omega_{z,\phi} = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, \quad (\text{A.13})$$

- okres miejsc zerowych kołysań bocznych

$$T_{z,\Phi} = \frac{2\pi}{\omega_{z,\phi}}, \quad (\text{A.14})$$

—

$$m_0 = \int_0^\infty S_x(\omega) d\omega, \quad (\text{A.15})$$

—

$$m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_x(\omega) d\omega; \quad (\text{A.16})$$



6. zastosowanie empirycznej poprawki do korekty różnicy pomiędzy zlinearyzowanym ramieniem prostującym a rzeczywistym ramieniem;
7. obliczenie kąta przewracania się z użyciem metody „ekwiwalentnego pola”, gdzie kąt przewrócenia jest oceniany jako minimum z dwóch kątów:
  - kąta zaniku stateczności pod naporem wiatru,
  - zwykłego kąta krytycznego – kąt zalewania;
8. obliczenie indeksu przewracania — indeks defektu stateczności:
  - indeks defektu

$$CI_{EA} = 1 - \exp(-\lambda_{EA}T_{exp}), \quad (\text{A.17})$$

— wielkość defektu

$$\lambda_{EA} = \frac{1}{T_{z,\phi}} \left[ \exp\left(-\frac{1}{2RI_{EA+}^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2RI_{EA-}^2}\right) \right]. \quad (\text{A.18})$$

## A.2. Propozycja japońska

Delegacja japońska w swojej propozycji kryterium zaproponowała zastosowanie „odcinkami–liniowej” aproksymacji nieliniowego momentu przywracającego dla fali oraz wiatru bocznego. Metodę aproksymacji „odcinkami–liniową” zaproponował Belenky[7].

Prawdopodobieństwo przewrócenia się „martwego” statku według propozycji japońskiej obliczyć można zgodnie z następującym algorytmem.

$$P(T) = 1 - e^{(u_{cap}T)}, \quad (\text{A.19})$$

$$u_{cap} = u_{capl} + u_{capw}, \quad (\text{A.20})$$

$$u_{capl} = u_l P_A(A > 0), \quad (\text{A.21})$$

$$u_{capw} = u_w P_A(A < 0), \quad (\text{A.22})$$

$$u_l = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} e \left[ -\frac{(\phi_M - \phi_D)^2}{2V_1} \right], \quad (\text{A.23})$$

$$u_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} e \left[ -\frac{(-\phi_D - \phi_M)^2}{2V_1} \right], \quad (\text{A.24})$$

$$P_A(A > 0) = \int_0^\infty f(A) dA, \quad (\text{A.25})$$

$$f(A) = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 (A - C_4)}{V_2} e^{\left[ \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 (A - C_4)^2}{2V_2} \right]}, \quad (\text{A.26})$$

$$c_4 = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \phi_D, \quad (\text{A.27})$$

$$\lambda_{1,2} = -\alpha E + -\sqrt{\alpha_E^2 + \omega_0^2 k f_1}. \quad (\text{A.28})$$

## B. Metoda Monte Carlo

Jedną z metod obliczania prawdopodobieństwa jest metoda Monte Carlo. W literaturze można znaleźć kilka definicji tej metody:

— Definicja Dimov’a[29]

**Definicja B.1.** Metody Monte Carlo są to metody przybliżonego określania rozwiązań problemów matematyki obliczeniowej, używających procesów stochastycznych. Metody te gwarantują błąd aproksymacji mniejszy niż dane prawdopodobieństwo.[29]

— Definicja Haltona [41]

**Definicja B.2.** Metoda Monte Carlo jest to metoda przedstawiająca rozwiązanie problemu w postaci parametru hipotetycznej populacji i używająca sekwencji liczb losowych do skonstruowania próby losowej danej populacji, z której to mogą być otrzymane statystyczne oszacowania tego parametru.

Autorstwo tej metody przypisuje się grupie naukowców (S. Ulam, N. Metropolis) pracujących nad budową bomby atomowej w Laboratorium Los Alamos w latach 40 ubiegłego wieku. Jednakże podobne zastosowanie prawdopodobieństwa w nauce można spotkać u wielu innych matematyków czy fizyków, poczynając od XVIII-wiecznego badacza Comote de Buffon, który stosował próbkowanie losowe do obliczenia całki.

Metody Monte Carlo mają ścisłe podstawy matematyczne wynikające ze statystyki matematycznej, między innymi z Prawa Wielkich Liczb[120] (PWL):

— Wartość przeciętna (oczekiwana):

$$E(X) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(u) du. \quad (\text{B.1})$$

— Prawo Wielkich Liczb (jest to też estymator wartości oczekiwanej) można zapisać w następujący sposób:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(u_i) = E(X). \quad (\text{B.2})$$

Z tych dwóch założeń można zapisać wzór na estymator Monte Carlo:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(u_i) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(u) du. \quad (\text{B.3})$$