

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Zbigniew Sekulski

**Wybrane problemy
optymalizacji wielokryterialnej
we wstępnym projektowaniu
konstrukcji kadłuba statków morskich**

Szczecin 2012

Recenzenci

CZESŁAW SZYMCAK
WOJCIECH TARNOWSKI

Opracowanie redakcyjne

ALICJA BERNER

WYDANO ZA ZGODĄ

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO
W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-111-0

WYDAWNICTWO UCZELNIANE ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE
70-311 Szczecin, al. Piastów 50, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl
Druk PPH „Zapol” Dmochowski, Sobczyk Sp.j., 71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 91 434 10 21
e-mail: zarzad@zapol.com

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	7
Objaśnienia skrótowców	11
Objaśnienia wybranych terminów	13
1. Wprowadzenie	15
1.1. Konstrukcja kadłuba statków morskich: elementy, projektowanie i optymalizacja	15
1.2. Ewolucyjna optymalizacja wielokryterialna	26
1.3. Problem badawczy, cel i zakres pracy	29
2. Problem optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich	33
2.1. Specyfika problemów optymalizacji	33
2.2. Algorytmy rozwiązywania zadania optymalizacji	38
2.3. Wybór metody rozwiązywania zadania wielokryterialnej optymalizacji	42
2.4. Narzędzia obliczeniowe do optymalizacji	44
2.5. Podsumowanie i wnioski	46
3. Podstawowe koncepcje optymalizacji wielokryterialnej	49
3.1. Sformułowanie zadania optymalizacji wielokryterialnej	49
3.2. Rozwiązywanie zadania optymalizacji wielokryterialnej – zbiór przybliżający front ocen rozwiązań optymalnych Pareto	53
3.3. Relacje preferencji zbiorów przybliżających	57
3.4. Podsumowanie i wnioski	61
4. Poszukiwanie zbiorów przybliżających	63
4.1. Oczekiwany rezultat optymalizacji wielokryterialnej	63
4.2. Klasyczne algorytmy optymalizacji wielokryterialnej	66
4.3. Ewolucyjne algorytmy optymalizacji wielokryterialnej	68
4.4. Struktura wewnętrzna zbioru dopuszczalnego – szeregowanie i licznik dominacji	70
4.5. Podsumowanie i wnioski	74
5. Ocena jakości zbiorów przybliżających	75
5.1. Wprowadzenie	75
5.2. Wskaźniki jakości zbiorów przybliżających	77
5.3. Wektorowe wskaźniki jakości zbiorów przybliżających	84
5.4. Strategie oceny jakości zbiorów przybliżających	85
5.5. Ocena skuteczności ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej	87
5.6. Podsumowanie i wnioski	90
6. Narzędzie obliczeniowe do ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji kadłuba statku	93
6.1. Podstawowe techniki obliczeniowe	93
6.1.1. Funkcje użyteczności	93
6.1.2. Funkcje kary za naruszenie ograniczeń	95
6.1.3. Wskaźnik dopuszczalności wariantu konstrukcji	98
6.1.4. Operatory genetyczne	99
6.1.5. Archiwizowanie rozwiązań niezdominowanych	100
6.1.6. Odległość od rozwiązania asymptotycznego	101
6.1.7. Szeregowanie i licznik dominacji	103
6.1.8. Kombinowana funkcja przystosowania	105

6.1.9. Szerokość i głębokość zbioru przybliżającego.....	107
6.1.10. Ocena jakości zbiorów przybliżających.....	108
6.2. Program komputerowy	111
6.3. Obliczenia testowe (próbne)	114
6.4. Podsumowanie i wnioski	115
7. Sformułowanie zadania wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statku. Modele obliczeniowe	117
7.1. Ogólna charakterystyka statku.....	117
7.1.1. Założenia i dane dotyczące optymalizacji	117
7.1.2. Szlak żeglugowy	118
7.1.3. Kryteria optymalizacji	119
7.2. Modele konstrukcji kadłuba statku	123
7.2.1. Geometryczny model konstrukcji	123
7.2.2. Materiałowe cechy konstrukcji	125
7.2.3. Obciążenia projektowe konstrukcji	126
7.3. Model optymalizacyjny konstrukcji kadłuba statku.....	128
7.3.1. Zmienne konstrukcyjne	128
7.3.2. Parametry modelu optymalizacyjnego	130
7.3.3. Funkcja celu	130
7.3.4. Ograniczenia	131
7.4. Genetyczny model optymalizacyjny konstrukcji kadłuba statku	134
7.4.1. Uwagi ogólne	134
7.4.2. Struktura chromosomu	134
7.4.3. Funkcja przystosowania.....	136
7.4.4. Archiwizacja rozwiązań niezdominowanych.....	137
7.4.5. Operatory genetyczne	137
7.4.6. Parametry sterujące	139
7.5. Podsumowanie i wnioski	139
8. Symulacje komputerowe – poszukiwanie zbiorów przybliżających.....	141
8.1. Plan symulacji komputerowych.....	141
8.2. Wyniki symulacji komputerowych	144
8.2.1. Seria 1.	144
8.2.2. Seria 2.	155
8.2.3. Seria 3.	157
8.2.4. Seria 4.	158
8.3. Analiza wyników	160
8.4. Podsumowanie i wnioski	166
9. Ocena jakości zbiorów przybliżających wygenerowanych w trakcie symulacji komputerowych	169
9.1. Plan oceny jakości zbiorów przybliżających.....	169
9.2. Wizualna ocena zbiorów przybliżających	169
9.3. Ocena zbiorów przybliżających za pomocą relacji dominacji.....	172
9.4. Ocena zbiorów przybliżających za pomocą wskaźników jakości	174
9.4.1. Seria 1.	174
9.4.2. Seria 2.	179
9.4.3. Seria 3.	180
9.4.4. Seria 4.	181
9.5. Podsumowanie i wnioski.....	183
10. Zakończenie.....	185
11. Plany badawcze.....	195

Załączniki	197
Załącznik A.....	199
Załącznik B.....	201
Załącznik C.....	203
Załącznik D.....	205
Załącznik E.....	209
Załącznik F.....	215
Załącznik G.....	217
Załącznik H.....	223
Załącznik I.....	227
Załącznik J.....	231
Załącznik K.....	233
Załącznik L.....	235
Literatura	237
Summary.....	259
Zusammenfassung.....	261

1. Wprowadzenie

1.1. Konstrukcja kadłuba statków morskich: elementy, projektowanie i optymalizacja

Podstawową część nośną współczesnych statków morskich, integrującą cały układ konstrukcyjny (podobnie jak w obiektach lotniczych, kolejowych i innych środkach transportu), stanowią konstrukcje kadłubowe. Pomijając, występujące niekiedy nawet w znacznej liczbie, rozwiązania specyficzne dla określonego typu statku (np. dla masowca, kontenerowca, statku ro-ro), kadłub każdego morskiego statku towarowego zbudowany jest według wspólnego podstawowego planu obejmującego cienką, zamkniętą, wodoszczelną powłokę, usztywnioną wewnątrz układem wzajemnie krzyżujących się belek, nazywanym układem wiązań (rysunek 1.1), oraz strukturami przegradzającymi, zazwyczaj wodoszczelnymi, chociaż stosuje się także struktury przegradzające niewodoszczelne, nazywane przegrodami. Belki, które biegną w poprzek kadłuba prostopadle do kierunku rufa-dziób, są to wiązania poprzeczne, natomiast te, które biegną wzdłuż kadłuba, to wiązania wzdłużne. Pionowe wodoszczelne struktury przegradzające, dzielące przestrzeń ograniczoną zewnętrzną powłoką kadłuba na wiele części lub przedziałów, nazywa się grodziami wodoszczelnymi – poprzecznymi lub wzdłużnymi. Pierwsze z nich ustawiane są w płaszczyznach prostopadłych do kierunku rufa-dziób i dzielą wewnętrzną przestrzeń kadłuba na kilka przedziałów wzdłuż długości statku. Grodzie wzdłużne, ustawiane równoległe do tego kierunku, dzielą tę przestrzeń na wiele przedziałów wzdłuż szerokości statku. Grodzie wodoszczelne sięgają od dna do górnego pokładu, zapewniając pływalność statku w przypadku awaryjnego zalania określonych przedziałów. Oprócz pionowych struktur przegradzających wewnątrz powłoki kadłuba mogą być montowane poziome struktury przegradzające nazywane międzypokładami lub platformami, w zależności od zasięgu przestrzennego i stopnia szczelności.

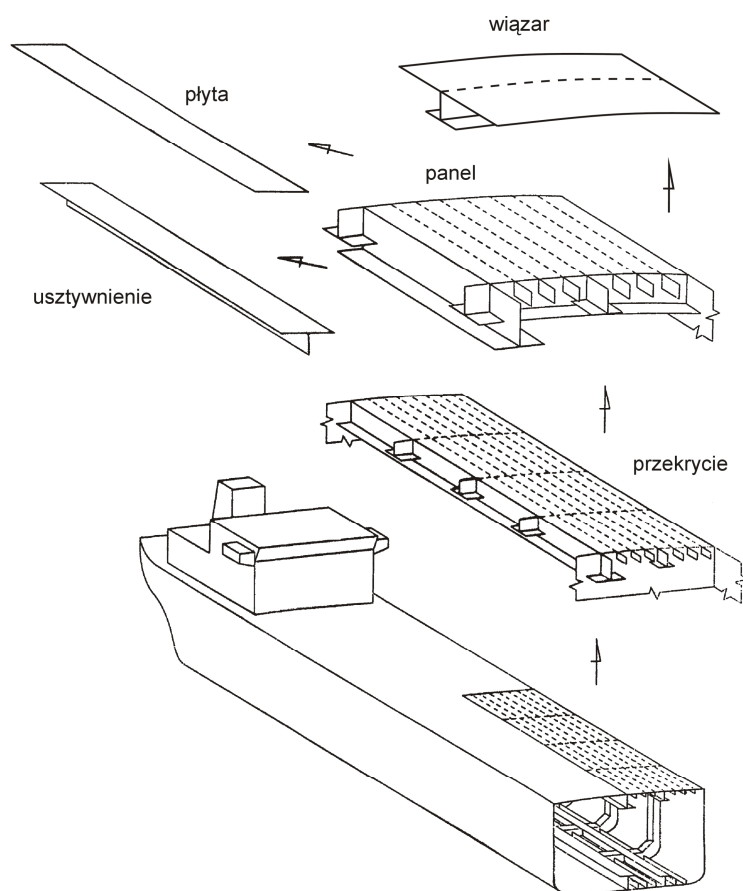
Ze względu na funkcję pełnioną w zapewnieniu wytrzymałości konstrukcji kadłuba statku wiązania dzielą się na dwie podstawowe grupy. Wiazania podpierające tylko elementy poszycia, wykonane najczęściej¹ z kształtowników walcowanych², nazywają się wiązaniami drugiego rzędu lub usztywnieniami. Wiazania, zazwyczaj o znacznych wymiarach, podpierające poszycie, a także wiązania drugiego rzędu, usztywnienia, nazywają się wiązaniami pierwszego rzędu lub wiazarami. Wiazary wykonuje się jako prefabrykaty spawane z elementów wykrawanych z arkuszy blach. Usztywnienia podpierające poszycie dna nazywają się wręgami dennymi. Natomiast rozstawione poprzecznie wiazary denne nazywają się dennikami, zaś zorientowane wzdłużnie – wzdłużnikami dennymi. Usztywnienia podpierające poszycie burt nazywają się wręgami burtowymi poprzecznymi lub wzdłużnymi, w zależnoś-

¹ Usztywnienia można również wykonywać, spawając je z płaskowników.

² W procesie walcowania wykonuje się kształtowniki stalowe, natomiast w procesie wyciskania wykonuje się kształtowniki ze stopów aluminium.

ci od kierunku ich przebiegu. Rozstawione poprzecznie wiązary burt nazywają się wręgami ramowymi, natomiast skierowane wzdłużnie – wzdłużnikami burtowymi. Usztywnienia podpierające pokład to pokładniki, poprzeczne lub wzdłużne, zależnie od kierunku przebiegu. Wiazary natomiast są to pokładniki ramowe, jeśli zorientowane są poprzecznie, lub wzdłużniki pokładowe, jeśli rozmieszczone są wzdłuż kadłuba. Rozmieszczone w tych samych przekrojach (płaszczyznach) oraz sztywno połączone ze sobą denniki, burtowe wręgi ramowe oraz pokładniki ramowe tworzą ramę wręgową.

Zorientowane poprzecznie wiązania kadłuba statku rozmieszczone są w regularnych odstępach nazywanych odstępem wręgowym. Wielkość ta, określana w procesie projektowania konstrukcji kadłuba, w sposób zasadniczy wpływa na jego wytrzymałość i charakterystyki eksploatacyjne statku jako całości.



Rys. 1.1. Hierarchiczna struktura konstrukcji kadłuba morskiego statku towarowego

Proces projektowania konstrukcji kadłuba statku morskiego może być opisany i realizowany podobnie jak proces projektowania innych obiektów technicznych. Kowalski (1983) na przykład przedstawił metodykę formułowania matematycznych modeli optymalizacyjnych elementów maszyn i urządzeń, przystosowanych do jednokryterialnych obliczeń komputerowych. Tarnowski (1984) przedstawił dyskusję nad procesem wyboru w projektowaniu technicznym, w różnych jego fazach, oraz zaproponował ogólny model procesu wyboru, który może dotyczyć konstrukcji całego obiektu lub jego części, systemu projektującego lub samej procedury projektowania. W pracy *Projektownawstwo. Elementy wiedzy o projektowaniu*

(1988) przedstawiono jedną z pierwszych syntez wiedzy projektoznawczej dotyczącej trzech grup zagadnień: podmiotu projektowania, przedmiotu projektowania i procesu projektowania. Szczególną uwagę zwrócono na podejście systemowe do przedmiotu projektowania oraz do procesu projektowania. Omówiono procesy podejmowania decyzji oraz etapy rozwiązywania problemów projektowych. Osiński i Wróbel (1995) przedstawili zwięzłą teorię konstruowania maszyn oraz kompleksowe podejście do komputerowego wspomagania projektowania. W szczególności przedstawili procedury formułowania matematycznego modelu konstrukcji na potrzeby optymalizacji. W pracy *Podstawy konstrukcji maszyn* (1995) (w pierwszym tomie trzutomowej monografii dotyczącej szeroko rozumianych problemów konstruowania maszyn) przedstawiono m.in. podstawowe zagadnienia związane z konstruowaniem, modelowaniem i optymalizacją części maszyn. Tarnowski (1997) przedstawił szczegółowe wprowadzenie do projektowania technicznego i podstawy teoretyczne tego procesu. Opisał także sposoby formułowania zadania projektowego i wymagań projektowych oraz metody poszukiwania rozwiązań zadania projektowego. Omówił znaczenie optymalizacji w projektowaniu oraz zaprezentował szczegółową metodykę formułowania zadań optymalizacji. Szymczak (1998) omówił wybrane zagadnienia nowoczesnego projektowania konstrukcji inżynierskich: podstawy metodologii projektowania technicznego, elementy projektowania optymalnego, elementy teorii bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji oraz analizy wrażliwości konstrukcji.

Jeśli chodzi o projektowanie konstrukcji kadłuba statków morskich, klasyczne monografie koncentrują się przede wszystkim na jej opisie jako całości oraz na bardziej szczegółowym omówieniu wybranych rejonów konstrukcyjnych; szczególne miejsce zajmuje dorobek Potyrały (1967). Inne prace monograficzne polskich autorów, poświęcone projektowaniu konstrukcji statków, to prace Bielińskiego i in. (1973, 1988), Wakuly (1975), Wewiórskiego i Wituszyńskiego (1977), Jastrzębskiego (1991) i Więckiewicza (1998, 1999). Spośród publikacji zagranicznych wymienić można np. prace: *Ship Design and Construction* (1980), Taylora (1984), Eyresa (2007). Bujniewicz i in. (1971), Butnicki (1971), autorzy pracy *Konstrukcje okrętowe ze stopów aluminium* (1976), Kozłowski i in. (1982), Jastrzębski i Puchaczewski (1989), Cudny i Puchaczewski (1995), oraz Cudny (1996) poruszają przede wszystkim zagadnienia związane z własnościami materiałów oraz kryteriami ich doboru na konstrukcje kadłuba statków. Szarejko i Roguski (1974), oprócz zagadnień konstrukcyjnych, bardzo szczegółowo omawiają zagadnienia teorii okrętów i właściwości morskich jednostek pływających. Orszulok (1983) i Judziński (2001) omawiają wpływ eksploatacji statków na wytrzymałość i bezpieczeństwo konstrukcji kadłuba.

Na uwagę zasługują również monografie dotyczące architektury statków (Netzel i in. 2009, Lerch 2010), w których autorzy wiele uwagi poświęcają także zagadnieniom konstrukcyjnym w kontekście wymagań, jakie narzucają proponowane rozwiązania architektoniczne.

W ostatnich latach autorzy opublikowanych monografii koncentrują swoją uwagę nie tylko na projektowaniu konstrukcji statków jako systemu współpracujących elementów konstrukcji poszycia, usztywnień i wiązarów, ale także na obliczeniowych metodach analizy konstrukcji, np. Bai (2003), Okumoto i in. (2009) oraz Hughes i Paik (2010).

Uwagę zwracają również publikacje wydawane przez SNAME, w tym monografia dotycząca projektowania oraz konstruowania wielu typów współczesnych statków morskich

Lamb (2004) oraz *The Principles of Naval Architecture Series*, w ramach której opublikowano monografie dotyczące różnych aspektów projektowania i konstruowania statków (Mansour i Liu 2008, Larsson i Raven 2010, Moore 2010 i Vorus 2010).

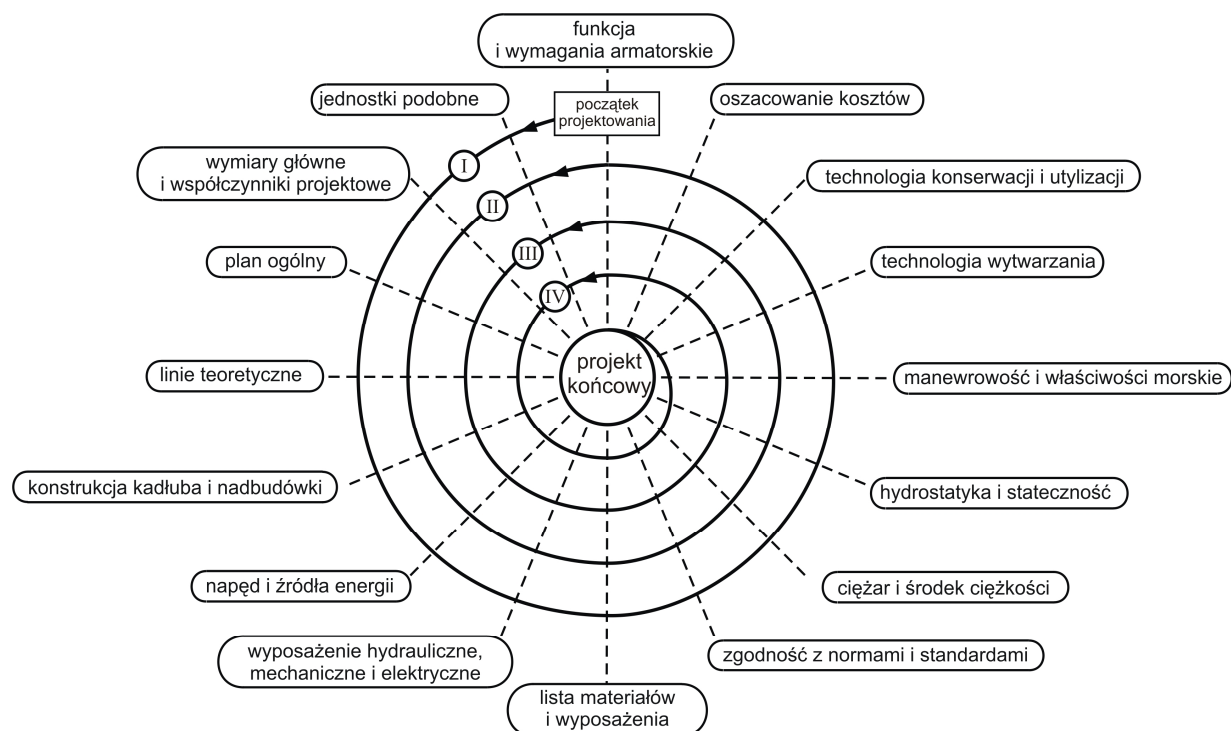
Konstruktorzy mogą również sięgnąć do opublikowanych przez IACS wytycznych dotyczących planowania i przeprowadzania przeglądów, oceny stanu technicznego oraz proponowanych metod naprawy węzłów konstrukcyjnych IACS (1999, 2002 a, b, 2005). Zawierają one bardzo wiele istotnych wskazówek dotyczących przede wszystkim szczegółowych rozwiązań węzłów konstrukcyjnych kadłuba wybranych typów statków. Podobny charakter mają także trzy inne wytyczne: LRS (1996 a, b) oraz *Tanker Structure Co-operative Forum* (2010).

Od 1996 roku Wydawnictwo Trademar Sp. z o.o. z Gdyni w ramach serii Współczesne Technologie Transportu Morskiego, skierowanej do marynarzy floty handlowej, opublikowało siedem monografii dotyczących eksploatacji różnych typów statków (Pałucha i in. 1996, Grzybowski i in. 1997, Puchalski 1998, Wiewióra i in. 1999, Studziński 2005, Puchalski i Soliwoda 2008, Cydejko i in. 2011). Mimo że monografie te w niewielkim stopniu dotyczą samych konstrukcji kadłuba statków, stanowią jednak bardzo obszerne kompendium wiedzy o wybranych typach statków, przydatnej także dla konstruktorów.

Bieżący stan wiedzy teoretycznej i doświadczeń dotyczących konstrukcji statków jest podsumowywany podczas organizowanych co trzy lata posiedzeń ISSC skupiających ekspertów wielu dyscyplin związanych z projektowaniem konstrukcji statków. Pierwszy kongres ISSC odbył się w 1961 roku w Glasgow, natomiast ostatni, siedemnasty, w sierpniu 2009 roku w Korei Południowej.

Proces projektowania tak złożonego obiektu, jakim jest konstrukcja kadłuba statku morskiego, ma przebieg sekwencyjno-iteracyjny i obejmuje projektowanie wstępne, techniczno-klasyfikacyjne i wykonawcze (Szarejko i Roguski 1974, Wewiórski i Wituszyński 1977, Jastrzębski 1994)¹, w którym wiele czynności wykonywanych jest wielokrotnie, przy jednoczesnym wzroście uszczegółowienia prac i stopniowym przybliżaniu się od początkowych założeń i podstawowych idei konstrukcji do szczegółowego zaprojektowania węzłów. Jest również procesem hierarchicznym, o strukturze zstępującej. Bardzo często, a zwłaszcza w przypadku zupełnie nowych typów statków, cały proces projektowania przedstawiany jest w zaproponowanej przez Evansa (1959) postaci – tak zwanej spirali projektowej (rysunek 1.2), która w końcowym etapie doprowadza do uzyskania pożądanych charakterystyk jednostki, a w efekcie prób morskich – do ich potwierdzenia. W najbardziej ogólnej postaci projektowanie konstrukcji kadłuba statku to dobór materiału i przestrzenne rozmieszczenie go w postaci elementów konstrukcji (pokładów, grodzi, bloków kadłuba itd.), spośród których każdy składa się z mniejszych jednostek strukturalnych (wiązarów, usztywnień, poszyc itd.) – rysunek 1.1. Ważne jest, aby przy spełnieniu narzuconych wymagań projektowych kadłub zapewniał bezpieczną eksploatację statku, przy najmniejszych kosztach.

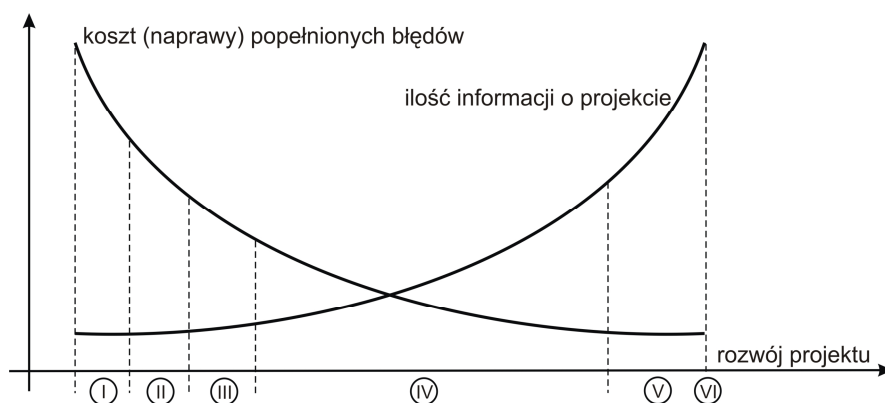
¹ W projektowaniu wstępnym zazwyczaj wyróżnia się kolejno: projektowanie koncepcyjne, ofertowe i kontraktowe. Do projektowania wstępnego zalicza się także formułowanie założeń projektowych.



Rys. 1.2. Projektowanie statku jako proces osiągania kolejnych poziomów uszczegółowienia w kolejnych przybliżeniach – spirala projektowa. Etapy projektowania statków: I – projektowanie koncepcyjne, II – projektowanie ofertowe, III – projektowanie kontraktowe, IV – projektowanie techniczno-klasyfikacyjne, V – projektowanie wykonawcze, VI – dokumentacja zdawcza; etapy I, II i III łączy się często, nazywając je projektowaniem wstępnym

Proces projektowania konstrukcji kadłuba statku oznacza zatem uściślanie opisu elementów, polegające na podejmowaniu decyzji projektowych i gromadzeniu informacji dotyczących: (1) materiału do budowy konstrukcji, czyli doboru materiału na elementy konstrukcyjne (materiału); (2) rozmieszczenia elementów konstrukcyjnych w przestrzeni (topologii); (3) kształtu elementów konstrukcyjnych (kształtu); (4) wymiarów przekrojów poprzecznych elementów konstrukcyjnych (wymiarowania), zapewniających osiągnięcie na odpowiednim poziomie wyspecyfikowanych wcześniej właściwości konstrukcji – kryteriów oceny. W praktyce projektowej postępowanie to ma zazwyczaj charakter iteracyjny, to znaczy polega na stopniowym uszczegóławianiu konstrukcji, poczynając od wariantu lub wariantów przyjętych jako wyjściowe (początkowe).

Dla osiągnięcia celów projektowania kluczowe znaczenie mają decyzje podjęte na etapie projektowania wstępnego, ponieważ wtedy ustala się podstawowe cechy statku – w tym tkwi główne niebezpieczeństwo popełnienia zasadniczych błędów w projektowaniu jednostki. Błędy popełnione na tym etapie uwidocznione są w cechach użytkowych oraz eksploatacyjnych i nie mogą być w sposób zadowalający zrekompensowane w późniejszym projektowaniu detali na niższych poziomach hierarchicznych projektowania. Jeśli nie zostaną usunięte, mogą powodować największe straty (rysunek 1.3). Jednocześnie decyzje podjęte trafnie i szybko przynoszą największe korzyści i w sposób istotny wpływają na sukces przedsięwzięcia finansowego związanego z budową nowego statku. W związku z tym w pracy założono, że opracowane modele konstrukcji kadłuba i dokładność przeprowadzonych analiz będą odpowiednie dla projektu wstępnego statku.



Rys. 1.3. Ilustracja relacji pomiędzy kosztami (korygowania, naprawy) błędów projektowych oraz ilością informacji o projekcie w trakcie rozwoju projektu statku. Etapy projektowania: I – projektowanie koncepcyjne, II – projektowanie ofertowe, III – projektowanie kontraktowe, IV – projektowanie techniczno-klasyfikacyjne, V – projektowanie wykonawcze, VI – dokumentacja zwalczająca

W środowisku stoczniowych biur projektowych przyjętą praktyką jest oparcie się na zgromadzonym doświadczeniu projektowym dotyczących jednostek zbudowanych wcześniej. Teoretycznie projektanci mogą opracować nieskończoną liczbę wariantów projektowych spełniających określone wymagania, lecz nie są w stanie zbadać wszystkich wariantów jedynie na podstawie własnego doświadczenia i wiedzy o zbudowanych statkach. W praktyce więc konstrukcja kadłuba statku projektowana jest na podstawie doświadczenia i danych dotyczących podobnych statków zbudowanych, przy założeniu, że przyjęte wzorce reprezentują warianty bliskie optymalnym i że wprowadzenie małych zmian dostosowujących projekt do założonych wymagań nie wpłynie ujemnie na ekonomiczną efektywność zaprojektowanych jednostek. Takie podejście jest akceptowane w przypadku konwencjonalnych statków towarowych, takich jak masowce, tankowce i kontenerowce, które po dziesięcioleciach rozwoju mają ustaloną formę konstrukcyjno-architektoniczną.

Problem projektowania konstrukcji kadłuba statku morskiego uwzględnia nie jedno, a wiele kryteriów oceny, które zazwyczaj pozostają we wzajemnym konflikcie. Formułowanie zatem problemu projektowego na podstawie modelu jednokryterialnego okazuje się odległe od rzeczywistości, a uwzględnienie więcej niż jednego kryterium powoduje konieczność rozwiązania zadania wielokryterialnego. Wymaga to pełniejszego zbadania przestrzeni wariantów, bez możliwości wyboru wariantu jednoznacznie uznanego jako najlepszy. Uzyskany zbiór wariantów kompromisowych stanowi podstawę podjęcia ostatecznej decyzji projektowej, czyli wskazania wariantu (ew. wariantów) do dalszej analizy na kolejnym poziomie procesu projektowania. Podejmowanie decyzji, czyli wybór wariantu, obciążone jest w tym wypadku subiektywnością oceny, połączoną z brakiem pełnej wiedzy; można jedynie dążyć do ich minimalizacji. Celowe jest zatem właściwe zidentyfikowanie możliwie najlepszego rozwiązania jako rezultatu wielokryterialnego procesu projektowania konstrukcji. Wariant konstrukcji, przyjęty na tej podstawie jako rezultat procesu projektowania, determinuje charakterystyki statku (np. koszt budowy i cenę zakupu, szybkość eksploatacyjną, ładowność, zużycie paliwa) w akceptowanym obszarze tolerancji, przyjętym w danym etapie projektowania.

Mimo że stosowanie metod optymalizacji w projektowaniu konstrukcji kadłuba statków morskich nadal jest bardzo skomplikowane, budzi ono coraz większe zainteresowanie, podobnie jak w innych gałęziach nauk i praktyce inżynierskiej. Prowadzone są prace badawcze, których celem jest zdobycie wiedzy o obciążeniach działających na konstrukcję i jej odpowiedzi na zadane obciążenia, poszukiwanie bardziej efektywnych metod matematycznych i algorytmów numerycznych. Stosowanie różnorodnych uproszczeń podczas formułowania modeli obliczeniowych oraz stosowanie uproszczonych metod analizy konstrukcji kadłuba, a także odpowiednia dekompozycja zadań optymalizacji powodują, że zastosowanie metod optymalizacji w projektowaniu konstrukcji kadłuba statku jest już możliwe. Pomimo istniejących możliwości nie wdrożono metod optymalizacji do praktyki.

Biorąc pod uwagę wymiarowanie wiązań, podstawą projektowania konstrukcji statków są (1) albo wymagania towarzystw klasyfikacyjnych (np. DNV, LR, GL), opublikowane w postaci przepisów klasyfikacyjnych zawierających uproszczone formuły szacowania wartości obciążeń konstrukcji i wymiarów elementów konstrukcyjnych zapewniających przeniesienie tych obciążeń, albo (2) bardziej racjonalne podejście oparte bezpośrednio i całkowicie na numerycznych metodach mechaniki konstrukcji. Mimo że formułuje się niekiedy opinie, że przepisy klasyfikacyjne nie spełniają oczekiwań konstruktorów dotyczących projektowania konstrukcji o nowatorskich rozwiązaniach, są one zbiorem zaleceń wywodzących się z dobrej praktyki projektowej, w związku z czym ich stosowanie w przypadku konwencjonalnych statków jest w pełni uzasadnione. W przedstawionej pracy autor zakłada, że wymiary elementów konstrukcyjnych określone zostaną zgodnie z odpowiednimi wymaganiami towarzystw klasyfikacyjnych, umożliwiającymi szybkie i automatyczne zwymiarowanie wielu wariantów konstrukcji generowanych przez algorytm optymalizacyjny.

Pierwsze próby optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich polegały na przeprowadzaniu ręcznych obliczeń przy zastosowaniu prostych metod analizy (np. badań parametrycznych kilku wariantów projektowych). Systematyczne badania, wykorzystujące analityczne algorytmy optymalizacyjne, stały się możliwe po powszechnym wprowadzeniu komputerów. Pierwsze programy komputerowe realizujące optymalizację uruchomiono na początku 60. lat XX wieku. Do tego czasu konstrukcje kadłuba projektowano, wykonując obliczenia ręcznie z wykorzystaniem odpowiednio przygotowanych wykresów i tabel (m.in. Harlander 1960, Mero i Spunt 1965).

Postępujący rozwój komputerów i zwiększenie ich mocy obliczeniowych stymulowały rozwój numerycznych algorytmów optymalizacyjnych oraz umożliwiły prowadzenie kolejnych badań nad rozwiązywaniem różnorodnych problemów optymalizacji konstrukcji statków. Evans i Khoushy (1963), Moe (1968), Moe i Lund (1968), Lund (1970) oraz Nowacki i in. (1970) podjęli pierwsze próby optymalizacji konstrukcji zbiornikowców. Natomiast Kavlie (1966) oraz Moses i Onoda (1969) zoptymalizowali model kadłuba statku w postaci belki poddanej zginaniu. Caldwell i Hewitt (1976) przedstawili metodę optymalizacji panelu okrętowego. Jendo (1979) przeprowadził optymalizację konstrukcji ramowej zbiornikowca. Bardziej szczegółowy opis ówczesnego stanu wiedzy, dotyczącego optymalizacji konstrukcji statków, przedstawiono w pracach Evansa (1975) i ISSC (1976).

Nowym bodźcem do dalszych prac, dotyczących optymalizacji konstrukcji kadłuba statków, były prace kierowane przez Hughesa, zwieńczone zbudowaniem programu kompu-

terowego, wykorzystującego MES, umożliwiającego optymalizację dużych złożonych struktur, z uwzględnieniem wielu nieliniowych ograniczeń. Pierwsza wersja programu została zaprezentowana pod nazwą AUSTROSHIP (Hughes i Mistree 1977). Od tamtego czasu opracowano dwie nowe wersje tego programu – SHIPOPT (Hughes i in. 1980) i MAESTRO (Hughes 1985, 1988).

W dwóch ostatnich dziesięcioleciach XX wieku stosowano coraz więcej różnych technik obliczeniowych do optymalizacji konstrukcji statków; przykłady optymalizacji konstrukcji kadłuba statków przedstawiają między innymi Miura i in. (1973), Jendo (1979), Lyon (1982), Hughes (1987), Hung (1987), Jang i Na (1987, 1991), Kriezis (1991), Krol (1991), Rahman (1992), Hatzidakis i Bernitsas (1994), Konieczny i in. (1994), Nobukawa i in. (1995), Rahman i Caldwell (1995), Jang i Seo (1996), Liang i in. (1997), Augusto i Kawano (1998) oraz Ahuja i Ulfvarson (2006). Rodionov (1990) omówił teoretyczne podstawy jednokryterialnej optymalizacji konstrukcji statków, ilustrując je przykładami optymalizacji prostych elementów konstrukcyjnych. Stan ówczesny podsumowano w kolejnych raportach ISSC (1988, 1997, 1991, 1994, 2000) oraz w pracy Catley i in. (1990).

Prace o charakterze przeglądowym, opublikowane już w nowym stuleciu, to m.in. *Optimistic – Optimization in Marine Design* (2003) oraz publikacja Rigo (2003). W pierwszej pracy przedstawiono przegląd problemów oraz współczesny stan wiedzy dotyczący zastosowania metod optymalizacyjnych w projektowaniu statków i obiektów oceanotechnicznych, w tym także optymalizacji konstrukcji kadłuba statków. Jest to jedyna znana autorowi praca o charakterze monograficznym, dotycząca metod stosowanych do optymalizacji obiektów morskich. Nowacki (2010) dokonał syntetycznego przeglądu najważniejszych koncepcji i osiągnięć dotyczących komputerowego wspomaganie projektowania statków, w tym także optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich. Niestety, przegląd ten zakończył na początku lat osiemdziesiątych poprzedniego wieku, nie odnosząc się do osiągnięć najnowszych, w tym do zastosowań ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej. Kontynuowano także publikowanie podsumowań w kolejnych raportach ISSC (2006 b, 2009 b).

W ostatnich latach podjęto wysiłki zmierzające do stosowania w rozwiązywaniu zadań optymalizacji konstrukcji kadłuba statków nowoczesnych algorytmów optymalizacyjnych. Okada i Neki (1992, 1995), Nobukawa i Zhou (1996), Zhou i in. (1997 a, b), Nobukawa i in. (1998), Sekulski i Jastrzębski (1998, 1999 a, b), Sekulski (2000, 2009 a, b) wskazali, że algorytmy genetyczne mogą być skutecznym narzędziem stosowanym w jednokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich.

Podjęte próby wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich nie są liczne. Początkowo badacze nie wykorzystywali pojęcia dominacji Pareto i nie przeszukiwali systematycznie przestrzeni ocen w celu uzyskania zbioru rozwiązań niezdominowanych. Moe i Lund (1968) przedstawili dwukryterialną optymalizację kosztu i ciężaru konstrukcji kadłuba tankowca. Wynikiem obliczeń były wykresy obrazujące zmiany kryteriów optymalizacji w odniesieniu do zmiennych decyzyjnych. Rahman (1992) oraz Rahman i Caldwell (1995) zaprezentowali wyniki optymalizacji kosztu i ciężaru konstrukcji statków śródlądowych. Jang i Shin (1997) oraz Shin i in. (2006) zastosowali strategię ewolucyjną do wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba zbiornikowca pod względem ciężaru

i kosztu. Zastosowanie strategii ewolucyjnej do optymalizacji wielokryterialnej pozwoliło na odszukanie zbioru rozwiązań niezdominowanych. Praca Jang i Shin (1997) jest pierwszą znaną autorowi publikacją przedstawiającą wyniki poszukiwania zbioru rozwiązań niezdominowanych w przypadku wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statku morskiego. Yang i Hwang (2002) zastosowali algorytm genetyczny do optymalizacji kształtu grodzi falistej pod względem ciężaru i kosztu konstrukcji. Autorzy ci zastosowali skalaryzację funkcji celu i nie poszukiwali zbioru rozwiązań niezdominowanych. Klanac i Kujala (2004) zastosowali algorytm genetyczny do optymalizacji sandwiczowych paneli okrętowych pod względem ciężaru i kosztu. Jastrzębski i in. (2007) zastosowali prostą metodę obliczeń parametrycznych do optymalizacji konstrukcji kontenerowca pod względem ciężaru konstrukcji, długości spoin spawalniczych i powierzchni elementów konstrukcyjnych do konserwacji. Autorzy przeanalizowali kilka wybranych przez siebie wariantów, jednak nie poszukiwali zbioru rozwiązań niezdominowanych. Klanac i Jelovica (2007 a, b) zastosowali algorytm genetyczny do optymalizacji konstrukcji szybkiego promu pasażersko-samochodowego pod względem ciężaru i wysokości środka ciężkości konstrukcji. Jelovica i Klanac (2009) zastosowali algorytm genetyczny do optymalizacji konstrukcji chemikaliowca, a Klanac i in. (2009) – do optymalizacji konstrukcji chemikaliowca pod względem odporności kolizyjnej mierzonej wielkością energii zaabsorbowanej podczas kolizji, masy konstrukcji i masy stali nierdzewnej zastosowanej do budowy statku. Caprace i in. (2010) zaprezentowali wyniki optymalizacji konstrukcji zbiornikowca LNG pod względem ciężaru i kosztu konstrukcji. Do optymalizacji użyli deterministycznej metody linearyzacji nieliniowego zadania optymalizacyjnego i agregacji kryteriów optymalizacji z odpowiednio dobranej współczynnikami wagowymi. Sekulski (2010) wykorzystał różne strategie wielokryterialnego algorytmu genetycznego do optymalizacji szybkiego promu pasażersko-samochodowego pod względem ciężaru i pola powierzchni elementów konstrukcyjnych. Sekulski (2011 a, b, c) zastosował własną metodę ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej z kombinowaną funkcją celu do optymalizacji konstrukcji statku szybkiego. Opracowana metoda pozwoliła na zbudowanie zbioru rozwiązań niezdominowanych. Metodę tę szczegółowo omówiono w niniejszej rozprawie.

Podsumowując dokonany przegląd, można stwierdzić, że skuteczne poszukiwanie zbioru niezdominowanych rozwiązań konstrukcji kadłuba statku morskiego umożliwiło dopiero zastosowanie ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej w 90. latach XX wieku oraz że w większości omawianych przypadków optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich przyjęto dwa kryteria optymalizacji – ciężar i koszt wykonania konstrukcji.

Pierwszą znaną autorowi pracą polskiego badacza, dotyczącą optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu okrętowym, jest opublikowana w 1975 roku propozycja metody oceny wielokryterialnych rozwiązań projektowych (Jagoda 1975) zastosowanej do projektowania siłowni okrętowej.

Termin „optymalizacja konstrukcji kadłuba statku” jest różnie rozumiany przez różne osoby lub zespoły prowadzące analizę. Dla zamawiającego statek w stoczni optymalizacja konstrukcji nowej jednostki oznacza określenie wymiarów głównych zapewniających maksymalizację zysków z eksploatacji (Buxton 1976). Dla projektanta jednostki optymalizacja konstrukcji (struktury) oznacza jednoczesne projektowanie kształtu i projektowanie wiązań

(ang. *scantling*) – Keane i in. (1991). Dla konstruktora optymalizacja konstrukcji to tak naprawdę znalezienie optymalnych wymiarów wiązań dna, burt i pokładów.

Optymalną konstrukcję kadłuba statku można otrzymać, przeprowadzając analizę optymalizacyjną w różnych obszarach, takich jak: optymalizacja wymiarów (ang. *sizing optimisation*), optymalizacja kształtu (ang. *shape optimisation*), optymalizacja topologii (ang. *topological optimisation*). Można również prowadzić optymalizację materiału konstrukcyjnego (ang. *material optimisation*).

Optymalizacja wymiarów może być rozumiana jako proces poszukiwania optymalnych wymiarów elementów konstrukcyjnych, przy ustalonych kształtach tych elementów i topologii. Wymiary główne i kształt kadłuba są ustalone. Pierwsze optymalizacyjne programy komputerowe, takie jak: SUMT (Moe i Lund 1968, Moses i Onoda 1969, Lund 1970), umożliwiły poszukiwanie optymalnych wymiarów elementów konstrukcyjnych, wykorzystując analityczne obliczenia odpowiedzi konstrukcji w postaci naprężeń lub odkształceń w poszczególnych punktach lub przekrojach elementów konstrukcyjnych. Takie podejście umożliwiło przeprowadzenie szybkich obliczeń optymalizacyjnych, lecz algorytm odpowiedzi konstrukcji musiał być formułowany specjalnie dla każdego konkretnego przypadku konstrukcji. Zastosowanie w latach 80. (Hughes i in. 1980, Zanic i in. 2000) MES do oceny odpowiedzi konstrukcji wymagało długich obliczeń niezbędnych do optymalizacji wymiarów elementów konstrukcyjnych. W celu uniknięcia tej niedogodności zaproponowano opracowanie bardziej efektywnych matematycznych algorytmów optymalizacji (Fleury 1989, 1993), a także rozdzielenie zadania optymalizacyjnego na dwa etapy (Hughes 1988, Sen i in. 1989, Krol 1991, Rahman i Caldwell 1995, Rigo 2001 a, b, Rigo i Fleury 2001) w tzw. procedurze racjonalnego projektowania (ang. *rational design*).

W ciągu ostatnich 20 lat nastąpił intensywny rozwój narzędzi do optymalizacji kształtu jednostek pływających (Beckers 1991). Opracowanie bardziej zaawansowanych metod obliczeniowych mechaniki płynów oraz losowych odpornych algorytmów optymalizacyjnych umożliwiło optymalizację kształtu kadłubów statków. Wadą takich procedur optymalizacyjnych są jednak wątpliwości dotyczące możliwości budowy kadłubów o kształtach sugerowanych przez wyniki optymalizacji, z uwzględnieniem wymagań stawianych konstrukcji kadłuba. Jako przykłady można wymienić prace Dejhalla i in. (2001, 2002), Chena i Huan-ga (2002) oraz Yanga i in. (2002). Trudnym do rozwiązania problemem pozostaje wzajemne oddziaływanie płynu i konstrukcji.

Stale postępujący rozwój możliwości obliczeniowych komputerów i algorytmów optymalizacyjnych stwarza szansę na pojawienie się już niedługo możliwości optymalizacji również topologii konstrukcji (Rigo 2001 b). Przez topologię konstrukcji rozumieć należy liczbę i typ elementów konstrukcji (kratowych, cięgnowych, belkowych, cienkościennych, płytowych, tarczowych, powłokowych itp.) oraz sposób ich połączeń. Możliwość rozwiązywania takich zadań optymalizacyjnych oznaczać będzie znaczny postęp w projektowaniu konstrukcji statków, dając szansę na nowatorskie podejście do projektowania konstrukcji opartych na nowej filozofii projektowania. Zostały już podjęte badania dotyczące zadań o niewielkiej liczbie zmiennych (Bendsoe i Kikuchi 1988, Jastrzębski i Sekulski 2005).

Problem doboru optymalnych własności mechanicznych i struktury materiału konstrukcyjnego (izotropowego, ortotropowego, anizotropowego) oraz stałych określających po-

szczególne rodzaje materiałów nie został dotychczas podjęty w odniesieniu do konstrukcji statków morskich. Istnieją w tym zakresie doświadczenia z zastosowania metod optymalizacji do projektowania struktur laminatów poliestrowo-szklanych, stymulowane przez potrzeby przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego. Z punktu widzenia konstrukcji statków, budowanych przede wszystkim ze stali, należy w pierwszej kolejności podjąć próbę rozwiązania zadania optymalnego doboru asortymentu stali przeznaczonej na odpowiednie elementy konstrukcyjne.

Zmienne projektowe, określające właściwości materiału konstrukcyjnego, zwykle są zmiennymi dyskretnymi, ponieważ wybór dokonywany jest z pewnego skończonego zbioru przyjętego asortymentu. Jeżeli rozpatruje się małą liczbę przewidywanych materiałów, najbardziej efektywna jest optymalizacja w odniesieniu do innych zmiennych (oddzielnie dla każdego materiału), a następnie porównanie otrzymanych rezultatów optymalizacji częściowych. Zastosowanie materiałów kompozytowych w elementach konstrukcji rozszerza zakres zadań, w których charakterystyki materiału występują jako zmienne projektowe. Choćby charakterystyki materiałów kompozytowych można uważać za ciągłe (np. granica plastyczności, objętość wypełniacza), problem ostatecznego wyboru materiału na konstrukcję w większości przypadków ma charakter dyskretny. W związku z tym także w tym wypadku najbardziej odpowiednim sposobem wykorzystania metod optymalizacji przy wyborze materiału jest uzyskanie kilku niezależnych rozwiązań przy zadanych wartościach zmiennych opisujących mechaniczne własności materiału. Procedury optymalizacji, dotyczące wyboru materiału konstrukcyjnego, stosuje się rzadko.

Poszukiwanie optymalnej konstrukcji kadłuba statków morskich odbywa się dziś w czterech obszarach: optymalizacji kształtu, optymalizacji materiału, optymalizacji topologii i optymalizacji wymiarów elementów konstrukcyjnych. Ze względu na specyfikę zadań optymalizacji nie sposób jest rozwiązywać jedno projektowe zadanie optymalizacji jednocześnie we wszystkich tych obszarach. Powszechną praktyką jest zatem to, że w każdym z nich formułuje się zadanie optymalizacji, niezależnie od pozostałych. Zadania te z kolei rozwiązywane są w zespołach eksperckich pracujących niezależnie w różnych miejscach i różnym czasie. Tak zorganizowany proces projektowania nazwać można projektowaniem rozproszonym. Podział ten wydaje się sztuczny i wynika z braku odpowiednich narzędzi pozwalających prowadzić jednocześnie projektowanie-optymalizację we wszystkich obszarach.

Rozwiązywanie oddzielnych zadań optymalizacyjnych w projektowaniu rozproszonym wydłuża znacznie proces projektowania konstrukcji kadłuba statku oraz bardzo ogranicza lub wręcz uniemożliwia skuteczne poszukiwanie zadowalających rozwiązań kompromisowych. Niemożliwe jest również w takim wypadku zbudowanie narzędzia obliczeniowego pozwalającego na automatyczne (bez udziału projektanta lub z jego ograniczonym bezpośrednim udziałem) generowanie projektów statków. Jeśli więc w przyszłości narzędzie takie ma powstać, powinno umożliwiać skuteczne rozwiązywanie zunifikowanych zadań optymalizacji kształtu–materiału–topologii–wymiaru (Sekulski 2009 a). Sekulski (2009 a, b) wykazał, że algorytmy genetyczne mogą być rozważane jako metoda umożliwiająca rozwiązywanie takiego zunifikowanego zadania optymalizacji.

Ponieważ zunifikowane zadania optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich nie są jeszcze formułowane i rozwiązywane, dokonuje się prób racjonalnego projektowania

konstrukcji kadłuba statków na drodze integrowania prac projektowych realizowanych w rozproszeniu. Odbyna się to przede wszystkim poprzez odpowiednie skoordynowanie prac projektowych oraz opracowywanie procedur wymiany informacji pomiędzy poszczególnymi zespołami realizującymi zadania szczegółowe. Próba zbudowania systemu integrującego projektowanie rozproszone konstrukcji statków morskich (DSS) był realizowany w latach 2006–2009 projekt IMPROVE finansowany z budżetu UE w ramach 6. programu ramowego (Giuglea i in. 2008, Rigo i in. 2010). Siedemnastu partnerów podjęło się opracowania kolejnych generacji trzech typów statków na podstawie systemu wspierania podejmowania decyzji, przy wykorzystaniu zaawansowanych technik analizy i syntezy na wczesnym etapie projektowania. Projekt dotyczył nowej generacji gazowców LNG i chemikaliowców oraz innowacyjnego rozwiązania dużego statku ro-pax. Konstrukcja, technologia wykonania, aspekty eksploatacyjne, funkcjonalność oraz wymogi bezpieczeństwa statku rozpatrywane były równocześnie. Osiągnięte rezultaty wykazały, że odpowiednio zintegrowane zespoły, realizujące w rozproszeniu cząstkowe zadania projektowe, miały wiele trudności i że zaplanowany cel nie został w pełni zrealizowany.

1.2. Ewolucyjna optymalizacja wielokryterialna

Powszechnie akceptowanym rozwiązaniem zadania z wieloma sprzecznymi kryteriami oceny jest zbiór rozwiązań niezdominowanych w sensie Pareto¹. W przypadku, gdy pełen front Pareto, zawierający oceny rozwiązań niezdominowanych, nie może być otrzymany, można zadowolić się jego przybliżeniem, to znaczy skończonym zbiorem rozwiązań niezdominowanych pokrywających go z akceptowalną rozdzielczością. Takie przybliżenie może być potraktowane przez decydenta jako źródło intuicji o charakterze konfliktu i możliwych kompromisach pomiędzy różnymi kryteriami. Na tej podstawie może on podjąć decyzję o wyborze kompromisu, który uzna za najbardziej zadowalający.

Do intensywniej rozwijających się w ostatnich latach obszarów poszukiwań skutecznych metod rozwiązywania wielokryterialnych zadań optymalizacyjnych należy ewolucyjna optymalizacja wielokryterialna (EMO). Algorytmy ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej (MOEA) były z powodzeniem stosowane do rozwiązywania różnych zadań optymalizacji wielokryterialnej (Deb 2001, Coello Coello 2006). Prawie wszystkie dobrze znane MOEA, a przede wszystkim uważane za najsukcesowniej algorytmy NSGA-II (Deb i in. 2000) i SPEA2 (Zitzler i in. 2001, 2002) wykorzystują relację dominacji Pareto, łącznie z miarami skupienia, do szacowania funkcji przystosowania dla każdego wygenerowanego wariantu. W tym znaczeniu nazywa się je algorytmami opartymi na relacji dominacji Pareto (PDBA). Oparte na relacji Pareto algorytmy są zazwyczaj bardzo skuteczne w poszukiwaniu rozwiązań optymalnych Pareto lub rozwiązań leżących w pobliżu frontu Pareto w przypadku zadań z dwoma lub trzema kryteriami. Skuteczność tych algorytmów pogarsza się znacznie, gdy liczba kryteriów optymalizacji rośnie (Hughes 2003, 2005, Khara i in. 2003, Purshouse i Fleming 2003, Jaszkiwicz 2004, Ishibuchi i in. 2008 a, b). Powodem jest to, że w przypad-

¹ Podstawowe koncepcje optymalizacji wielokryterialnej, w tym zaproponowaną przez Pareto koncepcję dominacji w wielokryterialnych problemach wyboru, omówiono w rozdziale 3 niniejszego opracowania.

ku wielu kryteriów prawie wszystkie warianty w populacji okazują się wariantami niezdominowanymi. Jeśli zaś w populacji wszystkie warianty są niezdominowane, relacja dominacji Pareto nie może wytworzyć „ciśnienia” selekcyjnego w kierunku frontu Pareto. W takim przypadku w każdym algorytmie opartym na relacji dominacji Pareto wartości funkcji przystosowania szacuje się dla każdego wariantu tylko na podstawie miary skupienia wytwarzającej nacisk selekcyjny jedynie na zróżnicowanie zbioru generowanych wariantów, bez uwzględnienia położenia względem frontu Pareto. Zatem skuteczność metod założonych na relacji dominacji Pareto pogarsza się w przypadku wzrostu liczby kryteriów optymalizacji.

Hughes (2005) wykazał, że w przypadku zadań z wieloma kryteriami optymalizacji wielokrotnie uruchomienie optymalizacji jednokryterialnej, z funkcją celu skalaryzującą kryteria optymalizacji, jest lepsze od pojedynczego uruchomienia ewolucyjnego algorytmu optymalizacji wielokryterialnej, wykorzystującego szeregowanie pod względem relacji dominacji Pareto. Podobne rezultaty uzyskał Jaszkiwicz (2004). Purshouse i Fleming (2003) oraz Hughes (2005) wykazali zmniejszającą się wraz ze wzrostem liczby kryteriów skuteczność algorytmu NSGA-II (Deb i in. 2002). Wagner i in. (2007) potwierdzili pogorszenie się skuteczności zachowania uznanych algorytmów opartych na dominacji Pareto NSGA-II i SPEA2, dostrzeżone wcześniej przez Purshouse’a i Fleminga (2003) oraz Hughesa (2005). Wykazali szybkie pogorszenie skuteczności związane ze wzrostem liczby kryteriów, a nawet to, że algorytmy mogą w ogóle nie generować rozwiązań zbieżnych z frontem Pareto lub że mogą one utknąć daleko od niego. Wspomniane rezultaty badań sugerują, że użycie ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej, wykorzystujących w procesie selekcji atrybuty dominacji Pareto, może nie być skuteczne w przypadku poszukiwania rozwiązań problemów z czterema lub większą liczbą kryteriów oceny.

Podsumowując, Kruisselbrink i in. (2009) twierdzą, że pełne odwzorowanie przybliżenia frontu Pareto jest użyteczne, jednak w praktyce możliwe jest tylko w przypadku, gdy liczba kryteriów jest nie większa niż cztery.

Wykazano także, że w przypadku rozwiązywania wielokryterialnych zadań optymalizacyjnych z liczbą kryteriów większą niż trzy skuteczniejsze mogą być algorytmy skalaryzacji kryteriów oceny SFFA (Jaszkiwicz 2002, 2004, Hughes 2003, 2005, 2007, Ishibuchi i Nojima 2006). SFFA mają wiele zalet, np. możliwość różnorodnego skalowania wielu kryteriów optymalizacji oraz wysoką zdolność rozwiązywania problemów optymalizacji kombinatorycznej. Ponadto szacowanie funkcji celu oparte na skalaryzacji kryteriów oceny wymaga znacznie mniej nakładów obliczeniowych w porównaniu z algorytmami opartymi na relacji dominacji Pareto. Zatem wydajność obliczeniowa jest kolejną zaletą SFFA.

Obiecującym kierunkiem, umożliwiającym zwiększenie skuteczności MOEA, jest także sprzęgnięcie ich z lokalnymi metodami poszukiwania (Ishibuchi i Murata 1996, Jaszkiwicz 2002, 2004, Ishibuchi i in. 2003, Khara i in. 2003, Sindhya i in. 2008). W lokalnym poszukiwaniu w takich sprzęgniętych ewolucyjnych algorytmach optymalizacji wielokryterialnej wykorzystuje się zwykle skalaryzację funkcji celu, np. ważoną sumę w lokalnych algorytmach genetycznych (Ishibuchi i Murata 1998), lub skalaryzację ze współczynnikami wagowymi zależnymi od położenia ocenianego wariantu względem najlepszych i najgorszych rozwiązań w zbiorze (Sindhya i in. 2008). Łatwe jest również włączenie poszukiwania lokalnego do algorytmów opartych na skalaryzacji kryteriów oceny; włączenie poszukiwania

lokalnego do algorytmów opartych na relacji dominacji Pareto zazwyczaj jest trudne. Wyso-ka zgodność z algorytmami lokalnymi jest zatem kolejną zaletą SFFA.

Kluczowe znaczenie w skutecznym zastosowaniu SFFA ma wybór odpowiedniego sposobu skalaryzacji. Powszechnie wiadomo, że metody ważonych celów są nieskuteczne w przypadku niewypukłego frontu Pareto, jednakże – jak sugerują Hang i Li (2007) – SFFA może być skuteczna w rozwiązywaniu MOOP w przypadku wypukłego frontu; jednak, gdy jest on niewypukły, poszukiwać należy innej metody szacowania funkcji przystosowania. W związku z tym kształt frontu Pareto może być dobrym wskaźnikiem określającym wybór metody ska-laryzacji. Niestety, kształt frontu Pareto zazwyczaj nie jest znany przed rozpoczęciem obliczeń optymalizacyjnych, a do jego wyznaczenia potrzeba bardzo dużej liczby obliczeń, np. pojedyn-czych przebiegów z ustalonymi wartościami współczynników wagowych (problem można czę-ściowo rozwiązać, stosując generowane losowo wartości współczynników wagowych).

Wydaje się, że SFFA mogą być skuteczne, gdy bieżąca populacja jest odległa od frontu Pareto, nawet jeśli jego kształt nie jest wypukły. Jeśli populacja zbliża się do niewy-pukłego frontu Pareto, skuteczniejsze mogą być inne metody szacowania funkcji przystoso-wania. Można również dla osobników w tej samej populacji stosować SFFA, jeśli są odległe od niewypukłej części frontu, a inne metody szacowania, jeśli leżą w jego pobliżu.

MOEA zazwyczaj skutecznie znajdują rozwiązania optymalne Pareto lub im bliskie, zlokalizowane wokół centralnych obszarów frontu Pareto zadań dwukryterialnych. Jednak nie zawsze okazują się skuteczne w znalezieniu dobrych rozwiązań leżących w pobliżu jego krawędzi. Metodą zmniejszenia tych trudności może być większe zróżnicowanie rozwiązań uzyskiwane poprzez zwiększenie wartości prawdopodobieństwa krzyżowania i prawdopodo-bieństwa mutacji. Jednak ceną za większe zróżnicowanie rozwiązań w pobliżu krawędzi frontu Pareto jest gorsze dopasowanie zbioru rozwiązań do prawdziwego frontu.

W obszarze ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej rozwiązano dotychczas wie-le zadań testowych i praktycznych dla dwu- lub trzykryterialnych zadań optymalizacyjnych. Zadania uwzględniające więcej niż trzy kryteria, które nazywa się także problemami z dużą liczbą kryteriów (MOP) – Farina i Amato (2002), próbowano rozwiązywać bardzo rzadko (Wagner i in. 2007). Przewiduje się, że wiele metod skutecznych w rozwiązywaniu zadań uwzględniających niewielką liczbę kryteriów nie będzie tak skutecznych w przypadku zadań z wieloma kryteriami. Zatem MOP stanowią znacznie większe wyzwanie niż rozwiązywane dotychczas wielokryterialne zadania optymalizacyjne (MOOP).

Procedury selekcji wykorzystywane w MOEA wymagają odwzorowania wektora ce-lów (wektora ocen) do odpowiedniej wielkości wprowadzającej porządek w ocenianym zbiorze rozwiązań. MOEA zawierają zwykle dwa operatory selekcji. Zasadniczy operator selekcji oparty jest na relacji dominacji Pareto i preferuje rozwiązania niezdominowane przed rozwiązaniami zdominowanymi. Drugi operator umożliwia zachowanie zróżnicowania i klasyfikowanie rozwiązań, które nie mogą być porządkowane według relacji dominacji (np. rozwiązania niedopuszczalne)¹. Przy takich metodach realizowania operacji selekcji relacja

¹ W propozycji autora funkcja przystosowania reprezentuje takie dwa operatory selekcji; su-ma kryteriów oceny określana jest dla wszystkich generowanych wariantów konstrukcji; atrybuty dominacji i odległość od rozwiązania asymptotycznego określone są dodatkowo jedynie dla warian-tów dopuszczalnych.

dominacji Pareto może nie być istotna jako założenie podstawowego operatora selekcji, z powodu dużej liczby rozwiązań, które nie mogą być ze sobą porównywane. Znaczenie drugiego mechanizmu selekcji rośnie wraz ze wzrostem wymiaru przestrzeni celów od momentu, gdy operator selekcji opartej na relacji dominacji Pareto coraz mniej skutecznie rozróżnia selekcionowane warianty.

W tym miejscu należy stwierdzić, że ewolucyjne algorytmy optymalizacji wielokryterialnej, skalaryzujące kryteria oceny, były pierwszymi próbami wykorzystania algorytmów ewolucyjnych do rozwiązywania MOOP (Schaffer 1985, Murata i Ishibuchi 1995). Jednak po opracowaniu skutecznych metod wykorzystujących atrybuty dominacji Pareto metody skalaryzujące zostały potraktowane jako zakończony etap rozwoju MOEA i nie były w istotny sposób rozwijane. Omówione wyniki badań wskazują jednak na uzasadnioną potrzebę powrotu do tej grupy metod i ponownego podjęcia prób opracowania skutecznych MOEA, wykorzystujących w procesie selekcji skalarne funkcje celu (skalaryzujące kryteria optymalizacji) z ewentualnym połączeniem z innymi strategiami wspomagającymi szacowanie funkcji przystosowania.

1.3. Problem badawczy, cel i zakres pracy

Dokonany przegląd problematyki optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich oraz problematyki ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej wskazuje na to, że (1) istnieje potrzeba formułowania oraz skutecznego rozwiązywania, na etapie projektu wstępnego, zunifikowanych zadań wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich oraz że (2) istnieje potrzeba opracowania skutecznych ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji kadłuba statków morskich, wykorzystujących w procesie selekcji, oprócz atrybutów dominacji w odniesieniu do relacji dominacji Pareto, także skalaryzację kryteriów optymalizacji, ponieważ algorytmy takie mogą okazać się skuteczne w przypadku rozwiązywania zadań z wieloma, tzn. z więcej niż trzema, kryteriami optymalizacji.

Autor zaproponował metodę optymalizacji wielokryterialnej, w której algorytm optymalizacyjny wykorzystuje własną koncepcję sformułowania kombinowanej funkcji celu integrującej w jednym wyrażeniu, oprócz kryteriów optymalizacji, także atrybuty dominacji w odniesieniu do relacji dominacji Pareto. Po sformułowaniu koncepcji kombinowanej funkcji celu autor sformułował następujące pytania: (1) czy ewolucyjny algorytm optymalizacji wielokryterialnej z kombinowaną funkcją celu może być skuteczny do rozwiązania zunifikowanego zadania optymalizacji wymiarów i topologii elementów konstrukcyjnych kadłuba statku morskiego na etapie projektu wstępnego?, (2) w jaki sposób algorytm obliczeniowy budować będzie zbiór rozwiązań niezdominowanych przybliżających front optymalny Pareto?, (3) w jaki sposób przeprowadzać ocenę jakości otrzymanych rezultatów – zbiorów przybliżających?, (4) w jaki sposób przeprowadzać ocenę skuteczności obliczeniowych algorytmów optymalizacyjnych?

Dostrzeżone potrzeby oraz postawione pytania pozwoliły na sformułowanie następującego problemu badawczego, stanowiącego podstawę niniejszej pracy: czy ewolucyjny algorytm optymalizacji wielokryterialnej, wykorzystujący narzędzia algorytmów genetycznych oraz sformułowaną w pracy skalarną funkcję celu ujmującą w jednym wyrażeniu kry-

teria oceny oraz atrybuty dominacji, może być skuteczny w rozwiązywaniu zunifikowanych częściowo zadań wielokryterialnej optymalizacji wymiarów elementów oraz topologii konstrukcji kadłuba statków morskich na etapie projektu wstępnego?

Z przedstawionego problemu badawczego wynika cel ogólny pracy, którym było opracowanie metody modelowania wielokryterialnego procesu decyzyjnego na etapie projektu wstępnego konstrukcji kadłuba statku morskiego oraz wskazanie, w jaki sposób podejmujący decyzje, dotyczące projektu konstrukcji kadłuba statku (projektant, decydent), może uzyskać za pomocą zastosowanej metody (ewolucyjnego algorytmu optymalizacji wielokryterialnej z kombinowaną funkcją celu) pogląd na temat decyzji ekstremalnych (np. o najmniejszych lub największych wartościach kryteriów oceny) i rozwiązań kompromisowych, aby następnie – przy uwzględnieniu dodatkowych warunków nieuwzględnionych w wykorzystanych algorytmach, swojego doświadczenia oraz intuicji – podjąć decyzję w sposób najbardziej uzasadniony. Przedstawiony w sposób ogólny cel pracy można uszczegółowić w postaci (1) celu poznawczego, badawczego, oraz (2) celu użytecznego, praktycznego.

Celem poznawczym pracy jest zbadanie, czy ewolucyjny algorytm optymalizacji wielokryterialnej z kombinowaną funkcją celu może być skutecznym narzędziem służącym do rozwiązania częściowo zunifikowanego zadania wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statku na etapie projektu wstępnego.

Celem użytecznym pracy jest opracowanie metody oraz narzędzia obliczeniowego umożliwiającego skuteczne rozwiązanie zunifikowanych zadań optymalizacji wymiarów elementów i topologii konstrukcji kadłuba statku morskiego na etapie projektu wstępnego, a także opracowanie metody oceny jakości osiągniętych wyników oraz skuteczności algorytmów obliczeniowych.

Celami pośrednimi procesu badawczego są: (1) rozważania teoretyczne dotyczące metod formułowania i rozwiązywania zadań optymalizacji wielokryterialnej, (2) opracowanie algorytmu ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji kadłuba statku, (3) opracowanie szczegółowych technik obliczeniowych, (4) opracowanie procedur obliczeniowych kontroli sformułowanych ograniczeń, (5) opracowanie metod śledzenia ewolucji populacji podczas symulacji, (6) opracowanie metod oceny jakości zbiorów przybliżających, (7) opracowanie metod oceny skuteczności algorytmów optymalizacji wielokryterialnej, (8) zbudowanie narzędzia obliczeniowego systemu programów komputerowych, (9) opracowanie modeli obliczeniowych konstrukcji kadłuba statku, (10) zaplanowanie symulacji komputerowych, (11) przeprowadzenie symulacji komputerowych, (12) przeanalizowanie wyników symulacji komputerowych, (13) sformułowanie wniosków i podsumowanie przeprowadzonych badań.

Zakres pracy ograniczono do pierwszego kroku unifikacji zadania optymalizacji konstrukcji kadłuba statku, czyli do sformułowania i rozwiązania zunifikowanego zadania optymalizacji topologii-wymiaru elementów konstrukcyjnych. Przeprowadzono szczegółową analizę podstaw teoretycznych i praktycznych zastosowań ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu konstrukcji kadłuba statku. Odpowiedziano na pytanie, czy wybrana metoda optymalizacyjna może być zastosowana do rozwiązania sformułowanego zadania optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich. Sformułowano założenia ewolucyjnego algorytmu optymalizacji wielokryterialnej do skutecznej optymalizacji

zacji konstrukcji statków na etapie projektowania wstępnego. Opracowane procedury obliczeniowe przedstawiono w postaci systemu programów komputerowych. Zbudowane narzędzie obliczeniowe zastosowano do serii symulacji komputerowych na opracowanym specjalnie modelu konstrukcji kadłuba wybranego statku morskiego. Wyniki symulacji, w tym w szczególności jakość uzyskanych zbiorów rozwiązań niezdominowanych oraz skuteczność algorytmów obliczeniowych, szczegółowo przedyskutowano i wykorzystano jako założenie do sformułowania ogólnych wniosków dotyczących skuteczności opracowanej metody.

Przystępując do realizacji sformułowanych celów, przyjęto następujące założenia: (1) przedmiotem badań będzie morski statek towarowy, (2) praca dotyczyć będzie konstrukcji kadłuba statku, (3) ilość informacji o projekcie oraz stopień złożoności analiz wytrzymałościowych będą właściwe dla projektu wstępnego, (4) modele oraz procedury obliczeniowe będą właściwe dla kadłuba statku wykonanego z materiałów metalowych, (5) do rozwiązania wielokryterialnego zadania optymalizacji wykorzystana zostanie koncepcja dominacji Pareto, (6) do formułowania ograniczeń wytrzymałościowych z punktu widzenia wytrzymałości ogólnej i lokalnej wykorzystane zostaną przepisy towarzystwa klasyfikacyjnego, (7) opracowana metoda zostanie zweryfikowana za pomocą symulacji komputerowych, (8) symulacje przeprowadzone zostaną na jednym przykładzie statku – demonstratorze.

W celu potwierdzenia skuteczności opracowanej metody oraz zbudowanego narzędzia obliczeniowego zastosowana zostanie technika symulacji komputerowej, ponieważ zdaniem autora: (1) brakuje właściwej metody analitycznego rozwiązywania problemu wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statku; (2) dostępna jest dostateczna liczba danych i informacji o modelowanej konstrukcji kadłuba statku, przy dokładności odpowiedniej dla projektu wstępnego, a zatem istnieje możliwość zapewnienia realizmu modelu obliczeniowego; (3) ewolucyjna optymalizacja wielokryterialna wymaga wykonania wielu obliczeń, a zastosowanie komputera znacznie przyspiesza uzyskanie informacji o poszukiwanym zbiorze przybliżającym; (4) rozpatrzone inne sposoby rozwiązania są nieodpowiednie, co oznacza, że w przypadku sformułowanego problemu nie można zastosować ani obserwacji na rzeczywistych obiektach, ani eksperymentu fizycznego; (5) symulacja procesu optymalizacji, czyli poszukiwania zbioru przybliżającego, może dostarczyć cennych i pouczających informacji o procesach zachodzących w zbiorach przybliżających, których nie można byłoby uzyskać za pomocą innych metod badawczych, np. badań empirycznych na rzeczywistych obiektach lub eksperymentów na modelach fizycznych.

Dokonany przegląd opublikowanych prac różnych autorów wskazuje, że wielokryterialna optymalizacja konstrukcji kadłuba statku morskiego nie jest często podejmowanym tematem badań i że nieliczne są jej praktyczne zastosowania w projektowaniu konstrukcji kadłuba statków morskich. Napotymane trudności, związane przede wszystkim z formułowaniem odpowiednio szczegółowych modeli optymalizacyjnych oraz z budową skutecznych metod obliczeniowych, powodują, że problemy te są przedmiotem zainteresowania przede wszystkim ośrodków badawczych. Brakuje także systematycznych badań skuteczności ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej do optymalizacji konstrukcji kadłuba statków morskich.

W rozdziale 2 omówiono zasadnicze grupy zadań optymalizacyjnych rozwiązywanych w procesie projektowania konstrukcji statków. Zwrócono uwagę na istniejące odseparowanie

poszczególnych obszarów optymalizacji konstrukcji i potrzebę unifikacji takich zadań. Omówiono wybrane metody i narzędzia obliczeniowe wykorzystywane do optymalizacji konstrukcji statków. Uzasadniono wybór algorytmów genetycznych jako metody rozwiązywania sformułowanego w pracy zadania wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statku.

W rozdziale 3 przedstawiono podstawowe koncepcje optymalizacji wielokryterialnej, ogólne sformułowanie zadań optymalizacji wielokryterialnej oraz szczegółowo omówiono możliwe do sformułowania warianty relacji dominacji Pareto, mającej zasadnicze znaczenie w poszukiwaniu rozwiązań wielokryterialnych zadań optymalizacji. Przyjęto, że rozwiązaniem zadania optymalizacji wielokryterialnej jest zbiór przybliżający front rozwiązań optymalnych w sensie Pareto.

W rozdziale 4 przedstawiono klasyczne i ewolucyjne metody optymalizacji wielokryterialnej. Szczególną uwagę zwrócono na atrybuty dominacji jako skuteczne narzędzie badań wewnętrznej struktury zbioru rozwiązań dopuszczalnych.

W rozdziale 5 przedyskutowano rzadko poruszany w literaturze problem oceny jakości rezultatów optymalizacji wielokryterialnej zbiorów przybliżających. Szczegółowo omówiono koncepcję wskaźników jakości oraz sformułowano koncepcję wektorowych wskaźników jakości.

W rozdziale 6 przedstawiono zbudowany system programów komputerowych, stanowiący narzędzie obliczeniowe służące do ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji kadłuba statku. Szczegółowo omówiono oryginalne techniki obliczeniowe oraz koncepcję procedury oceny jakości uzyskanych rozwiązań oraz algorytmów obliczeniowych.

W rozdziale 7 przedstawiono szczegółowo proces formułowania zadania wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji kadłuba statku, zmierzający do opracowania modelu umożliwiającego zastosowanie zbudowanego narzędzia obliczeniowego.

W rozdziale 8 przedstawiono program, przebieg oraz rezultaty obliczeń badawczych. Celem przeprowadzenia serii symulacji komputerowych było sprawdzenie skuteczności proponowanych algorytmów ewolucyjnej optymalizacji wielokryterialnej oraz opracowanego narzędzia obliczeniowego.

W rozdziale 9 przedyskutowano szczegółowo jakość rozwiązań uzyskanych w trakcie obliczeń oraz oceniono skuteczność zastosowanych algorytmów optymalizacyjnych.

W rozdziale 10 dokonano podsumowania i sformułowano ogólne wnioski. W rozdziale 11, kończącym pracę, wskazano kierunki dalszych badań.

Pracę uzupełniają załączniki oraz wykaz wykorzystanej literatury.

Summary

Selected problems of multi-objective optimization in the seagoing ship hull structure preliminary design

In the continuously changing economic situation the methods for ship structural design used nowadays are sometimes insufficient. A need for modernization of the cognitive apparatus is more and more apparent in the ship structural design to discover and conceptualize various aspects of designing. New methods can be attempted to be found or change the ones used so far. It is possible and may turn efficient application of methods developed in other fields. The results of the investigations prove that in the ship design and, especially, in the ship structural design, multi-objective evolutionary algorithms may be especially useful. Applications of these algorithms, even not many numerous, have been attempted, also by the author, since the 1990th confirmed their effectiveness also in the ship structural design. In this context, an objective of the dissertation is to develop a method for evolutionary multi-objective optimization of complex structures such as ship hull structures.

Multi-objective optimization of complex objects such as the hulls of seagoing vessels, despite more and more greater research and computational potential still encounters many barriers making practical application difficult even at the preliminary design where the models are significantly simpler than the models at the next design stages. The difficulties make investigations and applications related to the ship hull optimization focus on single-objective despite the fact that the most real problems in the ship structural design call for considering more than one optimization objective.

From the point of view of the problems related to the ship hull structural design searching optimal solutions is performed in the following four areas: shape optimization, material optimization, topology optimization as well as optimization of dimensions of structural elements. Due to the specific features of the optimization problems solved in each of these areas it is thus impossible to formulate and solve a single optimization problem covering all the areas. A common practice is therefore that in each of the areas the optimization problem is formulated and solved independently of the others. The division is disadvantageous, however, for the correct designing and the reason can be the lack of suitable tools for simultaneous designing-optimization in all areas. Formulation of the separate optimization problems makes the ship design both longer and more expensive as well as delimits or disables effective search for satisfactory optimal solutions. Yet there is no promising alternative for such a procedure, therefore it seems advisable to attempt to solve unified shape-material-topology-dimension optimization problem. So far the effective tools have not been developed. Investigation towards developing methods for multi-objective optimization seems justified. Due to the complexity of the problem it is reduced to topology-shape optimization treating it as the first step on the way towards formulation and solution of the full unified shape-material-topology-dimension optimization problem.

In the context of the general theory of evolutionary algorithms of multi-objective optimization an original method was developed and applied based on the genetic algorithm. In the method evolution is controlled by the scalar fitting function allowing for consideration of the evaluation objective, level of violating the formulated constraints, internal structure of the set of permissible solutions as well as distances of the generated solutions from the asymptotic solution defined in the dissertation. A set of non-dominated solution in the Pareto sense was taken as the result of solution of the multi-objective problem of the multi-objective optimization. The set is interpreted as an approximation of (unknown) real set of Pareto-optimal solutions. A number of original computational procedures were developed which were applied in the computer codes. Problems of assessment of solution quality and efficiency of the multi-objective evolutionary algorithms, controversial but rarely referred to in the literature, were discussed in details. Quality measures were suggested which allow for efficiency assessment of the developed algorithm.

To verify the computer code a computational model of the fast passenger-car ferry hull structure was developed. A number of computer simulations were performed using the model. The results, which were found the most important, were presented and discussed in details.

Application of the method to optimization of the twin-hull high-speed vessel allowed to demonstrate the specific features of the multi-objective evolutionary optimization methods. It was also possible to formulate the general conclusions and assess the applicability of the method to design analyses of such structures.

The method of multi-objective evolutionary optimization, presented in the dissertation, can be, according to the author's opinion, recommended to be applied to the ship structural preliminary design. It can also be applied to optimization of the other structures after implementation of computational procedures specific for the solved problem.

Zusammenfassung

Ausgewählte Probleme der multikriteriellen Optimierung in der Vorentwurfsphase der Seeschiffsrumfskonstruktion

In der sich ununterbrochen verändernden wirtschaftlichen Realität sind die gegenwärtig verwendeten Entwurfsmethoden von Schiffsrumfskonstruktionen manchmal nicht ausreichend. Im Ergebnis wird immer mehr ein Bedarf nach der Modernisierung des Erkenntnisapparats empfunden, um bestimmte Aspekte beim Entwerfen von diesen Konstruktionen zu entdecken und zu konzeptualisieren. Man kann daher versuchen, nach neuen Methoden zu suchen oder die bestehenden zu ändern. Zu diesem Zweck ist es möglich und kann sich auch als wirksam erweisen, die im Rahmen der anderen Disziplinen entwickelten Methoden zu verwenden. Die Ergebnisse von bisherigen Forschungsarbeiten weisen darauf hin, dass beim Entwerfen von Schiffsrumfskonstruktionen evolutionäre Algorithmen der multikriteriellen Optimierung nutzbar sein können. Die seit Mitte der neunziger Jahre des XX. Jahrhunderts nicht allzu oft vorgenommenen Versuche der Verwendung von diesen Algorithmen, auch vom Verfasser der vorliegenden Abhandlung, bestätigten zuerst ihre Wirksamkeit auch beim Entwerfen von Schiffsrumfskonstruktionen.

Die multikriterielle Optimierung der so komplexen Objekte wie die Seeschiffsrumfskonstruktion stößt trotz des immer größer werdenden Forschungs- und Berechnungspotenzials stets auf viele Hindernisse, die ihre praktische Verwendung sogar in der Vorentwurfsetappe erschweren, wo die entwickelten Konstruktionsmodelle wesentlich einfacher sind als Modelle, die während der nächsten Etappen der Projektierung entwickelt werden. Diese Schwierigkeiten haben zur Folge, dass sich der wesentliche Teil der Forschungs- und Applikationsarbeiten im Bereich der Optimierung der Schiffsrumfskonstruktion auf monokriteriellen Problemen konzentriert, obwohl die Mehrheit der wirklichen Probleme die Berücksichtigung von mehr als nur eines Kriteriums der Optimierung erfordert.

In Hinsicht auf Probleme, die im Entwertprozess von Schiffsrumfskonstruktionen gelöst werden, erfolgt heute die Suche nach optimalen Lösungen in vier Bereichen: Optimierung der Form, Optimierung des Werkstoffes, Optimierung der Topologie und Optimierung der Maße von Konstruktionsteilen. Aufgrund der Spezifik der Optimierungsaufgaben, die in jedem von diesen Bereichen gelöst werden, ist es nicht möglich, eine projektbezogene Optimierungsaufgabe der Schiffskonstruktion gleichzeitig in allen diesen Bereichen zu lösen. Es ist daher generell üblich, dass in jedem von diesen Bereichen Optimierungsaufgaben voneinander unabhängig formuliert und gelöst werden. Solche Aufteilung ist jedoch für korrektes Projektieren ungünstig und ihre Ursachen sind im Fehlen von geeigneten Werkzeugen zu suchen, die es erlauben würden, die Projektierung und Optimierung gleichzeitig in allen diesen Bereichen zu führen. Die Lösung von getrennten Optimierungsaufgaben verteuert und wesentlich verlängert den Projektierungsprozess des Schiffs als auch schränkt ein oder sogar

macht unmöglich eine wirksame Suche nach zufriedenstellenden Optimierungslösungen. Heute ist jedoch keine wirksame Alternativlösung für solche Verfahrensweise in Sicht. Daher scheint es zweckmäßig zu sein, die Versuche einer erfolgreichen Lösung von unifizierten Optimierungsaufgaben der Form, des Werkstoffs, der Topologie und des Maßes aufzunehmen. Bisher wurden dafür keine wirksamen Werkzeuge entwickelt. Als begründet scheinen deswegen Forschungen zu sein, die auf das Erarbeiten einer Methode der multikriteriellen Optimierung ausgerichtet sind, die beim Lösen solcher Aufgaben erfolgreich wäre. Aufgrund des Kompliziertheitsgrades des Problems beschränkte man sich in dieser Arbeit auf die Probleme der Optimierung der Topologie und des Maßes, die als erster Schritt auf dem Wege zum Formulieren und zum Lösen einer vollständigen, unifizierten Aufgabe der Optimierung der Form, des Werkstoffs, der Topologie und des Maßes betrachtet werden.

Im Kontext der allgemeinen Theorie von evolutionären Algorithmen der multikriteriellen Optimierung wurde ein eigener Algorithmus entwickelt und eingesetzt, der auf einem genetischen Algorithmus basiert. Im entwickelten Algorithmus wird die Evolution durch eine skalare Anpassungsfunktion geleitet, die eine Berücksichtigung im Optimierungsprozess der Bewertungskriterien, des Verletzungsgrades der formulierten Beschränkungen, der internen Struktur der Menge von zulässigen Lösungen als auch der Entfernung von generierten Lösungen von der in der Arbeit definierten asymptotischen Lösung ermöglicht. Als Ergebnis der multikriteriellen Lösung einer multikriteriellen Optimierungsaufgabe wurde eine Menge von Lösungen angenommen, die nicht im Sinne des Paretoprinzip dominiert wurden. Diese Menge wird als eine Annäherung der (unbekannten) realen Menge der Optimallösungen im Sinne des Paretoprinzip betrachtet. Es wurden viele originelle Berechnungsprozeduren und ein eigenes System der Computerprogramme entwickelt, die die erarbeiteten Algorithmen verwenden. Es wurden Probleme der Bewertung der Qualität von erzielten Lösungen und der Wirksamkeit der evolutionären Algorithmen der multikriteriellen Optimierung im Detail diskutiert, die in der Literatur selten aufgenommen werden und gleichzeitig viele Zweifel und Kontroversen erwecken. Es wurden eigene Qualitätsmaße vorgeschlagen, die eine Bewertung der Wirksamkeit des entwickelten Algorithmus erlauben.

Zur Verifizierung des entwickelten Berechnungswerkzeuges wurde ein Berechnungsmodell der Konstruktion einer schnellen Passagier- und Autofähre formuliert. Anschließend wurden mit diesem Modell viele Computersimulationen durchgeführt. Die als die wichtigsten erachteten Ergebnisse von diesen Berechnungen wurden präsentiert und im Detail diskutiert.

Der Einsatz der vorgeschlagenen Methode am Beispiel der Konstruktion eines schnellen Doppelrumpfschiffes erlaubte die Darstellung der Spezifik der evolutionären Methoden der multikriteriellen Optimierung beim Entwerfen der Seeschiffsrumpfskonstruktion. Dies erlaubte wiederum die Formulierung von Verallgemeinerungen und die Bewertung der Eignung von dieser Methode für die Projektuntersuchungen derartiger Konstruktionen.

Die in der Arbeit entwickelte und vorgestellte Methode der multikriteriellen Optimierung kann nach Meinung des Verfassers für den Einsatz beim Entwerfen der Seeschiffsrumpfskonstruktion in der Vorentwurfsetappe empfohlen werden. Sie kann auch für die Optimierung der Konstruktion von anderen Ingenieurobjekten eingesetzt werden, jedoch nach der Erarbeitung von entsprechenden Berechnungsprozeduren, die für das zu lösende Problem spezifisch sind.