



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

---

Корабостроителен факултет  
Катедра „Корабостроене, корабни машини и механизми“

инж. Севдалин Здравков Вълчев

## **Изследване и контрол на техническото състояние на корабни валопроводи**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за получаване на ОНС „доктор“

по научна специалност **„Корабни силови уредби, машини и механизми“**  
към професионално направление **5.5 „Транспорт, корабоплаване и авиация“**

Варна  
2021

Дисертационният труд е обсъден на 17.06.2021г. в катедра „Корабостроене, корабни машини и механизми”, на разширен катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна от 08.06.2021г. № 356 и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Корабостроене, корабни машини и механизми”.

*Автор:* инж. Севдалин Здравков Вълчев

*Заглавие:* Изследване и контрол на техническото състояние на корабни валопроводи



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

---

Корабостроителен факултет  
Катедра „Корабостроене, корабни машини и механизми“

инж. Севдалин Здравков Вълчев

**Изследване и контрол на техническото състояние на корабни  
валопроводи**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за получаване на ОНС „доктор“

по научна специалност „Корабни силови уредби, машини и механизми“  
към професионално направление 5.5 „Транспорт, корабоплаване и авиация“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Христо Атанасов Пировски

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Светослав Кънчев Симеонов
2. доц. д-р инж. Димитър Стоянов Кънев

Варна  
2021

Дисертационният труд съдържа 153 страници, включващи 160 фигури, 42 таблици, оформени в 4 глави и списък на използваната литература от 59 заглавия, от които 11 са на български, 44 са на английски и 4 на руски език. В автореферата всички означения, номерацията на формулите, фигурите и таблиците са според означенията в дисертацията.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ... . 2021г. от ... : ... часа, в зала ... , на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора ... / ... . 2021г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД „Докторанти”, стая 318 НУК.

## ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Актуалност на проблема

Повредите във валовите линии не са чести, но са потенциално много опасни, поради загубата на движение и маневреност на кораба. Рискът за кораба е по-голям в лоши метеорологични условия поради динамичното естество на пропульсивната уредба с дизелов двигател, като работи с претоварване по въртящ момент и огъващи моменти и съответното пулсиране на натоварването.

Най-опасни за експлоатацията на кораба са аварията, свързани с загубата на движение по време на ход. Такива са аварията на дейдвудните лагери, на коридорните лагери, скъсване на присъединителните болтове на фланцовите съединения, повреди в главните предавки, скъсване на валовете.

От направен анализ на неизправностите на валови линии на кораби, ремонтирани в кораборемонтни заводи на Р. България, след извършени дефектация и анализ на причините, са установени неточности при проектирането и/или изпълнението на първоначалния монтаж на валопровода. Направените изследвания показват значително влияние на износването на дейдвудните лагери върху разпределението на опорните реакции. От тук следва, че е необходим правилен подход за точна оценка на опорните реакции, не само на етапа на проектиране и строителство на кораба, но и при изпълнение на ремонтни операции. Този подход би гарантирал продължителна и безаварийна работа на валопровода.

Методът „криск тест“ (Jack-Up Test) е широко използвана процедура за проверка или настройка на натоварването на опорните лагери на валовите линии. Предимството му е в яснотата и в липсата на специално оборудване, и не на последно място – прилага се без каквито и да било демонтажни операции или монтаж на допълнително оборудване. Съществен негов недостатък е точността му. От това следва и една от задачите на изследване – оценка на неопределеността на метода „криск тест“ за измерване натоварването на опорните лагери на корабни валопроводи.

## ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

След обзор на често срещаните повреди при корабните валопроводи, докладвани в литературни източници и констатирани от автора при ремонт в кораборемонтни предприятия, е формулирана целта на настоящия дисертационен труд - да се представи нов подход за изследване и контрол на техническото състояние на корабните валопроводи.

За нуждите на изследването и изпълнението на поставената цел са формулирани следните задачи:

- да се изследва неопределеността на изчислителната процедура за определяне на напрегнатото и деформирано състояние на корабните валопроводи;
- да се изследва неопределеността при експерименталното измерване на натоварването на лагерите на корабни валопроводи по метода „крик тест“;
- да се оцени влиянието на износването на дейдвудните лагери върху центровката по време на експлоатацията на кораба;
- да се изследва влиянието на деформацията на корабния корпус и на топлинната деформация на корпуса на главния двигател върху центровката, на етап проектиране, от особено значение при голямотонажните кораби, като целта е да се дадат препоръки още на ниво проектиране за повишаване надеждността на валопровода;
- приложни изследвания на корабни валопроводи - да се изследват и анализират регистрирани случаи на повреди по валопроводите на кораби, а така също предложат определени решения при проектирането им.

## СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### ГЛАВА 1. Анализ на състоянието на проблема. Постановка на задачите за изследване.

В глава 1 е направен обзор на най-често срещаните повреди при корабните валопроводи, както и е извършен анализ на регистрирани повреди на кораби, ремонтирани в кораборемонтни предприятия в България през последните години.

В главата са разгледани и методите за центровка на валопроводите при етапите на строителство и ремонт на корабите. Обърнато е внимание на методите за контрол на качеството на центровка. Подробно е представен широко използваният метод „крик тест“ за проверка качеството на центровка.

### ИЗВОДИ НА ГЛАВА 1

При много от регистрираните повреди на изследваните валопроводи, след извършените дефектация и анализ на причините, се установяват неточности при проектирането и/или изпълнението на първоначалния монтаж на валопровода. Направените изследвания показват значително влияние на износването на дейдвудните лагери върху разпределението на опорните реакции. Налага се необходимостта от правилен подход за точна оценка на опорните реакции, не само на етапа на проектиране и строителство на кораба, но и при изпълнение на ремонтни операции. Този подход би гарантирал продължителна и безаварийна работа на валопровода.

В обзорната част на дисертационния труд са разгледани и методите за центровка на валопроводите в етапите на строителство и ремонт на корабите. Обърнато е внимание на методите за контрол на качеството на центровката. Съществено внимание в обзора е отделено на един от тези методи – „крик тест“ (Jack-Up Test), който е широко използвана процедура за проверка или настройка на натоварването на опорните лагери на валовите линии. Предимството му е в яснотата и в липсата на специално оборудване, и не на последно място – прилага се без каквито и да било демонтажни операции или монтаж на допълнително оборудване. Съществен негов недостатък е точността му. При някои „чувствителни“ валопроводи, малко отклонение в натоварването на определен лагер при центровката, може да доведе до неприемливо от гледна точка на експлоатацията преразпределение на опорните реакции. От това следва и една от задачите на изследване – оценка на неопределеността на метода „крик тест“ за измерване натоварването на опорните лагери на корабни валопроводи.

От съществено значение за повишаване на точността на пресмятане и изпълнение на центровката на корабния валопровод е отчитането на редица входни фактори, влияещи на изчислителната процедура. Познаването на степента на влияние на входните параметри би оказало положително влияние върху неопределеността на изчислените лагерни реакции.

## ГЛАВА 2. Изследване на неопределеността на метода „крик тест“ при измерване на реакциите на лагерите на валопровода.

### 2.1. Точност на измерванията. Неопределеност. Общи положения

През последните години се изисква измерванията да бъдат представени със съответната неопределеност като мярка за метрологичното качество на аналитичните резултати (измервания). Неопределеността е дефинирана като "параметър, асоцииран към резултата от измерване, характеризиращ дисперсията на стойностите, които могат да бъдат основателно приписани на измерваната величина". Този параметър се представя като полуинтервал, до приписаната стойност на величината:

$$\text{Стойност} \pm \text{Неопределеност [мерни единици]}.$$

В настоящата глава е извършено изследване на неопределеността на изчислителната процедура при пресмятане напрегнатото и деформирано състояние на валопровода, а така също е направена и оценка на неопределеността при измерване на реакциите на лагерите на корабен валопровод по метода „крик тест“.

На фиг. 2.3. е представена блок-диаграма за анализ на неопределеността при изчисление и измерване на товарването на лагерите на корабни валопроводи по метода „крик тест“.



Фиг. 2.3. Блок-диаграма за анализ на неопределеността при измерване на товарването на лагерите на корабни валопроводи по метода „крик тест“

Обект на изследването е 56000TDW кораб за насипни товари, строителен номер 101, построен в „Булярд КИ“ АД през 2011 г.

### 2.2. Изследване на неопределеността на изчислителната процедура при пресмятане на валопровода по МКЕ

Анализът на статичното напрегнато състояние на валопровода се извършва с помощта на метода на крайните елементи (МКЕ).

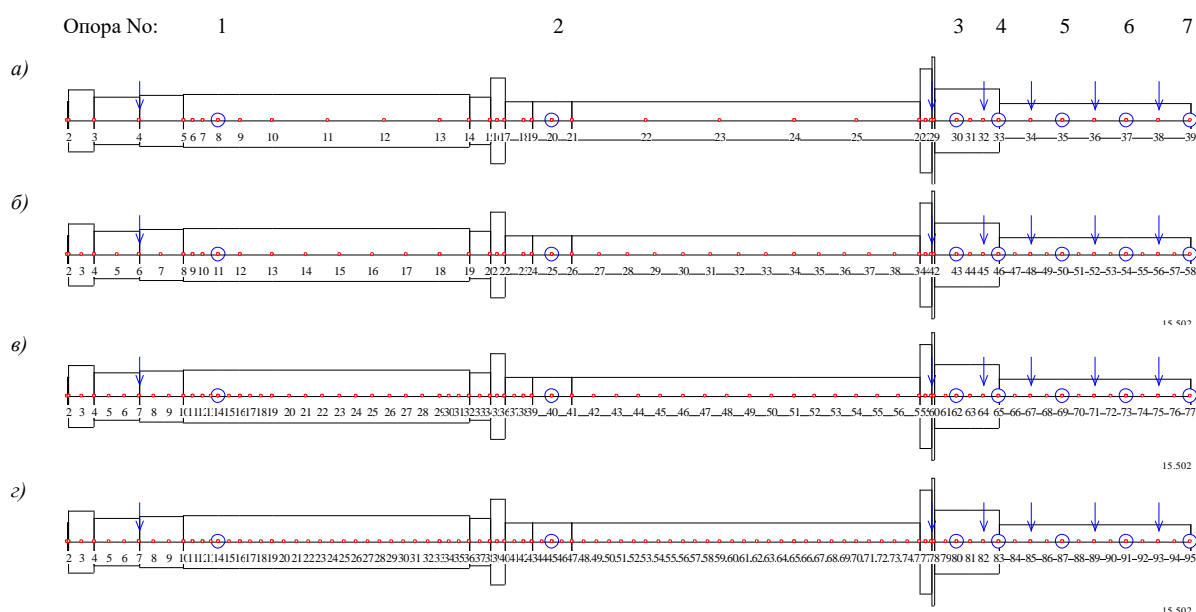


Дискретизацията на конструкцията на валопровода се извършва с програмен продукт „Shaft” [31], използващ крайни елементи тип греда, работещи на огъване с отчитане на плъзгането. Всеки краен елемент има четири степени на свобода – по едно праволинейно и ъглово преместване във възлите, ограничаващи елемента.

### 2.2.1. Влияние на степента на дискретизация на КЕ модел

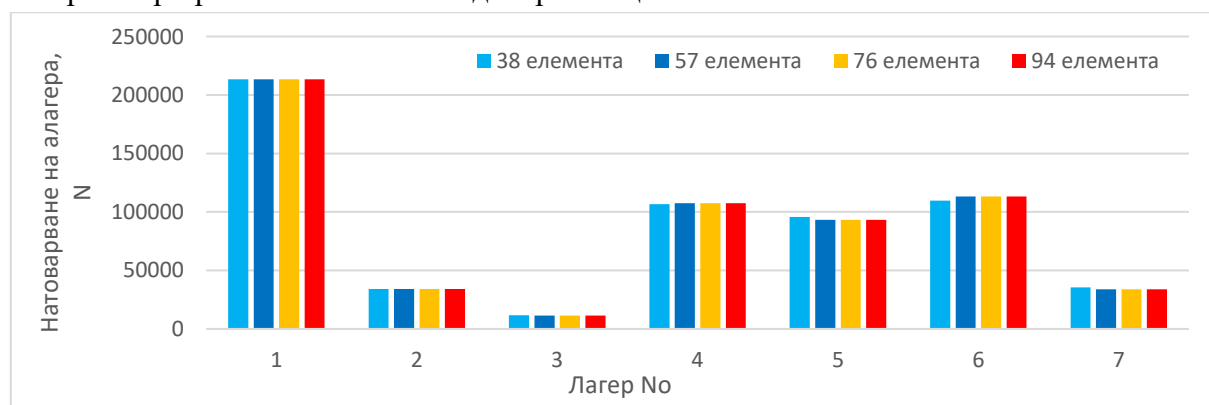
Степента на дискретизация, още плътност на мрежата, се определя от броя крайни елементи, с които се представя определен участък или област от изследваната конструкция [35]. Ниската степен на дискретизация определя минимален брой елементи в изследвания участък.

На фиг. 2.5 е показан КЕ модел на валопровода при различна степен на дискретизация.



Фиг. 2.5. Крайноелементен модел на валопровода на 56000TDW кораб за насипни товари, стр. No101, при различна степен на дискретизация: а – с 38бр. елементи; б – с 57бр. елементи; в – с 76бр. елементи; г – с 94бр. елементи

На фиг. 2.6 графично са показани резултатите от пресмятането на натоварванията на лагерите при различна степен на дискретизация.



Фиг. 2.6. Резултати от пресмятане натоварванията на лагерите при различна степен на дискретизация, 56000TDW кораб, стр. No101

Резултатите от фиг. 2.6 показват, че при дискретизация с 57, 76 и 94 елемента на крайноелементния модел, натоварванията на всички лагери след пресмятане на валопровода са приблизително еднакви. Разлика в натоварването на някои от лагерите се наблюдава при „груба“ дискретизация, с 38 елемента – това е минималния брой елементи, с който може да се дискретизира разглежданият валопровод.

Определени са стандартната неопределеност тип „В“ на натоварването  $u^{mesh}(R_i)$  и на коефициента на реакция  $u^{mesh}(C_R)$  на лагери No2 и No3 при правоъгълно разпределение (табл. 2.7 и 2.8).

### 2.2.2. Влияние на натоварванията

При пресмятане на статичното напрегнато и деформирано състояние на корабен валопровод за статично действащи сили се приемат: сила на тежестта на гребния винт, сила на опън от обтяжното устройство на веригата задвижваща разпределителния вал, сила на тежестта на коляно-мотовилковите механизми и на маховика. Масата на гребния винт се предоставя в техническата документация. Силите на тежестта на коляно-мотовилковите механизми се дават от производителя на двигателя в специален документ за пресмятане на колянния вал, където той е представен като цилиндрична греда с еквивалентен диаметър, а коляно-мотовилковите механизми – като съсредоточени сили в средното сечение на мотовилковите лагери [36].

Точките на прилагане на тези сили са ясно дефинирани с изключение на приложната точка на силата на тежестта на гребния винт.

Допуска се, при липса на данни, позицията на центъра на тежестта на гребния винт да бъде въведена в средата на конусния участък на гребния вал. В този случай възниква неопределеност при пресмятането на реакциите на валопровода.

При разглеждания 56000TDW кораб за насипни товари, размерите на чертежа показват отклонение от 9 mm между центъра на тежестта и средата на конусния участък.

От извършеното пресмятане на натоварването на лагерите при различни точки на прилагане силата на тежестта на гребния винт се установява, че силно се влияят дейдвуден лагер, лагер на междинния вал и кърмови основен лагер на главния двигател.

Определени са стандартната неопределеност тип „В“ на натоварването  $u^{prop}(R_i)$  и на коефициента на реакция  $u^{prop}(C_R)$  на лагери No2 и No3 при правоъгълно разпределение (табл. 2.7 и 2.8).

Друг параметър, оказващ влияние върху реакциите на лагерите е плътността на средата, в която се намира гребният вал (вода или масло) в участъка на дейдвудното устройство.

На участъците от гребния вал, потопени в масло или вода (в зависимост от типа на дейдвудното устройство) се задават материални характеристики, съобразени с теглото на измествания флуид.

Направено е изследване на влиянието на плътността на маслото върху резултатите от пресмятане на валопровода на 56000TDW кораб за насипни товари.

От резултатите може да се заключи, че промяната на плътността на маслото в дейдвудното устройство не оказва съществено влияние върху резултатите от пресмятане натоварването на лагерите.

Определени са стандартната неопределеност тип „В“ на натоварването  $u^{oil}(R_i)$  и на коефициента на реакция  $u^{oil}(C_R)$  на лагери No2 и No3 при правоъгълно разпределение (табл. 2.7 и 2.8).

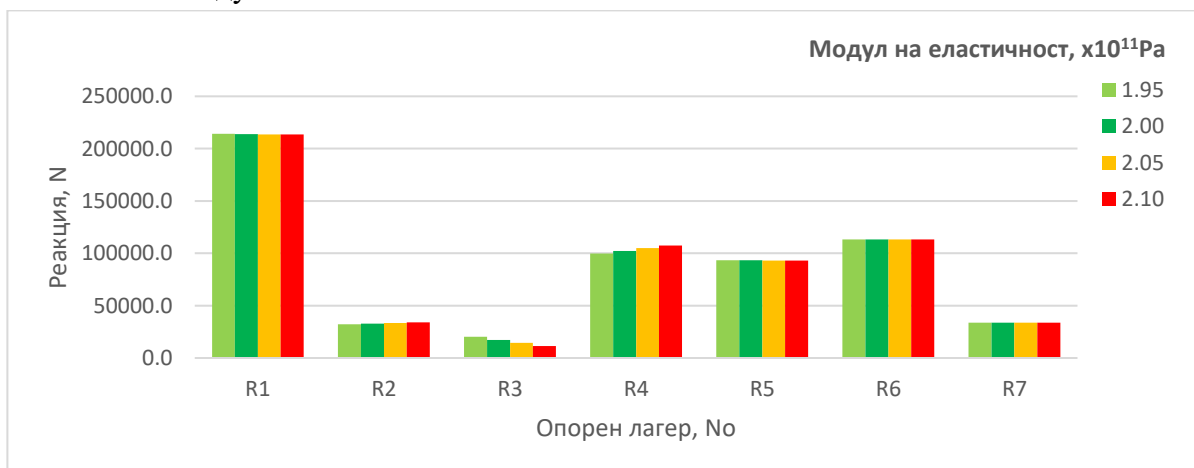
### 2.2.3. Влияние на механичните свойства на материала

При стоманата, модулът на еластичност е постоянен до определена граница – граница на пропорционалност. Модулът на еластичност може да варира в зависимост от химичния състав на материала и температурата.

В съответствие с химичния състав на стоманите, модулът на еластичност варира между  $1.95 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$  до  $2.10 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$ .

Освен химичния състав на стоманата, върху модула на еластичност влияние оказва и температурата. Необходимо е, при оценка на неопределеността на изчислителната процедура, като входен параметър да се отчете и изменението на температурата на стоманата. Този въпрос не е засегнат в дисертационния труд.

На фиг. 2.12 графично са представени разликите в реакциите на лагерите при различни стойности на модула на еластичност.



Фиг. 2.12. Графично представяне на разликите в реакциите на лагерите при различни стойности на модула на еластичност, 56000TDW кораб, стр. No101

Резултатите показват най-съществено влияние при кърмовия лагер на главния двигател (лагер No3). Отклонението е приблизително 9 kN.

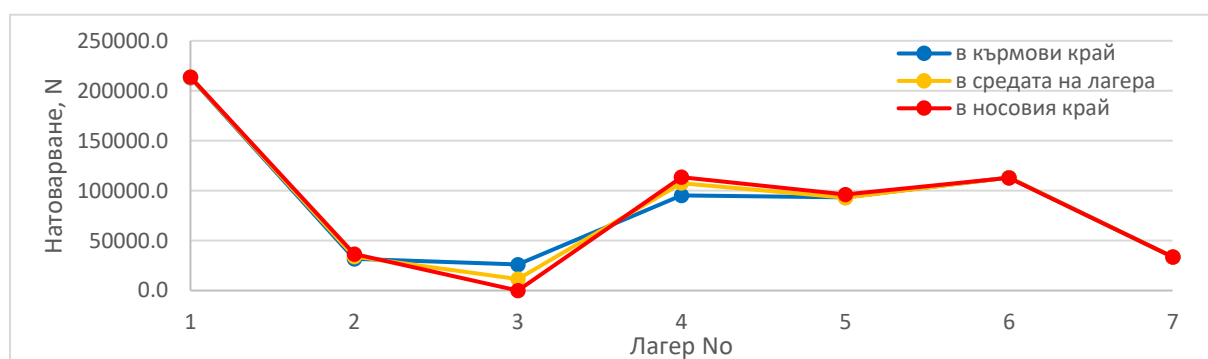
Определени са стандартната неопределеност тип „В“ на натоварването  $u^{me}(R_i)$  и на коефициента на реакция  $u^{me}(C_R)$  на лагери No2 и No3 при правоъгълно разпределение (табл. 2.7 и 2.8).

#### 2.2.4. Влияние на граничните условия

В зависимост от конструктивни особености и/или неправилен монтаж на коридорния лагер след ремонт, контактната точка на шийката на вала с лагерната черупка може да се окаже в носовия или кърмовия край.

Така при измерване натоварването на лагера би се получило натоварване, различаващо се от теоретично изчисленото.

Направено е изследване на влиянието на положението на точката на контакт върху реакцията на опорен лагер на междинния вал на кораб за насипни товари. В изчислителния модел е зададена точката на контакт да бъде в носовия и в кърмовия край на опорния лагер. Резултатите от това пресмятане са представени на фиг. 2.15.



Фиг. 2.15. Графично представяне на резултатите от пресмятане на валопровода при различна точка на контакт, 56000TDW кораб, стр. No101

Може да се заключи, че при промяна на точката на контакт в опорния лагер на междинния вал, разликата в неговото натоварване е от порядъка на 5kN, но се получават значителни разлики в натоварванията на двата кърмови основни лагера на главния двигател. В случая на опора, разположена в носовия край на лагера, лагерните реакции се разпределят по такъв начин, по който кърмовият лагер на главния двигател се разтоварва.

В таблици 2.7 и 2.8 са обобщени резултатите за съставляващите на стандартната неопределеност на изчисляване натоварването на двата разглеждани лагера.

Таблица 2.7. Съставляващи на стандартната неопределеност на изчисляване натоварването на опорния лагер на междинния вал и коефициента на реакция, 56000TDW кораб, стр. No101.

Съставляващи		Коридорен лагер на междинния вал (лагер No2)			
		Стандартно отклонение $u(R_z), N$	отклонение %	Стандартно отклонение $u(C_R^{No2})$	отклонение %
1. Степен на дискретизация на модела	$u^{mesh}$	11.1	0.5	0	0.0
2. Точка на прилагане силата на тежестта	$u^{prop}$	91.6	4.5	0.0001	1.7
3. Плътност на маслото в дейвудното устройство	$u^{oil}$	65.2	3.2	0.0001	1.7
4. Модул на еластичност на стоманата	$u^{em}$	503.6	24.7	0.0001	1.7
5. Опорна точка на междинния вал	$u^{pos}$	1364.1	67.0	0.0057	95.0

**Таблица 2.8.** Съставляващи на стандартната неопределеност на изчисляване натоварването на кърмовия основен лагер на главния двигател и коефициента на реакция, 56000TDW кораб, стр. No101.

Съставляващи		Кърмови основен лагер на ГД (лагер No3)		Стандартно отклонение $u(R_3), N$	отклонение %	Стандартно отклонение $u(C_R^{No3})$	отклонение %
1. Степен на дискретизация на модела	$u^{mesh}$	95.1	1.4	0.0136	31.0		
2. Точка на прилагане силата на тежестта	$u^{prop}$	53.2	0.8	0.0003	0.7		
3. Плътност на маслото в дейдвудното устройство	$u^{oil}$	31.9	0.5	0.0006	1.4		
4. Модул на еластичност на стоманата	$u^{em}$	2531.5	36.4	0.0121	27.6		
5. Опорна точка на междинния вал	$u^{pos}$	4239.0	61.0	0.0173	39.4		

### 2.2.5. Определяне на комбинираната средноквадратична неопределеност на изходната оценка

Върху комбинираната неопределеност на изчисляване натоварването на лагера на междинния вал, кърмовия лагер на главния двигател и коефициентите на реакция на същите, оказват влияние:

- степента на дискретизация на крайноелементния модел;
- положението на точката на прилагане силата на тежест на гребния винт;
- плътността на маслото в дейдвудното устройство;
- механичните свойства на стоманата на валовете;
- влиянието на някои гранични условия.

Комбинираната неопределеност на измерване на натоварването на лагери може да се определи чрез:

$$u_c(R_i) = \sqrt{u^{mesh^2}(R_i) + u^{prop^2}(R_i) + u^{oil^2}(R_i) + u^{me^2}(R_i) + u^{pos^2}(R_i)}. \quad (2.20)$$

Аналогично се прави и за коефициентите на реакция  $C_R$ .

Следователно:

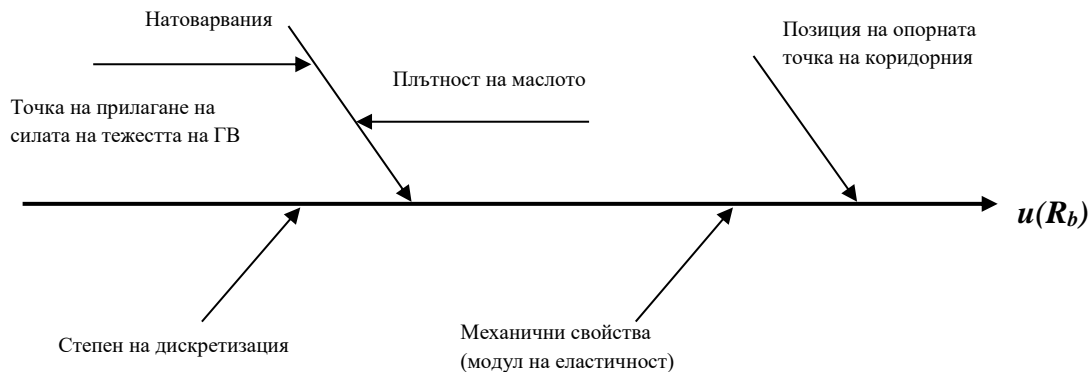
$$\begin{aligned} u_c(R_2) &= 1458.5 \text{ N} & u_c(C_R^{No2}) &= 0.0057 \\ u_c(R_3) &= 4938.7 \text{ N} & u_c(C_R^{No3}) &= 0.0251. \end{aligned}$$

Разширената неопределеност се определя по формула (2.19), с фактор на припокриване 2 (съответстващ на  $\approx 95\%$  статистическа сигурност):

<p><u>Опорен лагер на междинния вал:</u></p> $U^{R_2} = 2 * 1458.5 = 2916.9 \text{ N}$ $U^{C_R^{No2}} = 2 * 0.0057 = 0.0114$	<p><u>Кърмови основен лагер на ГД:</u></p> $U^{R_3} = 2 * 4938.7 = 9877.4 \text{ N}$ $U^{C_R^{No3}} = 2 * 0.0220 = 0.050$
--	---

### 2.2.6. Бюджет на неопределеността

За определяне източниците на неопределеност при изчисляване натоварването на лагерите по МКЕ е съставен списък с източниците, внасящи неопределеност в крайния резултат. За илюстрация е създадена графична структура с дървовидна форма (причинно-следствена диаграма) [39] – фиг. 2.16.



Фиг. 2.16. Причинно-следствена диаграма за идентифициране на източниците на неопределеност при изчисляване натоварването на лагерите на корабен валопровод по МКЕ

Таблица 2.9 представлява „бюджет“ на неопределеността на изчисляване натоварването на лагер No2 на разглеждания валопровод.

Таблица 2.9. „Бюджет“ на неопределеността на изчисляване натоварването на лагер No2 на разглеждания валопровод

Съставляващи	Означение	Тип оценка	Тип разпределение	Коефициент на разпределението	Брой измервания	Коефициент на чувствителност	Средноквадратична неопределеност				
							Лагер No2	$C_R$ Лагер No2	Лагер No3	$C_R$ Лагер No3	
<b>Резултати от числено пресмятане*</b>							<b>33761.7</b>	<b>0.9832</b>	<b>12732.9</b>	<b>1.7842</b>	
Степен на дискретизация на модела по МКЕ	$u^{mesh}$	V	право-ъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	11.1 N	0	95.1 N	0.0136	
Натоварвания	Точка прилагане сила тежестта ГВ	$u^{prop}$	V	право-ъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	91.6 N	0.0001	53.2 N	0.0003
	Масло дейдвудно у-во	$u^{oil}$	V	право-ъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	65.2 N	0.0001	31.9 N	0.0006
Модул на еластичност стоманата	$u^{me}$	V	право-ъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	503.6 N	0.0001	2531.5 N	0.0121	
Опорна точка на межд. лагер	$u^{pos}$	V	право-ъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	1364.1 N	0.0057	4239.0 N	0.0173	
<b>Комбинирана неопределеност <math>u_c</math></b>							<b>1458.5N</b>	<b>0.0057</b>	<b>4938.7 N</b>	<b>0.0136</b>	
<b>Разширена неопределеност <math>U</math></b>							<b><math>\pm 2916.9N</math></b>	<b><math>\pm 0.0114</math></b>	<b><math>\pm 9877.3N</math></b>	<b><math>\pm 0.0251</math></b>	

\* използвани са средни стойности на значенията на изчислените реакции и коефициенти

### 2.3. Изследване неопределеността при експерименталното измерване

Експерименталното измерване на натоварването на лагерите по метода „крик тест“ е свързано с едновременно измерване на повдигането на вал в точка, в близост до изследвания лагер, и измерване на натоварването на хидравличния крик. Това натоварване може да се определи чрез измерване на налягането в крика или непосредствено чрез силомер.

Следователно, неопределеността на метода „крик тест“ (при измерване на налягане) се свежда до определяне на неопределеността на апаратното осигуряване, т.е. измерването на налягане и преместване.

Извършено е оценяване на неопределеността тип „А“ и тип „В“ на експерименталното определяне на натоварването на лагерите [40].

За оценка на неопределеността тип „А“ се извършва статистически анализ на серия от наблюдения при условия на повтораемост. Количествената стойност е стандартно отклонение.

При оценка на неопределеност тип „В“, средноквадратичната неопределеност се основава на:

- опит и общи познания за измерването;
- сертификати, справочни данни, спецификации на производителите.

#### 2.3.1. Неопределеност тип „А“

Исходни данни за пресмятането са три последователни измервания на натоварването на опорния лагер на междинния вал на 56000TDW кораб за насипни товари, стр. No 102, построен е КРЗ „Булярд КИ“ АД през 2012г. - табл. 2.10.

**Таблица 2.10.** Резултати от измервания на натоварването на опорния лагер на междинния вал, 56000TDW кораб, стр. No 102 [40]

Лагер	Състояние на ГД	Измерване, No		
		1	2	3
<b>R<sub>2</sub></b>	<b>студено</b>	22618	23581	22498

Стандартната неопределеност  $u(R)$  се определя като средноквадратично отклонение на  $n$  измервания на  $i$ -тия лагер (2.9):

$$u(R_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2.21)$$

Тъй като броят на измерванията е малък ( $n < 10$ ), средноквадратичната неопределеност се завишава с коефициент  $h$  (табл. 2.1). За три измервания,  $h=2.3$ :  $u(R_2) = 788.4 N$

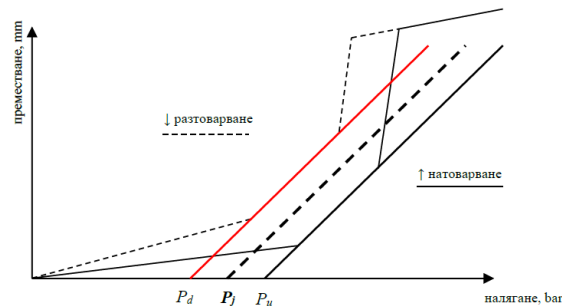
Разширената неопределеност следва да бъде [40]:  $U = k \cdot u(R_2) = 1576.6 N$ .

### 2.3.2. Неопределеност тип „В“

Системата за измерване натоварването на лагерите на корабни валопроводи по метода „крик тест“ на НПЛ „ВДМС“ включва следните елементи:

- вихротоков преобразувател на преместване - 8mm Proximitor 3300 Bentley Nevada;
- преобразувател на налягане - Pressure Transmitter A-10 WiKa;
- аналого-цифров преобразувател (АЦП) на напрежение - National Instruments NI9215.

Измерването на реакциите на лагера чрез „крик тест“ метода е свързано с определяне на преместването на вала в точката на прилагане на външна сила с помощта на хидравличен крик. Поради настъпващия хистерезис измерването се извършва както при повдигане на вала, така и при спускане. Определя се средно натоварване в крика  $P_j = \frac{P_u + P_d}{2}$ , фиг. 2.18. Получените стойности за налягане и преместване при повдигане и спускане на вала  $p_i$  и  $h_i$  определят две прави в равнината, а търсените налягания  $P_u$  и  $P_d$  ще представляват отрезки от тези прави с числова ос на налягането, фиг. 2.18.



Фиг. 2.18. Хистерезисна крива „крик тест“ [40]

За опростяване на процедурата, стойностите на  $p$  и  $h$  на правите на повдигане и спускане се обединяват, като по този начин ще определят една права, определяща  $P_j$ .

Определя се „средно“ натоварване в крика, при което се получава отделянето на вала от лагера:

$$R_j = P_j \cdot A_j \cdot 10, N, \quad (2.26)$$

където:  $P_j$  - налягане в хидравличния крик при отделяне на вала от лагера;  $A_j$  – площ на крика.

Поради невъзможността крика да бъде поставен в средата на лагера се използва поправъчен коефициент (коефициент на реакция)  $C_R$ , който е обект на допълнително пресмятане, при липсата му в документацията на валопровода. След умножение на натоварването на крика  $R_j$  с този коефициент се получава натоварването на лагера  $R_b$ :

$$R_b = C_R \cdot R_j, N. \quad (2.27)$$

Следователно натоварването на лагера е във функция от измерваните налягания и премествания  $R_b = f(p, h, C_R)$ , където  $p$  и  $h$  са измененията на налягането в хидравличния крик и преместването (повдигането) на вала в сечението над крика.



При изследването се допуска, че коефициентът  $C_R$  е зададен, както и неговата неопределеност:

- коефициент на реакция на лагер No2:  $C_R = 0.9832$  ;
- комбинирана неопределеност на  $C_R$ :  $u_c(C_R^{No2}) = 0.0057$  .

Неопределеността на експерименталното измерване се свежда до определяне на неопределеността на измерване на наляганята и преместванията.

Определят се стандартната неопределеност на налягането в хидравличния крик при отделянето на вала от лагера  $u(P_j)$  и стандартната неопределеност на коефициента на реакция  $u(C_R)$ .

Съгласно получените стойности за  $R_b$  и  $P_j$ , комбинираната неопределеност  $u_c(R_b)$  е:

$$u_c(R_b) = 2166.2 \text{ N} .$$

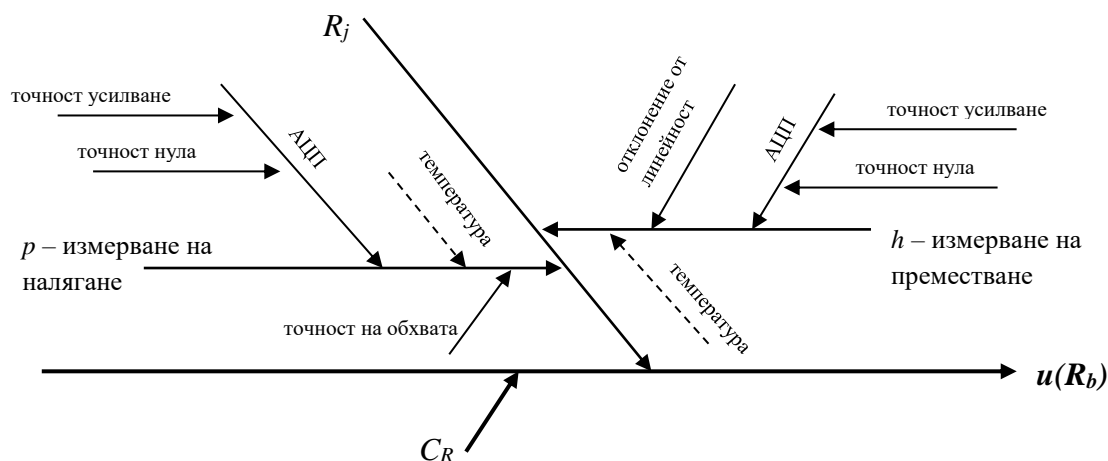
За разширената неопределеност, използвайки (2.19), се получава [40]:

$$U = 2 \cdot u_c(R_b) = 4332.4 \text{ N} .$$

### 2.3.3. Бюджет на неопределеността

С цел идентифициране на възможните източници на неопределеност се създава списък на тези, които внасят неопределеност в крайния резултат. За илюстриране на източниците на неопределеност е създадена графична структура с дървовидна форма – фиг. 2.21.

Влиянието на температурата на околната среда върху характеристиките на преобразувателите не е отчетено. Обикновено измерванията се провеждат при температура в машинно отделение близка до температурата на калибровка ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ).



Фиг. 2.21. Причинно-следствена диаграма за идентифициране на източниците на неопределеност при експериментално измерване на товарването на лагерите по метода „крик тест“ [40]

В табл. 2.13 е представен „бюджетът“ на неопределеността на измерване натоварването на лагерите по метода „крик тест“.

**Таблица 2.13.** „Бюджет“ на неопределеността на измерване натоварването на лагера на междинния вал по метода „крик тест“ [40]

Съставляващи	Означение	Тип оценка	Тип разпределение	Коефициент на разпределението	Брой измервания	Коефициент на чувствителност	Мерна единица	Средноквадратич на неопределеност	
Измерване на налягане	$u(p')$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	bar	1.44	
Измерване на преместване	$u(h')$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	mm	0.0346	
Измерване на ел. напрежение	$u(p_{АЦП})$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	bar	0.0173	
	$u(h_{АЦП})$	V	правоъгълно	$1/\sqrt{3}$	-	не	mm	0.0000882	
Измерване на преместване (измервателен канал)	$u(p)$	$u(p) = \sqrt{u^2(p') + u^2(p_{АЦП})}$				$c_p = 1$	bar	1.44	
Измерване на преместване (измервателен канал)	$u(h)$	$u(h) = \sqrt{u^2(h') + u^2(h_{АЦП})}$				$c_h = -r \cdot \frac{S_p}{S_h} = -58.75$	mm	0.0347	
Натоварване на крика	$u(P_j)$	$u(P_j) = \sqrt{c_p^2 \cdot u^2(p) + c_h^2 \cdot u^2(h) + 2 \cdot c_p \cdot c_h \cdot u(p) \cdot u(h) \cdot r(p, h)}$						bar	3.47
<b>Комбинирана неопределеност <math>u_c(R_b)</math></b>							N	<b>2166.2</b>	
<b>Разширена неопределеност <math>U = 2 \cdot u_c</math>, при <math>k=2</math></b>							N	<b><math>\pm 4414.2N</math></b>	
<b>Обявен резултат: <math>R_b = 23581 \pm 4414 N</math></b>									

## ИЗВОДИ НА ГЛАВА 2

От представеното изследване на неопределеността на изчислителната процедура следва, че най-съществено влияние върху неопределеността на пресмятане на натоварването на лагерите и на техните коефициенти на реакция оказват позицията на контактната точка на опорния лагер на междинния вал и приетият модул на еластичност за стоманата на валовете.

Промяната на точката на контакт между шийката и лагерната черупка на опорния лагер на междинния вал предизвиква значително изменение на реакциите на двата кърмови основни лагера на главния двигател, водещо до силно увеличение на неопределеността на изчислените реакции.

Заклучението, което може да се направи, е че при измерване натоварването на лагерите на корабен валопровод, операторът трябва предварително да се увери в правилното разположение на опорния/те лагери спрямо шийката/те на вала, т.е. дали валът лежи изцяло върху лагерната черупка. В противен случай, при едностранен контакт, лагерните реакции може значително да се различават от проектните.

В глава 2 е извършена и оценка на неопределеността на измерване натоварването на опорния лагер на междинния вал на 56000TDW кораб. Представени са два подхода за оценката – „оценяване тип А“ чрез статистически анализ на серия от последователни измервания и „оценка тип В“, основана на преценка на наличната информация на възможните изменения на входните величини. При нея подробно са анализирани характеристиките на използваните преобразуватели, като елементи на измервателната система. Определени са техните стандартни неопределености.

В резултат на проведеното изследване, при измерването на реакцията на опорния лагер на междинния вал, е установена разширена неопределеност в граници  $\pm 20\%$  от реакцията на лагера.

## ГЛАВА 3. Оценка на факторите влияещи върху изменението на центровката на корабния валопровод по време на експлоатацията

### 3.1. Влияние на износването на лагерите

През последните години полимерните дейдвудни лагери с водно мазане получиха широко приложение не само в корабостроителната индустрия.

#### 3.1.1. Обект на изследване, констатиран дефекти и пресмятане на напрегнатото и деформирано състояние на валопровода при проектно състояние

Обект на изследването са два кораба: м/к „Saint Fanouris” - кораб за насипни товари и м/к „Alaya“ - кораб за генерални товари.

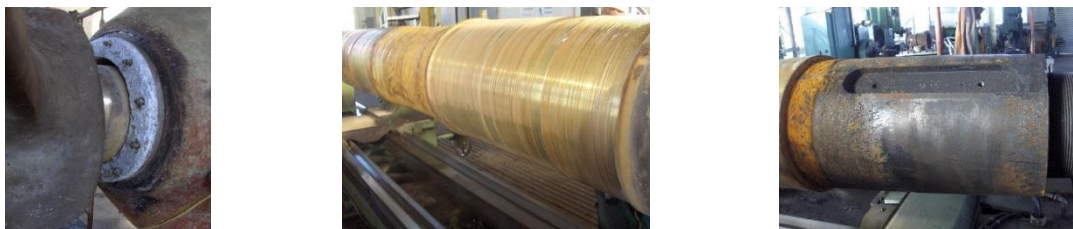
Извършено е числено пресмятане на напрегнатото и деформирано състояние на корабния валопровод, като за изходно положение е приет напрегнатият монтаж на валопроводите, съгласно корабната техническа документация или други пресмятания, базирани на измерени взаимни положения на оси и/или валове.

Корабът за насипни товари, м/к „Saint Fanouris“, постъпва за ремонт в „БУЛЯРД КИ“ АД през 2015г. Дефектите на валопровода му са силно износен кърмови дейдвуден лагер (полимерен, с водно мазане), повреди по бронзовата облицовка на гребния вал, корозия по конусната повърхност на вала към главината на гребния винт (фиг. 3.2).



Фиг. 3.2. Дефекти на гребен вал и дейдвудни лагери на м/к „Saint Fanouris“

Корабът за генерални товари, м/к „Alaya“, постъпва за ремонт в ККЗ „МТГ Делфин“ през 2011г. Дефектите на валопровода му са силно износени дейдвудни лагери (полимерен, с водно мазане), повреди по бронзовата облицовка на гребния вал, повредено носово дейдвудно уплътнение, корозия по конусната повърхност на вала към главината на гребния винт (фиг. 3.5).



Фиг. 3.5. Дефекти на гребен вал и дейдвудни лагери на м/к „Alaya“, ККЗ „МТГ Делфин“

### 3.1.2. Числено изследване влиянието на износването на лагерите върху центровката

Допустимото износване на дейдвудни лагери с водно мазане е в широки граници в зависимост от диаметъра. За диаметъра на лагерите на разглежданите кораби, допустимата хлабина е 8mm. Пропадане на кърмовия лагер (в следствие на износване) със стойност, приемлива от гледна точка на допустимото износване, би предизвикало неблагоприятно преразпределение на опорните реакции, като силно ще се натовари носовият дейдвуден лагер.

В табл. 3.4 и 3.5 са представени резултатите от пресмятането на реакциите на лагерите на валопроводите, съответно на м/к „Saint Fanouris“ и м/к „Alaya“, при симулиране износване на кърмовия дейдвуден лагер чрез последователно снижаване със стъпка от 0.5mm.

**Таблица 3.4.** Пресмятане на реакциите на лагерите на валопровода при симулиране износване на кърмовия дейдвуден лагер, м/к „Saint Fanouris“

Натоварване, kN	Начално състояние	Пропадане на вала в кърмовия дейдвуден лагер (симулиране на износване), mm						
		0	-0.5	-1	-1.5	-2	-2.5	-3
Кърмови дейдвуден лагер (1)	143.8	122.6	101.4	80.2	59.0	37.8	16.6	<b>-4.6</b>
Носови дейдвуден лагер (2)	14.2	56.0	97.7	139.4	181.1	222.9	264.6	306.3
Кърмови лагер на редуктора (3)	29.4	-9.3	-48.0	-86.7	-125.3	-164.0	-202.2	-241.4
Носови лагер на редуктора (4)	31.9	50.1	68.2	86.4	104.5	122.7	140.9	159.0

**Таблица 3.5.** Пресмятането на реакциите на лагерите на валопровода при симулиране износване на кърмовия дейдвуден лагер, м/к „Alaya“

Натоварване, kN	Начално състояние	Пропадане на вала в кърмовия дейдвуден лагер (симулиране на износване), mm						
		0	-0.5	-1	-1.5	-2	-2.5	-3
Кърмови дейдвуден лагер (1)	134.0	93.9	53.9	13.9	<b>-26.1</b>	-	-	-
Носови дейдвуден лагер (2)	34.9	105.0	175.0	245.1	315.2	-	-	-
Кърмови лагер на редуктора (3)	19.4	-38.9	-96.9	-155.1	-213.2	-	-	-
Носови лагер на редуктора (4)	41.5	69.6	97.7	125.8	153.9	-	-	-

За м/к „Saint Fanouris“, при 3.5mm симулирано износване (пропадане на кърмови дейдвуден лагер), се получава отрицателна реакция в същия. Този лагер е ненатоварен и работи с горната си част. Натоварването се прехвърля на носовия дейдвуден лагер, като стойността от 396kN отговаря на контактно налягане от около 1.32MPa, което превишава значително допустимото контактно налягане за дейдвудни лагери с водно мазане.

За м/к „Alaya“, при 2mm симулирано износване (пропадане на кърмови дейдвуден лагер), се получава отрицателна реакция в същия. Този лагер е ненатоварен и работи с горната

си част. Натоварването се прехвърля на носовия дейдвуден лагер, като стойността от 315kN отговаря на контактно налягане от около 1.05MPa, което превишава допустимото контактно налягане за дейдвудни лагери с водно мазане.

### *3.1.3. Изводи от изследването*

От проведените числени изследвания на влиянието на износването на кърмовите дейдвудни лагери върху преразпределението на реакциите между опорните лагери на корабните валопроводи на два кораба показва, че при допустимо пропадане на гребния вал от гледна точка на допустимата хлабина при дейдвудни лагери с водно мазане, се получават преразпределения на натоварванията, водещи до претоварване на определени лагери и до последващото интензивно износване на лагерните втулки.

## **3.2. Влияние на деформацията на корабния корпус и на главния двигател върху центровката на корабния валопровод**

Центровката на валопровода се извършва на вода при баластно газене и студен главен двигател. Когато корабът е в типичното експлоатационно състояние, газенето, особено за танкери и кораби за насипни товари, се променя значително. По време на експлоатация, се повишава температурата на главния двигател, както и на корпусните конструкции около него. Тези промени причиняват допълнителни деформации на корпуса, както и на конструкцията на главния двигател, което води до изменения на еластичната линия на колянвия вал на двигателя.

### *3.2.1. Методи за измерване деформацията на корабния корпус и главния двигател*

В зависимост от начина на измерването и задаването на началната линия, съществуват няколко измервателни метода за определяне на изместването – оптичен и струнен [16].

### *3.2.2. Прогнозиране деформацията на корабния корпус чрез МКЕ*

Надежден метод за прогнозиране на деформацията на двойното дъно в района на машинно отделение е методът на крайните елементи (МКЕ). Резултатите, получени от пресмятанията ще позволят, при определянето на центровката на валопровода, да се вземе предвид деформацията на корпуса при промяна в газенето.

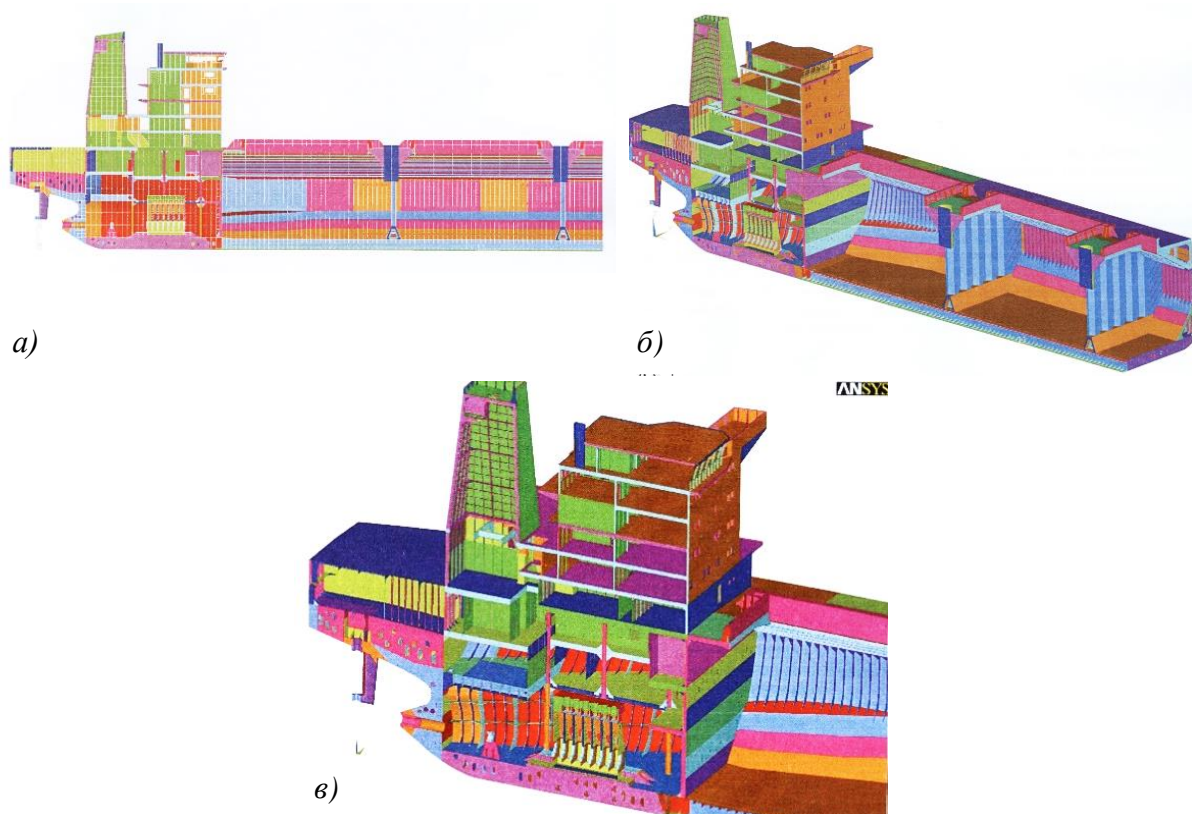
Решаването на задачата за числено определяне на деформираното състояние на корпуса на кораба в района на корабния валопровод включва:

- изграждане на крайноелементен модел на корабния корпус и надстройката;
- задаване на граничните условия на модела;
- тегло на полезния товар в трюмовете;
- тегло на приетия баласт на кораба;
- хидростатичното налягане, въздействащо върху потопената част от корабната обшивка в зависимост от газенето на кораба.

Обект на изследване е 42000TDW кораб за насипни товари задвижван от двутактов, шест цилиндров главен двигател, построен в „БУЛЯРД КИ“ АД през 2007 година.

### 3.2.2.1. Моделиране на корабния корпус

Крайноелементният модел обхваща кърмовата част на корпуса до ребро 120 на товарен трюм №3. В модела е включена и конструкцията на главния двигател, тъй като тя е съществено важна за коравината на двойното дъно в разглеждания участък под валовата линия. Механизми и оборудване, чиято маса не се променя с промяна на газенето на кораба не са отчетени в модела. На фиг. 3.14 е представен крайноелементният модел на корабната конструкция, разработен от доц. д-р инж. Христо Пировски с цел изследване на връзката между вибрациите на пропульсивната уредба и корпуса на кораба [43].



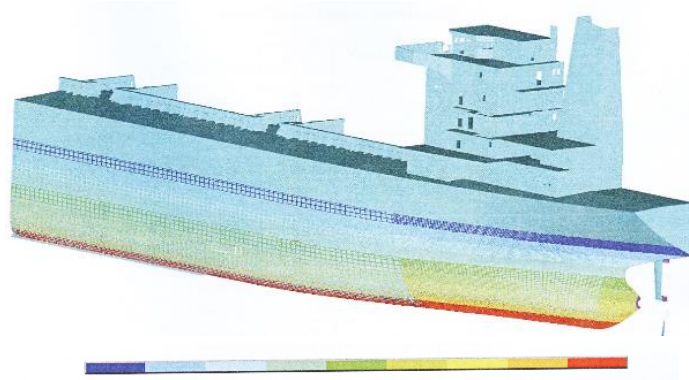
Фиг. 3.14. Модел на корабната конструкция, 42000TDW кораб [43]:  
а – страничен изглед; б – изометричен изглед; в – изглед машинно отделение.

### 3.2.2.2. Гранични условия и натоварвания

За създаване на оптимално гранично условие за прогнозиране на корпусната деформация, се прилагат две гранични условия:

- ограничаване на степените на свобода по диаметралната равнина;
- ограничаване на степените на свобода в напречно направление по ребро 120 в непосредствена близост до мидела на кораба.

Хидростатичното налягане на морската вода, действащо върху външната обшивка на кораба, както и теглото на флуида, действащо върху вътрешните стени на всеки танк, се прилагат към всеки елемент от крайноелементния модел, подложен на тяхното въздействие - фиг. 3.16.



Фиг. 3.16. Хидростатично налягане на морската вода, действащо върху външната обшивка на кораба, 42000TDW кораб

### 3.2.2.3. Определяне на деформациите на двойното дъно при различни състояния на газене за 42000TDW кораб за насипни товари

Състоянията, които се анализират са:

- **лек баласт** - състояние, при което се извършва центровката на корабния валопровод от корабостроителния завод ;
- **тежък баласт** - състояние, при което всички баластни танкове са пълни, както и 3-ти товарен трюм. Това е състояние, при което са проведени ходовите изпитания на кораба и е проверена центровка на валопровода при горещ двигател;
- **пълен товар** - състояние, при което всички товарни трюмове са пълни, а всички баластни танкове са празни.

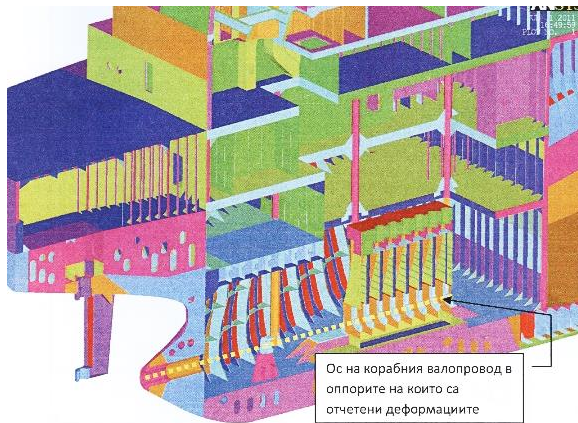
Тъй като единствено степента на относителната деформация е необходима при пресмятането на центровката на валопровода, е достатъчно да се определят съответните разлики в деформациите между трите състояния описани по-горе.

Изследването на деформациите е извършено в три зони на корабната конструкция:

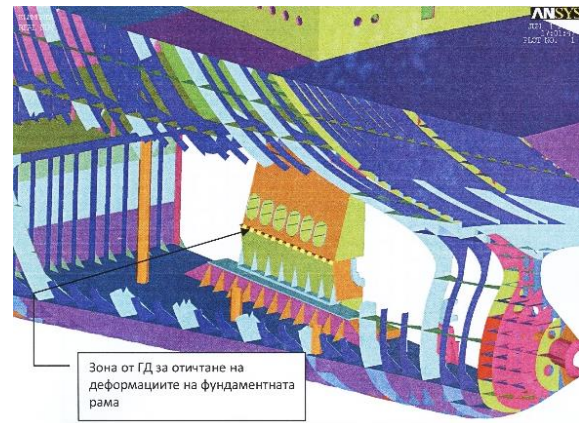
- по оста на валовата линия (възли от долните черупки на опорните лагери) (фиг. 3.17);
- по дължина на фундаментната рама (позиции на всяко ребро от конструкцията на двигателя) (фиг. 3.18);
- позиции по дължина на двойното дъно.

За всички пресмятания и представяне на резултати е приета следната координатна система:  $X$  – надлъжно на кораба;  $Y$  – напречно;  $Z$  – вертикално нагоре.



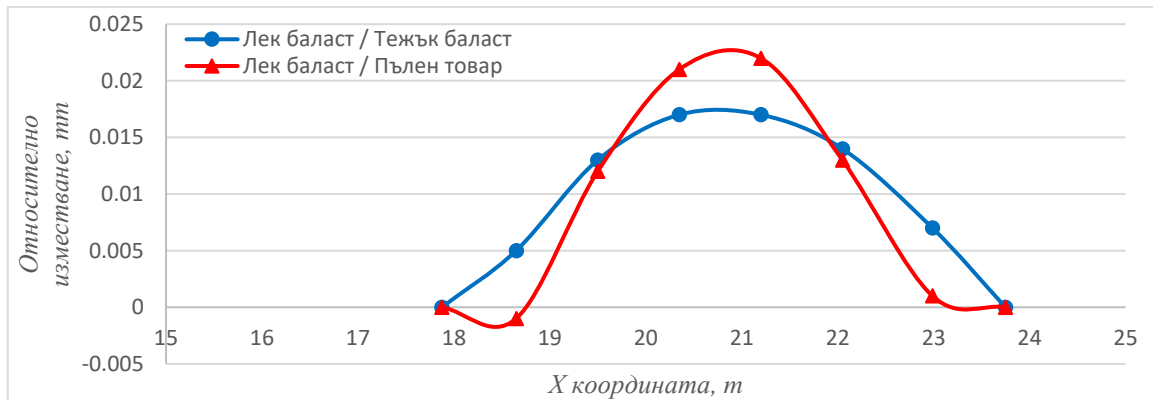


Фиг. 3.17. Изследване на деформациите по оста на валовата линия



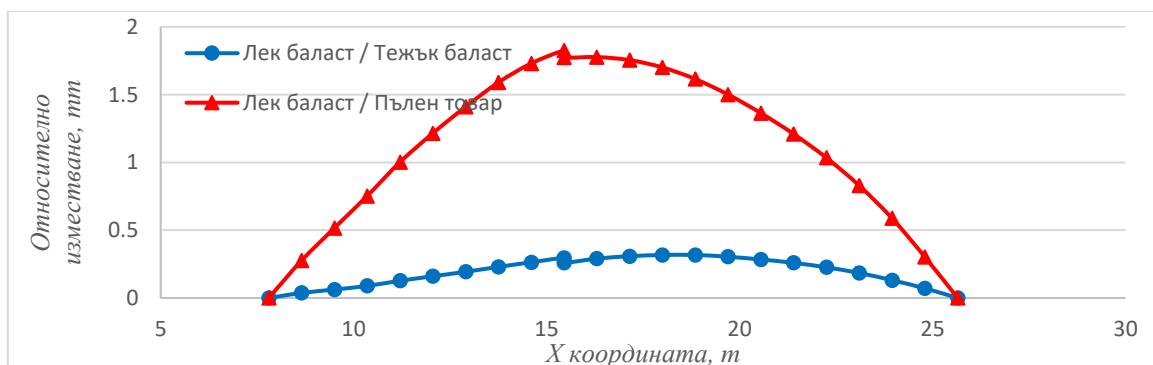
Фиг. 3.18. Изследване на деформациите по дължина на фундаментната рама

На фиг. 3.20 са показани резултатите от относителните вертикални деформации на точки от фундаментната рама на главния двигател за състояния на тежък баласт и пълен товар, сравнени с лек баласт. Максималните стойности достигат съответно 17 $\mu$ m и 22 $\mu$ m.



Фиг. 3.20. Вертикални деформации на фундаментната рама при различно газене на кораба

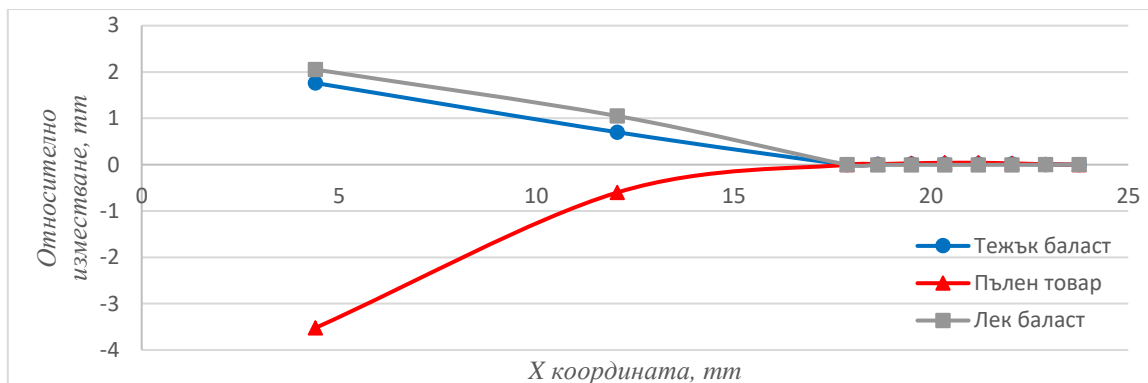
На фиг. 3.21 са показани резултатите от анализа на вертикалните деформация на двойното дъно по дължина. От диаграмата на относителните измествания се вижда, че двойното дъно се деформира вертикално с изпъкналост, достигаща 0.3mm – като разлика между тежък и лек баласт, и 1.8mm – като разлика между пълен товар и лек баласт.



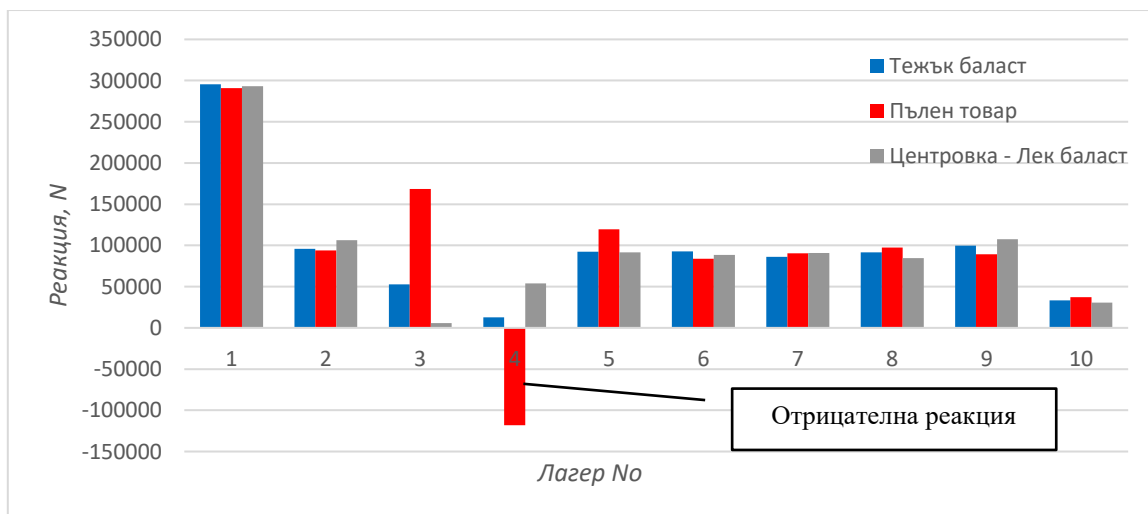
Фиг. 3.21. Вертикални деформации на двойното дъно при различно газене на кораба

Скокообразното изменение на относителните деформации се дължи на факта, че се отчитат деформации по диаметралната равнина до двигателя, а след това – по успоредна равнина, на разстояние 2.06m.

На фиг. 3.24 са показани вертикалните отмествания на лагерните опори на корабния валопровод (центровка на валопровода), за случаите: лек баласт (съответстващ на центровката, извършена на кея при студен главен двигател), тежък баласт и пълен товар, а на фиг. 3.25 са представени лагерните реакции на валопровода при тези състояния на натоварване.



Фиг. 3.24. Изчислени стойности на лагерните отмествания – центровка на валопровода на 42000TDW кораб за насипни товари, хоризонтално разположен ГД



Фиг. 3.25. Лагерни реакции за разглежданите състояния

Видно е, че при пълен товар възниква отрицателна реакция във втория кърмови лагер на главния двигател (лагер No4 от модела), като натоварването му се разпределя между двата съседни лагера.

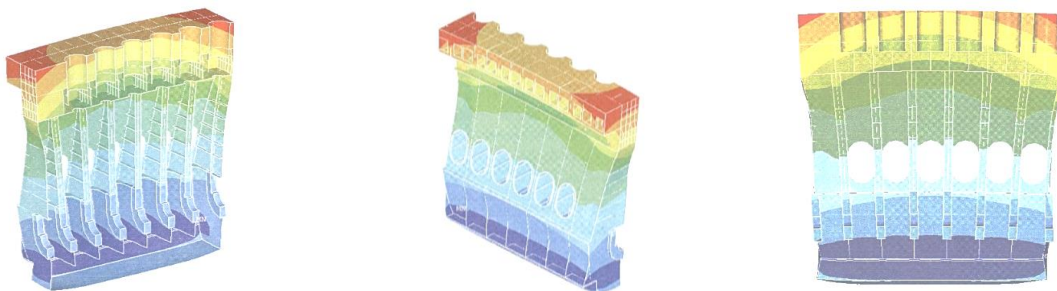
От гледна точка на нормалната работа на лагерите на главния двигател, те трябва да са натоварени с приблизително еднакви стойности. За да се гарантира това, при работното състояние (при пълен товар), от голямо значение е по време на центровката (при баластно газене и студен двигател) да се отчетат и прогнозираните смествания на лагерите на валопровода по отношение на състоянието пълен товар и горещ двигател.

### 3.2.3. Определяне влиянието на температурното разширение на ГД върху центровката на корабния валопровод

Топлинното разширение на конструкцията на двигателя е по три направления, но единствено вертикалните деформации оказват влияние върху центровката на валопровода. То може да се разложи на паралелно преместване и деформация от огъване.

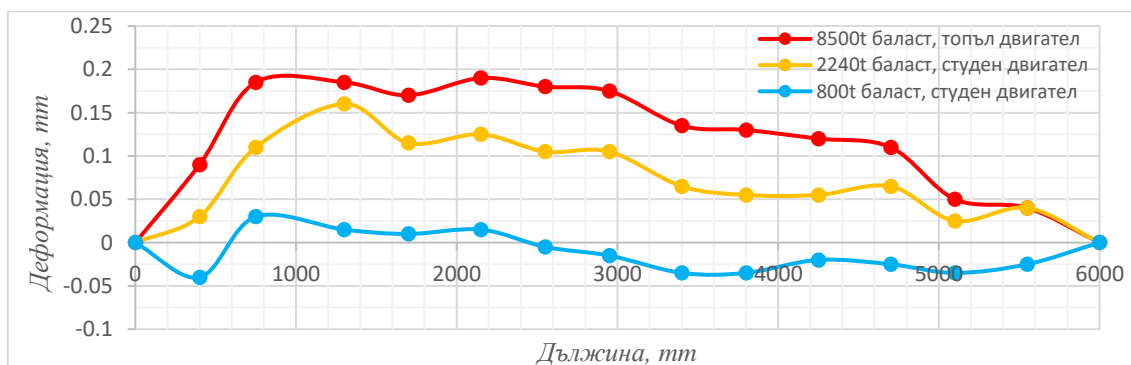
Паралелното нарастване на височината на всички лагерни позиции, се причинява главно от увеличаването на средната температура на фундаментната рама. От друга страна, деформацията от огъването е в следствие от относително голямото надлъжно разширение, дължащо се на по-високата температура на цилиндровия блок. Наблюдения на автора показват, че ефектът на деформация на огъване на двигателя не се отчита в проектни решения за центровка на валопроводи с нискооборотни главни двигатели.

На фиг. 3.28 са показани резултатите от определяне на топлинното разширение на конструкцията на главен двигател чрез използването на крайноелементен модел. Полученото максимално огъване е 0.3mm, като е отчетена и температурата на затопления кофердам под двигателя.



Фиг. 3.28. Крайноелементен модел на конструкцията на главен двигател 6S50MC на 42000TDW кораб за насипни товари (м/к „Стара планина“), показващ огъването на оста на лагерите в следствие от топлинното разширение на двигателя

За сравнение на получените резултати е извършено измерване на огъването на фундаментната рама на главния двигател на 42000TDW кораб за насипни товари (м/к „Стара планина“) с участието на автора в екип на НПЛ „ВДМС“ към ТУ-Варна, чрез използване на лазерна система Easy-Laser за измерване на равнинност/праволинейност. Резултатите от това измерване при студен и топъл двигател са показани на фиг. 3.30.



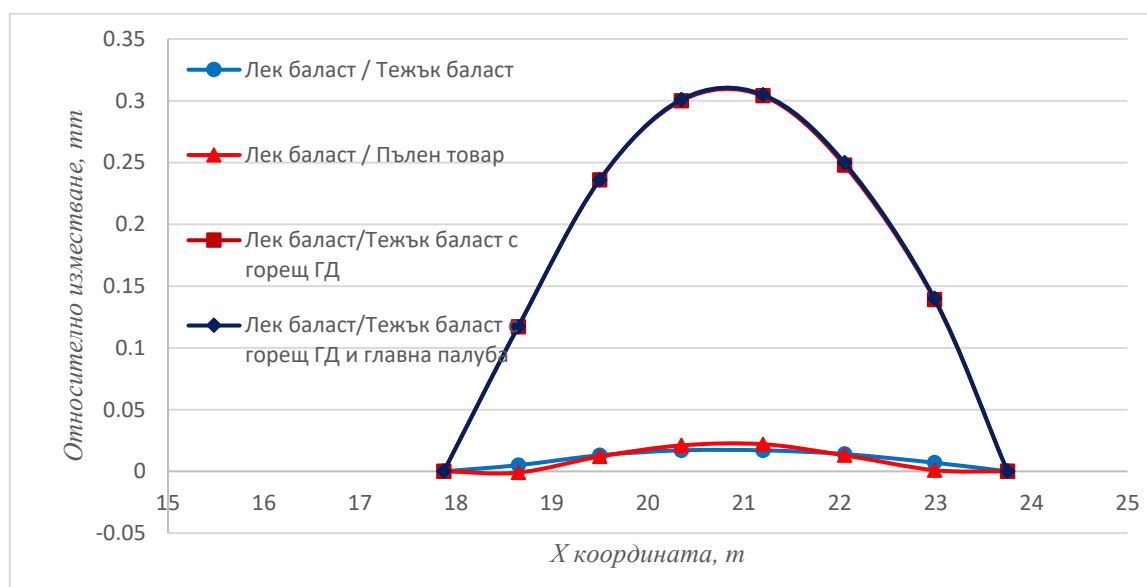
Фиг. 3.30. Резултати от измерване деформацията на фундаментната рама на двигател 6S50MC-C (десен борд) при различни газения, 42000TDW кораб

### 3.2.4. Влияние на деформациите на корабния корпус и главен двигател върху центровката на валопровода

С цел определяне влиянието на деформацията на корабния корпус при различно натоварване (газене) и на деформацията на ГД при промени в топлинното му състояние върху центровката на корабния валопровод, са направени следните изследвания:

#### 3.2.4.1. Влияние на деформацията на фундаментната рама на ГД

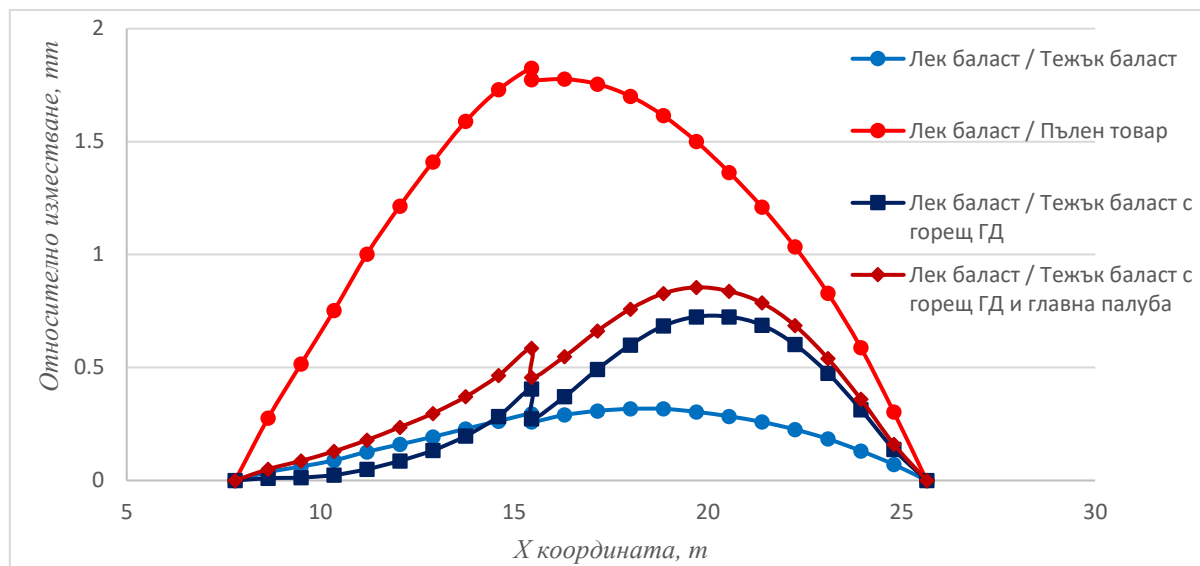
На фиг. 3.31 са представени вертикалните деформации на фланеца на фундаментната рама на двигателя в резултат на топлинното разширение от работните температури, както и температурното влияние на главна палуба при нагряването ѝ до  $t=40^{\circ}\text{C}$  при пресмятания, извършени по МКЕ. От фигурата се вижда, че деформациите от промяна в газенето на кораба са значително по-малки в сравнение с топлинните деформации на двигателя. От друга страна трябва да се отбележи, че добавеното температурно въздействие от нагряването на главна палуба почти не влияе на температурните деформации на фундаментната рама. Това може да се приеме за очаквано, като се има предвид монтажа на главния двигател върху относително мека полимерна подложка и голямата коравина на машинния фундамент.



Фиг. 3.31. Деформации на фланеца на фундаментната рама на двигателя

#### 3.2.4.2. Влияние на деформацията на двойното дъно

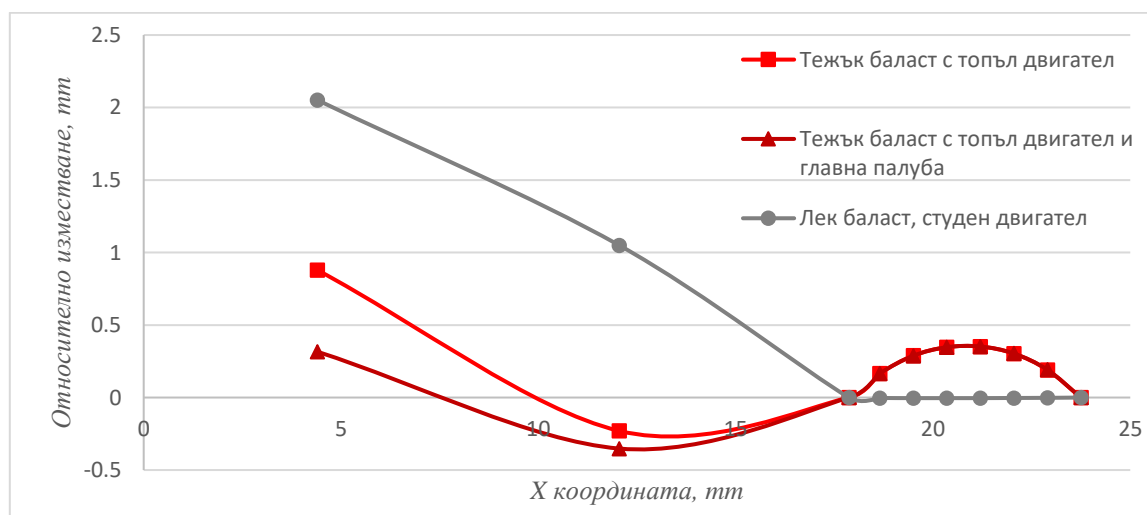
На фиг. 3.32 са представени вертикалните деформации на двойното дъно в областта на машинно отделение отново за двете топлинни състояния: топлинно разширение на ГД и добавено температурно влияние на главна палуба. От фигурата се вижда, че двойното дъно в района под ГД се деформира значително. Влияние тук оказва не само топлият двигател, но и топлият кофердам, разположен в двойното дъно. Влиянието на топлинното разширение от главна палуба също е съществено. Вижда се разлика, която съществено ще повлияе на центровката.



Фиг. 3.32. Деформации на двойното дъно в областта на машинно отделение

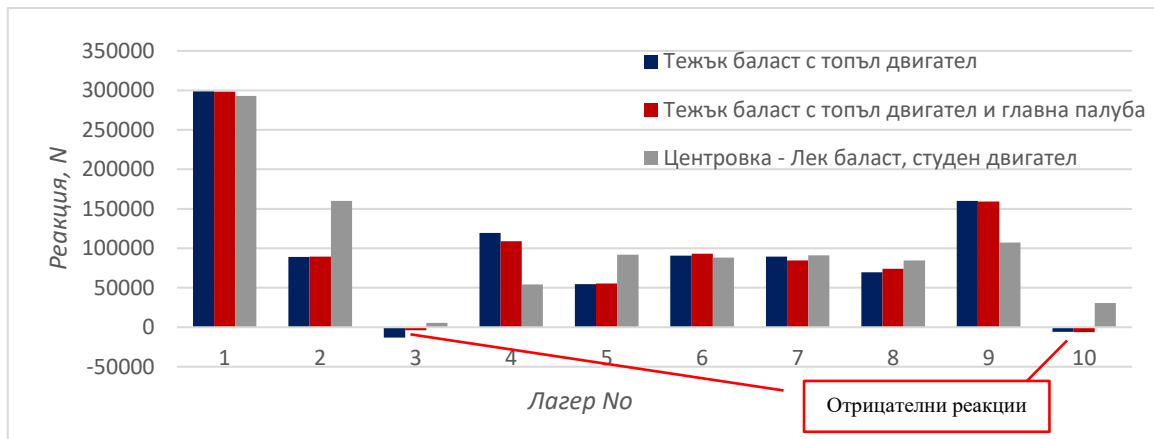
### 3.2.4.3. Промени в положенията на лагерите на валопровода

На фиг. 3.34 са представени вертикалните отмествания на лагерните опори за случаите: лек баласт със студен двигател; тежък баласт с топъл двигател; тежък баласт с топъл двигател и гореща палуба. Получените резултати чувствително се различават от центровката, която се очаква при спазване на схемата с еднакво отместване на всички основни лагери с 0.25mm. Това отместване е топлинното повдигане на оста на колянвия вал при загряването на фундаментната рама за разглеждания двигател.



Фиг. 3.34. Относителни вертикални отмествания на лагерните опори за разглежданите състояния на газене при хоризонтално разположение на двигателя

На фиг. 3.35 са представени лагерните реакции за случаите на топлинно натоварване, сравнени с лек баласт при студен двигател. Резултатите показват неприемливи лагерни реакции за крайните основни лагери (нос и кърма) на ГД.



Фиг. 3.35. Лагерни реакции за случаите на топлинно натоварване, сравнени с лек баласт и студен ГД

### 3.2.5. Изводи от изследването

Анализът на проведените изследвания показва, че окончателните лагерни отмествания при монтажа на валопровода трябва да удовлетворяват положителни натоварвания на лагерите, както за лек баласт, така и за газене при пълен товар – състояние, при което корабът се експлоатира през по-голямата част от експлоатационното време. Получените резултати показват, че проектирането на центровката на валопровода без отчитането на деформациите при различно газене и топлинната деформация на двигателя могат да доведат до неправилна експлоатация на основните лагери на колянвия вал, като причинят недопустими динамични напрежения.

## ИЗВОДИ НА ГЛАВА 3

В глава 3 са направени изследвания, оценяващи факторите, които влияят върху изменението на центровката на корабния валопровод по време на експлоатацията му.

Първото изследване обхваща валовите линии на два кораба с дизел-редукторни пропульсивни уредби. Изследването показва, че при определена стойност на износване на дейдвудните лагери, допустима от гледна точка на максималната хлабина при лагери с водно мазане, се получава такова преразпределение на реакциите, което води до претоварване и интензивно износване на определен лагер. Такова износване на дейдвудните лагери е констатирано при демонтажа на гребните валове.

Второто изследване е извършено с цел оценка на влиянието на деформацията на корабния корпус на голямотонажните кораби върху центровката на валопровода им. Анализът на проведените изследвания показва, че при определянето на параметрите на центровката на валопровода е необходимо да бъдат отчетени деформацията на корабния корпус при различно газене и топлинната деформация на главния двигател. В крайния етап на проектирането е необходимо да се определи такова положение на опорите на валопровода, което да удовлетворява изискванията на натоварване при всички експлоатационни режими на натоварване на корабния корпус.

## ГЛАВА 4. Приложни изследвания на корабни валопроводи.

### 4.1. Изследване на причините за аварии на валопроводите на кораби със среднооборотни главни двигатели и дейдвудни лагери с водно мазане

Разгледани са серия 16800TDW кораби, постъпили за аварийни ремонти в кораборемонтни предприятия със следните повреди:

- силно износване на дейдвудните втулки и повреди по бронзовите облицовки на гребните валове;
- дефекти по конусните съединения и скъсани присъединителни болтове;
- скъсване на болтовете на съединителните фланци между редуктор и валова линия.

#### 4.1.1. Скъсване на болтове на фланцево съединение на валопровода на 16800TDW кораб за насипни товари

Разгледан е м/к „Hagen“, който по време на преход къса присъединителни болтове между междинен вал и редуктор (фиг. 4.2).



Фиг. 4.2. Дефектирани съединителни фланци и болтове, м/к „Hagen“

Корабът постъпва на буксир за аварийен ремонт в Р. Аржентина в края на 2011 година, където се установява, освен скъсаните присъединителни болтове, силно износване на отворите на фланците. Приема се аварийният ремонт да се реализира посредством разпробиване на отворите на по-голям диаметър и изработката на нови болтове.

По изискване на представителя на класификационната организация, наблюдаваща ремонта, е извършено е пресмятане за гарантиране якостта на фланцевото съединение при преминаване на пас болтове с по-голям диаметър от екип на НПЛ „ВДМС“ към ТУ-Варна.

Фигура 4.3 представя крайноелементния модел на фланцевото съединение. Използвайки симетрията на конструкцията при пресмятането на напрегнатото състояние е разгледана 1/12 от фланцевото съединение.



Фиг. 4.3. Крайноелементен модел на фланцевото съединение, м/к „Hagen“

За изследването са разгледани три случая на натоварване:

*Случай на натоварване No 1:*

- натоварване от стегнатостта на сглобката пасболт - отвор (диаметри на отворите: 48mm, 52mm, 54mm; диаметър на болта 48.01mm, 52.01mm, 54.01mm);

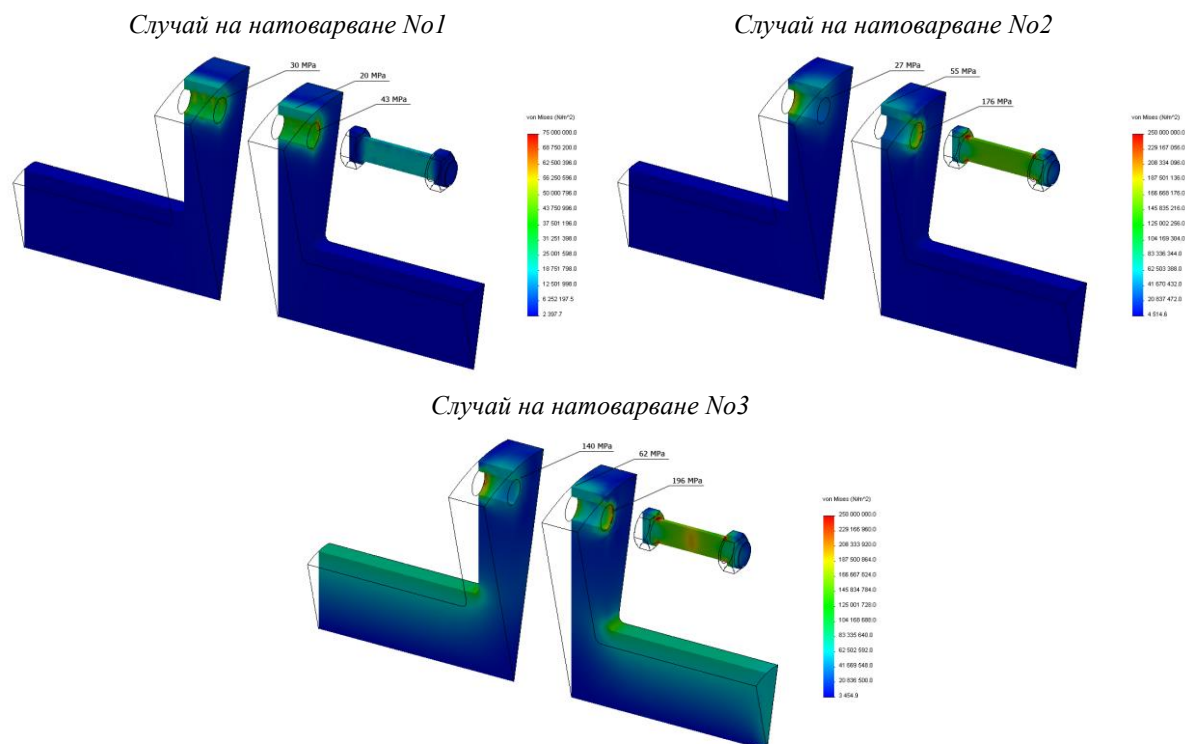
*Случай на натоварване No 2:*

- натоварване от стегнатостта пасболт – отвор;
- аксиална стегнатост на болта 0.19mm, съответстваща на момента на затягане;

*Случай на натоварване No 3:*

- натоварване от стегнатостта на сглобката отвори на фланците - болт;
- аксиална стегнатост на болта 0.19mm.
- усукващ момент приложен към междинния вал - 1/12 от въртящия момент към винта - 419.4kNm, при честота на въртене 125.3min<sup>-1</sup>.

На фигура 4.8 са представени резултатите от пресмятането на напрегнатото състояние на съединителните фланци между редуктора и междинния вал за трите случая на натоварване и диаметър 54mm на присъединителните болтове.



Фиг. 4.8. Напрегнато състояние на фланцовото съединение при трите случая на натоварване и диаметър на болтовете 54mm, м/к „Hagen“

Резултатите от изследването показват, че при разстъргване на отворите на фланцовото съединение вал на редуктора - междинен вал до диаметър на отвора 54mm се гарантира якостта на фланцовото съединение. На основата на направения анализ, наблюдаващата ремонтна класификационна организация е одобрила предложеното решение за болтове с диаметър 54mm.



Направени са пресмятания на напреженията от статичните и динамичните натоварвания на пас болтовете на фланцевото съединение междинен вал – вал на редуктора както следва:

- статични напрежения на срязване в пас болтовете от предавания въртящ момент към винта – 189.45MPa;
- динамични напрежения от опън от разцентровка на валопровода SAG - 0.85 mm – 16.7MPa;
- динамични напрежения от срязване в пас болтовете от резонансните усукващи трептения на валопровода с втората форма на свободните трептения – 20.37MPa.

По време на ремонта, с цел определяне причините за аварията, е извършено измерване на съосността на оста на дейдвудните лагери и оста на изходящия вал на редуктора. Констатирано, че оста на редуктора е на 1.65mm по-ниско от оста на дейдвудните лагери [47].

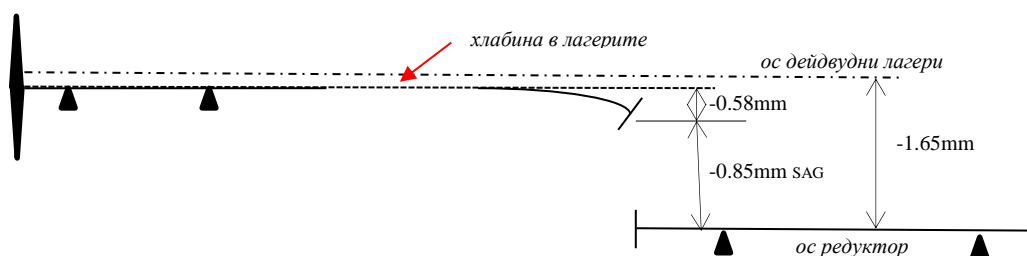
След приключване на ремонта и монтажа на валовата линия е извършено измерване на центровката между гребен вал – редуктор и редуктор – ГД [48].

Измерването на центровката между гребен вал и редуктор показва, че фланецът на редуктора е с 0.85mm по-ниско.

На база извършените измервания в кораборемонтния завод в Аржентина и с цел определяне на техническото състояние на валопровода на м/к „Hagen“ е направено пресмятане на напрегнатото и деформирано състояние на валопровода при следните случаи на взаимно разположение на оста на дейдвудните лагери и оста на редуктора:

- *Случай 1* - лагери на редуктора: -0.367mm спрямо оста на гребния вал – проектно състояние (от корабната документация);
- *Случай 2* - SAG 0.85mm – измерена разцентровка между гребен вал и редуктор [48].

Като се има предвид хлабината в дейдвудните лагери на валопровода, нормалното износване на дейдвудните лагери по време на експлоатацията на кораба и провисването на носовата част на междинния вал (0.58mm – резултат от пресмятане на деформираното състояние на системата гребен вал – междинен вал), за фактическо състояние на центровката на валопровода се приема SAG 0.85mm (фиг. 4.13).



Фиг. 4.13. Взаимно положение на осите на валопровод и редуктор, м/к „Hagen“

След извършения анализ на измерванията, провеждани при аварийния ремонт в кораборемонтен завод в Р. Аржентина и направените пресмятания на напрегнатото и деформирано състояние на валопровода е направено заключение, че механизмът на развитие на аварийното скъсване на пас болтовете на фланците на междинния вал и вала на редуктора е следният:

- поради значителната разцентровка на фланците на междинния вал и вала на редуктора в пас болтовете са натоварени със значителни динамични осови сили, които водят до фретинг износване на болтовете и отворите за болтовете във фланците (фиг. 4.2). Тези динамични натоварвания водят и до разхлабване на стегнатостта на фланците;
- продължителната работа на главния двигател при понижена честота на въртене  $640 - 660 \text{ min}^{-1}$  (по информация от екипажа – лошо техническо състояние на главен двигател) води до работа в около резонансната зона на усукващите трептения на валопровода, която от гледна точка на динамичната якост на междинния вал е допустима и поради това не е отбелязана в документите за експлоатация, обаче като срязващи усилия с променливо направление на действие са значителни;
- износването на пас болтовете и отворите на фланците, съчетано с работата на валопровода в зоната на резонансните обороти на усукващи трептения, предизвиква променливи срязващи напрежения във болтовете, които с нарастване на износването преминават в ударни натоварвания и водят до последващото им скъсване (фиг. 4.14).

На база по-горните заключения, експлоатацията на валопровода в това напрегнато състояние е недопустима. Препоръчана е прецентровка на редуктора до вертикална позиция, съответстваща на *Случай 1*.

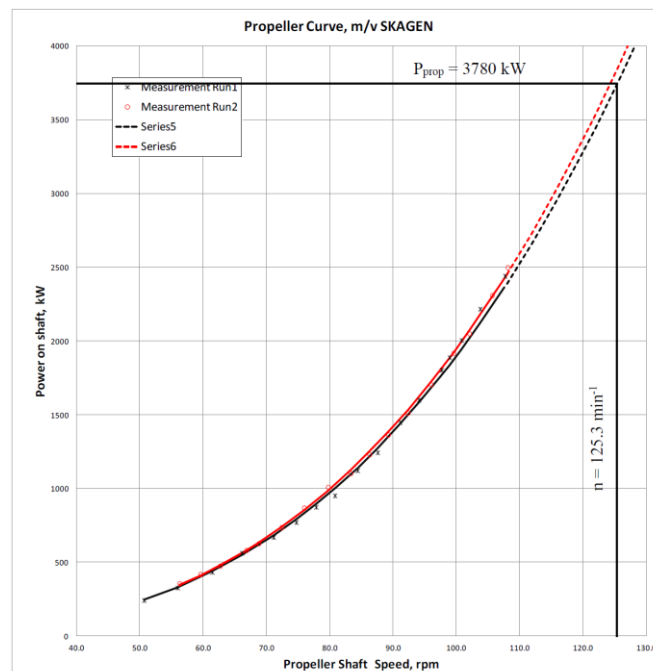
#### *4.1.2. Неправилна центровка редуктор – ос дейдвудни лагери*

Моторен кораб „Skagen“ е вторият от серия 16800TDW кораби. При първия (м/к „Hagen“, разгледан в предходната точка), неправилната първоначална центровка на валопровода и лошото техническо състояние на главен двигател довеждат до авария на валопровода и постъпването на кораба в кораборемонтен завод за аварийен ремонт. Това налага при м/к „Skagen“ да се извърши проверка на съосността между дейдвудните лагери и изходящия вал на редуктора след демонтажа на гребния вал, при влизането на кораба за ремонт в „Булярд КИ“ АД през 2012 година.

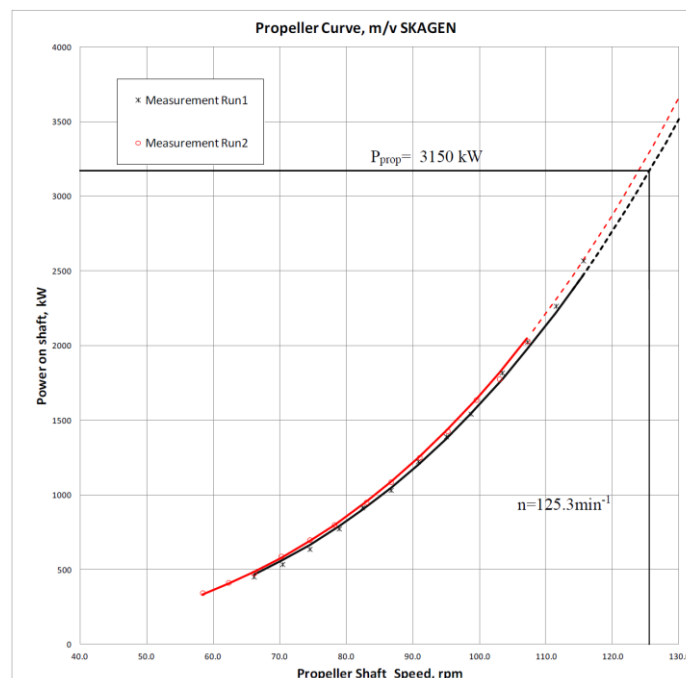
При извеждането на кораба на док и демонтажа на гребен вал е извършено измерване на износването на дейдвудните лагери. Измерените хлабини са в допустимите норми за износване на полимерни лагери, съгласно предписанията на производителя. Установена е несъосност, не отговаряща на проектната документация, като е прието да се компенсира с ексцентрично разстъргани лагерни втулки.

Поради констатирано претоварване на главния двигател на кораба по време на експлоатация и авария на кораб от същата серия, свързана с работа на главен двигател при понижени обороти, е взето решение да се коригира гребният винт. По този начин да се олекоти винтовата характеристика на пропульсивната уредба.

Проведени са ходови изпитания за измерване на пропульсивната мощност преди корекцията на гребния винт и след това. На фигури 4.16 и 4.18 са показани винтовите характеристики преди и след корекцията – данни от измерване на пропульсивната мощност и скорост.



Фиг. 4.16. Винтова характеристика преди корекция на гребен винт, м/к „Skagen“ [50]



Фиг. 4.18. Винтова характеристика след корекция на гребен винт, м/к „Skagen“ [50]

От двете фигури се вижда, че резултатът от промяната на профила и диаметъра на гребния винт е понижаване на консумираната мощност с 630kW при 125.3min<sup>-1</sup>.

Поради промяната в теглото на гребния винт и с цел измерване на натоварването на лагерите в работно състояние е извършено числено пресмятане на валовата линия на м/к „Skagen“ по МКЕ.

Измерването показва отклонение от разчетните стойности, но е прието от представителите на собственика и регистъра, наблюдаващи ремонта. При тази центровка носовият дейдвуден лагер се разтоварва, като основната част от товара се прехвърля към кърмовия дейдвуден лагер на изходящия вал на редуктора, но с това не се превишава товароносимостта му.

От направените измервания и изследвания се установява, че при м/к „Skagen“, на ниво проектиране и първоначален монтаж, са допуснати неточности при изпълнение на центровката, който биха довели до тежка авария на елементи на валопровода (регистрирано при м/к „Hagen“ – кораб от същата серия). При влизането на м/к „Skagen“ на доков ремонт са предприети действия по корекции на центровката на валопровода и гребния винт.

Качеството на центровката и пропульсивните характеристики са проверени след ремонта с провеждане на ходови изпитания и измерване натоварването на лагерите.

#### *4.1.3. Силно износване на дейдвудните лагери на 16800TDW кораб за насипни товари*

Изследван е м/к „Alaya“ постъпил за ремонт в ККЗ „МТГ Делфин“ през 2011г.

Констатираните дефекти, изследването и анализа на резултатите са описани в гл. 3, точка 3.1 от настоящия дисертационен труд.

## **4.2. Изследване на причините за ускорено износване на полимерни дейдвудни лагери с водно мазане**

### *4.2.1. Характерни повреди на полимерните лагери с водно мазане*

Характерните повреди по дейдвудните лагери с водно мазане могат да бъдат условно класифицирани в две групи. Първата група е пряко свързана с неподходящи проектни решения водещи до развитие на неизправности:

- високо контактно налягане по периферния ръб на лагерната втулка в следствие на деформацията на валовата линия и/или корабния корпус, водещи до несъвпадане (кръстосване) на оста на лагерната шийка на вала с оста на лагерната втулка;
- използване на дължини на лагерите  $L > 2 \cdot D_{\text{вал}}$  ;
- необтекаемо входно сечение на полимерни лагери без принудително охлаждане – разчита се на естествената циркулация, която създава попълнителен поток;
- неотчитане на възникваща странична сила при бързовъртящи се валове, обтичани косо от попълнителен поток (ефект на Магнус) [51].

Във втората група са описани най-чести повреди в следствие на неправилна експлоатация:

- интензивно износване при работа в абразивна среда – съдържание на твърди примеси в охлаждащата вода (абразивни частици – пясък);

- развитие на висока температура на охлаждащата вода  $t > 80^{\circ}\text{C}$ , особено за лагери без принудително охлаждане. Получава се ефект на хидролиза (химическо разграждане на контактния слой на лагера от водата) [52];
- разтопяване на повърхностния слой на лагера от спиране на охлаждането непосредствено със спирането на двигателите;
- пълно разтопяване на лагера в следствие на спиране на принудителното охлаждане или запушване на надлъжните канали на лагера от ракообразни [52].

#### 4.2.2. Обект на изследване

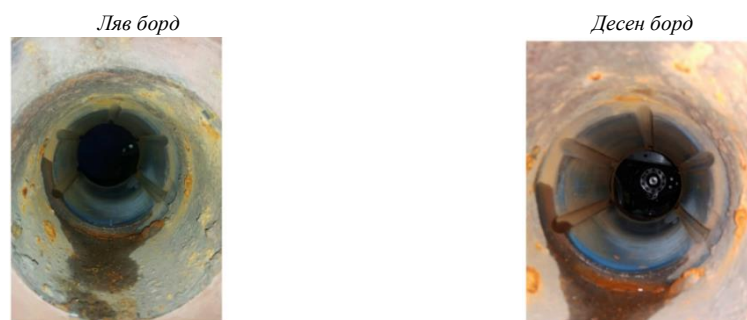
Обект на настоящото изследване е хидрографски речен кораб – катамаран „Дунав 1“ със стр. No 1201, построен в ККЗ „МТГ – Делфин“ през 2017 [53].

Гребните валове са с диаметър  $\phi 90\text{mm}$  и са изработени от неръждаема стомана. Полимерните втулки са от еластомер тип Thorplas Blue на фирмата Thordon [54].

При първоначален монтаж на полимерните лагери е отчетена хлабина вертикално и хоризонтално  $0.7\text{mm}$ . След година експлоатация в речни условия хлабината нараства значително и в лагера на кронщейна вертикално достига  $2.52\text{mm}$ , а в дейдвудния лагер  $1.25\text{mm}$ . В хоризонтално направление стойностите са съответно  $1.72\text{mm}$  и  $1.2\text{mm}$ , фиг. 4.26 и фиг. 4.27.



Фиг. 4.26. Износване в лагерите на кронщейните, хидр./к „Дунав 1“ [53]



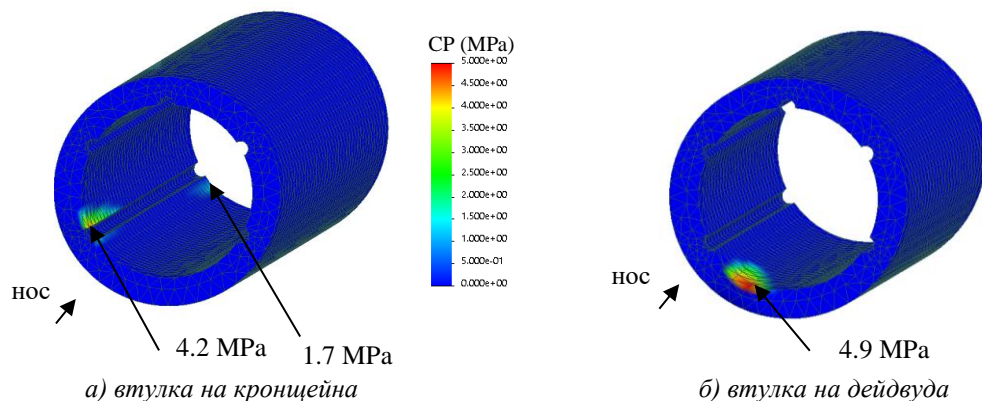
Фиг. 4.27. Износване в лагерите на дейдвуда, хидр./к „Дунав 1“ [53]

#### 4.2.3. Изграждане на изчислителен модел за оценка натоварването на полимерни лагери с водно мазане

Валовите линии на хидрографския кораб (стр. No 1201) са моделирани в средата на SolidWorks (фиг. 4.29), а числените пресмятания са направени по метод на крайните елементи (МКЕ) в средата на COSMOS M [53].

#### 4.2.4. Резултати и анализ от изследването

На фиг. 4.31 са представени резултати от проведените пресмятания на контактното налягане, което шийката на вала оказва върху повърхността на полимерния лагер [53]. За лагерната втулка на кронщейна се обособяват две контактни зони: близо до кърмовия край на лагера 1.7MPa и в носовата част 4.2MPa. За лагерната втулка на дейдвуда се обособява само една зона на контакт в носовия ръб на лагера с налягане от 4.9MPa.



Фиг. 4.31. Разпределение на контактното налягане, дейдвудни лагери – десен борд [53]

Извършени пресмятания съгласно [54], показват монтажна хлабина от 0.17 mm, която съществено се отличава от изпълнената 0.7mm. Прекалено голяма монтажна радиална хлабина чувствително нарушава хидродинамичните условия за поддържане водния клин в лагера.

Съгласно литературни източници [56], при валове с хлабина в лагера над 0.7mm и температура на водата 25°C, хидродинамичната товароносимост на лагера е под 0.14MPa.

За разглеждания случай липсват условия за изграждане на хидродинамичен воден клин, поради отчетен контакт в крайните сечения и голяма монтажна хлабина, т.е. налице е контактното триене на вала с лагерната втулка, способстващо интензивното ѝ износване.

Друг фактор, който ще определя срив на водния клин е създаването на контакт близо до зоната на надлъжния канал на лагерната втулка, фиг. 4.31a).

#### 4.2.5. Изводи от изследването

В резултат на проведените теоретични и експериментални изследвания могат да бъдат направени следните изводи и препоръки [53]:

- при прекалено голяма монтажна радиална хлабина хидродинамичните условия за поддържане водния клин се нарушават - настъпва контактното триене между шийката и вала;
- поддържането на хидродинамично водно мазане при относително дълги полимерни лагери ( $L/D > 2$ ) силно се влияе от съосното разположение на лагерната втулка и вала. Често първоначалният контакт е в крайните сечения на втулката, което води до нейното бързо износване, а оттам и нарушаване на условията за поддържане на воден клин;

- за отворен тип лагери на кронщейна е необходимо формата на входното сечение на потока към лагера да бъде скосена (конусовидна), с цел да се осигури достатъчно налягане на водния поток на входа на лагера на кронщейна;
- при работа на полимерни лагери в замърсена водна среда (плитки участъци на канали и реки) се създават условия за бързо износване лагерната втулка на кронщейна поради наличието във водата на абразивни частици (пясък). В тези случаи, ако се използват охлаждащи системи от отворен тип, е необходимо филтриране на охлаждащата вода, както и използване на принудителна циркулация за всички полимерни лагери.

#### **4.3. Рационален подход при определяне параметрите на центровка на корабните валопроводи**

Целта на изследването е разработване на рационален подход за определяне на параметрите на центровка на корабните валопроводи [57], основаващ се на:

- анализ на изискванията на класификационните организации, на производителите на елементи на корабните валопроводи, както и на корабостроителните и кораборемонтни фирми към статичните и динамични натоварвания на лагерите на валопровода;
- разработването на числен метод за изчисляване на напрегнатото и деформирано състояние на корабния валопровод;
- разработване на числена процедура за определяне параметрите на центровка на валопровода, удовлетворяваща техническите изисквания;
- разработване на технологична процедура за реализация в корабни условия на разработения рационален подход за центровка.

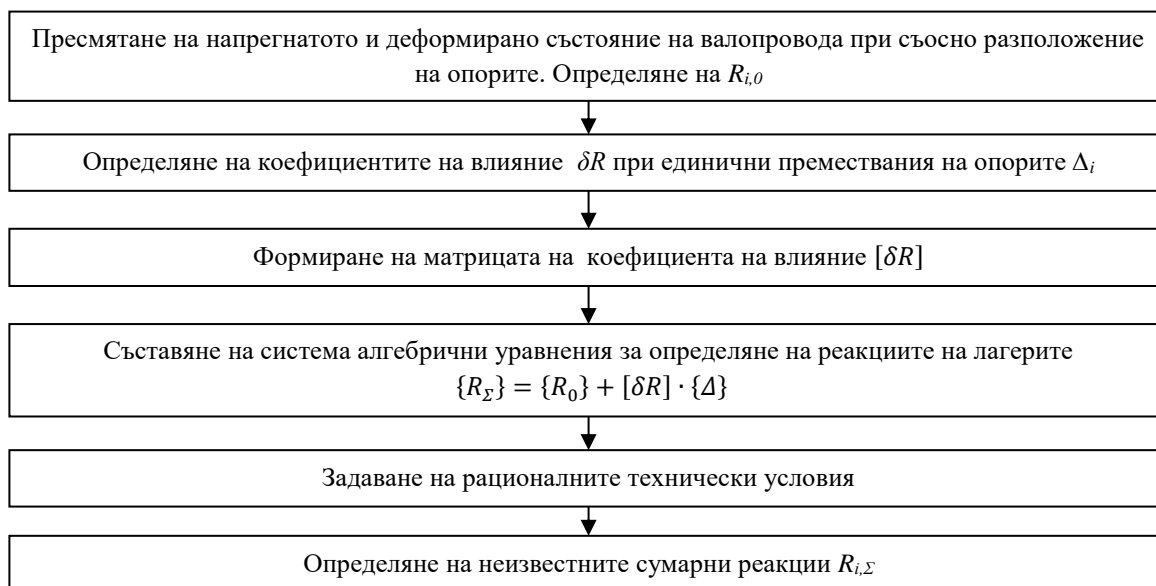
##### *4.3.1. Анализ на техническите изисквания към статичните товари на лагерите на корабните валопроводи*

Извършен е анализ на изискванията на класификационната организация, наблюдаваща преустройството, на производителя на опорните лагери и на производителя на главните двигатели.

##### *4.3.2. Числен метод за определяне на параметрите на рационална центровка на корабния валопровод*

Под рационален подход при определяне на параметрите на центровка на корабния валопровод се разбира определяне на такива параметри на напрегнат монтаж на валовата линия и главния двигател, гарантиращи изпълнението на изискванията на класификационната организация, наблюдаваща проект и изискванията на производителите на главни двигатели и корабно оборудване [57].

На фиг. 4.37 е представена блок-схема на процедурата за рационален подход при определяне параметрите на центровка на валова линия и главен двигател.



Фиг. 4.37. Блок-схема на процедурата за рационален подход при определяне параметрите на центровка на валова линия и главен двигател

#### 4.3.3. Пресмятане напрегнатото и деформирано състояние на валопровода на м/ф „Варна“

Обектът на изследване е м/ф „Варна“, постъпващ за преустройство в кораборемонтен завод ККЗ „МТГ Делфин“ през 2012г. Пропулсивната уредба се състои от два бавнооборотни дизелови двигателя MAN B&W 6S26MC, задвижващи два гребни винта работещи в дюзи. Всяка валова линия има по два гребни вала на кронщейн, два междинни вала, всеки лагеруван на един коридорен лагер.

След приключване на преустройството и корпусните работи, за извършване на монтажа на двете валови линии, се налага пресмятане на валопровода и определяне на параметрите на центровка.

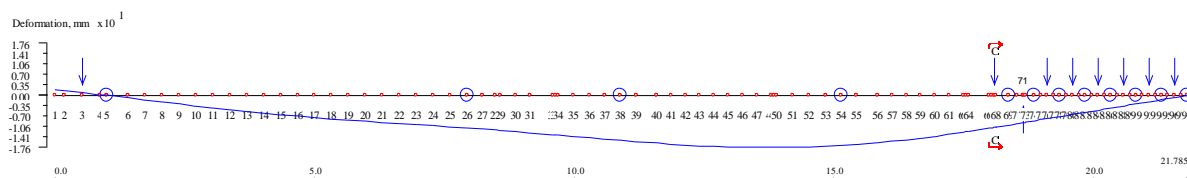
Извършено е пресмятане при съосно разположение на всички лагери на валопровода. Резултатите показват, че не се изпълняват изискванията на производителя на главните двигатели за натоварването на основните лагери и стойностите на сръзващата сила и огъващ момент във фланеца на двигателя.

По методиката, описана в предходната точка, са определени сместванията на лагерните опори на валопровода във вертикалната равнина, удовлетворяващи изискванията за напрегнатия монтаж.

На фиг. 4.40 е показана деформираната линия на корабния валопровод, а табл. 4.7 представя резултатите от пресмятане на реакциите на валопровода при напрегнат монтаж и горещо (работно) състояние на главния двигател.

Резултатите от пресмятането удовлетворяват изискванията.





Фиг. 4.40. Деформирана линия на валопровода при пресмятане по МКЕ, м/ф „Варна“ [57]

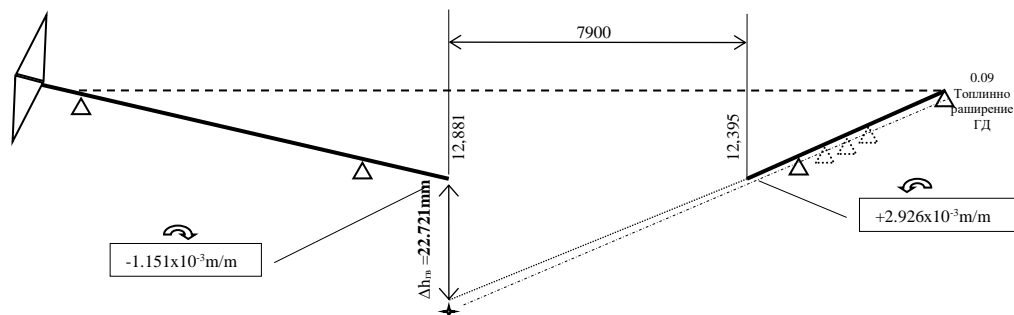
Таблица 4.7. Резултати от пресмятане на реакциите на валопровода при напрегнат монтаж – горещо състояние, 4577TDW ферибот [57]

Лагер		Лагер No	Възел No	Сместване $\Delta_i$ , mm	Реакция, N
Кърмови дейдвуден		1	5	0.0	29248
Носови дейдвуден		2	26	-11.01	22333
Кърмови коридорен		3	38	-15.16	8272
Носови коридорен		4	54	-16.83	5515
Основни лагери ГД	1 <sup>ви</sup> осн. кърмови	5	69	-9.98	911
	2 <sup>ри</sup> осн. кърмови	6	74	-8.56	5129
	...	7	78	-7.13	14138
	...	8	82	-5.70	14862
	...	9	86	-4.28	14270
	...	10	90	-2.85	13939
	...	11	94	-1.43	16967
...	12	98	0.0	5048	
Срязваща сила във фланеца на двигателя, kN					-5.6
Огъващ момент във фланеца на двигателя, kNm					-6.5
Сила на тежест на маховика, kN					-5.9

Извършено е и пресмятане на т.н. „студено“ състояние, необходимо за определяне параметрите на центровка, които се контролират при монтажа на валовите линии.

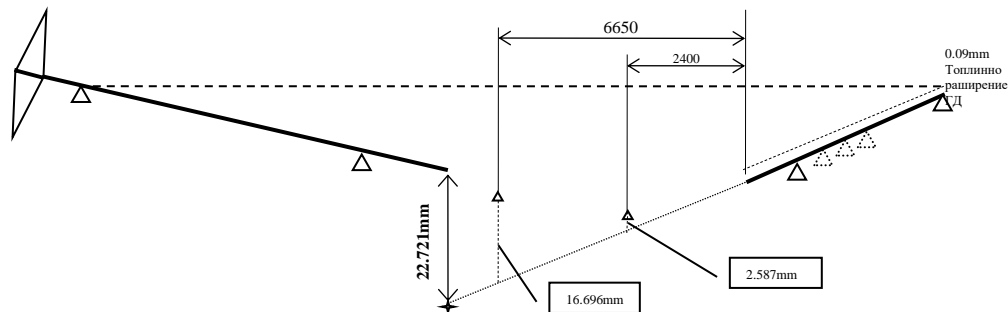
#### 4.3.4. Определяне на параметрите на рационален монтаж на двете валови линии на м/ф „Варна“ с главни двигатели 6S26MC.

На фиг. 4.43 е показано взаимното положение на гребен вал и колян вал на главния двигател. Взети са под внимание и деформациите на тези валове от собственото им тегло.



Фиг. 4.43. Геометрични построения на взаимното положение на гребен вал и колян вал на ГД, м/ф „Варна“ [57]

Положението на коридорните лагери е определено съгласно положението на системата гребен и колян вал на ГД, и от изчислените смествания на опорите по отношение на нулевата линия, минаваща през кърмовия дейдвуден лагер и носовия основен лагер на ГД – фиг. 4.44.



Фиг. 4.44. Центровка на коридорните лагери, м/ф „Варна“ [57]

На база резултатите за позицията на коридорните лагери е разработена процедура за центровка на валовите линии на м/ф „Варна“ с използването на оптична лазерна система Easy-Laser.

След приключване на монтажните операции, с цел потвърждаване качеството на центровките, е проведено измерване на натоварването на лагерите на валопроводите на м/ф „Варна“ при студено и горещо (работно) състояние на главните двигатели по метода „крик тест“ с участието на автора в екип на НПЛ „ВДМС“ към ТУ-Варна. Измерени са носовите дейдвудни лагери, опорните лагери на междинните валове и кърмовите основни лагери на главните двигатели и на двете валови линии.

Получените от експерименталното измерване резултати са близки до изчислените, единствено е констатирана разлика в натоварването на двата кърмови лагера на главните двигатели. Стойностите на реакциите са в диапазона на натоварване, даден от производителя на двигателите. Центровката е приета от класификационната организация, наблюдаваща преустройството на м/ф „Варна“ и той е пуснат в експлоатация.

Важно е да се отбележи, че след пет години експлоатация, при влизане на кораба за класов ремонт през 2018г., натоварването на лагерите на валопровода е проверено отново от екип на НПЛ „ВДМС“. Констатирано е несъществено изменение на натоварването на лагерите.

#### ИЗВОДИ НА ГЛАВА 4

В глава 4 от дисертационния труд са представени приложните изследвания на кораби, постъпили за ремонт или преустройство в български кораборемонтни предприятия.

При първите три кораба, разгледани в точка 4.1, е установена неправилна заводска центровка на валопроводите. Заключение, до което се достига след анализа на причините за възникналите повреди, е че още при построяката на корабите е допуснато

неточно изпълнение на центровките, които в комбинация с експлоатационни дефекти са довели до аварийни повреди.

В глава 4 е анализирани и валовите линии на хидрографски кораб, чийто дейдвудни лагери дефектират след кратък експлоатационен период. Установени са грешки при проектирането и монтажа на дейдвудните лагери на кронщейни, водещи до интензивното им износване. При извършения гаранционен ремонт са предприети действия за отстраняване на причините.

Приложните изследвания в глава 4 завършват с изследване на напрегнатото и деформирано състояние на валовите линии на двувалов ферибот, постъпил за преустройство в ККЗ МТГ „Делфин“. Разработена е методика за определяне параметрите на рационален монтаж на валопроводите, която е апробирана при монтажните операции след преустройството на ферибота.

## ОБЩИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертационният труд представя съществено нов подход в изследването и контрола на техническото състояние на корабните валопроводи.

Изследвана е неопределеността на изчислителната процедура за определяне напрегнатото и деформирано състояние на корабния валопровод. Разработена е методика за оценка на неопределеността при измерване на лагерни реакции по метода „крик тест“.

Една глава е посветена на изследвания, оценяващи факторите, които влияят върху изменението на центровката на корабния валопровод по време на експлоатацията му.

Дисертационният труд завършва с приложни изследвания на кораби, постъпили за ремонт или преустройство в български кораборемонтни предприятия.

При серия 16800TDW кораби са установени несъответствия между реалната центровка и проекта.

Констатирани са грешки при проектирането и монтажа на дейдвудните лагери на кронщейни на хидр./к „Дунав 1“, водещи до интензивното им износване.

Разработена е методика за определяне параметрите на рационален монтаж на валопроводите, която е апробирана при монтажните операции след преустройството на м/ф „Варна“.

При разработването на дисертационния труд са постигнати следните приноси:

### • Научно-приложни приноси

1. Разработена е методика за оценка на неопределеността на изчислителната процедура за определяне на напрегнатото и деформирано състояние на корабните валопроводи и лагерни реакции.
2. Разработена е методика за оценка на неопределеността на експерименталното измерване на лагерните реакции на корабни валопроводи по метода „крик тест“.
3. Предложен е изчислителен подход за оценка на деформациите на корабния корпус дължащи се на различно газене и температурни изменения на главна палуба и главен двигател.
4. Предложен е изчислителен подход за оценка на натоварването на полимерните лагери с отчитане влиянието на центровката и външни хидродинамични сили. На основата на проведени анализ на напрегнатото и деформирано състояние на лагерните втулки по МКЕ е установено контактно налягане в крайните сечения на втулките многократно превишаващо допустимото по данни на производителя, който факт се доказва и от ускореното износване на лагерите.

5. Предложена е методика за определяне параметрите на рационален монтаж на корабни валопроводи с цел постигане на положителни лагерни реакции и удовлетворяване изискванията на производителя на главния двигател и класификационната организация.

#### • Приложни приноси

1. В съответствие с приложената методика за оценка на неопределеността на изчислителната процедура за определяне на напрегнатото и деформирано състояние на корабния валопровод е определено, че най-съществено влияние при пресмятане на лагерните реакции и коефициентите на влияние оказва позицията на контактната точка на коридорния лагер и приетият модул на еластичност на материала.

2. Предложената методика за оценка на неопределеността при измерване на лагерните реакции по метода „крик тест“ е приложена за оценка на разширената неопределеност на коридорен лагер на междинен вал и е оценена в границите  $\pm 20\%$ .

3. Изследвано е влиянието на износването на дейдвудни полимерни лагери с водно мазане върху преразпределението на лагерните реакции. Установено е, че водещ критерий за подмяна при износване на дейдвудната лагерна втулка трябва да бъде неизпълнението на условието за положително и допустимо натоварване на всички лагери на валопровода. Направеното изследване доказва, че това условие се нарушава на по-ранен етап, преди износването на лагерната втулка да достигне допустимото, предписано от производителя.

4. Установени са причините за скъсване на пас болтовете на фланцево съединение на м/к „Hagen“ ремонтиран в Р. Аржентина. На основата на измервания на фактическото пространствено разположение на фланци и лагери на валолинията е установена реалната позиция на редуктора, несъответстваща на проектните изчисления и технологични препоръки за изпълнение на центровката. Проведените изчисления от автора, доказват необходимостта от прецентроване на редуктора, което е отправено като препоръка към корабособственика.

5. Установено е, че условията за поддържане на хидродинамично водно мазане при относително дълги полимерни лагери ( $L/D > 2$ ) силно се влияе от съосното разположение на лагерите на валолинията и деформираното ѝ работно състояние.

6. Предложената методика за определяне на параметрите на рационален монтаж е апробирана при ремонтните операции на м/ф „Варна“. След изпълнение на предложената центровка и извършена проверка на реакциите на лагерите чрез метода „крик тест“, е установена работоспособността на методиката. Резултатите се потвърждават и след продължителен пет годишен период на експлоатация на валолиниите.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **С. Вълчев**, Хр. Пировски, Хр. Драганчев, Рационален подход при определяне параметрите на центроване на корабните валопроводи, Механика на машините 106, Година XXII, Книга 2, 2014, ISSN 0861-9727
2. **С. Вълчев**, Анализ на неизправностите на корабни валопроводи, International Journal “NDT Days”, Volume I, Issue 3, Year 2018, ISSN 2603-4018
3. **С. Вълчев**, Хр. Пировски, Изследване причините за ускорено износване на полимерни дейдвудни лагери с водно мазане, International Journal “NDT Days”, Volume II, Issue 4, Year 2019, ISSN 2603-4018, eISSN 2603-4646
4. **С. Вълчев**, Хр. Пировски, Оценяване на неопределеността при измерване реакциите на лагерите на корабен валопровод по метода „крик тест“, International Journal “NDT Days” Volume III, Issue 5, Year 2020, ISSN 2603-4018, eISSN 2603-4646

## **Methods for investigation and control of the technical condition of ship shaft lines**

The thesis is dedicated to the methods for investigation and control of the technical condition of the ship shafts. A summary of the methods used in shipbuilding and ship repair practice in the alignment of the shafts is made, an assessment is made of the factors influencing this alignment. The uncertainty of one of the most widely used methods for measuring the load of the shaft support bearings is evaluated. Applied studies of ship shafts have been carried out.

Chapter 1 provides an overview of the most common damages in ship shafts, as well as an analysis of registered damages to ships repaired in shiprepair yards in Bulgaria in recent years.

The chapter also discusses the methods for aligning the shafts during the stages of construction and repair of ships. Attention is paid to the methods for quality control of alignment. The widely used "jack-up test" method for checking the quality of alignment is presented in detail.

Chapter 2 examines the uncertainty of the calculation procedure for calculating the stress and strain state of a shaft line of a 56000TDW ship. The uncertainty of measuring the load of the intermediate shaft support bearing by the "jack-up test" method, an element of the mounting operations of the shaft line, was evaluated.

In Chapter 3, studies have been performed assessing the factors that influence the change in the alignment of the ship's shaft line during its operation. The shaft lines of diesel-gear box propulsion systems and the influence of deadwood bearing wear on alignment and reliability are analyzed. An analysis of the influence of the deformation of the hull of large-tonnage ships on the alignment of their shafts is performed.

Chapter 4 of the thesis presents the applied research of ships entered for repair or reconstruction in Bulgarian shiprepair yards. The first covers a series of three ships, with fault analysis showing identical alignment errors in the design. In the chapter is analyzed a hydrographic vessel whose deadwood bearings fail after a short period of operation. Errors have been identified in the design and installation of deadwood bearings on struts, leading to intensive wear. It ends with a study of the stressed and deformed state of the shaft lines of a two-shaft ferry, received for reconstruction. It has developed a methodology for determining the parameters of rational installation of the shafts, and it has been tested during installation operations after the reconstruction of the hull.