



Секция „Корабна хидродинамика и аеродинамика“

Добрин Владимиров Ефремов

**СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ДИНАМИКАТА НА
СИСТЕМАТА
“ГЛАВЕН ДВИГАТЕЛ – КОРПУС - ГРЕБЕН ВИНТ”
ПРИ МАНЕВРИРАНЕ НА КОРАБА**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на
образователна и научна степен ”доктор” по научна специалност
02.03.01 "Теория на кораба"

Варна
2015

Дисертационната работа съдържа 123 страници основен текст (от които 8 страници са списък на цитираната литература от 101 заглавия), 67 фигури и 12 таблици разпределени в 8 глави. Приложенията на брой 3 съдържат допълнително 15 страници.

Защитата на дисертацията ще се състои на 18.09.2015г. от 14:00 часа в зала 201 на ЦХА-Варна. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Научно-техническата библиотека на ЦХА-Варна към ИМСТЦХА-БАН, етаж 5, адрес: 9003 Варна, кв. Аспарухово, ул.У.Фруд 1.

ИНСТИТУТ ПО МЕТАЛОЗНАНИЕ, СЪОРЪЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
„АКАД. А. БАЛЕВСКИ”
ЦЕНТЪР ПО ХИДРО- И АЕРОДИНАМИКА – ВАРНА
Секция “КОРАБНА ХИДРОДИНАМИКА И АЕРОДИНАМИКА”

Добрин Владимир Ефремов

**СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ДИНАМИКАТА НА
СИСТЕМАТА
“ГЛАВЕН ДВИГАТЕЛ – КОРПУС - ГРЕБЕН ВИНТ”
ПРИ МАНЕВРИРАНЕ НА КОРАБА**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на
Образователна и научна степен ”доктор”
по научна специалност 02.03.01 "Теория на кораба"

Научен ръководител: *Проф. д-р инж. Евгени Методиев Миланов,
ИМСТЦХА-БАН, Варна*

Рецензенти: *1. Доц. д-р инж. Иван Василев Иванов
2. Проф. д.т.н. инж. Петър Николаев Колев*

Варна
2015

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от Научния съвет на ИМСТЦХА по предложение на Общонаучния колоквиум на ИМСТЦХА-БАН.

Докторантът работи в ИМСТЦХА-БАН-Варна .

Автор: Добрин Владимиров Ефремов

Заглавие: СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ДИНАМИКАТА НА СИСТЕМАТА
“ГЛАВЕН ДВИГАТЕЛ – КОРПУС - ГРЕБЕН ВИНТ“ ПРИ МАНЕВРИРАНЕ
НА КОРАБА

Технически редактор:

Тираж: 30 бр.

Излязъл от печат: юли, 2015 г.

Печатна база на

Авторски права © 2015 – Добрин Ефремов

Декларирам, че настоящата дисертация е изцяло авторски продукт и в нейното разработване не са използвани чужди публикации и разработки в нарушение на авторските им права.

При изработването, оформлението и отпечатването на този дисертационен труд са използвани само лицензирани комерсиални програмни продукти на компанията Майкрософт (Microsoft®), както и лицензиран програмен продукт Матлаб (MATLAB®) на компанията „Mathworks“.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА РАБОТАТА

Актуалност. Превозът на продукти и стоки чрез кораби на дълги дистанции се е наложил като най-евтиния и разпространен вариант за транспортиране, в резултат от което трафикът по морските пътища се увеличи многократно през последните години. Това натоварване на водните пътища налага да се обърне по-големи внимание и усилия върху осигуряването на безопасността и управлението на корабите при маневриране.

Търсенето на възможности да се симулират корабни маневри на цифрови компютри нараства драстично през последните двадесет години, като това се подхранва от практическата нужда на корабните оператори да конкретизират и документират маневрените качества на корабите от една страна, както и от нарастващите строги изисквания към безопасността при маневриране в условията на интензивен трафик от друга. Особено силен стимул е широко разпространеното понастоящем приложение на корабни симулатори в реално време за обучение на морски кадри. Алгоритъмът за възпроизвеждане на корабните маневри е ключов елемент в математическия модел на хидродинамиката на маневриране кораба. Един от проблемите при реализацията на тези алгоритми е определянето на неизвестните величини в симулационния модел.

Доминиращи модели в областта са разработените от Абковиц, Японската група за моделиране на маневрите на кораба (JMMG) и А. Гудман, които са доразвити от редица други автори. Широко изследваният и систематичен модел на Абковиц разглежда взаимовръзката „корпус – вода“ и се основава на идеята за маневриране при малко отклонение от равновесно състояние при установено движение напред с проектната скорост. Той се оказва много успешен за симулация на произволна маневри с използване на руля при постоянен режим на двигателя, както е документирано в пионерската разработка на Стрьом-Тейсен и Числет, последвана от много други, включително на Олтман и Волф и Моланд. В модифицирана форма тя дори е била прилагана за маневри с помощта на двигателя, независимо от факта, че тези маневри едва ли може да се считат за "малки" отклонения от неутралното състояние. Моделът JMMG е доста развит и обръща специално внимание на взаимодействието между „корпус-винт-рул“, но също така предполага постоянство на оборотите на ГД по време на маневра като управлението се осъществява с руля. Освен това, в симулационния модел са включени и маневрите за спиране, както е документирано от Миниович и Пивано и резултатите са обобщени в доклад на Комитета по маневреност на 17-та Конференция на Опитните Басейни ИТТС.

Относно сложността и точността на модела, влиянието на взаимодействието на системата „ГД-К-ГВ“ е от изключително значение при изпълнението на зададени маневри, както при моделни изпитания, така и в практиката. Числени модели описващи взаимовлиянието на елементите в тази система все още се усъвършенстват и не са напълно разпространени при симулатори и тренажори. Такъв симулационен модел би спомогнал при изясняване и определяне на ефективността например на винтовете и рулите на кораб с двойка гребни винтове и двойка рули, избягване на претоварване на някой от валовете на винтовете, времето за извършване на зададена маневра във функция от работата на ГД, прогнозиране на създавания упор и момент и да бъдат анализирани по-лесно пропульсивно-маневрените характеристики на гребния винт. Това позволява още в стадия на проектиране преоразмеряването при нужда на вала на ГВ или преизчисляване и избор на по-подходящ ДРК. Публикувани са резултати относно влиянието на скосения потока обтичащ винта, като изследването на този ефект би позволило да се прогнозира изменението на развивания упор и момент при маневриране по криволинейна траектория. По проблема за асиметричното натоварване на винто-рулевия комплекс при движение на кораба по криволинейна траектория е наличен ограничен кръг от изследвания. Същото се отнася и до проблема за отчитане на динамиката на главния двигател при маневриране, когато преобладаващо значение имат преходните му режими при ускоряване, спиране и реверсиране.

Цели и задачи на изследването

Основната цел поставена в дисертационния труд е разработването на математически модел описващ взаимодействието между елементите в системата „ГД-К-ГВ“ и програмната му реализация в симулационния модел на маневреното движение на кораба. В настоящата дисертация при разработването на модела за пълнота е включен и модула на руля поради което по-нататък в абривиатурата на системата същият е добавен („ГД-К-ГВ-Р“). Такъв симулационен модел спомага за изясняване и определяне на ефективността на винтовете и рулите на двувинтов кораб, избягване на претоварване на някой от валовите на винтовете, определяне на времето за извършване на зададена маневра във функция от работата на ГД, и в резултат могат да бъдат анализирани по-лесно пропульсивно-маневрените характеристики на гребния винт. Това позволява още в стадия на проектиране правилното оразмеряване при нужда на вала на ГВ или преизчисляване и избор на по-подходящ ДРК. Извършените изследвания относно влиянието на косия ъгъл на потока обтичащ винта и разработения числен модел на явлението създават възможност да се моделира влиянието му върху развивания упор и момент при маневриране по криволинейна траектория.

Обект и предмет на изследване

Обект на разработката е изследване и реализиране на възможността за включване в модела на маневреното движение на кораба на уравненията на динамиката на главния двигател и на влиянието на скосения поток обтичащ гребните винтове и рули при маневриране на двувинтов кораб. В резултат е създаден разширен математически модел и програмни кодове в среда на Матлаб и Симулинк с помощта на които са анализирани характеристиките на елементите от системата „ГД-К-ГВ-Р“, включително несиметричното натоварване на винто-рулевия комплекс в режим на маневриране на двувинтов кораб.

Методи на изследване

В дисертацията е приложен последователен анализ на елементите на системата „ГД-К-ГВ-Р“ като е отделено внимание на явленията на взаимодействие между тях. С методите на математическото моделиране е съставен модел на маневреното поведение на двувинтов кораб. За определяне на хидродинамичните характеристики на обекта е приложен експериментален метод на принудените хармонични колебания на корабен модел с измерване на силовото натоварване. Осъществена е параметричната идентификация на коефициентите в уравненията на движение на кораба. Моделът на движение е програмиран в среда на Матлаб и Симулинк и след валидация на програмната реализация са извършени систематични изследвания на маневрите на кораба и поведението на елементите на разглежданата система.

Научна новост на изследването

Изследванията в дисертацията над несиметричното натоварване на гребните винтове и рулите на двувинтов кораб, както и включването в модела на уравнението на динамиката на главния двигател имат елемент на новост в симулационното изследване на маневреното поведение на многовинтови кораби.

ГЛАВА 1.

СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА МЕТОДИТЕ И ИЗСЛЕДВАНИЯТА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО НА СИСТЕМАТА „ГД-К-ГВ-Р“ ПРИ МАНЕВРИРАНЕ

Един от пионерите в областта на компютърното симулиране на маневрените качества на кораба е проф. Абковиц. През 1960г. в Датския морски институт за пръв път са измерени силите действащи на корпуса на кораба във функция от преместването му, след което са интегрирани в уравненията на движение, за да бъде прогнозирано изминатото разстояние и траектория. Въз основа на тези и други достижения в областта, от страна на Международната Морска Организация ИМО са въведени стандартни оценъчни маневри. През следващите години се наблюдава усъвършенстване на математичните модели и съответните експерименти, но базовите уравнения описващи движението на кораба практически остават неизменни. През 80-те години развитието на изчислителната техника вече позволи бързото и точно числено решаване в реално време на модела на маневреното поведение на кораба. В днешно време те са разпространени и биват развивани по целия свят, като входните данни все още са резултат от скъпи и трудоемки моделни изпитания. Така неизвестните коефициенти в уравненията на движение, свързани с присъединените маси, инерции, напречно-хоризонталното и ъгловото хоризонтално демпфиране, както силите върху движителите и средствата за управление основно се определят чрез специфичен моделен експеримент в опитен басейн. През последните години интензивното развитие позволява това да се извършва с използване на методите на числената механика на флуидите.

Следва да се подчертае, че в англоезичната литература се разграничават два вида симулационно изследване на поведението на морските обекти – чрез числено решаване на частни диференциални уравнения на движението на обекта в идеален или вискозен флуид (“CFD simulation”) или посредством решаване на системата от обикновени диференциалните уравнения на формулиран структурен модел с известни коефициенти („System based simulation”). Предмет на разглеждане в настоящия дисертационен труд е вторият подход.

Обхватността и точността на модела, влиянието на взаимодействието в системата „ГД-К-ГВ-Р“ е от изключително значение при изпълнението на зададени маневри, както при планирането на съответните моделни изпитания, така и при прогнозирането на маневреното поведение на кораба.

Отчитането в модела на маневреното движение на кораба на динамиката на ГД, както и на членовете на взаимодействието с останалите елементи на системата в много случаи се осъществява с опити за моделиране на маневрите в четирите квадранта на работа на ГВ, респективно на изменение на кинематичните параметри на движение в този режим. Налице е ограничен обем резултати от изследвания над управляемостта на двувинтови кораби, създавайки значителен недостиг на информация и затруднения за дизайнерите работещи в тази област. В някои алтернативни проучвания се разглежда модел, включващ различни модификации за описание на асиметричната работа на валолиниите на кораба по време на маневриране, в други проучвания се изследва влиянието на стърчащите части към корпуса на многовинтов кораб. Като цяло се констатира, че вследствие несиметричното обтичане по двата борда ДРК могат да изпитват големи колебания на мощност по време на критични маневри, с чувствително увеличение на съпротивителния момент спрямо този при установен режим на движение на прав курс съпроводено със значителни дисбаланси на мощността и въртящия момент.

В настоящата дисертация е разработен и апробиран симулационен модел на маневрите на двувинтов кораб с отчитане на спецификата на работа в кос поток на вътрешните и външни по отношение на траекторията на движение гребни винтове и рули, както и включването в модела на уравнение на динамиката на главния двигател. Структурата на модела предвижда идентификация на неизвестните хидродинамични коефициенти чрез

моделен експеримент и използването на апробирани емпирични зависимости в уравнението на динамиката на ГД. Модулите на изчислителните програми са разработени с използване на софтуерния пакет Матлаб и инструмент за структурно моделиране на сложни системи Симулинк.

ГЛАВА 2.

МОДЕЛ НА ГРЕБНИЯ ВИНТ ПРИ МАНЕВРИРАНЕ НА КОРАБА

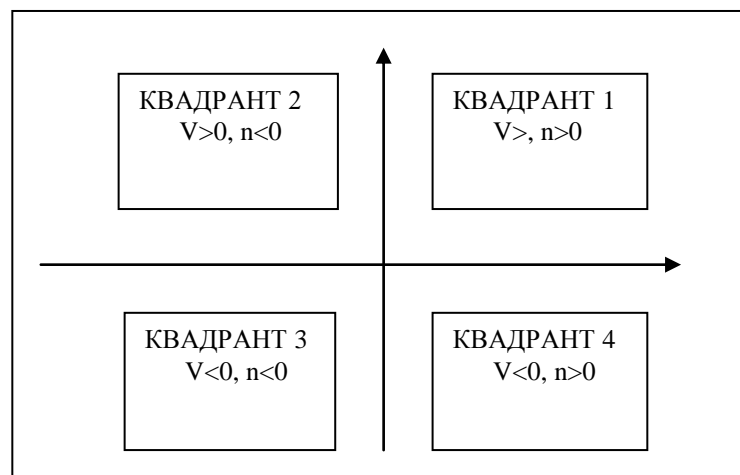
Общи характеристики на гребния винт

Относително напредване J се явява основна безразмерна кинематическа характеристика на ГВ, определяща режима на неговата работа. Силите които възникват на ГВ при зададена скорост V могат да бъдат сведени до две основни съставляващи – упор T действащ по направление на скоростта V_A , и съпротивителен момент на вала Q , преодоляван от главния двигател представени съответно с коефициентите K_T и K_Q . Както е известно, в условията на работа на ГВ зад корпуса тези величини зависят от:

- влиянието на корпуса, изразено с наличието на „попътен поток” което води до промяна в скоростта на обтичане. Ефективната скорост се определя чрез коефициента на попътния поток.
- в резултат от явлението засмукване зад корпуса настъпва редукция в създавания упор и ефективната му стойност се изчислява с помощта на коефициента на засмукване

Коефициентите K_T , K_Q и коефициента на полезно действие η_o са основните динамични характеристики на ГВ. Безразмерните динамични характеристики на ГВ K_T , K_Q и η_o , представени графично като функции на относителното напредване J , се наричат *криви на действие на винта*, които по правило се получават експериментално чрез моделни изпитания в опитен басейн или кавитационна тръба. Характерна особеност при извършване на различните маневри е, че режимите на работа на ГВ на реалния кораб могат да преминават през *четирите квадранта* на изменение на параметъра на относителното напредване J - фиг. 2.1 - което значително усложнява задачата за симулационно изследване на маневрите на кораба.

Фиг. 2.1 Режими на изменение на параметрите на относителното напредване при маневриране на кораба



В управляемостта на кораба е необходимо да се изследват всички вариации между различни упор и момент в 4-те квадранта на действие. С цел обхващане всички режими на работа на винта на база относителното напредване J и за избягване на сингулярните точки в

кривите на действие Лаврентиев въвежда универсален коефициент на напредване:

$$J_L = \frac{V_A}{\sqrt{V_A^2 + n^2 D^2}} \quad (2.1)$$

На практика при разработването на приложението на симулационния модел горепосочената трудност е отстранена програмно.

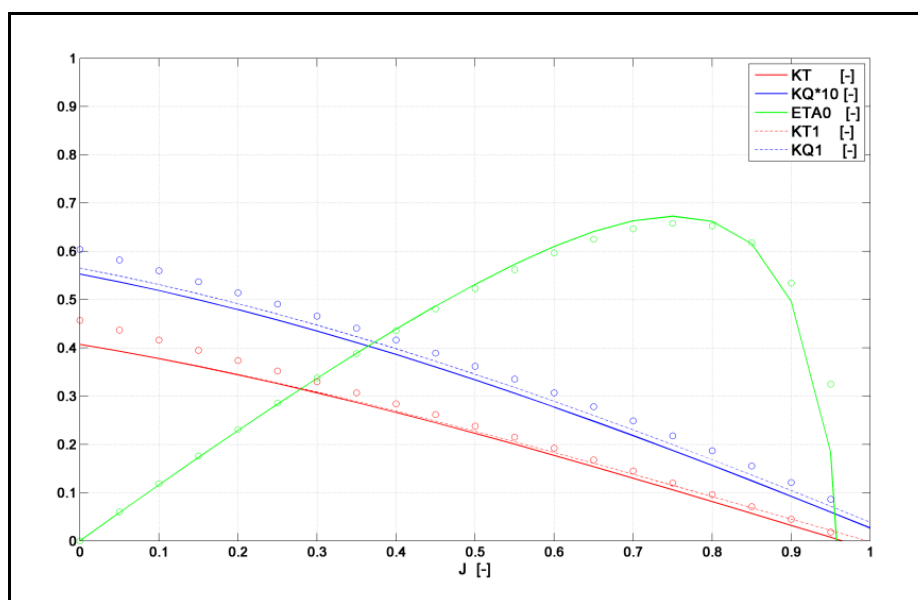
Регресионни модели на характеристиките на ГВ в свободна вода

Систематични изпитания се извършват за поредица от подобни винтове с цел да бъдат събрани в определени серии данни за кривите на действие на гребните винтове. Една от най-известните серии е серията В-Wageningen гребни винтове на Холандския изследователски институт MARIN, която се състои от около 120 модела. Те включват варианти с брой лопатки от 2 до 7, дисково отношение от 0,3 до 1,05 и крачково отношение от 0,5 до 1,4 и дават възможност за детайлен анализ на кривите на действие на различни по дизайн ГВ. Характеристиките на серията В-Wageningen в свободна вода се представят чрез регресионни уравнения в два диапазона на изменение на числото на Рейнолдс чийто обобщен вид е:

$$K_T(Rn) = K_T(Rn \leq 2 \times 10^6) + \Delta K_T(2 \times 10^6 < Rn \leq 2 \times 10^9) \quad (2.2)$$

$$K_Q(Rn) = K_Q(Rn \leq 2 \times 10^6) + \Delta K_Q(2 \times 10^6 < Rn \leq 2 \times 10^9) \quad (2.3)$$

На базата на горния регресионен модел от автора е разработено програмно приложение в среда на MATLAB за определяне на характеристиките на гребните винтове в „свободна“ вода. Работоспособността на програмата е проверена чрез набор от изчисления и сравнение с пряко измерени в моделни условия в ЦХА характеристики на модели на гребни винтове – фиг. 2.2.



Фиг. 2.2 Прогнозирани и експериментални (с точки) характеристики на двойка гребни винтове P0534/P0535

Валидирането на резултатите от изчисленията е извършено за 12 бр. Модели на гребни винтове изпитани в ЦХА. Данните за средноквадратичните отклонения на изчислените спрямо пряко измерените в опитните басейни на ЦХА коефициенти на упора и момента на гребните винтове са приведени в таблица 1. Резултатите от сравненията в числен

и графичен вид се съдържат в Приложения 1 и 2 към дисертацията. Тези резултати са представителни за останалите прогнози - Приложение 2 от дисертацията. Анализът на данните от таблица 1 показва че резултатите от изчисленията с реализирания програмен модул могат да се считат за напълно удовлетворителни.

Таблица 1

<i>ГВ No.</i>	<i>std Ktsim</i>	<i>std Kqsim</i>	<i>std Ktexp</i>	<i>std Kqexp</i>	<i>std Ktsim</i> %	<i>std Kqsim</i> %
534/5	0.025	0.034	0.144	0.171	0.17	0.21
605/6	0.011	0.006	0.121	0.112	0.07	0.04
675	0.013	0.022	0.146	0.167	0.09	0.14
677	0.031	0.033	0.218	0.307	0.21	0.20
685	0.040	0.050	0.182	0.212	0.28	0.30
689	0.029	0.039	0.120	0.127	0.20	0.24
698	0.028	0.032	0.145	0.152	0.20	0.19
699	0.023	0.017	0.107	0.096	0.16	0.11
702	0.019	0.032	0.115	0.118	0.13	0.19
703	0.032	0.049	0.147	0.172	0.22	0.30
<i>средно</i>	<i>0.025</i>	<i>0.031</i>	<i>0.144</i>	<i>0.163</i>	<i>0.17</i>	<i>0.19</i>

Характеристики на гребен винт в кос поток

При движение на кораба по първоначалния (преди маневриране) прав курс с номинални обороти на гребния винт n_0 и номинална скорост V_0 режима на работа на движение се характеризира напълно с относителното напредване $J_0 = V_0(1-w)/D.n_0$ и съответните им номинални стойности на коефициентите $\sigma_{T0}, K_{T0}, K_{Q0}$. При влизане в режим на криволинейно движение (маневра) условията на обтичане на гребния винт се променят. За отчитане на това явление се въвеждат коефициентите q_T и q_Q , характеризиращи измененията в упора и момента, предизвикани от косото обтичане в района на движителя и влиянието на отклонението на руля. В общия случай коефициентите q_T и q_Q , представляват функция от ъгъла на отклонение δ , ъгъла на скосения поток β_k и коефициент на натоварване на гребния винт според упора $\sigma_{T0} = \frac{2T_E}{\rho.V^2.L.T}$.

Резултати от изследвания за работата на гребния винт в кос поток в диапазона на ъгъл на скос $0 \leq \beta_k \leq 30^\circ$ са публикувани от Гутше. Испитанията са проведени в опитен басейн за гребен винт с дисково отношение в диапазона $0,35 \leq A_E / A_0 \leq 0,80$ и стъпково отношение в диапазона $0,5 \leq P/D \leq 1,5$. При испитанията са измервани упор, напречна сила и момент на вала на гребния винт. Подробен анализ на тези данни е осъществен от Гофман. Обработката на резултатите показва, че увеличението на упора и момента на вала на гребния винт при кос поток зависи от стъпково отношение P/D и от началния (без кос поток) режим на работа на ГВ σ_{T0} . Получени са графични зависимости за коефициентите на изменение на упора и момента на вала на ГВ съответно q_T и q_Q :

$$q_T = 1 + C_1(P/D, \sigma_{T0})f_1(P/D, \beta_k) \quad (2.4)$$

$$q_Q = 1 + C_2(P/D, \sigma_{T0})f_2(\beta_k) \quad (2.5)$$

като резултатните стойности на упора и момента са равни на сумата от номиналните (при отсъствие на скос в осеви поток) с добавени поправки за влияние на скос в потока, т.е.:

$$K_T = K_{T0}[1 + C_1(P/D, \sigma_{To})f_1(P/D, \beta_k)] \quad (2.6)$$

$$K_Q = K_{Q0}[1 + C_2(P/D, \sigma_{To})f_2(\beta_k)] \quad (2.7)$$

Графики за спомагателните функции $C_1(P/D, \sigma_{To})$, $f_1(P/D, \beta_k)$, $C_2(P/D, \sigma_{To})$ са представени в Приложение 3 към дисертацията. Величината $f_2(\beta_k)$ се определя по формулата:

$$f_2(\beta_k) = 0,00017 \cdot [\beta_k + 4 \cdot (\beta_k)^2] \quad (2.8)$$

където: β_k - в градуси.

Коефициентите q_T и q_Q характеризират не самите упор и момент на вала на ГВ, а относителното им изменение в кос поток.

Регресионни зависимости за изменение на характеристиките на гребен винт в кос поток

С използване на обработените от Гофман в табличен вид експериментални резултати на Гутше за изменението на q_T и q_Q във функция на дисковото и крачково отношение от автора е извършен регресионен анализ с цел получаване на модел на разглежданото явление, който е удобен за числени симулации. В параметричен вид зависимостите са представени с изразите (2.6) и (2.7).

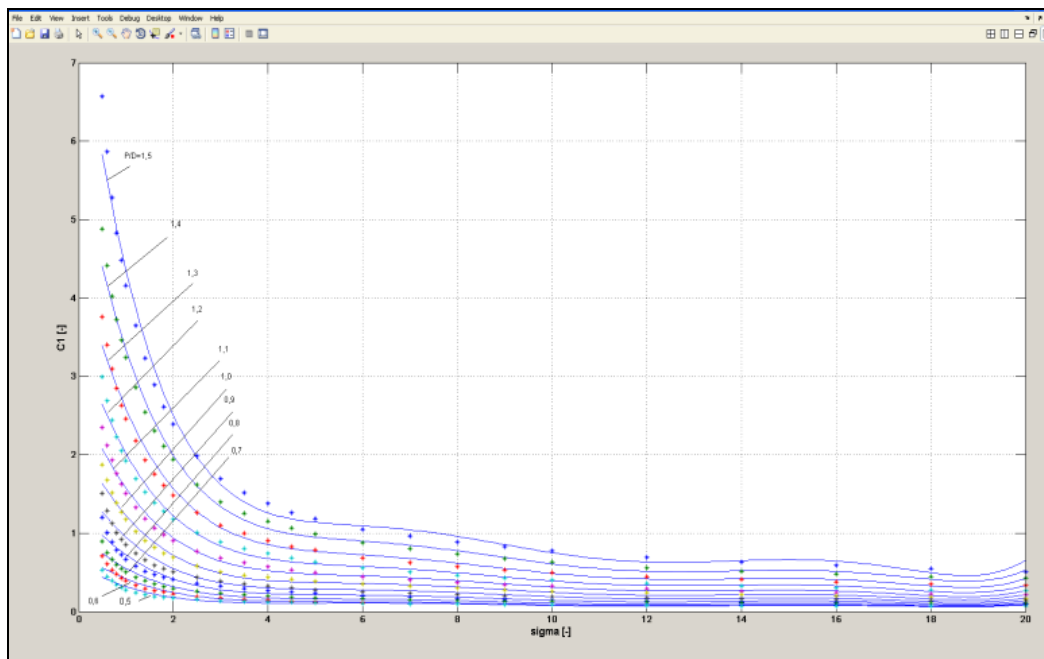
Анализът на кривите и формата на горните изрази показва необходимостта от използване на нелинейна множествена регресия или стъпкова нелинейна полиномна апроксимация. За целта е разработено приложение с използване на възможностите на пакета инструменти Cftool към софтуерния пакет Матлаб . Резултатите от регресионния анализ са получени и представени чрез следните полиномни изрази (2.9)-(2.11) за следните поправъчни коефициенти:

$$C2 = C_1 \cdot PD - C_2 \cdot PD^2 + C_3 \cdot PD^3 - C_4 \cdot PD^4 + C_5 \cdot PD^6 - C_6 \cdot \sigma - C_7 \cdot \sigma \cdot PD + C_8 \cdot \sigma^2 + C_9 \cdot \sigma^2 \cdot PD - C_{10} \cdot \sigma^3 - C_{11} \cdot \sigma^3 \cdot PD + C_{12} \cdot \sigma^4 + C_{13} \cdot \sigma^4 \cdot PD - C_{14} \cdot \sigma^5 - C_{15} \cdot \sigma^5 \cdot PD \quad (2.9)$$

$$f1 = f_0 + f_1 \cdot \beta - f_2 \cdot \beta \cdot PD + f_3 \cdot \beta \cdot PD^3 + f_4 \cdot \beta^2 - f_5 \cdot \beta^2 \cdot PD + f_6 \cdot \beta^2 \cdot PD^2 - f_8 \cdot \beta^2 \cdot PD^3 + f_9 \cdot \beta^3 - f_{10} \cdot \beta^3 \cdot PD + f_{11} \cdot \beta^3 \cdot PD^4 - f_{12} \cdot \beta^4 \cdot PD + f_{13} \cdot \beta^4 \cdot PD^2 \quad (2.10)$$

$$C1 = d_0 + d_1 \cdot PD - d_2 \cdot PD^2 + d_3 \cdot PD^3 - d_4 \cdot PD^4 + d_5 \cdot PD^6 - d_6 \cdot \sigma - d_7 \cdot \sigma \cdot PD^3 - d_8 \cdot \sigma \cdot PD^6 + d_9 \cdot \sigma^2 + d_{10} \cdot \sigma^2 \cdot PD^2 + d_{11} \cdot \sigma^2 \cdot PD^6 - d_{12} \cdot \sigma^3 - d_{13} \cdot \sigma^3 \cdot PD^3 - d_{14} \cdot \sigma^3 \cdot PD^6 + d_{15} \cdot \sigma^4 + d_{16} \cdot \sigma^4 \cdot PD^3 - d_{17} \cdot \sigma^5 \cdot PD^3 \quad (2.11)$$

С помощта на аналитичните изрази (2.9)-(2.11) са възстановени графичните зависимости и оценена точността на приближението на получените стойности като на фиг.2.3 е илюстрирано приближението на апроксимацията на експерименталните данни за случая на поправката C1.



Фиг. 2.3 Експериментални (с точки) и апроксимирани данни за определяне на поправка за влияние на кос поток C_1 във функция от натоварването по упор (σ H) за крачково отношение в диапазона $0,5 \leq P/D \leq 1,5$

Изменение на характеристиките на гребния винт в кос поток при двувинтови кораби

При движение на кораба по криволинейна траектория местният ъгъл на атака в района на рулите и на гребните витове при многовинтовите, в частност при често срещаните двувинтови, е различен предвид различието в радиусите на въртене и на положението по дължина на кораба на ГВ и рулите. По тази причина в последните години се правят опити и проучвания върху характеристиките и поведението на двувинтовите кораби.

При криволинейно движение с ъгъл на дрейф характера на обтичане на корпуса се изменя, съответно и коефициента на попълнителния поток w . С увеличаване на местния ъгъл на дрейф β_k , w намалява и достига до нула при пределни стойности на β и ъгловата скорост \bar{r} .

Асиметричното натоварване по упор и момент на гребните винтове при двувинтови кораби може да се обясни с изменението на местния ъгъл на дрейф β_k и попълнителния поток w . Влиянието на първия параметър може да се представи чрез регресионния модел за изменението на характеристиките на гребен винт в кос поток, а алгоритъма на изчисляването на w зависи от относителното напредване J и коефициентите за упор и момент - K_T, K_Q . Нужно е да се уточни, че за начални условия – например стойността на w преди поемане по криволинейна траектория се ползват данните от пропусивните изпитания на кораба. Този коефициент описва попълнителния поток в зоната на ДРК, но той е асиметричен, ако се разгледа поотделно за зоната на всеки ГВ. За целта е нужно проследяването на изменението на скоростите V_A и V_B , т.е. векторите на скоростите в зоната на точките на разположение на ГВ. Стъпките в анализа на асиметричното изменение на попълнителния поток w при наличие на два гребни винта са:

1. Известни са началните условия преди извършване на криволинейна маневра

$J = \frac{V_A}{n \cdot D}$ - изменението на J зависи преди всичко от скоростта на напредване на гребния винт

V_A , а както е известно тя е свързана със скоростта на кораба V посредством уравнението:

$$V_A = V(1 - w)$$

2. Намирането на V_A може да се представи чрез известното вече J или

$$V_A = J \cdot n \cdot D$$

3. Накрая е възможно изчисляването на w от предходните формули:

$$w' = 1 - \frac{V_A}{V}$$

където V е установената скорост на кораба по време на криволинейната маневра.

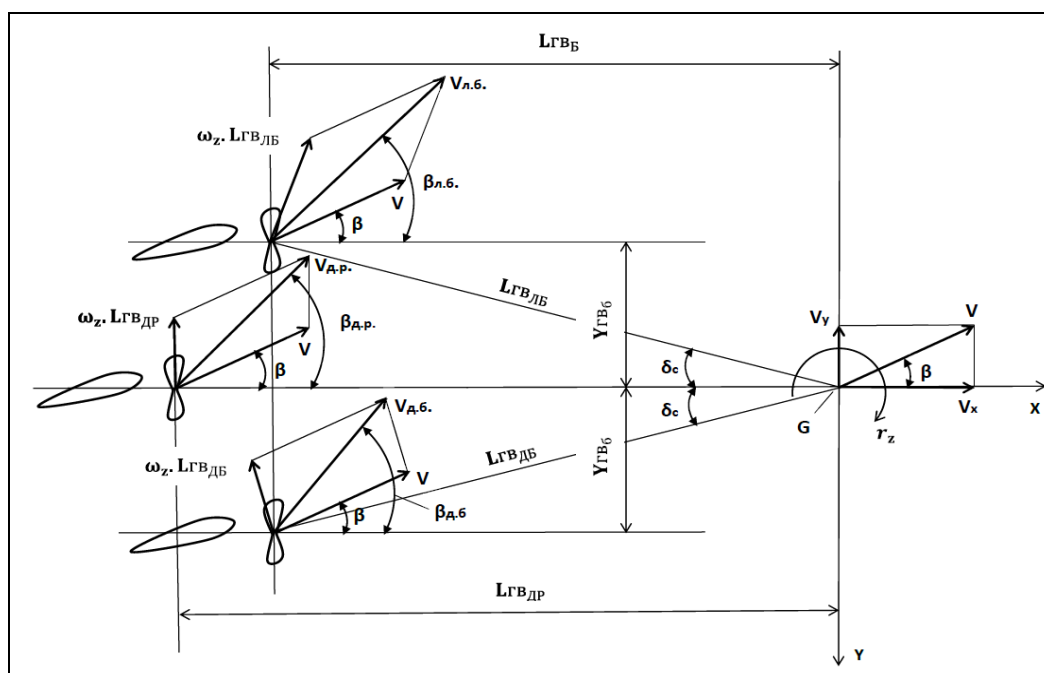
4. Чрез описаните формули може да се проследят стойностите на w при промяна на траекторията:

$$\Delta w = w' - w$$

където: w' – коефициент на попятния поток при маневриране; w – коефициент на попятния поток на прав курс

Оттук се вижда, че за определяне на асиметричните характеристики на двойка гребни винтове при криволинейна траектория е важна скоростта в съответната точка където е разположен гребния винт, а тя се влияе от ъгловата скорост $r = \frac{V}{R}$.

Постановката на задачата описва начина за определяне на вектора на скоростта за двата борда съответно за левия и десен – $V_{л.б.}$, $V_{д.б.}$ и зависимостите им от ъгловата скорост, скоростта на кораба в центъра на тежестта му и местните ъгли на дрейф се илюстрират с фиг. 2.4.



Фиг. 2.4 Геометрична постановка за определяне на вектора на скоростта за двата борда и зависимостта от ъгловата скорост, скоростта на кораба в центъра на тежестта му и местните ъгли на дрейф

С използване на геометричните зависимости и след алгебраични преобразования за определяне на местните ъгли на дрейф в района на левия и десен ГВ получваме:

$$\tan \beta_0 = \frac{\tan \beta + r_z \cdot \overline{L_{ГВл/дб}} / \cos \beta}{1 \pm r_z \cdot \overline{Y_0} / \cos \beta} \quad (2.12)$$

Изразът за скоростта в района на разположен странично (бордово) гребен винт се получава като:

$$V_{\delta} = V \sqrt{1 + \overline{r_z} \cdot \overline{L_{ГВл/д\delta}} \cdot (2 \sin(\beta + \delta_c) + \overline{r_z} \cdot \overline{L_{ГВл/д\delta}})} \quad (2.13)$$

Чрез гореописаните формули е възможно определянето на изменението на попътния поток w' и влиянието на местния ъгъл на дрейф върху натоварването по упор и момент за всеки от двойката гребни винтове при извършване на криволинейна маневра и приложен към описания по-рано регресионен модел.

На основата на горните изрази е построен алгоритъм и съответен програмен модул за отчитане в симулационния модел на спецификата на работа на гребните винтове на двувинтов кораб при маневриране, което е разгледано в Глава 8.

ГЛАВА 3. МОДЕЛ НА РУЛЯ ПРИ МАНЕВРИРАНЕ НА КОРАБА

Хидродинамични сили действащи на корабния рул

Корабният рул представлява главно средство за управление на кораба и основно се състои от перо и балер. Съществуват най-разнообразни конструкции на това техническо средство, за целите на настоящата разработка обаче е достатъчно да бъдат разгледани принципите на генериране на управляващата кораба сила.

Положението на перото спрямо обтичащия го поток се характеризира със следните величини:

- ъгъл на завъртане на перото, измерен спрямо ДР.

- ъгъл на атака на перото – ъгъл, заключен чезду равнината на симетрията му и равнината, преминаваща през балера и направлението на обтичащия поток. Двата ъгъла не са равни поради влиянието на корпуса и винта върху условията на работата на перото, както и поради различното местоположение на рулите спрямо ДР. Основен параметър влияещ на подезната сила на руля е относителното удължение на руля λ_R . При $\lambda_R \geq 1,5$, $C_{YL}(\alpha)$ е линейна в частта си до ъгъла на свив на потока – докато с увеличаване на удължението, при $\lambda_R < 1,5$ тя е нелинейна.

В общия случай хидродинамичните характеристики на корабния рул имат нелинеен характер. Съгласно хипотезата на Федяевски за крила с относително удължение $\lambda_R < 1$ подезната сила при ъгъл на атака има две компоненти – линейна в резултат от циркулационното обтичане на профилните сечения и нелинейна, породена от напречната компонента на скоростта и дефинирана с напречния коефициент на съпротивление C_D :

$$C_{YL} = C_{YL}^{\delta} \cdot \sin \delta + C_D \cdot \sin^2 \delta \cdot \cos \delta \quad (3.1)$$

Както беше споменато, в първо приближение с достатъчна точност може да се използва линейната форма на горната зависимост поради факта, че ефективният ъгъл на атака на перото вследствие влиянието на набор от фактори е значително по-малък от зададения посредством рулевата машина.

Изменение на хидродинамичните сили действащи на руля при маневриране

Когато кораба се движи напред потока преминаващ през винта се ускорява и завихря. Това ново състояние на потока води до промяна на неговата скорост и ъгъл на атака,

съответно оттук последва и промяна в силите и момента създавани от руля разположен зад движителя. Необходимостта от разглеждане на проблемът с взаимодействието на гребния винт с руля, налага да се обърне по-голямо внимание на някои зависимости влияещи върху работата на перото. За удобство те могат да се разделят на четири групи: потока обтичащ перото, геометрия на руля, геометрия на гребния винт и съотношения на размери и разположение на руля спрямо винта. Струята поток обтичаща перото на кораба или комплекса гребен винт-рул представлява попълната струя въздействана ѝ от корабния корпус, по този начин работата на руля зависи от два фактора свързани с него:

- Поради откъсване на граничния слой в зоната на кърмата и съответно влиянието на вискозното съпротивление, струята попадаща в зоната на комплекса перо-гребен винт е със скорост по-малка от тази в свободна вода или спрямо тази на кораба.
- Корпуса влияе на обтичането и местния ъгъл на атака на комплекса перо-гребен винт при криволинейна траектория, този ефект особено се проявява при кораби с пропульсивна уредба с два винта и два руля.

Тази функционална зависимост се представя от Федяевский и Соболев с помощта на поправки към безразмерния коефициент на подезната сила на руля във вид:

$$C_{YL} = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot C_{YL}^{\delta} (\delta - \beta_k) \quad (3.2)$$

Влияние на гребния винт

Предполагаме че рулят е монтиран на продължението на оста на съответната валолиния и част от него попада в струята на ГВ. Ако означим тази площ с A_R^I ; останалата част от перото с A_R^{II} ; номиналната скорост на потока зад корпуса с V и индуцираната от ГВ скорост с ΔV , то за подезната сила на руля в линейна постановка записваме:

$$Y_L = C_{YL} \frac{\rho}{2} (V + \Delta V)^2 \cdot A_R^I + C_{YL} \frac{\rho}{2} V^2 \cdot A_R^{II} \quad (3.3)$$

Формираме поправъчен коефициент r_1 на влияние на ГВ като отношение на подезната сила на руля зад гребния винт към аналогичната за изолирано перо. За определяне на отношението на индуцираната към номиналната скорост на потока $\frac{\Delta V}{V}$ използваме формулата от теорията на идеалния движител, като предполагаме че перото е разположено близо до диска на ГВ, т.е. $x/D_p \rightarrow 0$:

Така окончателно за поправката на влиянието на ГВ имаме:

$$r_1 = 1 + \frac{A_R^I}{A_R} \left[\left(\frac{\sqrt{1 + \sigma_p} + 1}{2} \right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

За σ_p трябва да се вземе в предвид и изменението му при движение на кораба по криволинейна траектория. По тази която причина е разработен и програмно реализиран описаният в Глава 2 регресионен модел.

Влияние на корпуса

Очевидно в района на рулите вследствие наличието на корпуса се изменя и попълната

поток което се отчита с поправката r_2 :

$$r_2 = (1 - w_R^{L,R})^2 \quad (3.5)$$

където: $w_R^{L,R}$ означава попътен поток в района рулите на левия и десния борд съответно. Те се определят по аналогична процедура както беше изложено за гребните винтове в Глава 2.

Влияние на кронщейн/рудерпост

Наличието на конструктивно оформен пред руля кронщейн или рудерпост оказват влияние върху характеристиките на средството за управление, което основно зависи от относителното удължение на системата „кронщейн-рул“ λ_{R+Kron} и от безразмерната средна хорда \bar{b}_R на перото. Отчита се с поправката r_3 като отношение на производните на подемната сила за конфигурация с кронщейн и без такъв:

$$r_3 = \frac{C_{YL+Kron}^\delta}{C_{YL}^\delta} = f(\lambda_{R+Kron}, \bar{b}_R) \quad (3.6)$$

Влияние на местния ъгъл на дрейф

В резултат от различното спрямо диаметралната равнина геометрично положение на рулите при двувинтовите кораби се изменят и стойностите на локалния дрейф β_k , който в общ вид е представен с израза:

$$\beta_k = \kappa_\beta \cdot \beta + \kappa_\omega \cdot x_R \cdot \omega \quad (3.7)$$

където: $\kappa_\beta, \kappa_\omega$ - коефициенти на влияние на попътния поток в района на рулите

β, ω - ъгъл на дрейф и ъглова скорост.

Местният ъгъл на дрейф е различен за двата руля и се определя по аналогичен начин както за гребните винтове. При извършване на криволинейни маневри разположението на всеки от двата руля оказва влияние върху генерираната полезна подемна сила. Следва да се вземе предвид кой е „външен“ и кой „вътрешен“, както и влияещите им фактори като размера на кронщейна/рудерпоста, взаимодействието с корпуса и гребния винт. В изчислителния модул на руля локалните стойности на ъгъла на дрейф и на попътния поток са отчетени с използване на формули (2.12)-(2.13).

ГЛАВА 4.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ГЛАВНИЯ ДВИГАТЕЛ ПРИ МАНЕВРИРАНЕ НА КОРАБА

Общи характеристики на главния двигател

В управляемостта на кораба обикновено се приема, че при извършване на стандартните маневри оборотите на ГД не се изменят значително. В настоящия труд е направен опит за отчитане на реалната динамиката на силовата уредба в режимите на маневриране. Принципната схема на движителния комплекс е показана на фиг. 4.1.

по-тежки от разчетните, т.е. съпротивлението се е увеличило, то съответната винтова характеристика 2 ще лежи над разчетната и ще пресича заградителната характеристика в т.В, за която $p < p_H$ и $P_s < P_{SH}$. В този случай винтът е хидродинамически “тежък”. При работа в т.С той е хидродинамически “лек” – получава се при пресичане на облекчената винтова характеристика 3 с регулаторната. За тази точка $P_s < P_{SH}$, а оборотите малко ще се увеличат, което се определя от голямата стръмност на регулаторната характеристика. Т.е. когато винтът е “тежък”, двигателят не може да развие номиналните си обороти, а при двата случая на несъответствие не може да се изразходва номиналната мощност на двигателя, което е свързано във всички случаи със загуба на скорост.

Диференциални уравнения на динамиката на системата ГД-ГВ

Ускорението и намаляването на скоростта са често ползвани маневри в практиката. Втората е една от важните маневри, особено при аварийни ситуации. Тези две маневри имат особено значение в проектирането на кораба като оценка за експлоатационните му качества и анализ при аварийни ситуации.

Частните случаи на маневриране, като ускорение или намаляване на скоростта, когато движението на кораба е на прав курс могат да се опишат чрез системата диференциални уравнения:

$$(m + \lambda_{11}) \left(\frac{dv}{dt} \right) = -R(v) - \sum_{i=1}^k R_{Ti}(v) + \sum_{i=1}^z T_{Ei}(v, n_i) \quad (4.1)$$

$$2\pi(I_i + \lambda_{Bi})(dn_i / dt) = M_{ДВи} - Q_i(v, n) - M_{ТР} \quad (4.2)$$

където:

- $R(v)$ - съпротивление на корпуса;
- $R_{Ti}(v)$ - съпротивление от ДРК;
- J_i - сумарен инерционен момент на ГВ;
- λ_{Bi} - присъединен инерционен момент на ГВ;
- $M_{ДВи}$ - момент на ГД;
- $M_{ТР}$ - момент на триене;
- Q_i - хидродинамичен момент на ГВ

Чрез решаването на системата уравнения (4.1) – (4.2) получаваме като резултат търсените параметри на движението на кораба $\bar{v}, \bar{\omega}, \beta$. Те могат да бъдат ползвани за построяване на траекторията на движение на кораба и положението му в координатната система. Задачата за моделиране на работата на ГВ, респективно първото уравнение, бяха предмет на разглеждане и анализ в предходните глави. Главен обект на анализ в настоящата глава е уравнение (4.2) на баланса на момента на ГД и на ГВ, което отразява взаимовръзката между тях.

Следва да се отбележи, че в изчисленията в настоящата глава се използват хидродинамичните коефициенти получени при РММ-изпитания в ЦХА на модел на двувинтовият кораб m/s “Red Hook”, както и публикувани и обработени от автора емпирични зависимости за характеристиките на главния двигател.

Динамика при ускоряване

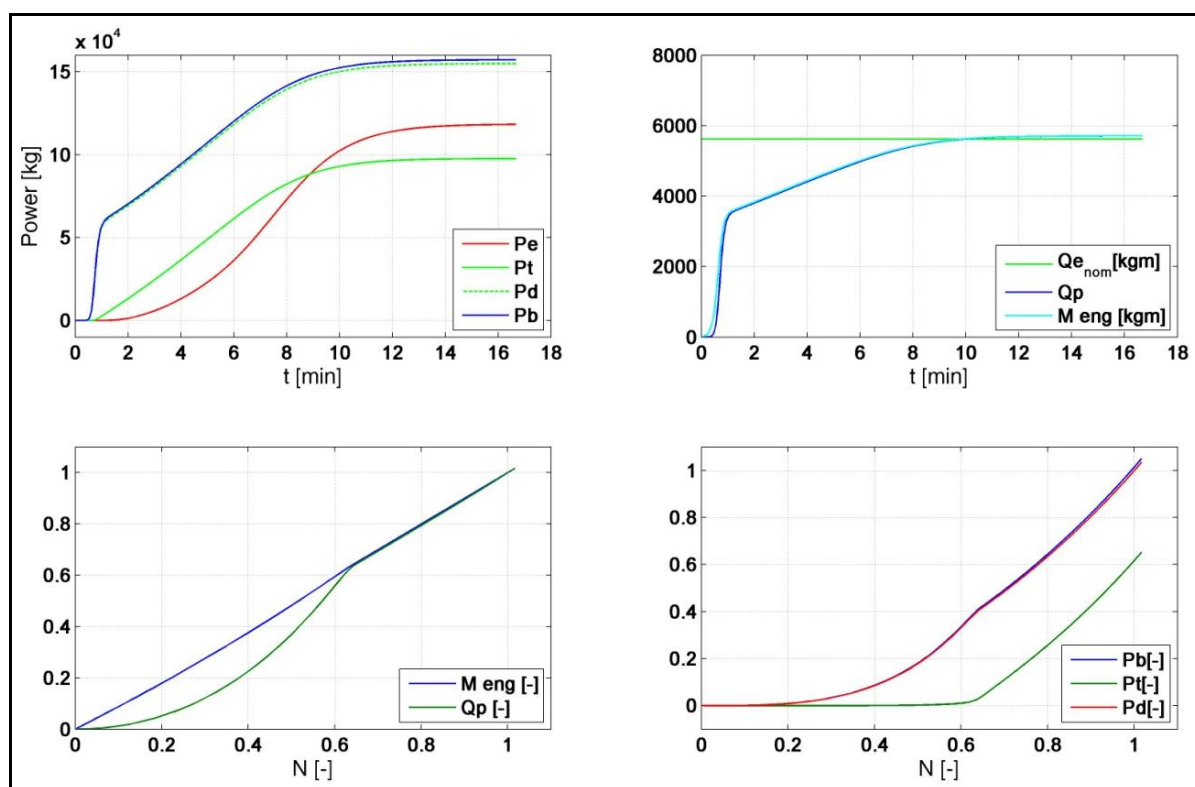
Ускоряването на кораба започва от момента на подаване на неподвижния кораб команда за пуск на ГД до достигане на номиналните му обороти. В общия случай този период се изпълнява от корабоводителя на няколко етапа с постепенно увеличение на оборотите. Процесът на аварийно ускорение на кораба може да бъде разделен условно на няколко етапа, удобни за изследване на динамиката на системата:

I – от подаване на командата до ГД до достигане на вала на ГВ номинални обороти.

II – от достигане на ГД номиналния момент до достигане на ГВ пълните обороти при швартови режим.

III – от развиване на ГВ на пълните обороти при швартови режим до достигане на кораба номинална скорост v_0

На основата на модела (4.1)-(4.2) и резултатите от предходните раздели е разработен и програмиран на Матлаб модел за изчисляване на неустановените процеси на ускоряване и спиране на кораба. Предполага движение по праволинейна траектория, т.е. използва се уравнението на надлъжната сила в съчетание с уравнението на момента на ГД. На фиг.4.3 е приведен примерен резултат от моделирането на ускорението на кораба и получените времеви характеристики на кинематичните параметри на маневрата.



Фиг. 4.3 Характеристики на ГВ и ГД при ускоряване:

От графиките е видно че през началния етап, че ГД е запуснат и развива обороти и момент, но все още не е предадена достатъчна мощност до ГВ и той не е развъртан, а корабът е неподвижен. Този етап е много кратък, след който ГВ започва да се развърта, но не е достигнал нужните обороти поради което скоростта е нулева, т.е. ГД работи в швартови режим – Iкв, Пкв. Третия етап е най-продължителен, той представлява основната част от времето за ускорение на кораба. Именно в тази част започва и завършва установяване на скоростта от кораба и моментите на ГД и ГВ.

Динамика при инерционно спиране

Инерционно спиране се нарича маневрата за прекратяване движението на кораба при спиране на главния двигател. При движение на преден ход със скорост v_0 се спира подаването на гориво към ГД. Уравненията за движение на кораба при този процес се представят във вида (4.1) и (4.2). Точността на решението на тази система се подобрява, ако разполагаме и ползваме кривите на съпротивлението $R(v)$ и кривите на действие K_T, K_Q за

ГВ. Процесът на свободно намаляване на скоростта на кораба може да бъде разделен условно на няколко етапа удобни за изследване на динамиката на системата:

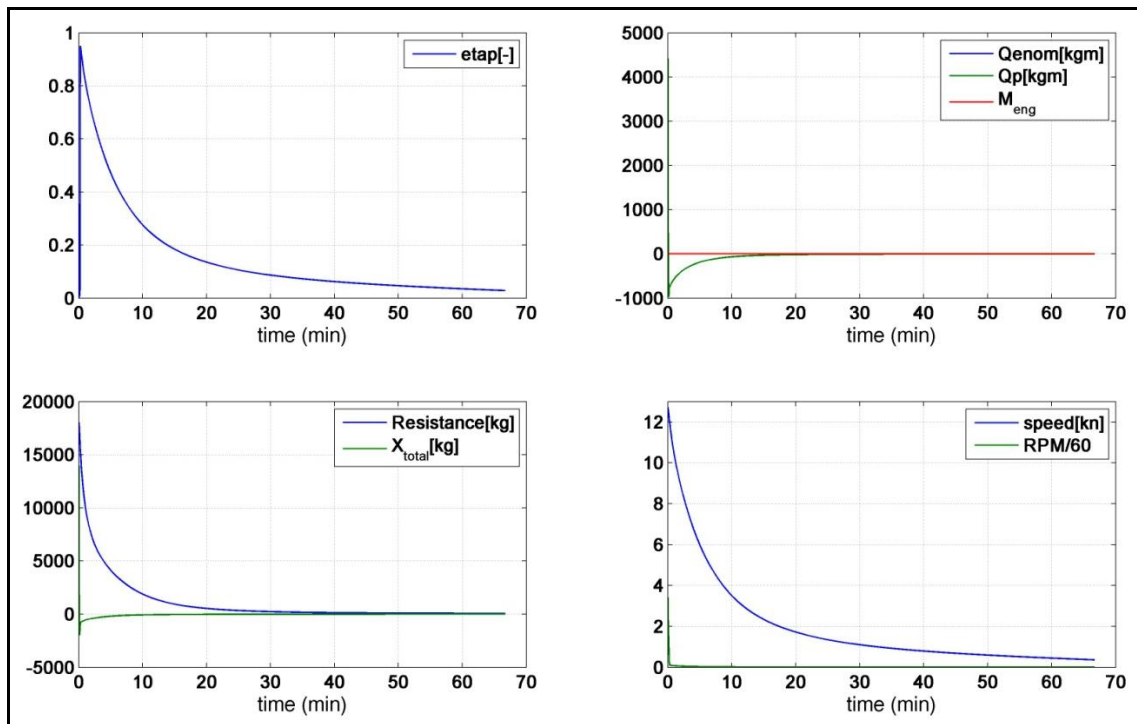
I – от подаване на команда за спиране на ГД, до спиране на подаване на гориво;

II – от прекратяване подаването на гориво, до преход на ГВ към турбинен режим;

III – от започване на работа на ГВ в турбинен режим спирането му;

IV – от спирането на ГВ до спиране на кораба.

На фиг.4.4 е илюстрирано изменението на кинематиката на движение при инерционно спиране на кораба.



Фиг. 4.4 Характеристики на инерционното спиране:

Iкв. - относително напредване (etap);

IIкв. - номинален момент на двигателя (Q_{enom}), момент на ГВ (Q_p), момент на ГД (M_{eng});

IIIкв. - надлъжна сила (X_{total}) и съпротивление (Resistance);

IVкв. – скорост (speed) и обороти (RPS);

Постигнато е моделиране на етапите от спиране на подаване на гориво на ГД до преминаването на ГВ в работа на турбинен режим. В началото стръмността на графиките е голяма и се основава на характеристиките на ГВ K_T, K_Q за диапазона им от номинален режим (първоначалния етап) до достигане на нулев момент на винта. От края на този период поради това че ГД не развива въртящ момент, ГВ се върти свободно в турбинен режим (IIкв.). Оборотите на ГВ намаляват линейно до окончателното им спиране (IVкв.). Оттук започва последния етап от инерционното спиране, ГД и ГВ са спрели работа и скоростта на кораба пада според закономерността от кривата на съпротивлението на корпуса (IVкв.).

Динамика при спиране чрез реверс на гребния винт

Реверс на кораба се нарича маневра от режим на установено движение до достигане на определена скорост (или обикновено нулева) в направление обратно на първоначалното под действието на приложени отрицателен упор и момент от ГВ. Главни характеристики на маневрата са минималния път и време за напълно спиране. Системата уравнения описващи движението на кораба и взаимодействието на системата ГД – ГВ има вида като тази при процес на ускоряване. Точността на решението на тази система се подобрява, ако разполагаме и ползваме кривите на съпротивлението $R(v)$ и кривите за K_T, K_Q за ГВ в 4-те квадранта на изменението им. За анализ на параметрите на движение на кораба при реверсиране на ГВ е удобно процесът да се раздели на следните етапи:

I – от подаване на команда за спиране на ГД, до спиране на подаване на гориво;

II – от прекратяване подаването на гориво, до преход на ГВ към турбинен режим;

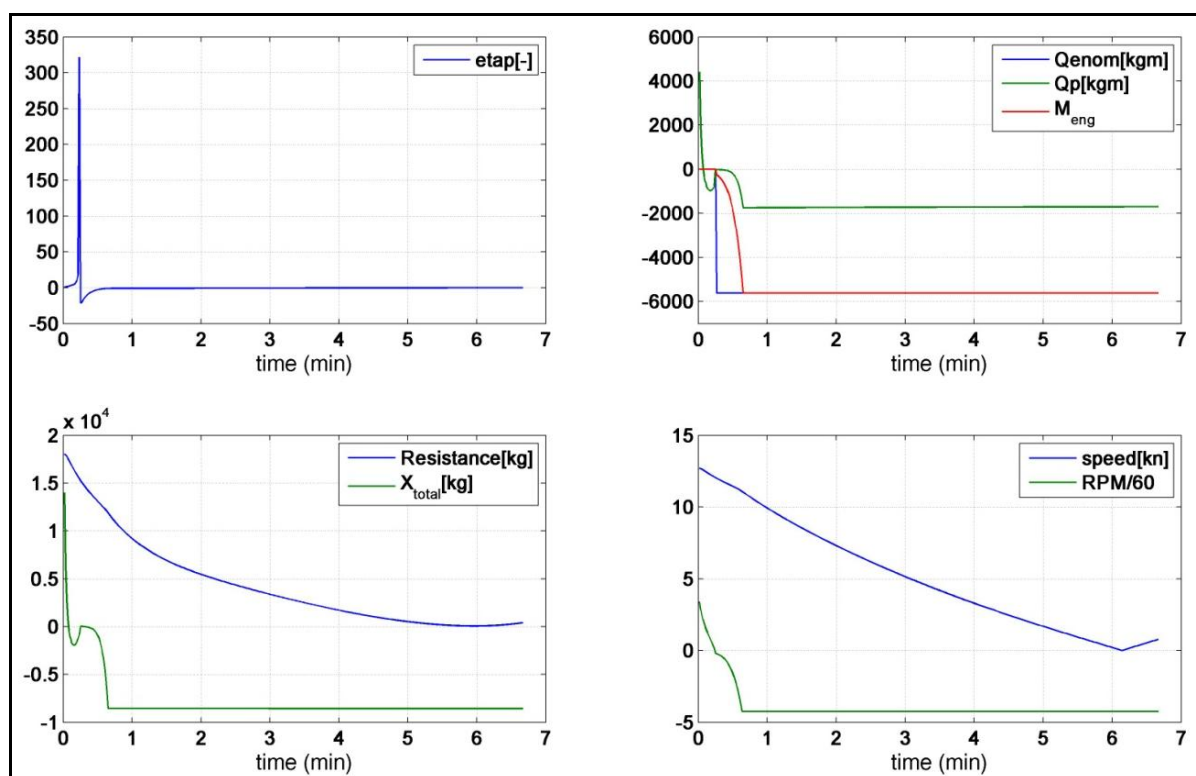
III – от започването на турбинния режим на ГВ до момента на пускане на ГД на заден ход;

IV – от пускане на ГД на заден ход до достигане и установяване на съответните обороти на ГВ;

V – от достигане и установяване на съответните обороти на ГВ до установяване в покой на кораба;

На фиг. 4.5 е илюстрирано изменението на кинематиката на движение при спиране на кораба чрез реверс на гребния винт при следните начални условия:

$U_0 = 6.538;$	% [m/s] – начална скорост
$nn_0 = 4.242;$	% [RPS] – начални обороти
$nn = -4.242;$	% [RPS] – зададени обороти
$\delta_{main_order} = 0;$	% [deg] – зададен ъгъл на руля
$Qe_nom = 0.01;$	% [kgm] – номинален момент на ГД



Фиг. 4.5 Характеристики на спирането с реверс на ГВ:

Iкв. - относително напредване (etap);

IIкв. - номинален момент на двигателя (Q_{enom}), момент на ГВ (Q_p), момент на ГД (M_{eng});

IIIкв. - надлъжна сила (X_{total}) и съпротивление (Resistance);

IVкв. – скорост (speed) и обороти (RPS);

Началните етапи при реверс са спиране на ГД чрез спиране подаването му на гориво, падане на оборотите на ГВ в зависимост от характеристиките му K_T, K_Q за диапазона им от номинален режим (първоначалния етап) до достигане на нулев момент на винта. След него ГВ се върти свободно в турбинен режим до установяването му в покой (IIкв., IIIкв.). За следващия етап е характерно ГВ да работи в турбинен режим при слабо намаляване на оборотите и скоростта, на тази база може да се приеме в системата уравнения $\frac{dn}{dt} \approx 0$ и съответно ГД да започне подава въртящ момент, за да бъде реверсиран ГВ (IIкв.). Следва пуск на ГД на заден ход, достигане и установяване на съответните обороти на ГВ. Финалният режим на работа на ГВ е близък до швартови, докато по нататък момента и упора се установят, съответно коефициентите K_T, K_Q са със значения постоянни и близки до швартовите (IIIкв.).

В тази глава е разработен алгоритъм за моделиране на динамиката на взаимодействието на системата ГД – ГВ при извършване на маневри при четирите квадранта на изменение на параметрите на относителното напредване J на ГВ. Чрез алгоритъма може да се анализират не само достигането на нужните обороти за извършването на зададената маневра, но и натоварването на системата ГД – ГВ по момент и постигната ефективна мощност при съответните обороти.

ГЛАВА 5

МОДЕЛ НА КОРПУСА ПРИ МАНЕВРИРАНЕ НА КОРАБА

Параметрите на движението на корпуса се определят от баланса на действащите на него сили, които условно могат да бъдат разделени на две основни категории:

- Инерционни сили, обусловени от инерцията на масата на корпуса и присъединените маси вода
- Неинерционни сили, свързани с хидродинамичното взаимодействие на корпуса с водна среда и външните сили на околната среда.

Инерционни сили

В хидродинамиката е прието, че уравнението за движение на твърдо тяло в идеален безграничен флуид може да се разглежда като уравнение за движение на тяло във вакуум, ако към векторите за движенията и моментите на тялото се прибави и тези за флуида. Тогава кинетическата енергия на тази система ще съдържа в себе си, кинетичната енергия на твърдото тяло (корпуса) T_1 и кинетичната енергия на флуида (течността) T . Инерционните сили и момент в хоризонталната равнина зависят от инерционните характеристики на кораба и от присъединените маси и инерции. В координатната система свързана с кораба същите имат вид:

$$X_{in} = (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} - (m + \lambda_{22}) v_y \omega - \lambda_{26} \omega^2 \quad (5.1)$$

$$Y_{in} = (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + (m + \lambda_{11}) v_x \omega + \lambda_{26} \frac{d\omega}{dt} \quad (5.2)$$

$$N_{in} = (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) v_x v_y + \lambda_{26} v_x \omega + \lambda_{26} \frac{dv_y}{dt} \quad (5.3)$$

В частния случай движението на кораба се разглежда като постъпателно движение с постоянна скорост и установена ъглова скорост и ъгъл на дрейф. Силите и момента X_{in} , Y_{in} , M_{in} представляват проекции на реакциите, свързани с поддържането на курса от кораба при даден ъгъл на дрейф. Съответно хидродинамичните сили, действащи на корпуса са равни на реакциите, но с противоположно направление.

Хидродинамични сили

В първо приближение корабният корпус може да се разгледа като вертикално крило с малко удължение, което пресича свободната водна повърхност и се движи с ъгъл на дрейф и ъглова скорост. Понеже и корпуса, и руля на кораба са симетрични спрямо диаметралната си равнина, в теорията за управляемостта се разглеждат основно крила със симетрични профили. При обтичането им от поток под ъгъл спрямо равнината на симетрията им, възниква значителна подемна сила. Нейната компонента е перпендикулярна на вектора на скоростта на обтичане. За маневреността на кораба интерес представлява случая на въздействието на течността върху крило с пределно малко удължение движещо се по кръгова траектория. Характерното за този случай е изменението на местния ъгъл на атака по дължината на хордата на крилото. За анализа на връзката между кинематичните параметри и хидродинамичното натоварване в идеална течност разглеждаме движението по криволинейна траектория на дублиран спрямо свободната водна повърхност корпус. Формулираме задачата за определяне на разпределеното по дължината на корпуса хидродинамично натоварване като прилагаме подхода на Соболев, основан на използването на метода на плоските сечения. Въвеждаме величината разпределено хидродинамично натоварване по дължина на корпуса и заместваме за местния ъгъл на дрейф с в резултат от което се получава линеен спрямо дрейфа и ъгловата скорост израз, тоест величината може да се представи с помощта на производни по тези кинематичните параметри на криволинейното движение:

$$\gamma(x) = \gamma^\beta(x) \cdot \beta + \gamma^\omega(x) \cdot \omega \quad (5.4)$$

Интегрирането на разпределеното натоварване по дължина на корпуса позволява получаването на линейните съставляващи на напречната сила и момент спрямо оста z . В дисертацията горните производни се определят експериментално и в симулационния модел линейните компоненти в безразмерен вид се представят като:

$$Y = Y_\beta \beta + Y_\omega \omega \quad (5.5)$$

$$N = N_\beta \beta + N_\omega \omega \quad (5.6)$$

където: Y_β, N_β - позиционна производна (по ъгъла на дрейф);
 Y_ω, N_ω - ротационни производни (по ъгловата скорост);

Както за корабния рул, структурата на нелинейната част на корпусните хидродинамични сили и момент се определя в предположение, че при съответно големи ъгли на дрейф корпусът в кърмовата част се обтича чисто напречно с откъсване, т.е. нелинейните

компоненти са функция на местния коефициент на съпротивление C_D . Използвайки зависимостта за координатата на полюса на въртене $x_0 = \frac{\beta}{\omega}$, то за безразмерните нелинейни компоненти на напречната сила и нейния момент в структурна форма записваме:

$$Y'_{нел} = Y'_{\beta|\beta} \beta|\beta| + Y'_{\beta\omega} \beta\omega + Y'_{\omega|\omega} \omega|\omega| \quad (5.7)$$

$$N'_{нел} = N_{\beta|\beta} \beta|\beta| + N_{\beta\omega} \beta\omega + N_{\omega|\omega} \omega|\omega| \quad (5.8)$$

Както се вижда, нелинейните членове –изрази (5.7) –(5.8) - са не само спрямо отделните параметри на движение, а също така и зависят от тяхното взаимовлияние. Тези хидродинамичните производни могат да бъдат определени с висока точност с помощта на хидродинамичен експеримент в опитен басейн.

ГЛАВА 6 МОДЕЛ НА СИСТЕМАТА „ГД – КОРПУС – ГВ - РУЛ“

Диференциални уравнения на маневреното движение на кораба

С използване на резултатите от предходните глави е съставена цялостаната система от диференциални уравнения на маневреното движение на кораба. Тъй като влиящите външни условия от околната среда като скорост на вятър, скорост на течението и др. не са предмет на разглеждане в настоящата дисертация, то системата уравнения може да се опрости до вида, в който е включено и уравнението на динамиката на главния двигател:

$$m(\dot{u} - v.r - x_G.r^2) = X_{hull} + X_{rud} + X_{prop}$$

$$m(\dot{v} + u.r + 2.u.r + x_G.r) = Y_{hull} + Y_{rud} + Y_{prop} \quad (6.1)$$

$$I_z \dot{r} + m.x_G(v - u.r) = N_{hull} + N_{rud} + N_{prop}$$

$$2\pi(I_i + \lambda_{Bi})(dn_i / dt) = M_{двi} - Q_i(u, n) - M_{тр}$$

като в лявата част на системата (6.1) са инерционните сили, а в дясната - хидродинамичните. Последните се описват като хидродинамични производни, съответстващи на членове от реда на Тейлър, съобразени с търсената степен на точност. При определянето на порядъка на хидродинамичните производни, в частност на комбинираните такива, отразващи взаимовлиянието между дрейфа и ъгловата скорост при криволинейно движение на кораба, е използван натрупания в тази област опит на ЦХА. В настоящия дисертационен труд предвид разглеждането на маневри в 4-те квадранта се приема квадратична нелинейна форма на представяне на хидродинамичните сили и момент в хоризонталната равнина. В резултат се получава удобна за числена реализация система от обикновени диференциални уравнения (6.2)-(6.5), в която на основание получените в Глава 2 и Глава 4 резултати уравнението на надлъжната сила е модифицирано за двувинтов кораб с два ГВ и два руля и е добавено уравнението на главния двигател:

Надлъжна сила

$$\begin{array}{c}
 \boxed{X_{hull}} \\
 \hline
 m(\dot{u} - vr - x_G \dot{r}^2) = \overbrace{X_{vv} v^2 + X_{rv} vr + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta v} \delta^2 v^2}^{X_{hull}} - R(u) \\
 \\
 \boxed{X_{rud}} \\
 \hline
 + \left(\frac{X_{dd}}{2} \delta_s^2 + \frac{X_{dd}}{2} \delta_p^2 \right) + \left(\frac{X_{dd\eta}}{2} \delta_s^2 \eta_s + \frac{X_{dd\eta}}{2} \delta_p^2 \eta_p \right) + \left(\frac{X_{dd\eta\eta}}{2} \delta_s^2 \eta_s^2 + \frac{X_{dd\eta\eta}}{2} \delta_p^2 \eta_p^2 \right) \\
 \\
 \boxed{X_{prop}} \\
 \hline
 - \sum_{i=1}^k R_{Ti}(u) + \sum_{i=1}^z T_{Ei}(u, n_i)
 \end{array} \tag{6.2}$$

Напречна сила

$$\begin{array}{c}
 \boxed{Y_{hull}} \\
 \hline
 m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = [Y_r \dot{r} + Y_{r|r} r|r] + (Y_v \dot{v}) + [Y_r ur + Y_{v|r} v|r] \\
 \\
 \boxed{Y_{rud}} \\
 \hline
 + (Y_d \delta) \\
 \\
 \boxed{Y_{prop}} \\
 \hline
 + (Y_s) + [Y_{v|\eta} v|\eta] \left(\frac{\eta_s + \eta_p}{2} \right) + Y_{v\eta} uv \left(\frac{\eta_s + \eta_p}{2} \right) + [Y_{* \eta} u^2 + Y_{d\eta} u^2] \left(\frac{\eta_s + \eta_p}{2} \right)
 \end{array} \tag{6.3}$$

Момент на рискане

$$\begin{array}{c}
 \boxed{N_{hull}} \\
 \hline
 I_z \dot{r} + mx_G (\dot{v} + ur) = \overbrace{N_r \dot{r} + N_{r|r} r|r + N_v \dot{v} + N_r ur + N_{v|r} v|r + N_v uv + N_{v|\eta} v|\eta}^{N_{hull}} \\
 \\
 \boxed{N_{rud}} \\
 \hline
 + N_d \delta
 \end{array}$$

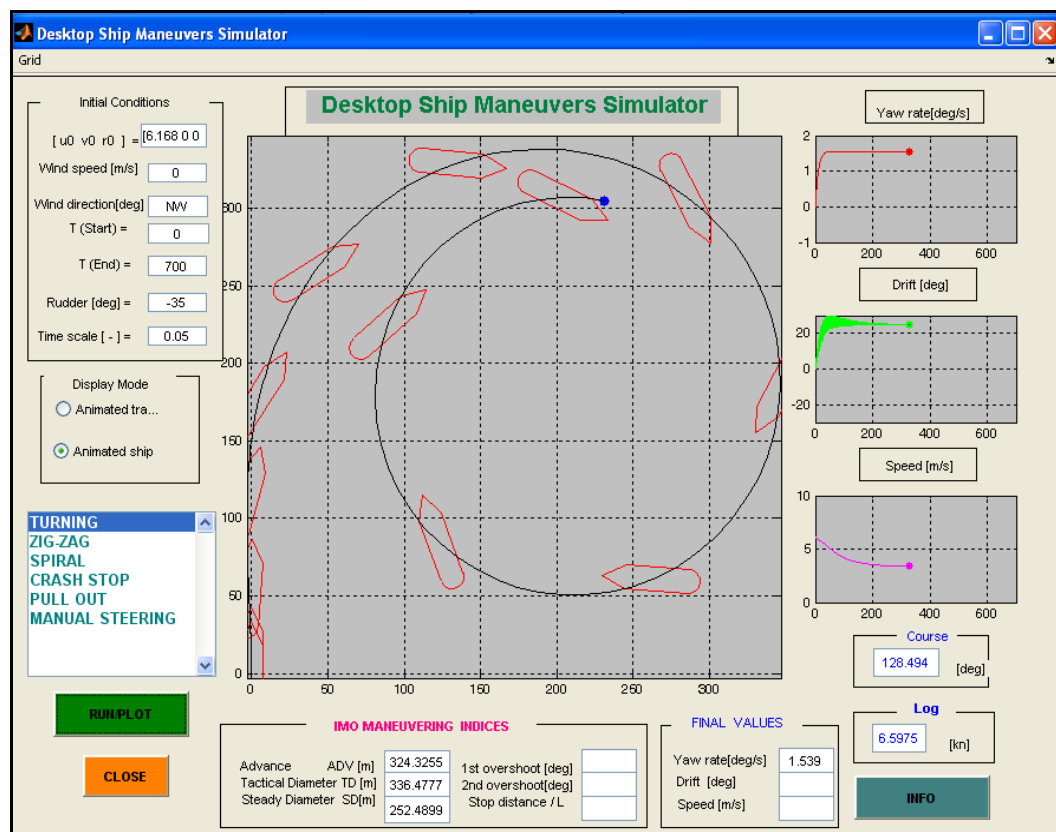
$$\begin{aligned}
 & \overbrace{N_{prop}} \\
 & + N_* + N_{v\eta} u v \left(\frac{\eta_s + \eta_p}{2} \right) + N_{v|v|\eta} |v| v \left(\frac{\eta_s + \eta_p}{2} \right) + N_{dr\eta} u^2 \left(\frac{\eta_s + \eta_p}{2} \right) + N_{*\eta} u^2
 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Момент на вала на главния двигател

$$2\pi(I_i + \lambda_{Bi})(dn_i / dt) = M_{двi} - Q_i(u, n) - M_{TP} \quad (6.5)$$

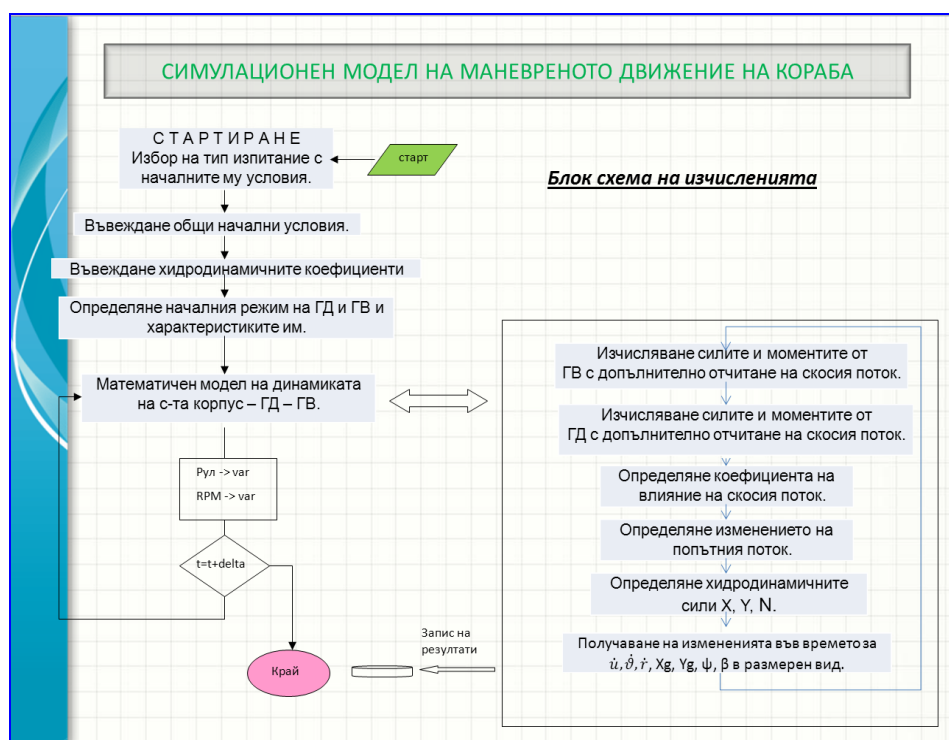
Програмна реализация в среда на MATLAB и чрез инструмента Симулинк

На основата на математическия модел, съставен от уравнения (6.2)- (6.4), както на зависимостите за изменението на характеристиките на ГВ в кос поток, на ГД (6.5) и на двойката рули, с използване на базовото софтуерно осигуряване на настолния маневрен симулатор на ЦХА DSMS, симулационната програма е модифицирана за целите на настоящето изследване. Системата от диференциални уравнения (6.2)-(6.5) се решава спрямо ускоренията в хоризонталната равнина и ускорението на вала на ГВ. Моментните стойности на курса, координатите на траекторията на ЦТ, радиуса на кривината и оборотите на ГД се изчисляват с формули за числено интегриране. Точността на симулирането на траекторията при маневриране може да се контролира със стойността на времевия интервал Δt , през който се правят изчисленията. В случай на изчисления за натурния кораб по правило стъпката се приема $\Delta t=1s$. Базовото меню на настолния симулатор DSMS е представено на фиг.6.1. Допълнителни функции позволяват извеждането на цифрова и графична информация за отделни маневри и резултати за частни случаи на числено изследване.



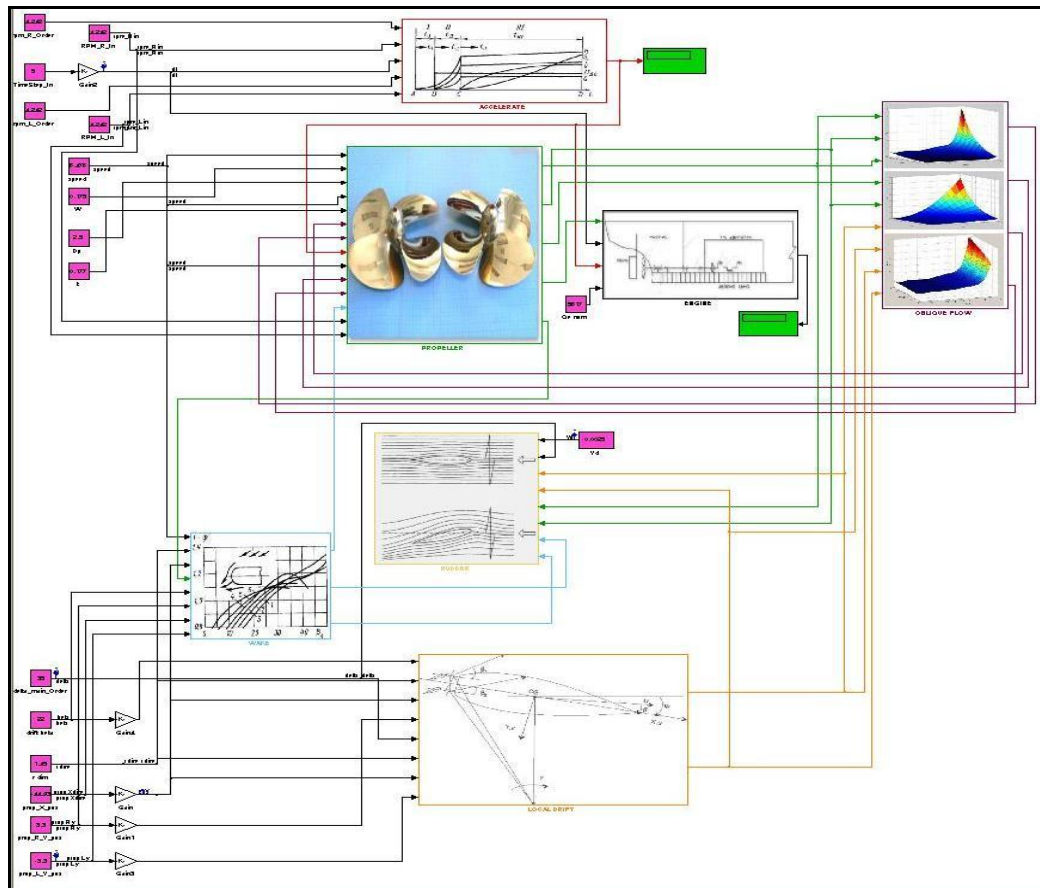
Фиг. 6.1 Графичен интерфейс на DSMS за управление на маневрите на кораба

Блок схема на изчисленията и последователност на етапите през които се преминава, както и схема на симулационния модел на маневреното движение на кораба е представена на фиг.6.2.



Фиг. 6.2 Блок схема на симулационния модел на маневреното движение на кораба

С цел онагледяване на изчислителния процес и което е по-важно – за генериране на изпълним модул от типа dll-библиотека за среда на Windows за нуждите на маневрени симулатор на ЦХА то симулационният модел е реализиран с помощта на инструмента за структурно програмиране на сложни системи Симулинк от пакета Матлаб на фирмата MathWorks – фиг. 6.3. Той предоставя готовите резултати в удобен формат за ползване, тяхното бързо изчисляване и представянето им в желанния графичен вид чрез инструмент за създаване на потребителски интерфейс (GUI). Това е пакет за моделиране, симулиране и анализ на динамични системи, като например в областта на електротехниката, механиката и термодинамиката. Той съдържа библиотека от различни елементи (блокове) всеки от които извършва различни функции и могат да бъдат приспособени за специфичните нужди на потребителя.



Фиг. 6.3 Симулационния модел на маневреното движение на кораба в среда на Simulink

ГЛАВА 7.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ХИДРОДИНАМИЧНИТЕ КОЕФИЦИЕНТИ В МОДЕЛА

За извършване на симулационно изследване на маневрите на кораба, респективно на системата „ГД-К-ГВ-Р“ са необходими подходящи входни данни. Такива могат да бъдат геометрични, кинематични, хидродинамични и др. според целите на изследването. Също така при разглеждане на влиянията между отделните елементи на системата са нужни данни за тях като най-важно в тази насока е взаимодействието на отделните части в системата. Получаването на входните данни е реализирано чрез провеждане на хидродинамични изпитания в ЦХА по метода на принудените хармонични колебания с помощта на експериментална уредба РММ както и на автономни маневрени изпитания. Измервателната система при РММ изпитанията е разпределена в трите блока на основната схема на изпитанието – експериментална уредба РММ, модел и буксировъчна количка. Наред с принудените колебания методът включва и стационарна буксировка на корабния модел. По тази причина се различават две големи групи изпитания – стационарни и динамични.

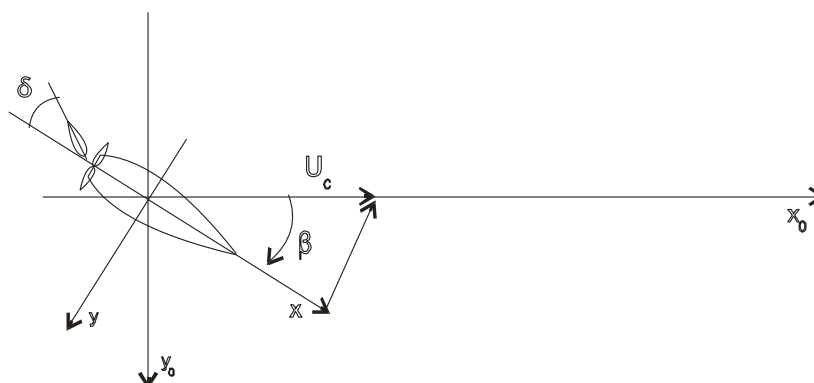
При стационарните изпитания моделът се буксира с постоянна скорост като се варират параметрите на маневреното движение и на управление на обекта, както и условията на външната среда. С помощта на динамометричните датчици се измерват силите и моментите действащи на корпуса и се регистрират стойностите на дадения параметър на стационарните изпитания.

При динамичните изпитания на модела се задават принудени хармонични колебания с определени амплитуда и честота и се измерва реакцията на обекта в хоризонталната

равнина на несмутената свободна повърхност. В резултат от комбинирането на надлъжната скорост на буксировъчната количка и напречното и ъглови движения на каретката на РММ - при определено съчетание на стойностите на трите насложени движения – се възпроизвеждат различни видове частни случаи на движение. Това позволява разделяне на променливите в уравненията на маневрите на кораба/модела и тяхното идентифициране, което е предмет на по-нататъшното изложение.

Стационарни изпитания

При всички стационарни моделни изпитания напълно оборудваният корабен модел се буксира по продължение на централната ос на басейна с вариране на параметрите на съответното изпитание.



Фиг.7.1 Обща схема на буксировката при стационарни изпитания

• Буксировка на прав курс

Моделът се буксира за набор от стойности на обобщения коефициент на относителното напредване на гребния винт η .

Параметри на изпитанието:

Достигането на желаната стойност на η може да стане по два равностойни начина:

$$a/ U = U_c; \quad n \rightarrow \text{var} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{nU_c}{Un_c} = \frac{J_c}{J}$$

$$б/ U \rightarrow \text{var}; \quad n = n_c \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{nU_c}{Un_c} = \frac{J_c}{J}$$

Изборът зависи от диапазона на изменение на варираните параметри и от технологичните възможности на експеримента. В повечето случаи се варират оборотите на гребния винт.

• Буксировка с ъгъл на дрейф

Моделът се буксира с постоянна зададена скорост и обороти на ГВ при зададени фиксирани ъгли на дрейф при условия за 3 диапазона на изменение на η .

Параметри на изпитанието:

$\eta \rightarrow \text{var}$; диапазон на изменение $< 0.8; 1.0; 1.2 >$

$\beta \rightarrow \text{var}; \sin \beta = -\frac{v}{U_c}$; диапазон на изменение $< -4^\circ \div 18^\circ >$ със стъпка 2°

- **Буксировка с ъгъл на руля**

Това изпитание е свързано с определянето на силите, действащи върху системата „К-ГВ-Р“ при отклонено перо на руля за различно натоварване на двигателя.

Параметри на изпитанието:

$\eta \rightarrow \text{var}$; диапазон на изменение $\langle 0.8; 1.0; 1.2; 1.8 \rangle$

$\delta \rightarrow \text{var}$;

- **Комбинирана буксировка с ъгъл на дрейф и отклонен рул**

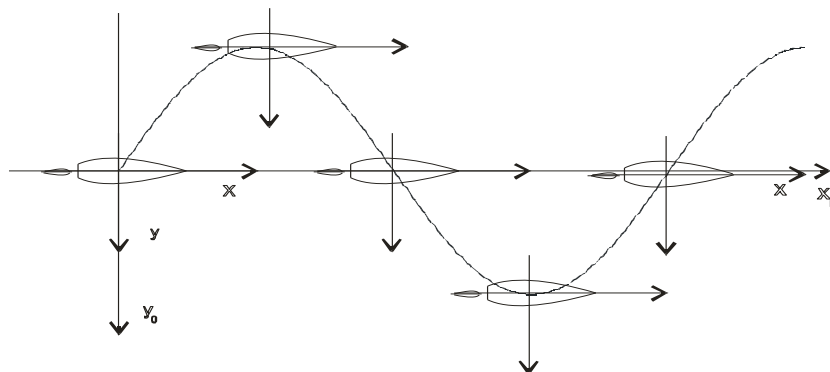
Влиянието на дрейфа върху силите на руля се определя чрез буксировка на модела при следните условия:

$\beta \rightarrow \text{var}; \sin \beta = -\frac{v}{U_c}; \delta \rightarrow \text{var}$

Динамични изпитания

- **Чисто напречно-хоризонтално колебание**

За определяне на присъединените маси и инерции по координатната ос "y" моделът се буксира с постоянна скорост като на модела се задават хармонични колебания – фиг. 7.2.



Фиг. 7.2 Траектория на движение и позиция на модела при напречно-хоризонталните колебания

Параметри на изпитанието

Кинематиката на движение при чисто напречните хармонични колебания се описва със зависимостите:

$$U_c = U_0; \psi = 0; \beta = 0;$$

$$y = y_m \sin \omega t \tag{7.1}$$

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega y_m \cos \omega t \tag{7.2}$$

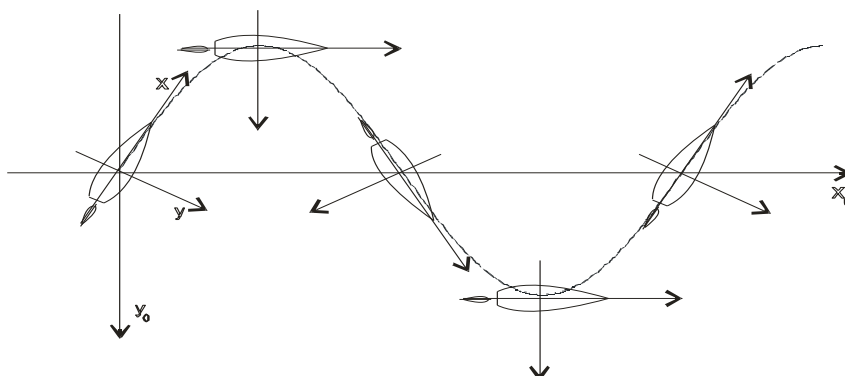
$$\dot{v} = \ddot{y} = -\omega^2 y_m \sin \omega t \tag{7.3}$$

- **Чисто ъглово-хоризонтално колебание**

Моделът се буксира с постоянна зададена скорост като се задават напречни и ъглови хармонични колебания (фиг.7.3), като съчетанието на надлъжното, напречното и ъглово колебания са такива, че векторът на резултантната скорост тангира по

синусоидалната траектория на модела с хармонично изменяща се ъглова скорост.

Кинематиката на движение се описва със зависимостите:



Фиг. 7.3 Траектория на движение и положение на модела при ъглово-горизонталните колебания

$$\psi = \psi_m \cos \omega t \quad (39)$$

$$r = \left(\frac{\omega y_m}{U_c}\right) \omega \sin \omega t = r_m \sin \omega t \quad (40)$$

$$\dot{r} = \left(\frac{\omega y_m}{U_c}\right) \omega^2 \cos \omega t = \dot{r}_m \cos \omega t \quad (41)$$

• **Ъглово-горизонтално колебание с ъгъл на дрейф**

Този вид движение е аналогичен на горния, като на модела е зададен фиксиран ъгъл на дрейф $\beta = \beta_s$. Траекторията на модела е както на фиг.7.3 при което на модела предварително е зададен статичен ъгъл на дрейф.

Идентификация на хидродинамичните коефициенти

Обработката на двата основни вида изпитания с РММ – стационарни и динамични – се различава съществено, поради което съответните процедури се разглеждат поотделно. В най-общ вид парадигмата на обработката е дадена на фиг. 7.4.



Фиг. 7.4 Схема на обработката на данните от РММ-изпитания

В резултат от моделните изпитания и съответна постпроцесорна обработка на експерименталните данни се изчислени неизвестните коефициенти от модела на маневреното движение на кораба. В долната таблица 2 са приведени получените и използване коефициенти в симулационния модел на кораб m/s "Red Hook"

Таблица 2

```

% Хидродинамични производни в модела на маневреното движение - M0376
m = 1248e-5; % маса на модела на кораба [-]
Iz = 3.5e-5; % инерционен момент [-]
xG = 0; % ЦМ [-]

Xudot = -70e-5; Y0 = 0e-5; N0 = 0e-5;
Xrv = 230e-5; Yvdot = -751e-5; Nvdot = 24.7e-5;
Xvv = -62e-5; Yv = -1023e-5; Nv = -425e-5;
Xdd = -100e-5; Yvv = -2262e-5; Nvv = 30.7e-5;
Xrr = 6.5e-5; Yr = -826e-5; Nr = -241e-5;
Xvve = 0; Yrv = 407e-5; Nrv = -647e-5;
X0 = -134.3e-5; Yrdot = -6.5e-5; Nrdot = -94e-5;
Xe = 68.5e-5; Yd = 252e-5; Nd = -73e-5;
Xee = 11.8e-5; Yde = 471e-5; Nde = -161e-5;
Xeee = 54e-5; Ye = 0e-5; Nve = 0e-5;
Xdde = -103.2e-5; Yee = 0e-5; Ne = 0e-5;
Xddee = -86.4e-5; Ydd = -214.3e-5; Nee = 0e-5;
Xddvv = 0e-5; Yddee = 175.7e-5; Nrrv = 0e-5;
Ydee = 4.8e-5; Yd = 252e-5; Ndd = 49.8e-5;
Yddee = 175.7e-5; Yrrv = 0e-5; Ndde = 129.3e-5;
Yrrv = 0e-5; Ydv = 0e-5; Ndee = -77e-5;
Ydv = 0e-5; Yddv = 0e-5; Nrrv = 0e-5;
Yddv = 0e-5; Ndv = 0e-5;
Nddv = 0e-5;
  
```


ГЛАВА 8

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАНЕВРИТЕ НА ДВУВИНТОВ КОРАБ С ПРИЛОЖЕНИЕ НА РАЗРАБОТЕНИЯ СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ

Симуляционното изследване на маневрените характеристики на двувинтовия кораб m/s “Red Hook” е осъществено на два етапа:

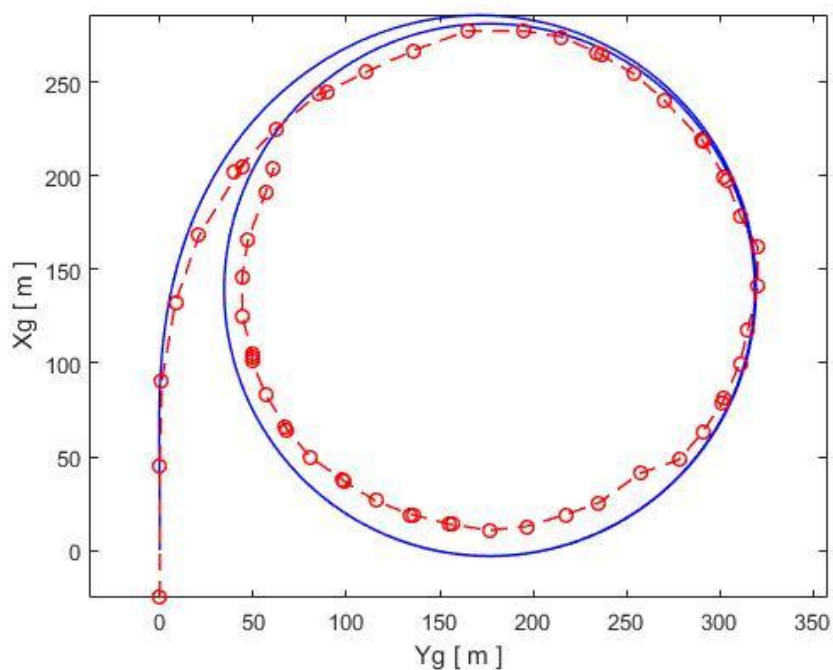
а/ валидация на основния алгоритъм и съответно на програмния код посредством изчисляване на маневрите на модел на двувинтовия кораб и сравнението им с пряко измерените на автономен физически модел на кораба за частния случай: постоянни обороти на ГД и интегрално разглеждане на ДРК, което съответства на условията на моделните изпитания

б/ включване в програмата на модифицираните модула за: моделиране на динамиката на ГД и диференциално разглеждане на външния и вътрешен спрямо посоката на движение движително-рулеви комплекси

С цел изследване на несиметричното натоварване на винто-рулевия комплекс се предполага задвижване на гребните винтове с помощта на два отделни двигателя. В качеството на тестова маневра се разглеждат стандартна маневра циркулация за ъгъл на отклонение на рулите 35° .

Валидация на симуляционната програма

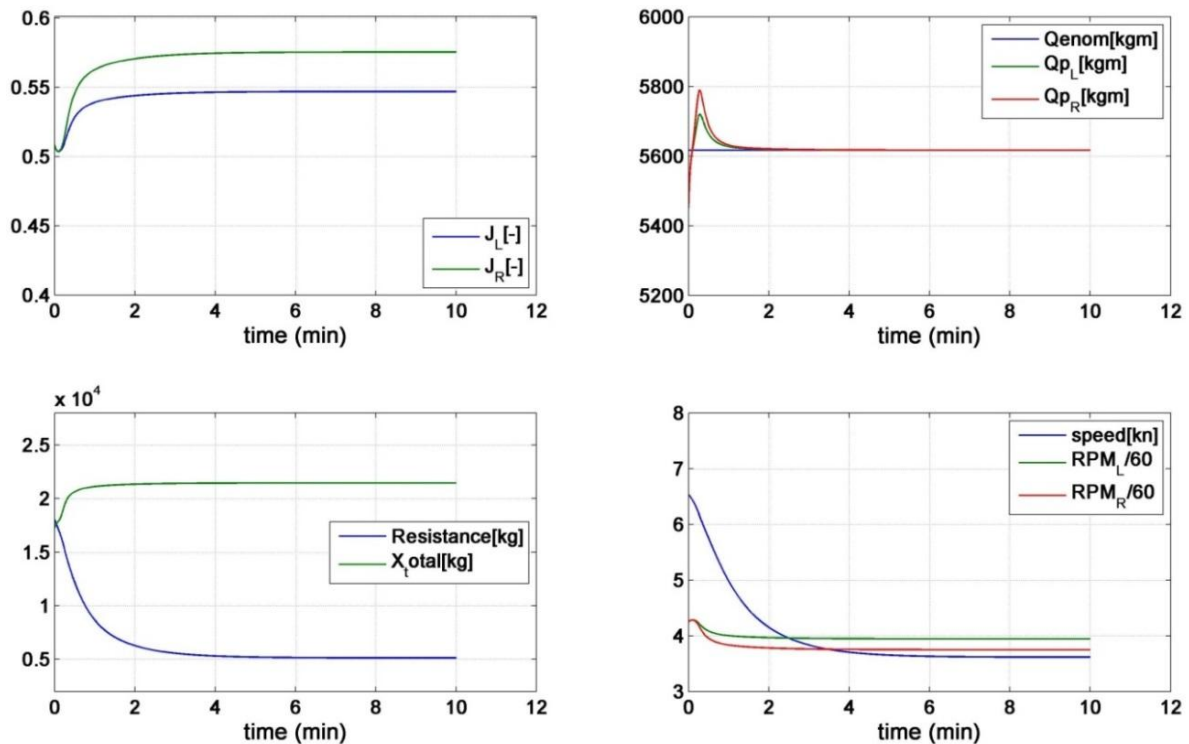
Осъществена е симулация на маневрата, като резултатите са сравнени с пряко измерена в басейн на ЦХА траектория на модел на кораба. От графиката на симулираните и експериментално измерени траектории – фиг.8.1, се вижда много доброто приближение в двата вида резултати.



Фиг. 8.1 Траектория при маневра „циркулация“ – експеримент (точки) и симулация

Изследване на характеристиките на ГД при маневриране

Както при гребните винтове анализът на характеристиките на ГД при маневриране позволява да се определи натоварването им по упор и момент и да се преценят и анализират загубите на обороти за всеки от двойката винтове. Развитието на характерните величини, свързани с циркулацията на кораба за двете маневри са приведени на фиг.8.2.



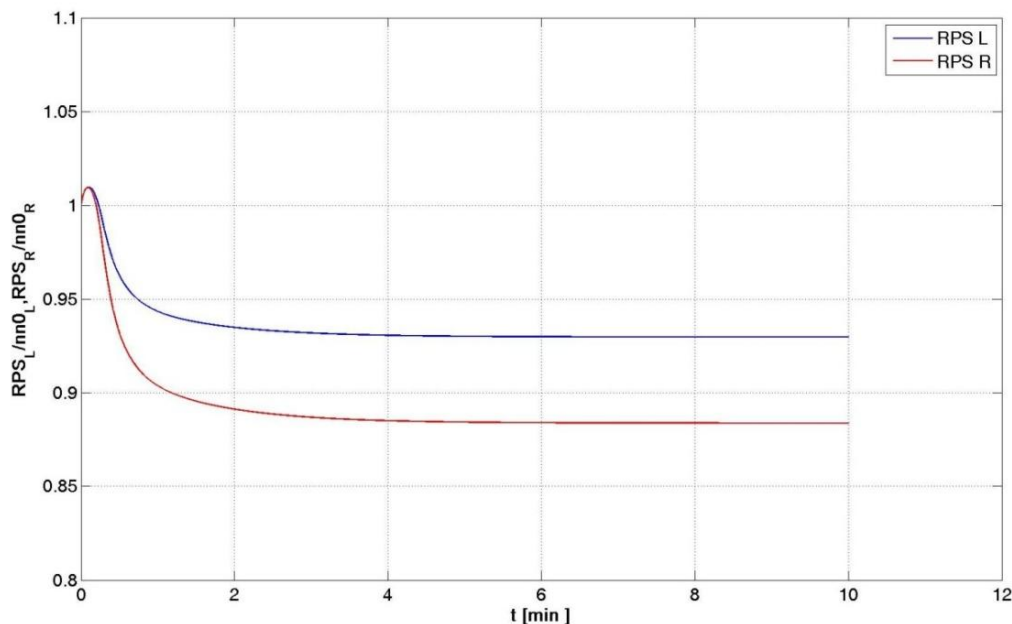
Фиг. 8.2 Характерни величини при циркулация

Наблюдава се нарастване на относителното напредване, което е свързано с натоварването на ГВ по момент и понижаване на оборотите им. Увеличаване на J_R на вътрешния ГВ спрямо външния (с около 3-5%) и свързано с това редуция на оборотите на същия гребен винт RPM_R . В резултат, в началните преходни фази на циркулацията, когато J е по-ниско, оборотите са постоянни, а векторът на скоростта в точките на разположение на ГВ е непроменен и равен на този в ЦТ има повишаване на натоварването на винтовете по момент.

При извършване на циркулация натоварването на корабния гребен винт се изменя пропорционално на местния ъгъл на дрейф. Особено при извършване на маневри с големи ъгли на отклонение на руля увеличаването на натоварването на ГВ по момент се отразява на пропульсивната система и дава предпоставки за свръхнатоварване над 100% и оттам да последват аварии. Най-голямото натоварване за ГВ и съответно ГД е в преходния режим на работа когато не са установени параметрите на маневрата „циркулация“, това се забелязва и от резултатите от симулациите.

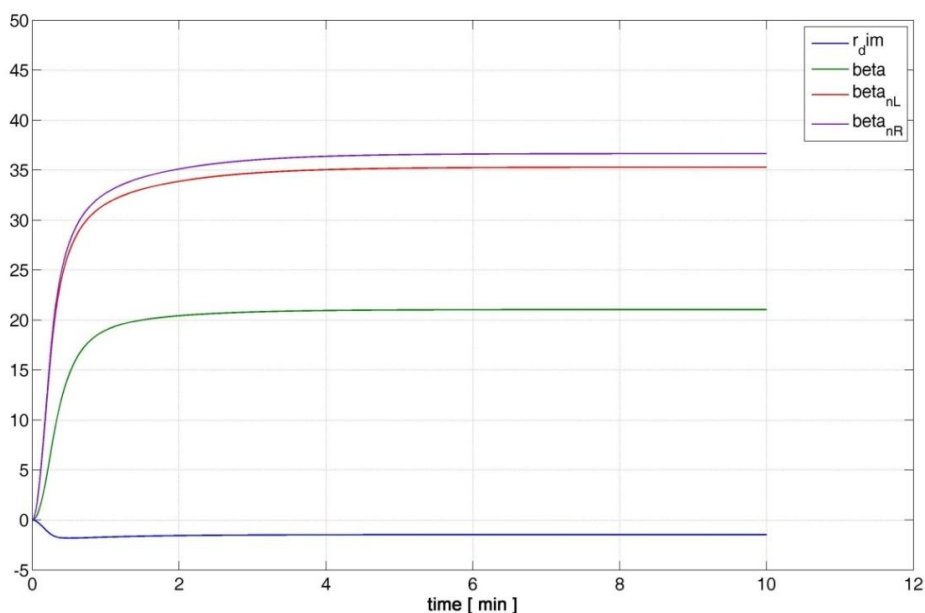
Изследване на характеристиките на ГВ при маневриране

По време на симулации на маневри могат да бъдат проследени характеристиките на гребните винтове като тяхното асиметрично натоварване и да бъде достигнато до заключения за подобряване тяхната работа.



Фиг.8.3 Относителна загуба на обороти за двата ГВ

Относителните разлики в оборотите между двата винта е 3 - 5% , като те се увеличават при по-критични зададени циркулации. Това се повлиява от различното натоварване на вътрешния и вътрешен ГВ.

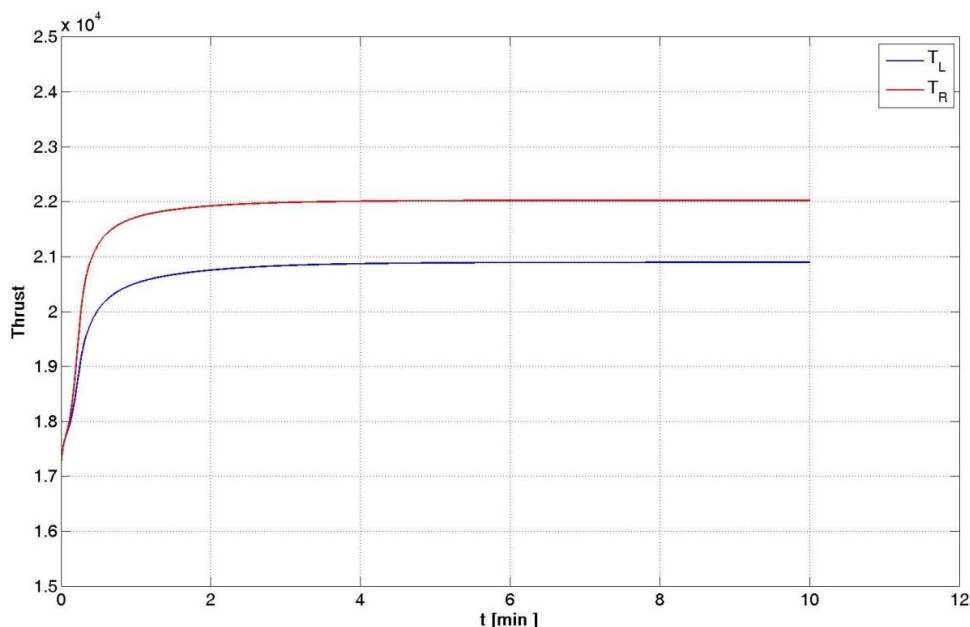


Фиг.8.4 Ъглова скорост, ъгъл на дрейф, местни ъгли на дрейф в диска на ГВ

Местните ъгли на дрейф за точките на разположение на двойката винтове са по-големи спрямо ъгъла на дрейф в ЦТ. Това е нормално, тъй като векторите на скоростите в тези точки като крайно разположени в зоната на кърмата са по-големи спрямо в ЦТ. Също по

тази причина и местния ъгъл на дрейф за вътрешния ГВ е по-голям от този при външния ГВ.

Натоварванията по упор за двата винта се увеличават при влизане в циркулация - фиг. 8.5, като при големите ъгли на циркулация са по-големи. Тук влиянието на косия поток на обтичане е значително и регресионния модел разработен на база изследванията на Гутше добре ги отразява в симулациите.

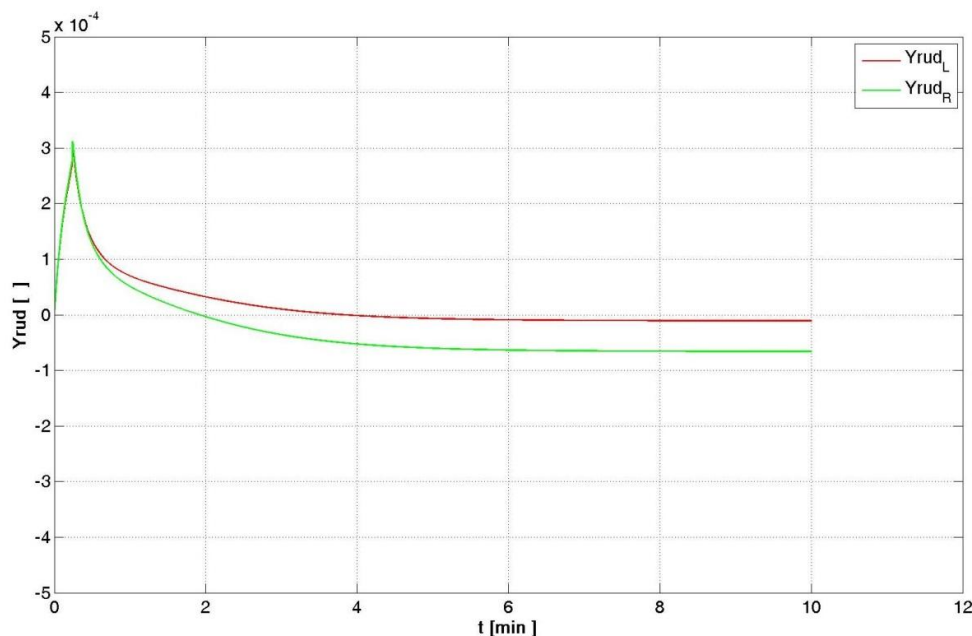


Фиг.8.5 Упор на двата ГВ при циркулация

За отчитане влиянието на косия поток върху работата на ГВ е приложен създадения регресионен модел, като основно влияние в него оказва местния ъгъл на дрейф, който е различен за всеки от двата гребни винта и това естествено се отразява и на натоварването им по упор. Например десния ГВ, който се пада „вътрешен“ при циркулацията на десен борд бива и по-натоварен в сравнение левия ГВ. Естествено това влияе на поддържането на оборотите, редуцията на които при двувинтовите кораби (особено при по-високи стойности на F_n) е асиметрична. Тя е пропорционална с увеличаване на ъгъла на руля и е водно, че процентно най-голямото асиметричното понижение е при $\delta=35^\circ$. Налага се извода, че построеният алгоритъм за отчитане в симулационния модел на спецификата на работа на гребните винтове на двувинтов кораб при маневриране отразява много добре взаимовлиянията описани в Глава 2. Алгоритъмът позволява проследяването на работата двувинтовия комплекс и в диапазона $\delta = 10^\circ - 25^\circ$ подобрява прогнозирането на маневрирането на кораба при циркулация.

Изследване на характеристиките на руля при маневриране

При маневриране всеки от двойка рули е различно ефективен в зависимост кой се пада „вътрешен“ и кой „външен“ при циркулация, един от основните фактори водещи до загуба на подемната им сила е попятния поток в зоната на всеки един. В преходния режим има неустановен пик на подемната сила и с увеличаване ъгъла на отклонение тя нараства, като за „външния“ рул това увеличение е по-гплямо. С установяване на ъгловата скорост и скоростта на обтичане на рулите, генерираната от тях подемна сила се установява.



Фиг.8.6 Коефициент на подезната сила на двата руля при циркуляция

За да се опише обтичането на съответното перо е необходимо да се знае скоростта в района на перото, аналогично както в случая за съответния гребен винт. Поради центробежните сили, ъгловата скорост в разглежданата точка и отдалечеността ѝ от ЦТ на корпуса скоростите са по-големи и разбира се най-висока е при левия рул („външен“ при циркуляцията на десен борд). Това се отразява на важния фактор – попятния поток в зоната на ДРК. Изследвания за изменението на попятния поток при по-бързи двувинтови кораби-например за военни – показват че за големите ъгли на отклонение на руля над 25° в зоната вътрешния рул попятния поток е отрицателен. В настоящото изследване при симулациите при рул отклонен $\delta=15^\circ$ при „вътрешния“ рул попятния поток има обратен знак, а при „по-тежка“ маневра $\delta=35^\circ$ вече и при двете пера потока е отрицателен.

В това явление има влияние обтичането в зоната на кърмата, изменението на попятния поток и ъгъла на атака са включени като поправъчни коефициенти в работата на рулите. Чрез тях може да се обясни асиметричната работа на всеки от двата, също се вижда тенденцията тази разлика в подезната им сила да се увеличава с ъгъла на отклонения. При критичните ъгли като $\delta=35^\circ$ ефективността им доста намалява, което потвърждава анализа относно кризисния ъгъл на ползвания като база рул тип NASA-0018.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От приведенния анализ се вижда, че включването в симулационния модел на уравнението на главния двигател позволява уточнява и се постига по-добро приближение при моделирането на преходните режими при маневриране на кораба. В същата посока, диференциалното разглеждане на характеристиките на гребните винтове и рулите при движение по криволинейна траектория на двувинтовите кораби позволява да бъдат оценени реалистично асиметричното наоаварване на гребните винтове и рулите зад тях, което е от значение при проектирането и оразмеряването на елементите на движително-рулевия комплекс на дадения кораб.

Статии и доклади, разработени и публикувани в рамките на дисертацията

1. Efremov D., Influence of Curvilinear Motion of the Ship's Propeller Characteristics, 11th Int. Conference on Marine Sciences and Technologies, Black Sea'2012, Proceedings of Conference, pp.60-65, October 2012, Varna
2. Milanov E., Chotukova V., Efremov D., Stern F., Systematic Experimental Investigation of Maneuvering Characteristics of Free Running Delft372 Catamaran in Still Water and Regular Waves, 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2-7 November 2014, Hobart, Tasmania, Australia
3. Milanov E., Chotukova V., Efremov D., Simulation Model of Danube Pusher Manoeuvrability in Deep and Shallow Waterways, "European Inland Waterway Navigation Conference", 10-12 September, 2014, Budapest, Hungary, ISBN 978-963-313-124-4
4. Миланов, Е., Ефремов, Д., Симулационно изследване на преходните режими при маневриране на кораба, Списание на БАН, бр. 5, стр.13-22, 2012
5. Е.Миланов, Д. Ефремов, „Изследване на вълновата картина около високоскоростен катамаран”, „ДНИ НА МЕХАНИКАТА ВЪВ ВАРНА”, Международен дом на учените „Ф. Ж. Кюри“, курорт „Св. Константин и Елена“, Варна, България, септември, 2013 г

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

1. Разработен е теоретично-експериментален метод за отчитане на влиянието на скоса на потока върху хидродинамичните характеристики на корабния гребен винт.
2. Разработен е алгоритъм за диференциално определяне на хидродинамичното натоварване на комплексите “гребен винт-рул” за двата борда при двувинтов кораб.
3. Разработен е алгоритъм на взаимодействието на главния двигател с гребния винт в режим на маневриране на преден и заден ход.
4. Дефиниран е усъвършенстван симулационен модел на маневреното движение на двувинтов кораб в четирите квадранта на изменение на кинематичните параметри.
5. Извършени са числени изследвания на несиметричното натоварване на винто-рулевия комплекс при циркулация на кораба.

Приложни приноси:

6. Разработена е и валидирана числена процедура за изчисляване на характеристиките на гребен винт с скосен поток.
7. Осъществени са числени изследвания на влиянието на динамиката на главния двигател върху параметрите на ускоряването, спирането и реверсивното движение на кораба.
8. Осъществена е програмна реализация в среда на MATLAB на дефинирания усъвършенстван симулационен модел.

9. Извършена е идентификация на неизвестните в модела коефициенти с използване на експериментални данни от проведени в ЦХА хидродинамични експерименти с физически модел на двувинтов кораб.
10. Извършени са комплексни симулационни изследвания за анализ на влиянието от включването в модела на динамиката на ГД при диференциално третиране на компонентите на ВРК върху стандартните маневри на кораба.
11. На основата на симулационния алгоритъм е разработен функционален модел на системата „ГД-К-ГВ-Р“ с помощта на програмен инструмент Simulink с цел генериране на С-код и програмни библиотеки за маневрени симулатор на ЦХА.

Практическа приложимост на резултатите:

Крайните резултати от работата по дисертационния труд, под формата на програмен модул, са инкорпорирани в основната симулационна програма на настолния маневрен симулатор на ЦХА, както и в програмното осигуряване на панорамния маневрен тренажор на центъра.

ABSTRACT OF A DOCTORAL THESIS for awarding educational and scientific degree of PhD

Thesis theme: Simulation Model of the “Main Engine-Hull – Propeller” System Dynamics in Ship Maneuvering Motion

PhD Student: Dobrin Vladimirov Efremov

The algorithm for reproducing the ship maneuvers is a key element in the mathematical model of the hydrodynamics of ship maneuvers. One of the problems in the implementation of these algorithms is determination the unknown variables in the simulation model. In this thesis in the development of complete model of the ship maneuver motion for completeness is included and the rudder so that later in the abbreviation of the same system has been added ("E-H-P-R").

Regarding the complexity and accuracy of the model, the impact of the interaction into the system "E-H-P-R" is extremely important in implementing to the set maneuvers as in model tests and in practice. Numerical models describing the influence of the elements in this system are still improving and are not fully available. Such a simulation model would help in clarifying and determining, the effectiveness as screws and rudders of ship with twin propellers and rudders, avoid overloading one of the shafts of screws, the time to perform the set maneuver in function of the work of engine, prediction of created thrust, torque and more easily analyzed maneuverable propulsion characteristics of the propeller. This permits even at the stage of designing, if necessary, resizing of propeller shaft or recalculating and selection of a more appropriate system "E-H-P-R".

The main aim of the thesis is development of simulation and mathematical model describing the interaction between the elements in the "E-H-P-R" and its implementation in the model of ship motion maneuver. Object of research is the development and realization possibility for inclusion in the model of maneuver ship motion equations of the dynamics of the main engine by the impact of the oblique stream flowing over the propellers and rudders to maneuvering twin-screw ship. As a result, it's created an extended mathematical model and program codes by MATLAB and Simulink with which were analyzed the characteristics of system elements "E-H-P-R", including asymmetrical loading of the complex “H-P-R” during maneuvering of twin-screw ship.