

ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ”

ФАКУЛТЕТ „НАВИГАЦИОНЕН”

Катедра „Корабоводене”

Инж. Лъчезар Костадинов Конаков

**ПОВИШАВАНЕ НА АДАПТИВНОСТТА НА
СЪВРЕМЕННИТЕ АВТОРУЛЕВИ УСТРОЙСТВА
ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДАННИ ЗА КРЕН И
ДИФЕРЕНТ ОТ АВТОМАТИЗИРАНИ СЕНЗОРИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за придобиване на образователната и научна степен

„ДОКТОР”

по научна специалност

„Управление на кораби и корабоводене”

Научен ръководител:

Доц. д-р Георги Вълчев

Рецензенти:

Проф. д.т.н. Трифон Димитров Пенков

Доцент д-р Благовест Чанев Белев

Варна, 2015 г.

Докторантът работи като асистент в катедра „Корабоводене” и е на обучение в същата катедра на Висшето военноморско училище „Н. Й. Вапцаров” в задочна форма за разработване на дисертационния труд.

Изследванията от дисертационния труд са извършени във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”.

Дисертационния труд е насочен за защита от Факултет „Навигационен” при ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, в съответствие на чл. 5, ал.1 от ЗРАС.

Автор: Лъчезар Костадинов Конаков

Заглавие: **ПОВИШАВАНЕ НА АДАПТИВНОСТТА НА СЪВРЕМЕННИТЕ АВТОРУЛЕВИ УСТРОЙСТВА ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДАННИ ЗА КРЕН И ДИФЕРЕНТ ОТ АВТОМАТИЗИРАНИ СЕНЗОР**

Тираж: броя

ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

АП - автопилот;

АСОПК - автоматизирана система за определяне параметрите на кораба;

ЕПСКК - електронноцифров преобразовател на сигналите за курса на кораба;

ЗК - зададен курс;

МПСАУКК - микропроцесорна система за автоматично управление на курса на кораба;

ПСУ - пулт за следящо управление;

ПУ - пулт за управление;

РД - рулеви датчик;

САУ - система за автоматично управление;

САУКК - система за автоматично управление курса на кораба.

Използваната номерация на фигурите, формулите и литературата съответства на тази в дисертационния труд.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема:

Голяма част от навигационните аварии (като изключим тези от грубите грешки), се дължат на проблеми, свързани с управлението на кораба по курса. Това допускане се основава на следния факт: качеството на управлението на курса е в определена зависимост от динамичните характеристики на кораба, които са най-добри при пътническите кораби и най-неблагоприятни при танкерите. Разпределението на аварията по типове кораби е както следва [18]:

- за пътническите кораби – 6,8 %;
- за сухотоварните кораби – 7,4 %;
- за танкерите – 11,8 %.

Корелацията между аварията на корабите и динамичните им характеристики е очевидна. В същото време изследванията показват, че при подходящо настройване на автопилотите, качеството на автоматичното управление е по-добро от ръчното управление на курса. В документациите на автопилотите обаче, се дават само препоръки за посоката на изменение на настройваните параметри, без количественото им уточняване за конкретен кораб и при конкретно негово състояние (скорост и натоварване). От друга страна, не са известни в явен вид динамичните параметри на кораба, от които зависи правилното настройване на автопилота. Резултатът е неефективна експлоатация на автопилотите и некачествено управление на курса с всички произтичащи от това последствия.

При плаване в лоши хидрометеорологични условия (над 3-4 бала), автоматичното управление на курса се усложнява. Създават се предпоставки за претоварване на рулевото устройство и за излизането му от експлоатация. Прекомерните отклонения на руля са причина за спадане

на скоростта, а оттам и за енергийните загуби на кораба, които достигат между 6 и 10 %.

Тези причини от една страна, и развитието на теорията на автоматичното управление от друга, както и все по-широкото внедряване на компютърната техника в морския транспорт, насочиха редица фирми към синтезирането и производството на адаптивни автопилоти, в които горните проблеми трябваше да отпаднат. От специализираната литература по разглеждания проблем се вижда, че произведените до момента адаптивни автопилоти не отговарят в пълна степен на поставените им цели. Като главна причина за недостатъците им се изтъква неподходящото подбиране на критерия за оптимално управление, а оттам – и на оптималната функция на управление. Основна причина за това е, **че не се отчита влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управлението [18,19,30].**

Обект на изследване:

Адаптивна система за автоматично управление на курса на кораба с отчитане на влиянието на клатенето му при силно вълнение.

Предмет на изследване:

Повишаване на качеството на автоматичното управление на курса с отчитане на влиянието на клатенето на кораба при влошени хидрометеорологични условия.

ЦЕЛТА на дисертационната работа е да се докаже необходимостта от адаптивна САУКК, в която е отчетено и влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управление на курса, чрез филтриране на излишните отклонения на руля, свързани с динамиката на крена и диферента на кораба.

Апробация

Дисертационния труд е представен и обсъден в катедра „Корабоводене” при Висшето военноморско училище „Н. Й. Вапцаров”. Разработените идеи в дисертацията са публикувани в научни издания.

Структура и съдържание на дисертационния труд

Дисертацията се състои от увод, четири глави, обобщени изводи (включващи и насоките за практическа реализация на получените резултати), заключение, приноси, научни публикации, свързани с проблемите на дисертационната работа и цитирана литература.

УВОД

В увода е изведена актуалността на проблема (разгледана в по-широкия аспект на безопасността в корабоплаването) и първоначалните въвеждащи коментари към темата.

ГЛАВА 1

СЪЩНОСТ И СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Разкрити са проблемите, свързани с автоматичното управление на кораба по курса при плаване в стеснени райони и в открито море.

Направена е кратка характеристика на системата за автоматично управление на курса и са изследвани областите на изменение на нейните параметри.

Разкрити са възможностите за определяне на параметрите на кораба като обект на САУКК.

Характеризирани са основните загуби, свързани с управлението на кораба по курса.

Разгледани са най-често срещаните в литературата критерии за оптимална работа на системата и са разкрити някои от недостатъците им.

Представена е характеристика на най-разпространените конвенционални АП в корабоплаването.

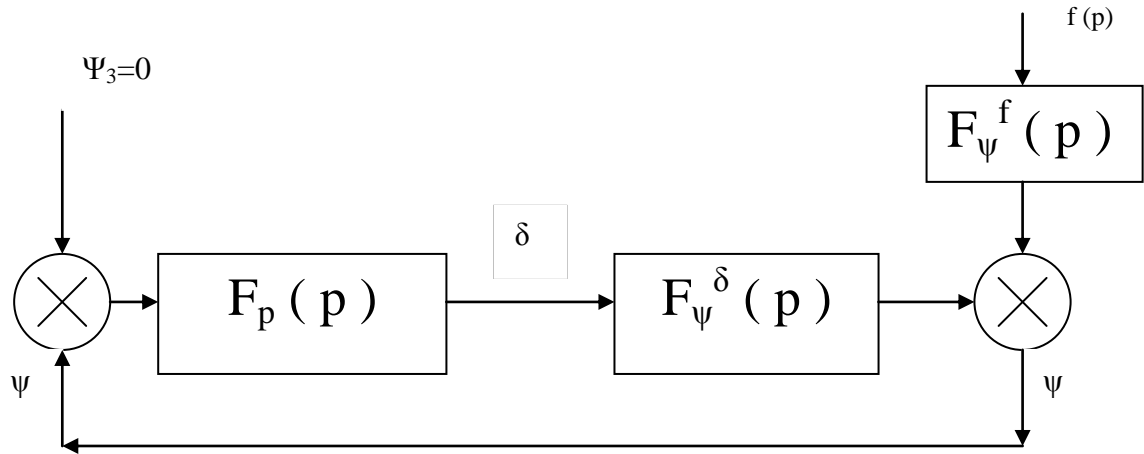
Класифицирани са и са характеризирани най-разпространените към настоящия момент адаптивни автопилоти.

Представена е хипотеза за влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управлението му по курса.

Формулирани са задачите на дисертационната работа, които определят нейното съдържание и структура.

1.1. Същност на проблема, свързан с управлението на кораба по курса.

1.1.1. Кратка характеристика на САУКК при работа в режим „стабилизация на курса”



Фиг. 1.1 Блок - схема на САУКК.

където:

$F_p(p)$ - предавателна функция на регулатора;

$F_\psi^\delta(p)$ - предавателна функция на кораба по управляващо въздействие δ (ъгълът на отклонение на руля);

$F_\psi^f(p)$ - предавателна функция на кораба по външно въздействие $f(p)$;

ψ - отклонение на кораба от зададения курс грешка в поддържаия курс;

ψ_3 - зададено изменение на курса.

От направената характеристика на САУКК в т. 1.1.1. се вижда, че параметрите на кораба се променят в твърде широки граници, което изисква значителни промени на параметрите на регулатора в процеса на експлоатацията. В конвенционалните автопилоти е предвидена възможност за пренастройване на регулатора, но липсва информация за параметрите на кораба, както и за оптималната зависимост на параметрите на регулатора от тези на кораба и на хидрометеорологичните условия. Това се явява предпоставка за неефективната експлоатация на системата и за съпроводените с това загуби.

1.1.2. Възможности за определяне на параметрите на кораба като обект на САУКК

От точността на определяне на параметрите на кораба зависи точността на параметрите, свързани със системата. Обикновено параметрите на кораба се определят експериментално. Аналитичното им определяне е съпроводено с големи трудности и дава значителни грешки [3,18,19].

Експерименталното определяне на параметрите се извършва с помощта на честотната или на времевата характеристика на кораба. Честотният метод [3,18,23,24,25,26,41,64,70] дава значително по-добри резултати от втория метод (по времева характеристика на кораба). Той позволява не само да се определят коефициентите (T_c, K_c) на вече възприетото уравнение на кораба, но и да се провери дали този линеен вид на уравнението е достатъчно точен за дадения обект.

При обработването на резултатите от експеримента може да се използва както амплитудно-честотната [64], така и амплитудно-фазовата характеристика на кораба [3].

Трудностите при използване на честотният метод са свързани с:

- неизбежното извеждане на кораба от експлоатация;
- невъзможността да се определят параметрите на кораба при всички негови режими на експлоатация, свързани с натоварването и скоростта му;
- трудното изпълнение на хармоничното отклоняване на руля.

Последният проблем отпада при определяне параметрите на кораба по времеви характеристики, но точността на определяне се влошава (над 10 %).

Най-голямата трудност и при двата метода се дължи на зависимостта на параметрите на кораба от величината на ъгъл δ [18]. За да се определят с достатъчна точност параметрите на кораба при различни режими на експлоатация и за различни значения на ъгъл δ , е необходимо продължително извеждане на кораба от експлоатация което е икономически неизгодно и практически невъзможно. Още по-сложен е проблемът с определянето на параметрите, ако се отчете факта, че те зависят също от крена и диферента на кораба [18,19]. Всичко това налага извода, че цитираните (класически) методи за определяне параметрите на кораба като обект на САУКК са непригодни за оптималната експлоатация на автопилотите.

1.1.3 Характеристика на основните загуби, свързани с управлението на кораба по курса

Ако се приеме, че автопилотът е настроен за максимално точно удържане на зададен курс и корабът плава в открито море при добри хидрометеорологични условия, то поведението му няма да се различава от това, което се изисква при плаване в крайбрежни води. Курсът ще се поддържа еднакво добре и в двата случая, отклоненията от зададения курс ще бъдат малки и включванията на регулатора са минимални, т.е. регулаторът в такъв случай не се нуждае от пренастройване. Няма опасност за излизане на рулевото устройство извън експлоатация и енергийните загуби, свързани с управлението са минимални.

При влошаване на хидрометеорологичните условия (вълнение на морето, по-голямо от 3-4 бала) върху корпуса на кораба започват да действат по-големи външни сили, които предизвикват значителни флукуации на курса. Ако автопилотът остане настроен за стабилно управление на курса, това ще доведе до значителни претоварвания на рулевото устройство и до повишаване на опасността за излизането му от

експлоатация. Освен това корекциите на отклоненията от зададения курс, предизвикани от вълнението, са съпроводени от значително повишаване на хидродинамичното съпротивление на корпуса и от рязкото намаляване на скоростта на кораба вследствие на големите и ненужни отклонения на руля. Такива примери в световната практика има и резултатите от тях са известни [60].

Горните разсъждения налагат **извода**, че при плаване в открито море е необходим нов подход към качеството на управлението.

1.1.4 Критерии за оптимална работа на САУКК в открито море

Правилността на избиране на оптимален закон за управление преди всичко зависи от правилното избиране на критерия за оптималност. Този критерий трябва да удовлетворява две изисквания: да отразява основното предназначение на системата за управление и да се подава на количествена оценка т.е. да бъде измерим.

Предназначението на САУКК произлиза от основното предназначение на кораба: безопасно и с минимални загуби да транспортира товара до предназначеният място. В съответствие с това могат да се разграничават два режима на плаване – плаване в открито море (далеч от навигационни опасности) и плаване в стеснени райони с повишена опасност за корабоплаването. [17,18,19,20,21,22,23,24,25,26, 27]

При **първия режим** основното изискване към САУКК се явява икономическата целесъобразност от реализацията на закона за управление на курса. Затова той може да бъде наречен икономичен режим на управление.

При **втория режим** основното изискване към системата се явява максималната безопасност на плаването.

В съответствие с изложеното могат да се формулират **два критерия на оптимално управление**: критерий за минимизация на експлоатационните разходи (критерии за икономично управление) и критерий за безопасно управление на кораба.

1.1.5 Критерии за устойчивост на САУКК

Повишаването на качеството на автоматичното управление по някои показатели (например по минимизация на дисперсията на ъгъл δ т.е. на управляващото въздействие в САУКК) може да се отрази неблагоприятно върху устойчивостта на системата. Това трябва да се има предвид при всяко настройване на регулатора (автопилота), особено в режим на икономично управление.

При анализ на САУКК могат да се използват както алгебричните критерии [64,69,71] (критериите на Вишнеградски, Хурвид, Раус и др.), така също и честотните критерии (на Михайлов, амплитудно-фазовия критерий) за устойчивост. Практически най-удобен за изследване на САУКК като система от трети род, се явява критерият на Вишнеградски в т. 1.1.5.

1.2. Състояние на проблема, свързан с експлоатацията на САУКК

1.2.1. Характеристика на най-разпространените конвенционални АП в корабоплаването

Правилата за конвенционалното обзавеждане на морските кораби [44,45] са насочени главно към точността, надеждността и лекотата на обслужване на автопилотите в смисъл по-лесно включване, изключване и задаване на режимите “автомат”, “следящ” и “просто управление”. Обърнато е внимание, че АП трябва да имат възможност за ръчно настройване, съобразно с променящите се фактори – натоварване, скорост

на кораба и хидрометеорологичните условия. Не са предявени изисквания по отношение на качеството на настройването на автопилотите, както и по отношение на диапазоните на настройваните параметри.

1.2.2. Основни технико-навигационни сведения за някои адаптивни автопилоти.

Известно е, че точното удържане на кораба на линията на зададения курс става за сметка на чести и големи отклонения на управляващия орган - руля, свързани с големи разходи. При плаване в теснини, когато точното управление е наложително, тези разходи са оправдани. При плаване в открито море обаче те са неоправдани, нещо повече - стремежът за точно удържане на кораба на линията на ЗК при вълнение може да доведе до претоварване и авария на рулевото устройство. Очевидна е необходимостта от целесъобразно пренастройване на САУКК (в частност на АП) съобразно някакъв **критерий за оптималност**, в зависимост от целта и района на плаването. В тези случаи управлението на кораба по курса е "оптимално управление".

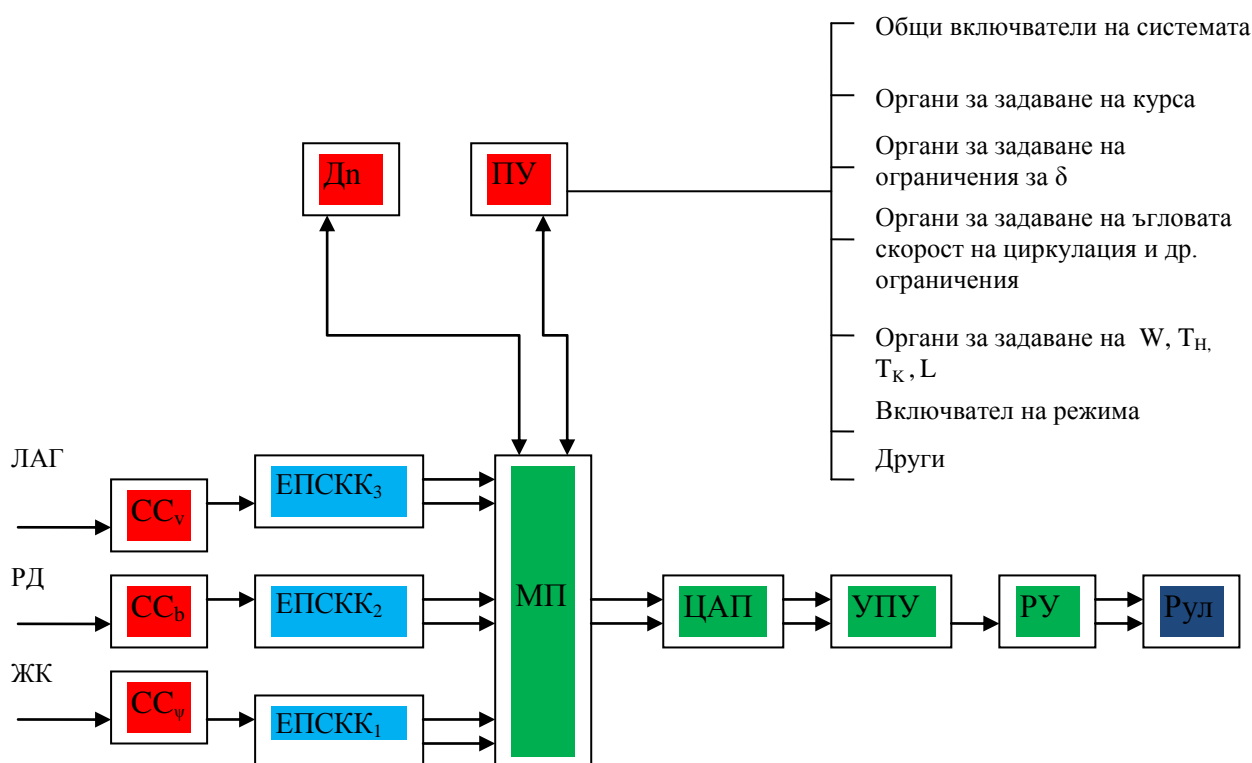
Решаването на задачата за оптимално управление на кораба по курса е най-сложната задача, свързана с автоматичното му управление. Ето защо през последните години бяха разработени т.н. **адаптивни (самонастройващи се по определен критерий за оптималност) автопилоти**. Характеристиките на някои от тях са разгледани в т. 1.2.2.

Управлението се нарича **оптимално**, ако движението му по курса удовлетворява предварително избран (целесъобразен от гледна точка на някакво качество) **критерий за оптималност**. Изборът на критерият в най-голяма степен зависи от района на плаването.

При плаване в открито море (далече от навигационни опасности) най-целесъобразен е т.н. **критерий за икономично управление**. Същността му е свързана с минимизацията на загубите по управлението.

При плаване в крайбрежни води, теснини и канали, когато главната задача е точното удържане на кораба на линията на ЗК, най-целесъобразен е критерият за точно управление.

Извод: От разгледаните адаптивни автопилоти в т. 1.2.2, които оптимизират автоматичното управление на курса съгласно критерия за икономично управление, в недостатъчна степен минимизират загубите, свързани с управлението на курса при вълнение.



Фиг. 1.7 Блок схема на МПСАУКК

1.3. Влияние на клатенето на кораба върху качеството на управлението му по курса

При вълнение на морето, когато естествено се увеличава рискаенето на кораба около курса, стремежът за точното му поддържане води до:

- намаляване на скоростта;
- увеличаване на разхода на гориво;

- претоварване на рулевата машина и опасност за извеждането ѝ от експлоатация.

С други думи стремежът за точно управление на курса не само че не води до икономии, но дори е опасен за кораба. В такъв случай, по-целесъобразно е корабът да се управлява съобразно с критерия за “икономично управление” [3,5,12,18,19,24,29], при който се спестяват излишните отклонения на руля и свързаните с това неблагоприятни ефекти.

До този момент никъде не е отчетено влиянието на напречното и надлъжното клатене на кораба върху динамичните му параметри, а от там и върху качеството на управлението му по курса.

Както е известно от механиката, всяко масивно тяло което се върти или колебае около ос, притежава кинетичен момент H , чиито вектор е насочен по оста на въртенето (клатенето). Големината на H зависи от инерционния статичен момент I и от ъгловата скорост (честотата) ω на въртене (клатене) на тялото относно същата ос, т.е:

$$H = I \cdot \omega \quad (1.37)$$

Когато кинетичният момент е голям, тялото проявява жирокопични свойства:

- устойчивост относно всяка друга ос, извън оста на въртене (клатене);
- свойство да реагира на приложените към него моменти с въртене (разклащане) около ос, перпендикулярна на вектора на приложения момент.

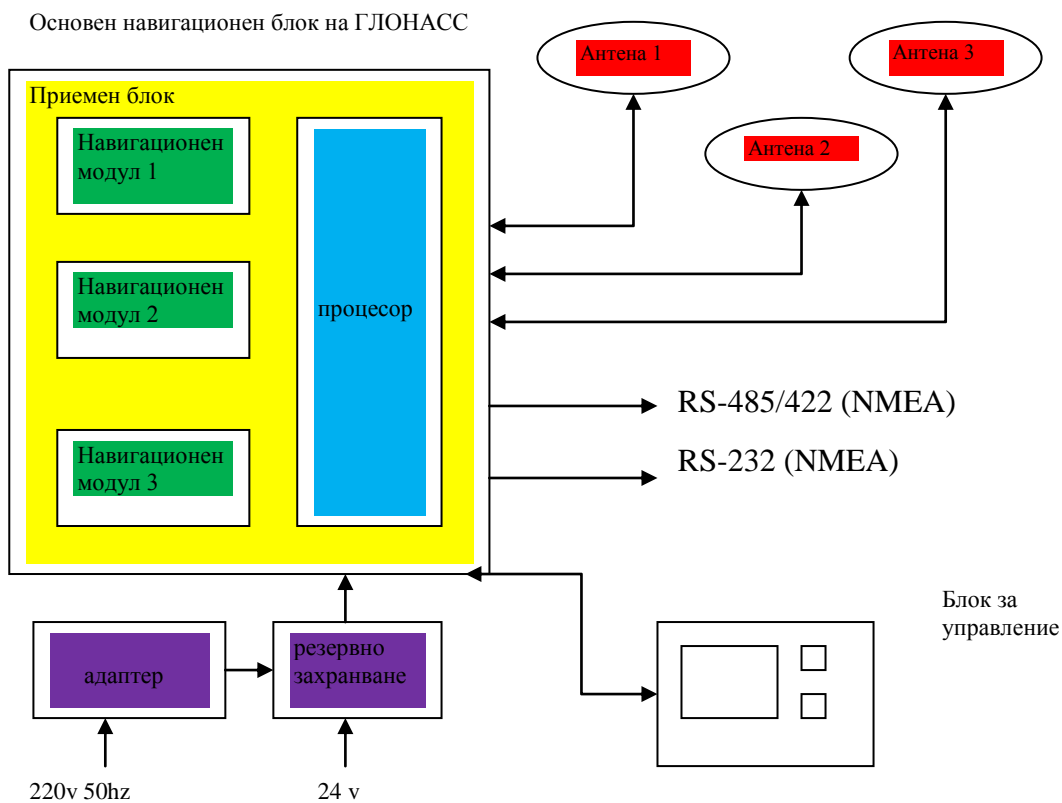
От направените разсъждения в т. 1.3 следва изводът, че руля трябва да се използва за корекции на курса само около моментите, в които

корабът е максимално отклонен към едната или към другата посока (примерно от 2 – 3 s преди максимума до 2 - 3 s след максимума) [30].

1.4. Възможности за осигуряване на цифрова информация за крена и диферента на кораба. Електронни креномери/диферентомери.

До преди няколко години необходимостта от информацията за крена и диферента на кораба беше ограничена. С развитието на автоматизацията на корабоводенето тази информация става все по-необходима. Без актуална информация за крена и диферента на кораба в цифров вид, не е възможно тя да бъде използвана в системите за автоматично управление на курса на кораба. За разлика от класическите креномери, които са аналогови, съвременните спътникови приемоиндикатори с 3 и 4 антени позволяват измерването на крена и диферента на кораба и могат да го индикират, а също така да го подават в цифров вид (със съответния стандарт) към другите средства на кораба. Такъв е и приемоиндикатора „ФАРВАТЕР РК-2306“.

Приемоиндикаторът „ФАРВАТЕР РК-2306“ е разчетен да работи с двете глобални спътникови навигационни системи „ГЛОНАСС“ (Русия) и NAVSTAR GPS (САЩ). Той е предназначен както за морски, така и за речни кораби. Характерно за „РК-2306“ е, че освен информацията за курса, координатите и скоростта на кораба, приемоиндикаторът изработва и индикира ъглите на крена и на диферента.



Фиг.1.8 Блок схема на приемоиндикатора „Фарватер РК-2306”

По-важни характеристики на приемоиндикатора:

- Диапазон на честотите – при ГЛОНАСС: 1595 – 1610Mhz;
при GPS: 1575,42Mhz;
- Код на приемане - при ГЛОНАСС: СТ (L1);
при GPS: C/A(L1);
- Количество канали : 24;
- Честота на обновление на данните: 1 s;
- Време на непрекъснатата работа: без ограничение;

- Точност на измерваните ъгли:

- курс $0,2^{\circ}/R$;

- крен $0,4^{\circ}/R$;

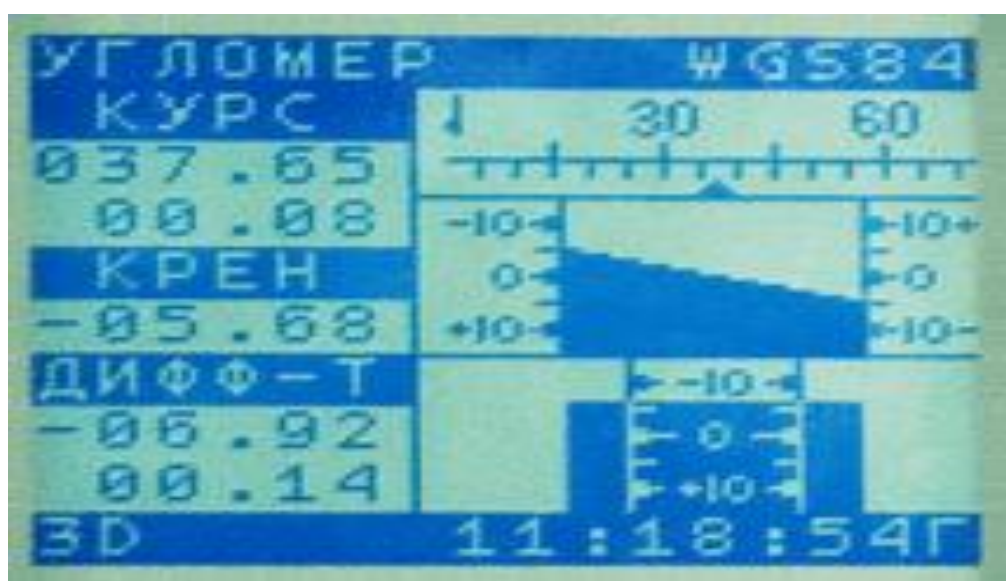
- диферент $0,4^{\circ}/R$;

(R – базово разстояние на антените в метри)

- Тип на интерфейс RS-232,

RS-422;

- Протокол на обмена NMEA-0183, вер.2.2.



Фиг.1.9 Дисплей на приемоиндикатора - „ФАРВАТЕР РК-2306“

ИЗВОДИ

1. Конвенционалните (неадаптивните) автопилоти не позволяват оптимизирането на управлението на курса на кораба. Проблемите с оптималното им настройване са непреодолими.

2. Независимо от конструктивните особености и функционални възможности на разгледаните адаптивни автопилоти, в тях по един или друг начин е заложен критерият за минимизация на експлоатационните загуби, чиито недостатъци са показани в т. 1.2.

3. В документациите на автопилотите се указва, че поведението им при режим “курс” (точно удържане на курса) не се различава от това на конвенционалните автопилоти. При плаване в стеснени райони и адаптивните автопилоти трябва да бъдат превключвани на ПИД-управление, което не се различава от конвенционалните автопилоти и изисква ръчното им, т.е. „експертно“ настройване с всички произтичащи от това трудности.

4. Предимствата на адаптивния автопилот пред конвенционалния [77] се проявяват само при вълнение над 3 бала, когато се реализират икономии на гориво от порядъка на 1,3%. Те обаче са твърде далече от доказаните загуби на кораба, свързани с управлението, които възлизат от 6 до 10% [18, 24, 68].

5. Експлоатацията на разгледаните по-горе адаптивни АП е все още значително сложна и в някои отношения дори превишава по сложност тази на конвенционалните. Освен това за нормалната работа на адаптивния АП е необходимо да се провеждат адаптационни и реадаптационни процедури с продължителност от порядъка на 1-2 часа при всяка промяна на условията - газене на кораба, скорост, хидрометеорологични условия. За тази цел се налага корабът да бъде отклоняван периодически на повече от 10^0 към всеки от двата борда, което изисква напрежение от екипажа, от една страна и загуби на време и скорост, от друга.

6. Експерименталните изследвания на горните ААП показват, че в някои моменти те могат да покажат и неочаквани ефекти – включително отказ, което ги определя като недостатъчно надеждни на този етап.

7. Горните недостатъци до голяма степен са преодолені в МПСАУКК. Но както в горните адаптивни системи, така и в МПСАУКК **влиянието на клатенето на кораба при вълнение на морето не е взето предвид.**

На базата на извършения литературен обзор на тенденциите за развитие на адаптивните и конвенционални автопилоти и направените изводи се достига до заключението, че формулираната пред дисертационната работа цел ще се постигне с решаването на следните задачи:

1. Да се предложи математически модел на клатенето на кораба при вълнение на морето.

2. Да се извършат аналитични изследвания на влиянието на клатенето на кораба върху неговото качество “управляемост” на базата на които да се поставят хипотези.

3. Експериментално да се изследва влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управлението му при силно вълнение. Валидизиране на хипотезите.

4. Да се предложат мерки за намаляване на влиянието на клатенето на кораба и да се предложи блок-схема на адаптивна система за автоматично управление на курса на кораба с отчитане на влиянието на клатенето му при силно вълнение.

ГЛАВА 2

АНАЛИТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА КЛАТЕНЕТО НА КОРАБА ПРИ ВЪЛНЕНИЕ НА МОРЕТО ВЪРХУ НЕГОВОТО КАЧЕСТВО „УПРАВЛЯЕМОСТ“

Предложен е избор на математически модел на вълнението на морето и на влиянието му върху поведението на кораба, движещ се с постоянна скорост на прав курс.

Предложен е подробен теоретичен анализ на влиянието на клатенето на кораба върху свойството му “управляемост”. Доуточнени са хипотезите.

2.1. Теория на вълнението и на влиянието му върху поведението на кораба

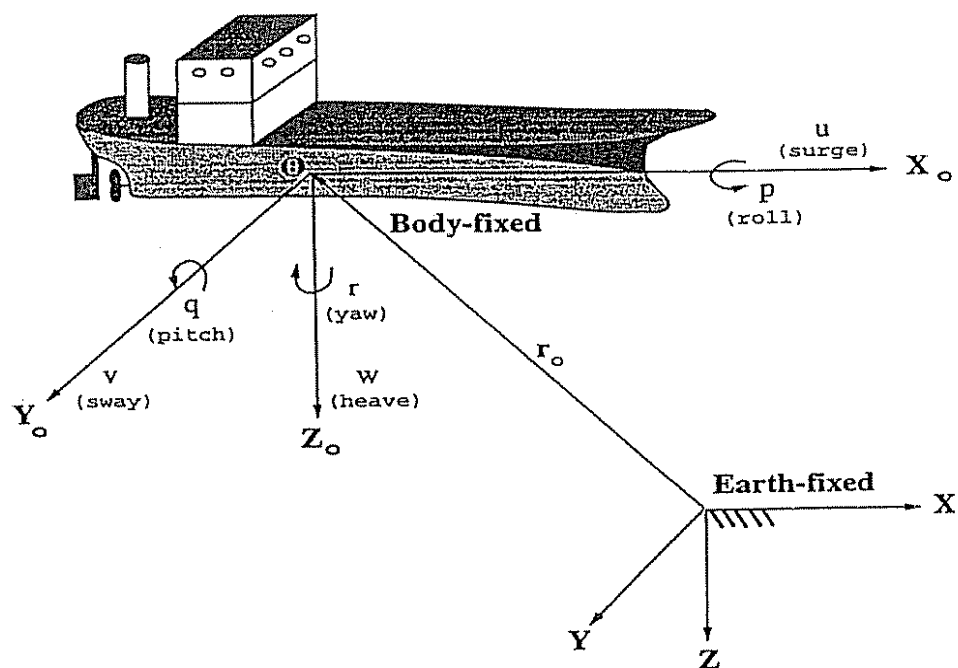
2.1.1. Координатни системи, свързани с кораба

Анализирайки движението на кораба, притежаващ 6 степени на свобода, е удобно да се дефинират две координатни системи, както е показано на фиг. 2.1

Координатната система $X_0Y_0Z_0$ е фиксирана за кораба и се придвижва заедно с него [107, 108].

Центърът на координатната система т. О обикновено се избира така, че да съвпада с центъра на тежестта на кораба. За морските кораби осите на координатната система X_0 , Y_0 и Z_0 съвпадат с главните оси на инерция на кораба и се описват по следния начин:

- ос X_0 – надлъжна ос с посока от т. О към носа на кораба;
- ос Y_0 – напречна ос с посока от т. О към десния борд на кораба;
- ос Z_0 – вертикална ос с посока от т. О към дъното на кораба.



Фиг2.1 Координатни системи и видове премествания на кораба

Движението на една фиксирана за кораба рамка обикновено се описва по отношение на инерциална координатна система. За морските съдове обикновено се приема, че ускоренията на точка, която се намира на повърхността на Земята (няма се предвид върху водната повърхност) могат да се пренебрегнат [110].

В резултат на това една неподвижна спрямо Земята координатна система X, Y, Z може да бъде използвана и да се счита за инерциална [111]. Така позицията и ориентацията на кораба може да бъде описана по отношение на инерциалната координатна система, а линейните и ъглови скорости на кораба могат да бъдат представени по отношение на фиксирана с кораба (корабна) координатна система [112].

2.1.2. Влияние на ветровете вълни върху елевацията на кораба

Процесът на генерация на ветровете вълни е добре известен. Под влияние на вятъра на повърхността на морето започват да се образуват малки вълни. Това от своя страна увеличава силата на притегляне, което

довежда до нарастване на късите вълни. Тези вълни продължават да растат докато накрая не се пречупят и енергията им не се разпръсне [117].

Наблюдавано е, че в процеса на образуване на щорм, той започва с вълни с висока честота, създаващи спектър с максимум на относително висока честота. След като вятърът утихне започват да се формират вълни с ниска честота. Те формират вълнови спектър с максимум на относително ниска честота. Тези вълни са дълги и добре оформени. Ако те, известни като „мъртво вълнение“ [118], си взаимодействат с вълните на друг щорм, може да се наблюдават вълни с два максимума на честотата. За по-голяма простота в изследването е прието, че вълните имат един максимум на честотата [120].

Елевацията на вълната $\zeta(x,t)$ на вълна с дълъг гребен, която е нерегулярна, придвижваща се по ос x , може да бъде изразена като сума от вълнови компоненти:

$$\xi(x,t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(w_i t - k_i x + \varphi_i) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} k_i A_i^2 \cos 2(w_i t - k_i x + \varphi_i) + O(A_i^3) \quad (2.7)$$

където φ_i е произволен фазов ъгъл $(0;2\pi)$ [18].

Линейната теория на вълните представя апроксимация на елевацията на вълните от първи ред. Това съответства на първия член на A_i на формула (2.4). Теорията от втори ред предполага, че трябва да бъде включен допълнителен член $\frac{1}{2} k_i A_i^2$ във формулата за $\zeta(x,t)$ [124].

Така силите, описани с уравненията за първи и втори ред, носят името вълнови сили от първи и втори ред [125].

Вълновата теория от втори ред е подходяща за описание на влиянието на вълните върху корабите, движещи се в условия на вълнение.

Влиянието на вълните от първи ред описва клатенето на кораба, докато уравнението от втори ред описва дрейфа на кораба под действие на вълните [126].

2.2. Анализ на влиянието на клатенето върху качеството “управляемост” на кораба

В т. 1.3 е предложена хипотеза за влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управлението му. Тук се предлага анализ на това влияние в зависимост от вида на клатенето на кораба – напречно, надлъжно и смесено.

2.2.1. Влияние на надлъжното клатене на кораба върху качеството на управлението му по курса

Нека корабът се движи срещу вълнението. В такъв случай той ще извършва килево клатене около напречната си ос O_y с някаква честота ω_y, s^{-1} на изменение на диферента j (ъгълът между надлъжната ос O_x и хоризонта), т. е.:

$$j = j_0 + j_m \sin(2\pi\omega_y \cdot t) \quad (2.16)$$

където:

j_0 - статичен (постоянен) диферент, deg.;

j_m - амплитуда на динамичния диферент, deg.

Когато диферентът нараства ($\Omega_y > 0$), т.е. когато носът се издига, векторът на кинетичния момент \mathbf{H}_y е насочен към десен борд. Ако в такъв момент рулят бъде отклонен надясно, векторът \mathbf{L}_p ще бъде насочен надолу и корабът ще получи тенденция за накреняване надясно, обратно – ако рулят бъде отклонен наляво, когато векторът \mathbf{L}_p е насочен нагоре – корабът ще има тенденция за накреняване наляво. В резултат – срещу управляващия момент, насочен по оста Oz , освен познатите [1,2,3] съпротивителни моменти, ще противодействат и следните два момента: моментът на жirosкопичната реакция \mathbf{R}_z ($\mathbf{R}_z = \mathbf{H}_y \cdot \omega_{px}$) и моментът \mathbf{R}_ω от

хидродинамичната сила, дължаща се на накренияването ($R_{\omega} = Q \cdot \omega_{px} \cdot \Delta t$), където Δt е времето, през което е отклонен руля, а Q е коефициент, зависещ от размерите и скоростта на кораба.

От изразите в скобите се вижда, че допълнителните съпротивителни моменти и загубите, свързани с тях, могат да се избегнат само ако е изпълнено условието $\omega_{px} = 0$, т. е. ако не се прилага управляващ момент. Тъй като това е невъзможно, трябва да се търси компромиса и руля да се използва за необходимите корекции на курса, но в интервалите от време, когато $N_y \approx 0$ (например, $N_y < 0.5 N_{y\max}$).

Когато диферентът намалява ($\Omega_y < 0$), кинетичният момент N_y е насочен към ляв борд. При прилагането на управляващ момент L_p , корабът ще реагира с накренияване в посока, противоположна на посоката на отклонение на руля, т. е. в посоки обратни на горния случай. Това означава, че моментът R_{ω} от хидродинамичната сила ще смени знакът си и реално ще подпомага управляващия момент. Този ефект лесно се обяснява с намаляването на газенето на борда, към който се изменя курса. Срещу управляващият момент ще остане да действа обаче моментът на жирокопичната реакция R_z .

От направените разсъждения следва изводът, че **при надлъжно клатене на кораба корекциите на курса най-целесъобразно е да се извършват малко (например, 1-3 sec) преди горен максимум на диферента ($N_y \approx 0$, $R_z \approx 0$) до няколко секунди след това (диферентът намалява и $R_{\omega} \approx 0$) - Хипотеза I.**

2.2.2. Влияние на напречното клатене на кораба върху качеството на управлението му по курса

Нека корабът плава на курс, при който вълнението е бордово. При такова въздействие на вълните върху кораба, той извършва клатене около

надлъжната си ос Ox (бордово клатене) с някаква честота ω_x, s^{-1} . Кренът i ще се променя по закона:

$$i = i_0 + i_{max} \sin(2\pi\omega_x t) \quad (2.19)$$

където:

i_0 - статичния (постоянния) крен на кораба, най-често $i_0 = 0, \text{deg}$;

i_{max} - амплитудата на динамичния крен, deg .

Когато кренът i се променя надясно, векторът на кинетичния момент H_x е насочен към носа на кораба. Ако рулят бъде отклонен надясно и към кораба се приложи управляващ момент L_p , насочен надолу, корабът ще реагира с прецесионно намаляване на диферента, т. е. с навеждане на носа. Ако рулят бъде отклонен наляво и приложи управляващ момент L_p , насочен нагоре, корабът ще реагира с прецесионно увеличаване на диферента, т.е. с издигане на носа. Ъгловата скорост на изменение на диферента $\omega_{py} = L_p / H_x$ е твърде малка, но достатъчно голяма, за да се реализира моментът на жirosкопична реакция R_z , който да компенсира управляващия момент L_p ($R_z = H_x \cdot \omega_{py} = L_p$). Този ефект е толкова по-силно изразен, колкото е по-голям кинетичния момент H_x , т. е. когато корабът преминава през равновесното си положение ($i = i_0 \approx 0$). Обратно – когато кренът е максимален ($i = i_0 \pm i_{max}$), кинетичният момент е нула, корабът реагира на управляващия момент L_p и променя курса си.

Когато кренът се променя наляво, векторът H_x е насочен към кърмата. При отклонения на руля, корабът ще реагира по аналогичен начин само, че в противоположни посоки на горния случай.

Хипотези Па и Пб: При напречно (бордово) клатене на кораба е най-целесъобразно корекциите на курса да се извършват когато корабът е максимално накрени ($H_x \approx 0, R_z \approx 0$), като корекциите на курса надясно да се извършват няколко секунди преди максималното му накрениване наляво

(Хипотеза Па), и обратно – корекциите на курса наляво да се извършват няколко секунди преди максималното му накреняване надясно (Хипотеза Пб).

По такъв начин се постигат едновременно два ефекта: избягва се противодействието на момента на жirosкопичната реакция и не се допуска увеличаване (колкото и малко да е то) на хидродинамичната съпротивителна сила от прецесионно намаляване на диферента.

2.2.3. Влияние на едновременното клатене на кораба относно двете му хоризонтални оси върху качеството на управлението му по курса

В някои случаи, особено при относително малките кораби, се наблюдава едновременно клатене на кораба относно двете му хоризонтални оси, т. е. едновременно бордово и килево клатене. В такива случаи е най-целесъобразно да се обединят направените по-горе изводи (Хипотеза П). Още повече, че при правилно натоварване на кораба, напречното и надлъжното клатене се редуват, като смяната на осите на клатене става около моментите на максимумите на крена/диферента.

ИЗВОД:

Удовлетворяването на препоръчаните действия при ръчно управление на кораба е сравнително трудна и практически невъзможна задача. При автоматичното управление и особено при цифровите адаптивни системи решаването на тази задача не представлява никакъв проблем. Достатъчно е за тази цел на входа на системата да постъпва надеждна и достатъчно точна информация за **крена i** и за **диферента j** на кораба.

ГЛАВА 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОВЕРКА (ВАЛИДИЗИРАНЕ) НА ПРЕДЛОЖЕНИТЕ В ГЛАВА ВТОРА ХИПОТЕЗИ

3.1. Организация на експеримента за изследване на влиянието на клатенето на кораба върху свойството му „управляемост“

Основната цел на изследването е влиянието на клатенето върху способността на кораба да бъде управляван с основния управляващ орган – руля, т.е. върху качеството “управляемост” на кораба.

Допълнителни цели на изследването са: валидизиране на хипотезите, представени в т. 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3.

Експериментът е проведен на тренажор “NT-PRO 5000“ с три кораба: Обект 1 (**Carcarrrier**), Обект 2 (**Bulk carrier**) и Обект 3 (**Oil tanker**) на прав курс с пълен ход при две степени на вълнението (при отсъствие на вълнение и при значително вълнение над 3-4 бала) и за три амплитуди на отклонения на руля, а именно:

а/ 5 градуса;

б/ 10 градуса;

в/ 15 градуса.

Експериментът с корабите при спокойно време е необходим за да се получи информация за реалното им свойство „управляемост“. С получените резултати за реакцията на кораба при различни отклонения на руля ще се сравнят резултатите от експеримента на кораба при клатенето му от вълнението.

Трите обекта са избрани с различно свойство “Управляемост” и с различни параметри, като обекти на автоматично управление.

Район на плаване: **Открито море**, при следните хидрометеорологични условия:

А. **Вятър** – 1-2 бала, море – вълнение по-малко от 1 бал, видимост добра, слаб/незначителен динамичен крен;

Б. **Море** – 5-8 бала, вятър – 2-3 бала, видимост 5-6 мили, динамичен крен/диферент > 6-10 градуса.

При „условие Б“ корабът плава на предварително избрания курс, при който динамичния крен/диферент е максимален.

За целите на изследването, се измерват интервалите от време Δt между моментите на отклоненията на руля и моментите на началото на промяната на курса за трите значения на δ : 5° , 10° и 15° . Задаването на отклоненията на руля (при „условие Б“) се извършват: **първо** - около 2 sec преди крена/диферента да е станал 0° ; **второ** - около 2 sec преди крена/диферента да е станал максимум. Изследва се при кой от двата случая корабът ще бъде по-чувствителен към отклоненията на руля.

При всяко отклонение на руля с два секундомера се измерва и записва в съответната таблица (от табл. 3.1 до табл. 3.6) **интервала Δt между момента на задаването на отклонението на руля и началото на промяната на курса. Времето $\Delta t_p < \Delta t$ между задаването на отклонението δ и отработването на руля се приема за константа. Времето Δt_p се измерва преди всеки експеримент с точност 0,2 sec.**

Единичните измервания са извършени след предварително успокояване на кораба на избрания курс, което (предвид сложните хидрометеорологични условия) в някои случаи продължи 6-10 минути. Това налага ограничаване до 12 измервания за всеки отделен случай.

За експерименталното изследване на корабите при спокойно време се получават по 6 реда за всеки от трите обекта или общо $3 \times 6 = 18$ реда. За експериментите при силно вълнение, комбинациите са два пъти повече – за всеки обект се получават по 12 реда или общо $3 \times 12 = 36$ реда. Общо за

целия експеримент са извършени $50 \times 12 = 600$ наблюдения, което се реализира с над 80 часа работа на навигационния тренажор TRANSAS NT Pro 5000.

3.2. Анализ на резултатите от експериментите, проведени с избраните обекти

3.2.1. Анализ на резултатите от експеримента с Обект 1 – Carcarrier

А) При спокойно море – вълнение на морето ≤ 1 бал;

Основни характеристики на кораба: Водоизместване - 46 100 GRT при пълно натоварване, Length – 214 m, Breadth – 32, Engine – (1 x 18280 kw), газене – F - 9,70 m, Aft - 9,70 m, стъпката на винта – PS Pitch;

Район на плаване – Черно море;

Дистанция до брега – 20 n.mi.;

Курс на кораба: 336° , постоянен;

Скорост на кораба: 17 kn, експлоатационна (номинален “пълен ход”);

Хидрометеорологични условия: Вълнение на морето – посока 0/сила 1бал, вятър – посока 0/сила 1бал, максимална амплитуда на крена - 0° , динамичен крен/диферент - 0° .

Времето Δt_p между задаването на отклонението δ и отработването на руля за $\delta = 5^\circ$ е 2,1 сек., за $\delta = 10^\circ$ е 3,62 сек., за $\delta = 15^\circ$ е 5,23 сек.

Резултатите от експеримента са поместени в таблица 3.1 от дисертационния труд

От получените резултати се прави анализ, че при отсъствие на вълнение и съответно клатене, кораба е толкова по-чувствителен, колкото по-голямо е отклонението на руля, което е логично. При този обект закъснението на реакцията на кораба Δt по отношение на отклоненията на

руля е в границите 6,5 - 8,8 sec, като най-малката стойност на Δt е при $\delta = 15^\circ$, а най-голямата – при $\delta = 5^\circ$. Ако се отчете и времето Δt_p за отклонението на руля до зададената стойност, горната зависимост на Δt от големината на δ е по-категорична (при $\delta = 5^\circ$ $\Delta t_{cp} - \Delta t_p \approx 6,5$ sec., а при $\delta = 15^\circ$ - $\Delta t_{cp} - \Delta t_p \approx 1,7$ sec.).

Достига се до извода, че чувствителността на кораба по отношение на отклоненията на руля при $\delta = 15^\circ$ е почти четири пъти по-голяма от чувствителността му при $\delta = 5^\circ$.

Б. При силно вълнение на морето (> 5 бала) и голям динамичен диферент на кораба

Основни характеристики на кораба: Водоизместване - 46 100 GRT при пълно натоварване, Length – 214 m, Breadth – 32, Engine – (1 x 18280 kw), газене – F - 9,70 m, Aft - 9,70 m, стъпката на винта – PS Pitch;

Район на плаване – Черно море;

Курс на кораба: 345° , постоянен;

Скорост на кораба: 17 kn, експлоатационна (номинален “пълен ход”) – моментна скорост – 12 kn;

Вълнение на морето – посока 345° /сила 6 бала, вятър – посока 0/сила 0, максимална амплитуда на крена – $1-2^\circ$ (крена се променя много бавно с много голям период от порядъка над 10 минути и не оказва влияние на управлението на курса в разглеждания смисъл), амплитуда на диферента - $12^\circ - 15^\circ$, среден период на клатене – 8,50 sec.

Времето t_p между задаването на отклонението δ и отработването на руля за $\delta = 5^\circ$ е 2,1 сек., за $\delta = 10^\circ$ е 3,62 сек., за $\delta = 15^\circ$ е 5,23 сек.

Резултатите от експеримента са поместени в таблица 3.2. от дисертационния труд

При този експеримент с „Обект 1“ при силно надлъжно клатене (диферентът достига до $12 - 15^\circ$) интерес представлява, дали при отклонения на руля преди нулата или преди Мах корабът ще реагира по-бързо на отклоненията на руля? От резултатите в таблица 3.2 се прави анализ, че:

- при $\delta = 5^\circ$ корабът не „слуша“ руля и не променя курса си;

- при $\delta = 10^\circ$ кораба „слуша“ руля, като интервалът Δt_{cp} за отклонения на руля около 2 sec преди Мах ($\Delta t_{cpjm} = 5,72 - 5,79$) е с 2-3 sec по-малък от аналогичния интервал при отклонения на руля около 2 sec преди преминаване през нулев диферент, когато $\Delta t_{cpj0} = 7,83 - 8,61$ sec.;

- при $\delta = 15^\circ$ корабът е най-чувствителен на отклоненията на руля, като интервалът Δt_{cp} за отклонения на руля около 2 sec преди Мах ($\Delta t_{cpjm} = 5,47 - 5,93$) е с над 3 sec по-малък от аналогичния интервал ($\Delta t_{cpj0} = 7,83 - 8,61$ sec.) при отклоненията на руля малко преди $j = 0$;

- заслужава да бъде отбелязан и фактът, че както за $\delta = 10^\circ$, така и за $\delta = 15^\circ$, Δt_{cpjm} е по-малък с повече от 1 sec от интервала Δt_{cp} , измерен при същите отклонения на руля в спокойно море (Табл. 3.1) и равен кил на кораба. Този факт ни дава основание за извода, че: клатенето на кораба може да бъде полезно за управлението на кораба. Достатъчно за това е то да бъде целесъобразно оценявано и отчитано.

Направеният анализ на резултатите от експеримента с „Обект 1“ потвърждава и с това прави валидна Хипотеза I.

Обобщени изводи от анализа на експеримента с „Обект 1„:

1. От получените резултати се вижда, че при отсъствие на вълнение и съответно клатене, кораба е толкова по-чувствителен, колкото по-голямо е

отклонението на руля. Чувствителността на кораба по отношение на отклоненията на руля при $\delta = 15^\circ$ е почти четири пъти по-голяма от чувствителността му при $\delta = 5^\circ$.

2. При вълнение на морето над 3-4 бала, корабът не ”слуша” руля при малки стойности на δ (например, $\delta = 5^\circ$).

3. Около момента на максимума на динамичния диферент корабът реагира със закъснение ($\Delta t_{\text{срjм}} = 5,72 - 5,79$) на отклоненията на руля, което е дори по-малко (с повече от 1 sec) от закъснението на реакциите му при отсъствие на вълнение. Обратно, около моментите на преминаване на кораба през равен кил, закъснението на реакцията на кораба е съизмеримо с периода на клатенето. Факт, който доказва, че отклоненията на руля са целесъобразни (полезни) само около момента на максимален и положителен диферент на кораба. През останалото време от периода на клатене те са вредни, снижават значително скоростта, следователно водят до сериозни загуби на кораба и корабособственика. Резултатите от направения експеримент с ”Обект 1” потвърждават Хипотеза I.

3.2.2. Анализ на резултатите от експеримента с „Обект 2“ – Bulk carrier

А) При спокойно море

По-важни характеристики на кораба: водоизместване – 76 800 GRT при пълно натоварване, Length – 290 m, Breadth – 46, Engine – (1 x 14720 kw), газене - F-5,70 m Af - 9,30 m, type of propeller – FPP;

Район на плаване – Черно море;

Дистанция до брега – 20 n.mi.;

Курс на кораба - постоянен - 90° ;

Скорост на кораба: 16 kn, експлоатационна (номинален ”пълен ход”);

Вълнение на морето – посока 0/сила 0, вятър – посока 0/сила 0, максимална амплитуда на крена - 0°, среден период на клатене – 0 s.

Времето между задаването на отклонението и отработването на руля се приема за константа, като при отклонение за 5° е 1,64 сек., за 10° е 2,45 сек., за 15° е 3,45 сек.

Резултатите от експеримента с „Обект 2“ са поместени в таблица 3.3 от дисертационния труд

Изводите от този експеримент с „Обект 2“ са аналогични на направените изводи за „Обект 1“ при плаване на прав курс при спокойно време и отсъствие на клатене.

Б. При силно вълнение > 5 бала

Обект 2 – Bulk carrier, водоизместване – 76 800 GRT пълно натоварване, Length – 290 m, Breadth – 46, Engine – (1 x 14720 kw), газене - F-5,70 m Af - 9,30 m, постоянен курс - 0°, type of propeller – FPP;

Дистанция до брега - 20 n.mi.;

Район на плаване – Черно море;

Скорост на кораба: 16 kn, експлоатационна (номинален “пълен ход”) моментна -12 kn;

Вълнение на морето – посока 80°/сила 5-6 бала, вятър – посока 0/сила 0, максимална амплитуда на крена от 6°до 8°, среден период на клатене – 10,3 s.

Времето Δt_p между задаването на отклонението δ и отработването на руля се приема за константа, като при отклонение за 5° е 1,64 сек., за 10° е 2,45 сек., за 15° е 3,45 сек.

Резултатите от експеримента с „Обект 2“ са поместени в таблица 3.4 от дисертационния труд

Анализът на получените резултати (Δt_{cp}) от експеримента с „Обект 2“ - Bulk carrier при вълнение на морето – над 3-4 бала и динамичен крен – 7-8° дават основание за следните изводи:

- отклоненията на руля с 5°, както към л/б, така и към д/б не се изпълняват, т.е. кораба не „слуша“ руля;

- отклоненията на руля с 10°, зададени около 2 sec преди преминаване на кораба през средно положение ($i = 0$) също не се изпълняват (или се изпълняват след повече от 12 sec, когато кренът вече е минал през единия от максимумите си);

- отклоненията на руля с 10°, зададени около 2 sec преди преминаване на кораба през максимално накренияване се изпълняват със закъснение Δt_{cp} от 5,9 до 7,3 sec, като по-малкото закъснение ($\Delta t_{cp}=5,9$ s) е при отклонение на руля към противоположния на крена борд, т.е., когато корабът е накрени надясно, а на руля е зададено отклонение наляво, и обратно;

- отклоненията на руля с 15°, зададени около 2 sec преди преминаване на кораба през средно положение ($i = 0$) се изпълняват с голямо закъснение - $\Delta t_{cp} = 9,26$ sec, което се различава само с 1 секунда от периода на клатенето на кораба – 10,3 sec.;

- отклоненията на руля с 15°, зададени около 2 sec преди преминаване на кораба през максималното му накренияване, се изпълняват със закъснение 5,32 до 5,94 sec, като по-малкото закъснение ($\Delta t_{cp} = 5,32$ sec) е при отклонение на руля към противоположния на крена борд, т.е., когато корабът е накрени надясно, а на руля е зададено отклонение наляво, и обратно;

- и при този експеримент (както при експеримента с „Обект 1“) се наблюдава много полезният ефект на съизмеримост на реакциите (чувствителността) на кораба по отношение на отклоненията на руля с реакциите му при плаване в тихи води, без клатене.

Горните изводи дават основание да се приеме, че при този обект **Хипотезите Па и Пб** са валидни. От своя страна, достоверността на двете хипотези е достатъчно условие да се приеме, че и **Хипотеза Ш** е валидна.

3.2.3. Анализ на резултатите от експеримента с „Обект 3“

А) При спокойно море

По-важни характеристики на „Обект 3“ – Oil tanker;

Водоизместване -77 100 GRT при пълно натоварване, Length – 243 m, Breadth – 32, Engine – (1 x 13610 kw), газене - F-12,50 m, Af - 12,50 m, стъпката на винта – FPP;

Район на плаване - Средиземно море;

Дистанция до брега - 20 n.mi.;

Курс на кораба – постоянен, 0°;

Скорост на кораба: 15 kn, експлоатационна (номинален “пълнен ход”);

Хидрометеорологични условия: вълнение на морето – посока 0/сила 0, вятър – посока 0/сила 1, максимална амплитуда на динамичния крен/диферент - 0, среден период на клатене - 0 s.

Времето между задаването на отклонението и отработването на руля се приема за константа, като при отклонение за 5 е 2,73 сек., за 10 е 4,21 сек., за 15 е 6,26 сек.

Резултатите от експеримента с „Обект 3“ са поместени в таблица 3.5. от дисертационния труд

Изводите от анализа на резултатите от експеримента с „Обект 3“ при спокойно време и отсъствие на клатене на кораба са аналогични на изводите, направени за първите два обекта

Б. При бурно море – **7-8 бала;**

Район на плаване – Средиземно море;

Курс на кораба - постоянен курс - 0° ;

Скорост на кораба: 15 kn, експлоатационна (номинален “пълнен ход”) моментна -12 kn;

Хидрометеорологични условия: Вълнение на морето – посока 80° /сила 7-8 бала, вятър – посока 0/сила 1-3 , максимална амплитуда на крена - 6° - 8° , среден период на клатене – 12-14 s.

Времето между задаването на отклонението и отработването на руля се приема за константа, като при отклонение за 5° е 2,73 сек., за 10° е 4,21 сек., за 15° е 6,26 сек.

Резултатите от експеримента с „Обект 3“ са поместени в таблица 3.6. от дисертационния труд

Анализът на резултатите от експеримента с „Обект 3“ **потвърждава изводите, направени за влиянието на динамичния крен на кораба върху неговото качество „управляемост“.** И при този обект **Хипотезите Па и Пб се потвърждават.**

Новото, което се забеляза при експеримента с „Обект 2“, но тук – при експеримента с „Обект 3 “ се прояви с пълна сила, е високата устойчивост на кораба относно надлъжната му ос, дължаща се на динамичния му крен, което го прави стабилен на курса. Той трудно се управлява, отклоненията на руля с 10 - 12° не му влияят, но в същото време, той не рискае и поддържа постоянен курс. Това означава, че колебанията на курсоуказателя (симетрични на средния курс) трябва да се шунтират, защото са лъжливи. В такъв случай очевидно трябва да се отработи само сигнал по интеграла от показанията на компаса за период на интегриране от порядъка на часове, а не от порядък на 2-3 периода на рискаене на кораба относно зададения курс, както е при сега действащите САУКК.

ИЗВОДИ

1. Проведеният експеримент с “Обект 1” потвърди Хипотеза I, а именно, че: при относително голям динамичен диферент корабът “слуша” руля само в малък интервал от време Δt , когато диферента е максимален и положителен.

2. Проведените експерименти с “Обект 2” и “Обект 3” потвърждават Хипотеза IIa и Хипотеза IIб, а именно, че: при сравнително голям динамичен крен корабът “слуша” руля само в малък интервал от време Δt , когато крена е максимален, като корекциите на курса надясно е най-добре да се извършват при максимален крен наляво, и обратно.

3. Експериментите и при трите обекта разкриват скрит положителен ефект, а именно че: ако отклоненията на руля се извършват само в посочените в горните изводи интервали (Δt), управлението на кораба може да бъде дори по-добро,отколкото при спокойно море.

4. Изпитанията на трите обекта при силно вълнение и включено автоматично управление на курса (без да се отчита влиянието на клатенето на кораба) показват следните отрицателни ефекти:

- автопилота задава на руля отклонения до 35° ;
- скоростта на кораба спада до нива, при които не може да бъде управляван автоматично.

5. Изследването на точността и закона на разпределение на получените при експериментите редове (Δt) показва, че те не са на желаното ниво. Фактът, че доверителните интервали за редовете (Δt), получени при преминаване на кораба през нулата и доверителните интервали за редовете (Δt), получени при преминаване на кораба през максимума на крена/диферента не се застъпват, дават основание да се вярва на получените резултати и на произлизащите от тях ИЗВОДИ.

6. Резултатите от екпериментите с трите обекта потвърдиха тезата, че отклоненията на руля (колкото и големи да са те) извън интервала от време около максимума на крена/диферента са излишни, т.е. не се отработват от обекта. Те обаче понижават скоростта на кораба 2 до 3 пъти, което е съпроводено с големи енергийни загуби и затормозяване на управлението, включително до загуба на управление.

ГЛАВА 4

МЕРКИ ЗА ИЗКЛЮЧВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА КЛАТЕНЕТО НА КОРАБА ВЪРХУ КАЧЕСТВОТО НА УПРАВЛЕНИЕТО МУ. БЛОК-СХЕМА НА СИСТЕМАТА

От направените разсъждения и изводи във Втора и Трета глави се разбира, че изключването на влиянието на клатенето на кораба се свежда до:

1. Ограничаване на отклоненията на руля през временните интервали, когато **кинетичният момент H** на кораба е твърде голям. т. е., докато предизвиканият от **H вертикален момент на жirosкопична реакция R_z** , насочен винаги срещу **управляващият момент L_p** , на практика го компенсира.

2. Ограничаване на отклоненията на руля, когато това е съпроводено с увеличаване на хидродинамичната съпротивителна сила от прецесионното наклоняване на кораба.

4.1. Мерки за изключване на влиянието на надлъжното клатене

На фиг.4.1 моментите на екстремумите на ъгъла на диферента j са означени, както следва:

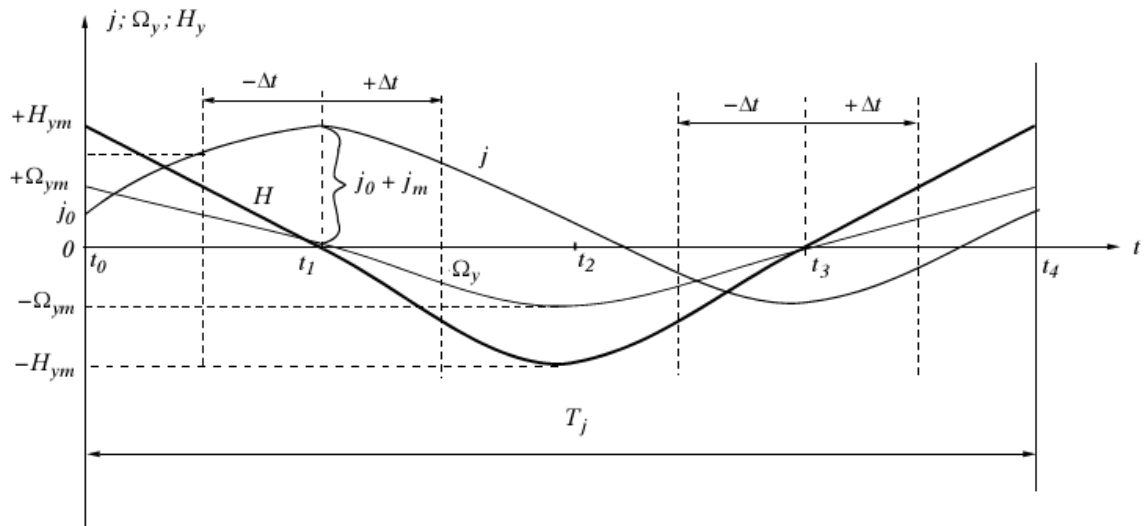
$t_0 = 0$ при $j = j_0$; $\Omega_y = +\Omega_{ym}$ (динамичният диферент е 0 и нараства с максимална скорост);

$t_1 = T/4$ при $j = j_0 + j_m$; $\Omega_y = 0$ (динамичният диферент е максимален – положителен);

$t_2 = T/2$ при $j = j_0$; $\Omega_y = -\Omega_{ym}$ (динамичният диферент е 0 и намалява с максимална скорост);

$t_3 = 3T_j/4$ при $j = j_0 - j_m$; $\Omega_y = 0$ (диферентът е максимален – отрицателен, т.е. минимален);

$$t_4 = 4T_j/4 = t_0 = 0.$$



Фиг. 4.1 Моменти на екстремумите на ъгъла на диферента j

Мярката за изключване на влиянието на диферентното клатене върху качеството на управлението се свежда до изпълнение на условието:

$$\delta \begin{cases} \delta_{opt} \\ \delta_{cp} \end{cases} \begin{cases} - \text{ в интервала } t_1 < t < t_1 + \Delta t; \\ - \text{ през остоналата част от периода } T_j, \end{cases} \quad (4.1)$$

където:

$$\delta_{opt} = K_{1opt} \cdot \psi + K_{2opt} \cdot d\psi/dt + K_{3opt} \cdot \int \psi dt; \quad (4.2)$$

$$\delta_{cp} = K_{3opt} \cdot \int \psi dt \quad (4.3)$$

Δt - интервал, през който е целесъобразно да се задават отклонения на руля за корекция на курса без загуби ($\Delta t < T_j/4$, например - $\Delta t = T_j/6$);

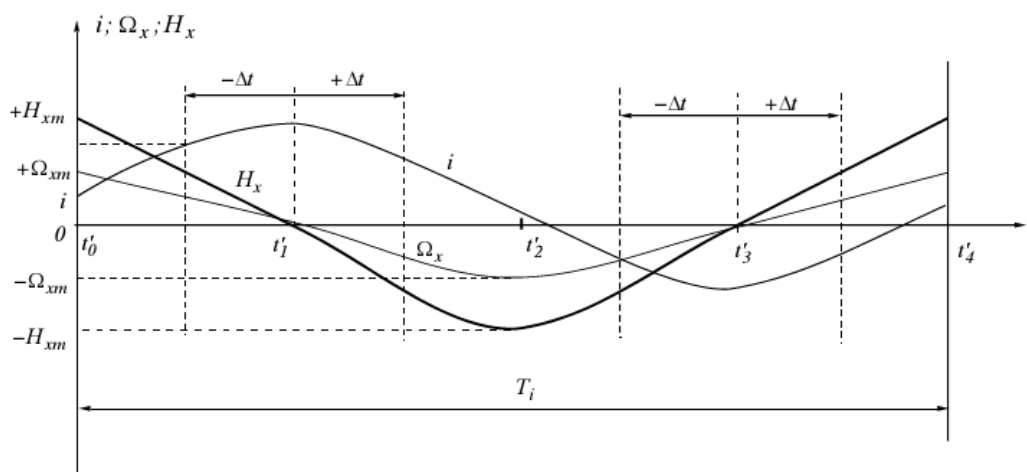
T_j - период на килевото клатене.

В някои случаи интервалът на пропускане Δt може да се окаже много тесен за ефективното управление на курса. В такива случаи моментът R_ω от съпротивителната сила, предизвикана от прецесионното наклоняване може да бъде пренебрегната и условието за изключване на влиянието на диферентното клатене да се сведе до вида:

$$\delta \begin{cases} \delta_{opt} & \text{- в интервалите: } t_1 - \Delta t < t < t_1 + \Delta t \\ \delta_{cp} & \text{- през останалата част от периода } T_j \end{cases} \quad (4.4)$$

4.2. Мерки за изключване на влиянието на напречното клатене

В съответствие с **Хипотезите II а и II б**, предложени в т. 2.2.2 на глава Втора и потвърдени в глава Трета, мерките за изключване на влиянието на бордовото клатене се свеждат до следните ограничения на отклоненията на руля (фиг. 4.2):



Фиг. 4.2 Моменти на екстремумите на ъгъла на крен i :

$$\delta \begin{cases} \delta_{opt} \\ \delta_{cp} \end{cases} \begin{array}{l} - \text{ в интервалите: } t_1' - \Delta t' < t < t_1'; \quad t_3' - \Delta t' < \\ t < t_3' \\ - \text{ през останалата част от периода } T_i \end{array} \quad (4.5)$$

където:

t_1' ; t_3' - моменти на максималните накрения на кораба ($i = \pm i_{max}$) съответно – към десния (t_1') и към левия борт (t_3');

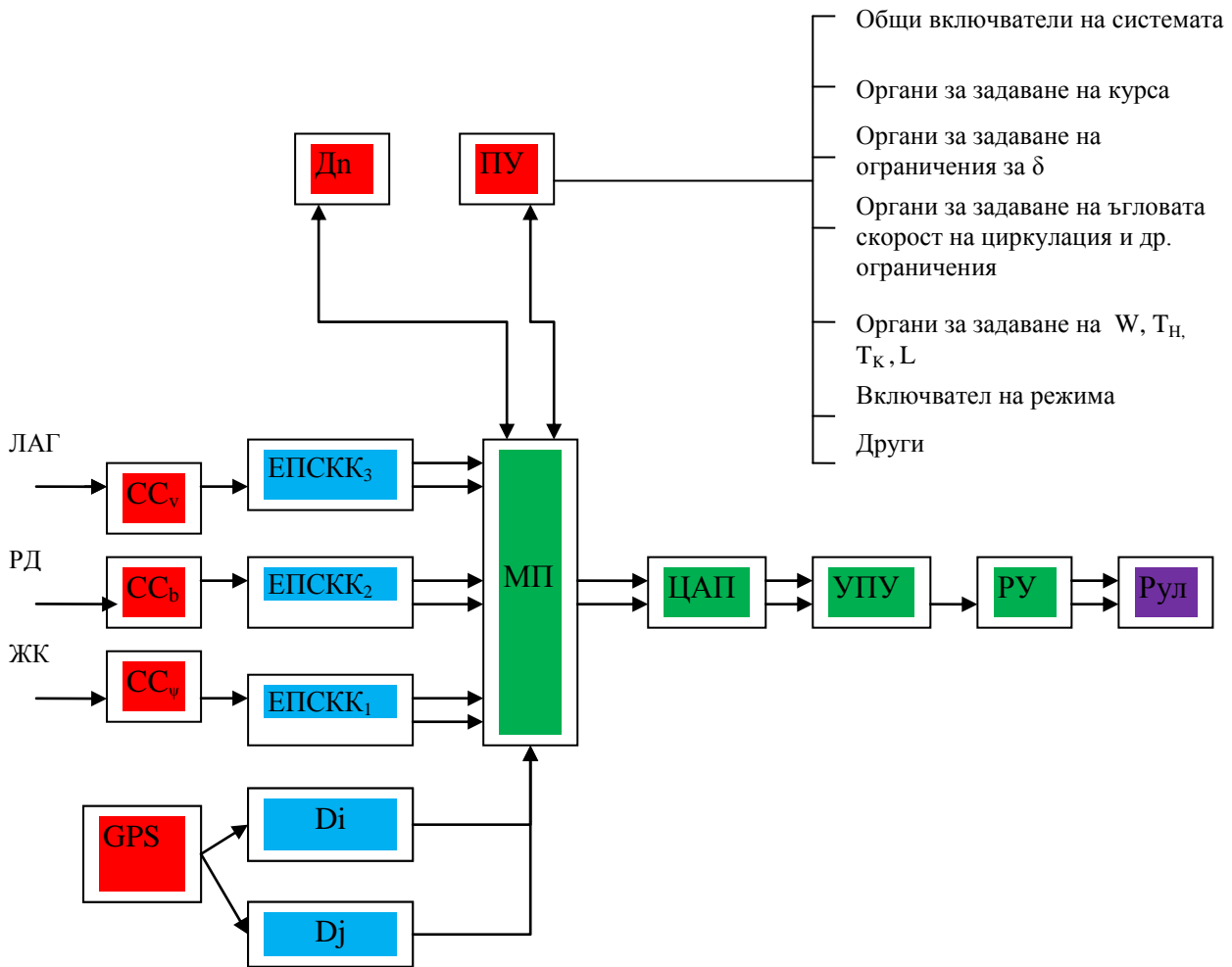
$\Delta t'$ - интервал, през който е целесъобразно да се задават отклонения на руля за корекция на курса без загуби ($\Delta t' < T_i/4$, например $\Delta t' = T_i/8$);

T_i - период на бордовото клатене.

Очевидно е, че условията (4.1.), (4.4.) и (4.5) могат да се изпълняват от **филтри**, които да пропускат “командата за отклонение на руля” (U_{opt}) за реализацията на δ_{opt} само през време на посочените интервали и да възстановяват руля “в средата” (δ_{cp}) през останалото време в границите на един период на клатене. Управлението на филтрите ще се извършва от датчиците за крена (креномер) и за диферента (диферентомер).

При съвременните цифрови системи за автоматично управление на курса на кораба тези филтри могат да бъдат част от софтуера на системата.

4.3. Структурна схема на адаптивната система



Фиг.4.3 Блок схема на цифрова адаптивна ситема, в която постъпва информация за диферента и крена на кораба

На фиг. 4.3 е показана структурна схема на цифрова адаптивна ситема, в която **постъпва информация за диферента и крена на кораба, включително** за динамичните им стойности.

Информацията за крена и диферента се използва за:

1. Извършва се проверка дали крена i или диферента j е по-голям от предварително зададена стойност (например 5°).

2. При положителен отговор, се **определя полупериода на крена/диферента ($T_{i/j}/2$)**, като се измерва интервала между две съседни преминавания на крена/диферента през нулата.

3. Отклоненията на руля се регулират съгласно с условия (4.1) или с (4.4) при по-голям динамичен диферент и респективно, съгласно с (4.5) при по-голям динамичен крен, с което се предотвратяват излишните отклонения на руля.

Обръща се специално внимание при изграждането на микропроцесорната система на адаптивния автопилот на следните два момента:

.

ОБОБЩЕНИ ИЗВОДИ

1. Изследването на проблемите, свързани с автоматичното управление на курса на кораба при лоши хидрометеорологични условия потвърждава сериозните противоречия на специалистите при подхода им за тяхното решаване.

2. Обзорът на по-известните адаптивни системи за управление на курса убеждава, че в тях не се отчита влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управлението, а се използва “оптимална функция”, която е в зависимост от степента и честотата на рискаенето на кораба.

3. Аналитичното и експерименталното изследване на влиянието на динамичния крен/диферент показват убедително, че при вълнение над 5 бала това влияние е значително и води до сериозни загуби, които в никакъв случай не бива да се пренебрегват.

4. Предложените мерки за намаляване на влиянието на клатенето и примерната структурна схема са основа за повишаване на ефективността на адаптивните системи чрез минимизиране на излишните отклонения на руля и на съпровождащите ги сериозни загуби.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главните причини за проблемите на съвременните адаптивни системи се свеждат до целесъобразността на избрания критерий за оптимално управление и до несъобразяването с влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управлението му. Доколкото възможностите за решаване на първият проблем при адаптивните системи, (независимо от различните подходи на създателите им) са изчерпани, без да се реализират очакваните икономии, то убеждението е, че основните загуби, свързани с управлението на курса на кораба, се дължат на втория проблем – излишните (и много големи) отклонения на руля през по-голямата част от периода на клатене при вълнение и рязкото падане на скоростта като резултат. Тези разсъждения дават основание да се извърши планирания експеримент (глава Трета), за да се провери верността на хипотезите. Резултатите от експеримента с три обекта с различни свойства “управляемост” не само потвърдиха изложените хипотези, но те разкриха факта, че при използване на управляващия орган само около моментите на максимален крен/диферент, курса на кораба се управлява по-добре, отколкото при отсъствие на клатене.

От изложението в глави Втора и Трета се достига до извода, че филтрирането на излишните отклонения на руля е крайно необходимо и полезно. За тази цел е нужна съвсем малка промяна във вече разработените микропроцесорни адаптивни системи (като МПСАУКК например), към микропроцесорната система на която да постъпва коректна информация за крена и диферента (глава Четвърта), която да “оживява” съответните филтри (логически алгоритми), в линията на т.нар. “команда за отклонение на руля” в адаптивната система.

НАУЧНИ ПРИНОСИ:

1. Определено е влиянието на клатенето на кораба при силно възбуждане върху управляемостта му, в зависимост от знака на крена/диферента.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ:

1. Експериментално е доказано влиянието на силния динамичен крен върху свойството “управляемост” на кораба:

А) корабът добива допълнителна устойчивост относно надлъжната си ос;

Б) корекциите на курса надясно е най-добре да се извършват при максимален крен наляво;

В) корекциите на курса наляво е най-целесъобразно да се извършват при максимален крен надясно;

С) отклоненията на руля при преминаване на кораба през нулев крен са абсолютно излишни.

2. Експериментално е доказано влиянието на силния динамичен диферент върху свойството “управляемост” на кораба:

а) корекцията на курса е най-целесъобразно да се изпълнява при максимален положителен диферент;

б) отклоненията на руля през останалата (по-голяма) част от интервала на клатенето T_j са абсолютно излишни и вредни.

3. Създадена е структурна схема на адаптивна система за управление на курса на кораба, с отчитане влиянието на клатенето на кораба върху качеството на управление.

НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Конаков Л., КРАТЪК АНАЛИЗ НА АДАПТИВНИТЕ СИСТЕМИ ЗА АВТОМАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА КУРСА НА КОРАБА, Научна сесия с международно участие, ВВМУ “Н. Й. Вапцаров”, Варна, 2013.

2. Конаков Л., Вълчев Г., ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОРАБ ТИП "CAR CARRIER" ЗА ВЛИЯНИЕ НА НАДЛЪЖНОТО КЛАТЕНЕ ВЪРХУ КАЧЕСТВОТО МУ УПРАВЛЯЕМОСТ - АНАЛИЗ И ИЗВОДИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТА, депозиран доклад за участие в Международна научна конференция „Технологии и наука за устойчиво морско развитие, Варна, май, 2015.

3. Конаков Л., ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОРАБИТЕ ТИП "BULK CARRIER" И "OIL TANKER" ЗА ВЛИЯНИЕ НА НАПРЕЧНОТО КЛАТЕНЕ ВЪРХУ КАЧЕСТВОТО ИМ УПРАВЛЯЕМОСТ - АНАЛИЗ И ИЗВОДИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТА, депозиран доклад за участие в Международна научна конференция „Технологии и наука за устойчиво морско развитие, Варна, май, 2015.

Дисертационният труд се състои от 134 страници

Основен текст - 121 стр.

Брой на литературните източници - 132

Брой на фигурите - 25

Брой на таблиците - 10

Брой на публикациите по дисертацията -3

Защитата на дисертационния труд ще се състои на отч. в зала на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”

Рецензиите, становищата на членовете на научното жури и авторефератът са публикувани в сайта на училището www.naval-acad.bg

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на факултет „Навигационен” на ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”, стая №, Адрес: Варна, ул. ”Васил Друмев” №73