

Metod och anordning för undvikande och dämpning av ett fartygs rullning

Tekniskt område

Föreliggande uppfinning relaterar till en metod och en anordning för att undvika och dämpa rullning hos ett maskindrivet (marint) fartyg som framdrivs med propeller.

Bakgrund

Rullning är en välkänd säkerhetsrisk för fartyg. Den kan leda till förlust av containers, hög belastning på surningen av lasten och dålig komfort för passagerare och besättning. En fartygsrullning kan beskrivas som den periodiska rörelsen hos en pendel. Den motsvarande periodtiden kallas fartygets naturliga rullperiod. När ett fartyg får en lutning, orsakat av t.ex. en våg flyttar sig fartygets flytcentrum i tvärskeppsled och ett rätande moment uppstår som stabiliserar fartyget.

Oftast dämpas den pendel-relaterade rullningen ut snabbt på grund av det rätande momentet och friktionskrafterna mellan fartygsskrovet och vattnet. Rullning förorsakas av störningar från omgivningen såsom vågor, vind eller strömt vatten. I vissa fall kan dessa störningar ha mycket låg energi, men ändå successivt utveckla en rullning med hög amplitud genom en energiöverföringsmekanism mellan två tillstånd. Exempelvis är en känd, farlig variant av en kritisk rullning så kallad ”parametrisk rullning”, som uppstår när havsvågorna längs fartyget har en periodtid som i ett visst förhållande matchar fartygets naturliga rullperiod.

En rullning med hög amplitud med en bibehållen och konstant periodtid kallas ”kritisk rullning”.

Historiskt sett har olika typer av anordningar föreslagits för att undvika rullning, såsom slingerkölar, fenstabilisatorer eller roderrörelser. Emellertid är rullning fortfarande ett stort problem för sjöfarten.

Kort ritningsbeskrivning

För att bättre förstå den föreslagna metoden refereras till följande figurer:

Figur 1 illustrerar rätande krafter och rätande moment hos et lutande fartyg

Figur 2 illustrerar en typisk konfiguration (enligt känd teknik) av ett fartygs varvtalsreglering med tillhörande ställdon och givare.

Figur 3 illustrerar schematiskt konfigurationen av en anordning för undvikande av- och dämpning av rullning i enlighet med en exemplifierad utföringsform

Figur 4 illustrerar ett flödesschema för de olika stegen i metoden för undvikande av- och dämpning av rullning i enlighet med en exemplifierad utföringsform

Figur 5 illustrerar kritisk rullning hos ett fartygs när anordningen för undvikande och dämpning av rullning inte är i funktion

Figur 6,7,8,9 och 10 illustrerar exempel på reaktioner av rulldämpningen vid olika exemplifierande utföringsformer av principen för undvikande av- och dämpning av rullning

Känd teknik

Följande känd teknik hänvisas till i detta dokument:

(PA1): Metoder och anordningar för förhindrande av rullning

(PA2): Regleranordningar för varvtal och belastning hos framdrivningsmaskineriet

PA1- Metoder och anordningar för förhindrande av rullning (dagens teknik)

Passiva anordningar för förhindrande av rullning såsom slingerkölar använder friktionsenergi för att avleda ett fartygs rullningsenergi. Aktiva rulldämpningsanordningar är effektivare än passiva på grund av användandet av specialiserade ställdon, styrda av regulatorer, som injicerar energi för att motverka rullningskrafterna.

I dag ofta använda ställdon för att dämpa rullning är fenstabilisatorer.

En automatiserad rulldämpningsmetod är presenterad i H.H.Dows US patent nr 1,731,236, av den 15e oktober 1929 och nr 1,774,825 av den 2a september 1930 (Dows patent). Dows patent beskriver användandet av en eller två propellrar som rulldämpningsställdon genom att motbalansera ett fartygs krängningsvinkel genom att använda vridmomentet från en propeller eller det resulterande vridmomentet från två propellrar. Vidare beskriver patenten ett mekaniskt arrangemang för sagda kompensation. En utföringsform av ett kontrollsystem som använder 1930-talets teknologi.

PA2 - Regleranordningar för varvtal och belastning hos ett fartygsmaskineri (bakgrundsteknik)

Fartygets varvtals- och lastkontrollanordning har till uppgift att upprätthålla maskineriets varvtal och belastning inom ett förutbestämt arbetsområde. Följaktligen kan även fartygets hastighet hållas inom ett förutbestämt hastighetsområde.

Figur 2 visar schematiskt komponenterna hos en traditionell varvtals- och lastkontrollanordning för ett dieselmaskineri. En anordning för avgivande av varvtalsbörvärde **300** används för att ställa in det önskade varvtalet till värde n^* . Vanligen är det en operatör eller ett automatiskt navigationssystem som avger sagda börvärde. Maskineriets aktuella varvtal n fås från varvtalsgivaren **314**. Varvtalskomparatorn **302** subtraherar maskineriets aktuella varvtal från börvärdet. Den resulterande varvtalsdifferensen dn tillförs en varvtalsregulator **304**. Utsignalen från varvtalsregulatorn utgör börvärdet p till en anordning för inmatning av bränsle **310**. En bränslepumpskomparator **306** subtraherar den aktuella nivån på bränsleinsprutningen p , som avläses av givaren för bränslepumpindex **312**, från börvärdet p^* . Den resulterande differensen dp är insignalen till bränsleregulatorn **308** som manipulerar bränsleanordningen **310** via en effektstyrsignal fc . Bränsleanordningen dirigerar bränsleinsprutningen till dieselmaskineriet **316** så att varvtalet n följer börvärdet n^* . För de klassiska dieselmotorerna är bränsleanordningen en mekanisk ställdon, medan för ett Common Rail bränslesystem består bränsleanordningen av en elektronisk kontrollenhet tillhörande motorn.

Framdrivningsarrangemang med diesel-elektriska maskinerier fungerar på motsvarande sätt med den skillnaden att elektriska generatorer och elektriska motorer är placerade mellan dieselmaskineriet och propellern, och att det är den elektriska motorn som är hastighetskontrollerad.

BESKRIVNING AV FÖREDRAGEN UTFÖRINGSFORM

Ett arrangemang för undvikande av och dämpning av rullning hos ett propellerdrivet fartyg är beskrivet nedan i enlighet med en föredragen utföringsform.

Arrangemang av den föredragna utföringsformen

Som visas i **Figur 3**, förbättras arrangemanget i den tidigare beskrivna regleranordningen **PA2** genom att dessutom innefatta funktionaliteten för undvikande och dämpning av rullning. Ett marint fartyg kan vara utrustat med ett flertal maskiner och propellrar. För enkelhets skull är endast en maskin och en propeller beskrivna i denna utföringsform.

Ett fartyg motsvarande den föredragna utföringsformen omfattar en maskin **316** som driver fartygets framdrivningspropeller **318**. En operatör eller ett navigationskontrollsystem ger fartygets varvtalsreferens via anordningen för avgivande av varvtalsbörvärdet **300** till fartygets varvtals- och lastkontrollanordning **334**.

Arrangemanget i enlighet med den föredragna utföringsformen består i huvudsak av anordningen för undvikande och dämpning av rullning **320** (RAD anordningen) som är integrerad i fartygets varvtals- och lastkontrollenhet. Ingångar till RAD anordningen består åtminstone av: (1) samplade signaler från en eller fler givare som används för att utvärdera fartygets rullningsegenskaper och (2) inmatad information om tekniska och fysikaliska egenskaper hos olika anordningar i arrangemanget. Utgångarna från RAD arrangemanget är kommandon och parametrar till varvtalsregulatorn.

I den föredragna utföringsformen är den givare som används för att bestämma rullningsegenskaperna en inklinometer **322** som ger den aktuella rullningsvinkeln θ .

Information om fartygets egenskaper inges via ett operatörsgränssnitt och/eller via en överordnad dator **324**. Egenskaper av intresse omfattar fartygets naturliga svängningsperiod T_s , tvärgående tröghetsmoment J_s samt fartygets rulldämpningskoefficient ζ_s . Egenskaper av intresse hos maskineriet utgör effekt P_e , nominellt varvtal nn och maskineriets tröghetsmoment J_e . Egenskaper av intresse för varvtals- och lastkontrollenheten är reglerförstärkningsfaktorn k samt tidskonstanterna för bränsleanordningen och regulatorn T_c . I den föreslagna utförandeformen antas denna information vara känd från tekniska specifikationer eller från tester under fartygets igångkörning. I en alternativ utföringsform skulle denna information kunna bestämmas genom identifiering av parametrar hos en dynamisk modell.

Metoden steg för steg

De olika stegen för den föreslagna utförandeformen i enlighet med **Figur 4** utförs upprepade gånger med konstant tidsintervall T_{sample} för att säkerställa ett tillräckligt antal givaravläsningar för varje rullperiod. Ett lämpligt område för T_{sample} varierar från tiotals till hundratals millisekunder. En typisk rullperiod är mellan 10-30 sekunder.

Steg 1. RAD anordningen **320** läser av inklinometern **322** för att fastställa fartygets aktuella lutningsvinkel θ . Värdet lagras i RAD anordningen och är tillgängligt för vidare beräkningar.

Steg 2. Genom att använda tidigare avläsningar av lutningsvinkeln bestämmer RAD anordningen amplituden A_r och periodtiden T_r hos fartygets rullning. Det finns många kända metoder att bestämma amplituden och periodtiden hos grundtonen av en samplad signal, t.ex. genom diskret Fouriertransform, kurvanpassning eller nollgenomgång.

I det föreslagna utförandet föreslås följande nollgenomgångsalgoritm:

RAD anordningen mäter ett antal krängningsvinklar som är registrerade under ett tidsintervall motsvarande fartygets naturliga rullperiod och bestämmer den tidigare maximala rullvinkeln, H_{max} , och den tidigare minimala rullvinkeln H_{min} i skaran av samplade värden. Tidsintervallet mellan två konsekutiva nollgenomgångar av rullvinkeln sätts till T_{zero} . Rullningsamplituden kan nu beräknas som $A_r = (H_{max} - H_{min})/2$ och rullningsperioden T_r som $T_r = 2 * T_{zero}$.

Steg 3. Under detta steg bestämmer RAD anordningen rullningsamplitudens och rullningsperiodens trend över intervallet T_{trend} (trend-tiden). Storleken av T_{trend} beror på typ av fartyg och krav på varvtalsprecision. Ett lämpligt värde är fartygets rullningsperiod multiplicerat med ett litet heltal. Exempelvis om fartygets naturliga rullningsperiod är $T_s = 20$ sekunder kan ett lämpligt område för T_{trend} vara mellan 20 och 200 sekunder. Under trend-tiden undergår fartyget åtskilliga rullperioder vars amplitud- och periodtrend kan karakteriseras som följer:

Trenden för amplituden A_r karakteriseras tillhörande en av följande kategorier: Låg, Stokastisk, Konstant, Ökande eller Minskande.

Trenden för rullperioden T_r karakteriseras tillhörande en av följande kategorier.

Stokastisk, Konstant eller Naturlig. 'Stokastisk' innebär att rullningsperioden T_r respektive rullamplituden A_r inte är regelbunden. 'Konstant' innebär en rullningsperiod som är skild från fartygets naturliga rullningsperiod. 'Naturlig' innebär en rullningsperiod

som är identisk med fartygets naturliga rullningsperiod. 'Låg' innebär att rullningens amplitud är låg.

De ovan beskrivna trenderna gäller för den föredragna utföringsformen. Alternativa utföranden kan ha en annorlunda trendbeteckning jämfört med den föredragna utföringsformen, såsom fler typer av intervall eller ett kontinuerligt arbetsområde.

Steg 4. RAD anordningen 320 använder rullperioden och rullamplituden tillsammans med fartygets dynamiska egenskaper samt maskineriets egenskaper erhållna via operatörsinterface 324 för att fastställa en regleralgorithm och parametrar för varvtalskontroll som effektivt undviker och dämpar rullning och som också bibehåller fartygets förinställda hastighet. Algoritmen för varvtalskontroll enligt känd teknik som saknar rulldämpning betecknas **NS**. Som kommer att beskrivas längre fram i sektion Algoritm, definierar den föredragna utföringsformen två slags algoritmer som undviker och dämpar rullning hos fartyg: (1) användande konstant varvtal (**CS**) och inverterad kontroll (**IC**). **IC** har en starkare rullningsreducerande effekt jämfört med **CS** och kan användas till att dämpa starkare rullning.

Den föredragna utföringsformen beskriver ett antal regler för valet av rätt algorithm för olika typer av rullreducering och rulldämpning som visas i tabell 1.

TABELL 1

Rullamplitud Ar	Rullperiod Tr			
		Stokastisk	Konstant	Naturlig
	Låg eller $dn=stor$	NS	NS	NS
	Stokastisk	CS	CS	CS
	Konstant	CS	CS	IC
	Minska	CS	IC	IC
	Öka	CS	IC	IC

Till exempel, som kan ses i tabellens första rad: Om rullningsamplituden är 'Låg' eller varvtalsskillnaden dn är stor, används regel **NS** normal varvtalskontroll enligt känd teknik. Om rullperioden är 'Konstant' (andra kolumnen) och rullamplituden är 'Increase' (den femte raden), desto starkare appliceras regel **IC** (inverterad kontroll) för att dämpa

dem ökande rullningen. Om rullperioden är 'Stokastisk' (andra kolumnen) och amplituden har en minskande trend (fjärde raden) används algoritmen för konstant varvtal **CS**. De övriga cellerna i tabellen skall tolkas på samma sätt. Följaktligen väljs en lämplig algoritm för att dämpa och undvika rullning för varje rådande förhållande.

Steg 5. Vid detta steg aktiverar RAD anordningen **320** den valda algoritmen i varvtsregulatorn **304**.

De ovan nämnda metodstegen återupprepas cykliskt med början på steg 1 vid nästa *Tsample* tidpunkt.

De ovan beskrivna stegen kan varieras i alternativa utföringsformer enligt följande:

- En givare kan mäta krängningsvinkeln θ samt första- resp. andraderivatan av θ under steg 1, på ett sådant sätt att en noggrannare utvärdering av rullningsamplitud och rullningsvinkel kan göras i Steg 2.
- Steg 1 och Steg 2 kan sammanfogas genom att använda en givare som direkt avger värden för rullningsvinkel och rullningsamplitud.
- Vid Steg 3 kan rullningstrenden kodas med en annan upplösning. Ävenledes kan reglerna implementeras med Oskarp Logik, Artificiella neurala nätverk, Smith-prediktor eller med andra motsvarande metoder.
- Vid Steg 4 kan en, två eller flera algoritmer för undvikande och dämpning av rullning användas.
- Vid steg 4 kan, beroende på typ av fartyg och preferenser med avseende på rulldämpning, andra regler i alternativa utförandeformer användas.

Algoritm

Rullning hos ett fartyg förorsakas av en kombination av krafter såsom:

- Maskineriets vridmoment
- Fartygsskrovets interaktion med vattnet
- Propellerns interaktion med vattnet
- Rodrets interaktion med vattenströmmen

En del av dom följande förklaringarna gäller för fartyg med en propeller och andra för fartyg med två eller fler propellrar. För fartyg med fler propellrar och för azimuth-propellrar förutsätts att varje propeller har sitt eget varvtalsreglersystem.

Varvtalsregulatorn bestämmer maskineriets utgående moment. Sagda moment ökar eller minskar beroende på (a) fartygets hastighet, (b) propellerns rotationshastighet, (c) variationer i fartygets krängningsvinkel, (d) rodrets interaktion med vattenströmmen från propellern, (e) ändringar i fartygets girvinkel samt (f) interaktion mellan vågor och fartygsskrov.

Nedan beskrivna fenomen, var för sig eller i kombination bidrar till att utveckla en kritisk rullning som kan beskrivas som en korrelation mellan varvtalsregulatorns dynamik, fartygets specifika rullperiod och dynamiken hos vågorna. Tillståndet utgör en driven harmonisk svängning.

(F1) Reaktiva momenteffekter på fartygsskrovet från propellern.

Framdrivningsmaskinens vridmoment omvandlas huvudsakligen till längsgående trust. Emellertid skapar en liten del ett vridande moment och ett reaktionsmoment mellan propellern och den omgivande vattenmassan. Detta vridmoment överförs från propellern till fartygsskrovet. Vridmomentet är proportionellt mot effekten hos framdrivningsmaskineriet. Högre hastighet hos fartyget innebär ett högre vridmoment på propellern enligt en nära kvadratisk relation.

(F2) Longitudinellt moment skapat av propellern

När fartyget kränger förflyttas propellern till sidan om fartygets centrumlinje. Detta ger propellerns trust en momentarm som vrider fartyget åt samma håll som det kränger. Följaktligen, när fartyget rullar, kommer det att ha en bana som successivt alternerar mellan styrbords och babords sida om den styrda kursen.

(F3) Vridmoment som skapas av ett oregelbundet flöde runt ett krängande fartygsskrov

För ett fartyg med krängningsvinkeln noll flyter vattnet symmetriskt på styrbords- och babordssidan. Ett krängande fartyg har ett oregelbundet vattenflöde runt skrovet. I enlighet med Bernoullis princip, kommer trycken på styrbords och babords sida att bli olika. Ett lutande fartyg har hydrodynamiska egenskaper som är sämre än ett på rät köl.

Resultatet är mer släp motstånd som förorsakar en reduktion av fartygets hastighet samt att vridmomentet hos propellern ökar. Varvtalsgivaren (314) registrerar en minskning av propellervarvtalet. Varvtalsregulatorn (304) ökar maskineriets moment för att rätt varvtal skall återställas. Detta kommer att öka de ojämna vattenflödet på ett sådant sätt att fartyget tenderar att ändra kurs. Detta ökar krängningsvinkeln som avkänns av inklinometern (322) ytterligare och som en följd ökar maskineriets moment åter. Det uppstår en kontinuerlig process där slutligen jämvikt uppstår tack vare kompensande rätande moment och friktionsmoment. Maskineriets moment ökar olinjärt med krängningsvinkeln, sålunda uppstår en självuppehållande rullning som modelleras av en nära kvadratisk funktion. Denna effekt finns hos fartyg med både en- och två propellrar.

(F4) Skrovrörelsens effekt på interaktionen mellan propeller och vatten

Litteratur beskrivande handhavande av fartyg beskriver ett antal effekter som skapar sidorörelser hos aktern på grund av ojämnt flöde genom propellerbladen: kölvatten effekten, lutningsffekten, spiralformigeffekten och squat-effekten. Dessa effekter orsakas av skillnader i vattenflödet mellan fartygspropellerns styrbords- och babordssida. Akterlig tvärrörelse skapar ändring i styrd kurs som i sin tur skapar en sidoriktad centripetalkraft som ökar krängningsvinkeln. Dessa effekter uppstår endast på fartyg med en propeller.

(F5) Effekten av skrovets lutning på interaktionen mellan propeller och vatten

Rullningsmoment som skapas av ändringar i kursen (vridningen) hos ett fartyg. Ett fartyg med massan m som har en linjär hastighet v , har en kinetisk energi som kan uttryckas som $E_k = mv^2/2$. Ett fartyg kan svänga på grund av antingen en roderrörelse eller en av de ovan beskrivna effekterna. Under en sådan sväng krängs fartyget av en sidoriktad centripetalkraft. Sålunda omvandlas en del av den kinetiska energin till energi som kränger fartyget.

(F6) Krafter exciterade av vågor

Fartygets dynamik i lugnt vatten är annorlunda jämfört med förhållandena i grov sjö när hänsyn måste tas till vågornas anfallsvinkel mot fartygsskrovet.

I lugnt väder har maskineri/propeller ett stabilt varvtal. Rodret är i mittläge och vridmomentet lutar fartyget, i motsatt riktning relativt propellerrotationen. Beroende på fartygets storlek, vikt och vattenflödet relativt skrovet, blir lutningsvinkeln i storleksordningen 0,5-2 grader. Lutningens vinkelhastighet är 0. I grov sjö eller i svall är

reaktionen hos fartyget och dess varvtalsregulator annorlunda på grund av vågornas dynamiska effekt på fartygsskrovet. Vågor studsar mot- och kränger fartyget. När fartyget kränger blir vattenmotståndet högre och fartyget tenderar att svänga i enlighet med vad som beskrivits ovan under punkt (F3) och (F5) och rodet vrids ut för att kompensera den begynnande svängen. Alla dessa tre processer förorsakar släp-motstånd och saktar ner fartyget. Sålunda ökar maskineffekten i takt med att rullningsvinkeln ökar.

Vidare, skrovets transversella hastighet och vinkelhastighet ökar eller minskar maskineriets belastning:

- Maskinbelastningen ökar när fartyget rullar från babords till styrbords sida (ifall propellern roterar medurs).
- Maskinbelastningen minskar när fartyget rullar från styrbords till babords sida.

Denna variation är överlagrad den lastvariation som orsakas av fartygets hastighetsvariation.

Maskineriets rotationshastighet och belastning, härav vridmomentet, kommer att variera. Belastningsvariationen förorsakar att maskineriets varvtalsregulator ökar eller minskar bränsleindex (312) för att det begärda varvtalet skall bibehållas.

(F7) Roderkrafter

De angripande vågorna förorsakar ett kursfel. Autopilotens kursregulator kommer då att ändra roderläget så att kursfelet korrigeras. Korrigeringar som kursreglersystemet gör kan även öka eller minska krängningsvinkeln och sålunda maskinbelastningen.

(F8) Interaktion från varvtalsregleringen

I det följande kommer vi att visa kvantitativt hur fartygets varvtalsregulator genererar och bibehåller rullningen hos ett fartyg.

Rullningen hos ett framdrivet fartyg kan bestämmas genom lösningen av ett system av ekvationer som modellerar dynamiken hos krängningsvinkeln som interaktionen mellan varvtalsreglering, maskinens moment och fartygets tröghetskraft. Ett möjligt sådant system av differentialekvationer för den föredragna utförandeformen är:

$$\ddot{\phi} = 2\omega_s(k - \varsigma)\dot{\phi} - (\omega_s^2 - \omega_w^2 \cos(2\pi \frac{t}{T_w}))\phi \quad (\text{E1})$$

$$\dot{k} = \frac{1}{T_c}(-k + A_c \phi^2) \quad (\text{E2})$$

Ekvationen (E1) kan skrivas ekvivalent med explicita termer som:

$$\ddot{\phi} = 2\omega_s k \dot{\phi} - 2\omega_s \zeta \dot{\phi} - \omega_s^2 \phi + \omega_w^2 \cos(2\pi \frac{t}{T_w}) \phi$$

E1 består av följande termer:

- T1.** $\ddot{\phi}$ är andraderivatan av krängningsvinkeln, dvs. krängningsvinkelns acceleration
- T2.** $-2\zeta\omega_s\dot{\phi}$ är en dämpningsfaktor som är beroende av skrovets form och kondition. där ζ är en dämpningskonstant som är specifik för ett fartygs design och skrovkondition, ω_s är krängningens vinkelhastighet som motsvaras av fartygets naturliga svängningsperiod skalad med fartygets tröghetsmoment, och $\dot{\phi}$ är rullningsvinkelns hastighet.
- T3.** $-\omega_s^2\phi$ är det rätande vridmoment som ger fartyget stabilitet (se **Figur 1**)
- T4.** $2\omega_s k \dot{\phi}$ är en faktor som kränger fartyget via varvtalsregleringen och resulterande maskin/propellermoment. Dynamiken i detta moment är avhängig av variationen av faktorn k hos maskineriets varvtals- och lastregleranordning **334**, som bestäms av förstärkningen och tidskonstanten hos maskineri **316**, varvtalsregulator **304**, bränsleregulator **308** och bränsleanordning **310**. Denna variation modelleras i differentialekvationen $\dot{k} = \frac{1}{T_c}(-k + A_c \phi^2)$ (**E2**) som uttrycker fördröjningen och magnituden av varvtalsregulatorns ingrepp. I denna ekvation är T_c den kombinerade tidskonstanten för regulatorns och maskineriets aktivering och A_c är varvtalsregulatorns förstärkningsfaktor. Både T_c och A_c är parametrar som kan justeras via varvtalsregulatorn **304** inom vissa gränser. I (E2) uttrycker den kvadratiska faktorn ϕ^2 den olinjära relationen mellan maskineriets vridmoment och krängningsvinkeln.
- T5.** $\omega_w^2 \cos(2\pi \frac{t}{T_w})\phi$ är en faktor som beskriver vågornas inverkan. T_w är vågornas periodtid och ω_w^2 är vågornas amplitud skalad med fartygets tröghetsmoment. För RAD-anordningen verkar denna faktor som en störning. För en alternativ

utföringsform, kan våg-parametrar identifieras, mätas eller erhållas från kommersiella källor för prediktering av marina vågor och vindar.

Om inflytandet som är beskrivet av termen T_4 och/eller T_5 är större än den dämpande delen av ekvationen kommer fartygets rullning att upprätthållas och förstärkas. I praktiken är så ofta fallet med moderna fartyg försedda med starka maskiner och/eller lastfartyg med litet rätande moment.

Om inga vågor förekommer, så ger hastighets- och last regleranordningen **334** ingen fördröjning och då reduceras ekvation **(E1)** till en Van der Pol ekvation som är känd för att generera kritiska svängningar. Om det förekommer vågor med en periodtid som är hälften av fartygets naturliga periodtid, beskriver termen $(\omega_s^2 - \omega_w^2 \cos(2\pi \frac{t}{T_w}))\phi$ en typisk parametrisk rullning av Mathieu-typ.

Kärnan i den föreslagna metoden är att undvika att en rullning byggs upp genom att manipulera varvtalsregulatorns parametrar som återfinns i differentialekvationen **(E1)** s högra sida på ett sådant sätt att krängningens acceleration, hastighet och värde reduceras effektivt. Detta innefattar, men är inte begränsat till, en av dom följande metoderna:

M1. Ökning av svarstiden T_c hos maskineriets varvtalsregulator. Detta reducerar termen **T4** och rullningen upphör att upprätthållas av fartygets maskineri.

M2. Reduktion av varvtalsregulatorns förstärkning till ett värde som inte skapar kritiska svängningar.

M3. Genererande av varvtalsvariationer hos framdrivningsmaskineriet insatta vid rätta ögonblick på ett sådant sätt att term **(T4)** motverkar variationerna i krängningsvinkeln. Detta innebär ett regleringrepp med omvänt tecken.

M4. Vilken som helst annan varvtalsregleringsmetod som minskar variationen i krängningsvinkeln som modellprediktiv reglering och som utnyttjar krängningsvinkelns integral över en rullningsperiod som en kostnadsfunktion.

M5. Vilken som helst ekvivalent metod som minimerar integralen av krängningsvinkelns variation genom att styra varvtalsregulatorns parametrar.

Den föredragna anordningen som är beskriven av metod-stegen visade i **figur 4**, beskriver två metoder för reducering av och dämpning av rullning:

- 1) Konstantvarvtalsalgoritmen (**CS**) som kan implementeras medelst ovan beskriven metod **M1** eller **M2**.
- 2) Inverterad reglering (**IC**) som kan implementeras enligt algoritm **M3**, **M4** eller **M5**.

De ovan beskrivna metoderna för reducering av den olinjära termen är associerade med störningar i fartygets hastighet och kurs som måste kompenseras för. Följaktligen inkluderar den föreslagna metoden även lämplig kompensation av fartygets hastighet som är beskrivet i Metod-steg sektionen.

Den metod för undvikande av- och dämpning av rullning som beskrivs i denna ansökan är fundamentalt olika den metod som beskrivs i Dows patent No US 1, 731,236, beskrivet i sektionen känd teknik (**P1**).

Detta och andra liknande patent för dämpning av rullning fokuserar på ett nytt ställdon för dämpning av rullningen -i detta fall propellern - som var okänd i denna funktion före 1930-talet.

Som kontrast utnyttjar den av oss föreslagna metoden och anordningen det faktum att under rullning uppstår en variation i fartygets hastighet som reflekteras som en variation i propellerns vridmoment. Varvtalsreglerfunktionen känner av variationen och normalt underhålls och förstärkes fartygets rullning genom en återkommande process.

Den av oss föreslagna metoden avlänkar den kritiska rullningen genom att bryta det kritiska sambandet mellan propellerns vridmoment och fartygets varvtalsreglerfunktion.

Alla presenterade alternativa anordningar är väsentligen variationer och modifikationer som använder samma beskrivna princip för undvikande och dämpning av rullning utan att avvika från omfattningen av den föreslagna uppfinningen såsom den är definierad i de bifogade patentkraven.

Exempel

Exempel 1. **Figur 5** visar en kritisk rullning hos ett fartyg i enlighet med ekvationerna **(E1)** och **(E2)** när anordningen för undvikande och dämpning (RAD) inte är aktiverad. Den vertikala koordinaten är krängningsvinkel (i grader) och den horisontella koordinaten tid (i sekunder). Den naturliga rullningsperioden är 20 sekunder och tidskonstanten hos Varvtals- och Lastkontrollanordningen är 1 sekund. Varvtalsregulatorns förstärkningsfaktor är 80. Ett högt värde som upprätthåller en kritisk rullning.

Exempel 2. **Figur 6** visar effekten av att använda en algoritmvariant med lägre förstärkningsfaktor **M2**, för samma fartygsparametrar som i Exempel 1. Den valda algoritmen innebär en sänkning av förstärkningsfaktorn från 80 till 75. Det framgår att rullning fortfarande förekommer, men den dämpas ut efter ca 9 perioder.

Exempel 3. **Figur 7** visar effekten av att använda algoritmvariant **M1** av metod **CS** för samma fartygsparametrar som i Exempel 1. Varvtalsregulatorns tidskonstant har ökat från 1 sekund till 50 sekunder och förstärkningsfaktorn är åter 80 som gav kritisk rullning. Det framgår att en kraftigare dämpning uppnås i jämförelse med situationen i exempel 2. Rullningen dämpas efter ca 7 perioder. Varvtalsregleringen påverkas mer i jämförelse med vad som är fallet i Exempel 2 eftersom varvtalsregleringen inte reagerar förrän efter 50 sekunder.

Exempel 4. **Figur 8** visar effekten av att använda algoritmvariant **M3** av metod **CS** för samma fartygsparametrar som i Exempel 1. Varvtalsregulatorns tidskonstant är åter 1 sekund, men förstärkningen är nu -50, d.v.s. inverterad reglering. Det framgår att en ytterligare starkare dämpning uppnås i jämförelse med situationen i Exempel 3. Rullningen är eliminerad efter ca 4 perioder till priset av en eventuellt större avvikelse i varvtalsregleringen under 80 sekunder.

Exempel 5. **Figur 9** visar en kritisk rullning av typ parametrisk rullning erhållen från ekvation (E1) när vågorna karakteriseras av $K_w=56$ och $T_w=T_s/2=10$ sekunder. Varvtalsregulatorns parametrar är samma som i Exempel 1.

Exempel 6 **Figur 10** visar en dämpande effekt av den parametriska rullningen som visas i Exempel 5. Algoritmen är inverterad reglering (IC) med en förstärkningsfaktor av -30. Dämpningen är inte så stark, men parametrisk rullning är en säkerhetsrisk och det finns inga enkla effektiva metoder för dämpning tillgängliga. Följaktligen är varje uppnådd dämpning värdefull.