

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Александар Симић

**МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ
СВОЈСТАВА УПРАВЉИВОСТИ БРОДА**

- МАГИСТАРСКИ РАД -

Београд, 2005.

РЕЗИМЕ

Иако управљивост брода не утиче само на ефикасност брода у експлоатацији, већ и на безбедност у пловидби, донедавно се о утицају облика брода на његове маневарске карактеристике знало релативно мало. Зато је Поткомитет ИМО организације, задужен за пројектовање и опрему бродова, формирао посебну Радну групу која је предложила стандарде и дала смернице за процену управљивости брода. Овим су обухваћене минималне маневарске карактеристике брода, које би требало да буду потврђене на пробним возњама, али и одговарајуће методе за процену својстава управљивости које се могу користити и при пројектовању брода.

У првом делу рада детаљно су описане и објашњене постојеће одредбе и поступци за мерења својстава управљивости већ изграђених бродова. Други део рада се бави проценом маневарских карактеристика брода, а на основу његових главних димензија, бродских линија и осталих карактеристика с којима се обично располаже у почетним фазама пројектовања брода.

Постоји више метода за процену својстава управљивости брода; оне се међусобно разликују и у погледу поузданости добијених резултата и у начину њиховог спровођења. Расположиве методе се грубо могу поделити у три основне групе:

- 1) Најједноставније методе су базиране на претпоставци да ће својства управљивости новог брода бити слична својствима управљивости прототипа (постојећег брода довољно сличних карактеристика). Ове методе су очигледно базиране на искуству и зависе од базе расположивих података.
- 2) Нешто поузданије, али зато и знатно скупље методе су базиране на директним моделским испитивањима тзв. слободних модела.
- 3) Трећу групу чине методе које су базиране на примени одговарајућих математичких модела за процену, тј. симулацију кретања брода у маневру.

За поуздану симулацију маневра (применом метода из треће групе) непоходно је познавање законитости којима је одређена веза између одговарајућих брзина и хидродиманичких сила које делују на брод, а које се поуздано могу утврдити само моделским испитивањима тзв. везаних модела. Методе из ове групе се сматрају најпоузданијим и најефикаснијим, па је зато њима и посвећена највећа пажња.

Да би било могуће анализирати утицај различитих параметара бродске форме на бази линеарног математичког модела кретања брода у хоризонталној равни, при чему су у обзир узета три степена слободе – залетање, заносење и закретање – развијен је рачунарски програм. Показано је да линеарна теорија даје добре резултате, у случају динамички стабилних бродова у курсу који се крећу релативно малим брзинама и уз мале углове отклона кормила. Даљом анализом су уочене законитости које се при пројектовању брода могу употребити за процену и побољшање његових маневарских карактеристика.

У раду је поменуто и нелинеарна теорија и дате су основне смернице за њену примену. Међутим, због недовољног броја резултата моделских испитивања, детаљнија анализа у овом правцу није спроведена.

FACULTY OF THE MECHANICAL ENGINEERING
UNIVERSITY OF BELGRADE

Aleksandar Simić

PREDICTION OF SHIP MANOEUVRABILITY

Master of Science Thesis

Belgrade, 2005.

ABSTRACT

In spite of the fact that the needs for good maneuvering qualities of a ship have been recognized for centuries, prediction of ship maneuverability during design has typically been given little attention. Hence, concerned with the ship safety, IMO's Working Group recently suggested minimum standards for maneuverability (to be proven on sea trials) and guidelines for estimating maneuvering performance (to be used in ship design). Consequently, the first part of the thesis thoroughly examines the standards and the guidelines for ship maneuverability.

The second part of the thesis focuses on the evaluation of maneuvering performances at the vessel design stage, i.e. on prediction of the vessel's maneuverability based on ship's main dimensions, line drawings and other relevant design information. Current prediction methods are assessed, and are found to vary in accuracy of the predicted maneuvers, and in the cost of performing the prediction. Most of the prediction methods have been based on the following three approaches:

- a) The simplest methods base predictions on experience, and on existing data, assuming that the maneuvering characteristics of a new ship will be close to that of similar existing ships (often called prototypes).
- b) More reliable, and expensive, methods base prediction on direct model tests, with the so called "free models".
- c) The third, and most sophisticated, group of methods is based on mathematical models and simulations, depending, to some extent, on the experimental data with captive models.

Since simulations are more efficient and cost effective than direct model testing, the core of the thesis is based on the third approach - methods often called *Hydrodynamic Force Modeling*.

Ships moving with a forward speed in deep and infinite water are considered, and the effects of surrounding bodies are excluded. Linear Newton equations of motion that consider three degrees of freedom – surge, sway and yaw – are used to describe and analyze the dynamics of maneuvering and coursekeeping. A computer program is developed to analyze the influence of various ship parameters. It is shown that the linear theory is useful for analyzing the effect of ship design features on course stability and turning ability of directionally stable ships, but only in the linear range, i.e. for small velocities and rudder deflections. Nonlinear theory is also mentioned but is not developed further due to the inadequate quantity of necessary model experiment data.

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. О УПРАВЉИВОСТИ БРОДА	4
2.1. Стабилност брода у курсу	5
2.2. Окретљивост брода	7
2.3. Промена брзине брода	7
2.4. Како доћи до брода добрих маневарских својстава	8
3. ИСПИТИВАЊА СВОЈСТАВА УПРАВЉИВОСТИ	9
3.1. Параметри који се мере	9
3.2. Околности потребне за спровођење тестова	11
3.3. Стандардни тестови за испитивање управљивости брода	11
3.3.1. Тестови који служе за оцену стабилности брода у курсу	12
3.3.1.1. Спирални тест (Диедонов тест, С – маневар)	12
3.3.1.2. Обрнути спирални тест (Бехов тест)	13
3.3.1.3. Тест извлачења (Pull-out Test)	14
3.3.1.4. Модификовани Z тест	15
3.3.2. Тестови који служе за оцену окретљивости брода	15
3.3.2.1. Маневар окретања	15
3.3.2.2. Z тест (Кемпфов тест, Цик-цак тест)	18
3.3.2.3. Z тест при малој брзини	20
3.3.2.4. Маневар исправљања курса	20
3.3.2.5. Тест прамчаних потискивача	21
3.3.3. Тестови за процену маневарских могућности брода у случају опасности	22
3.3.3.1. Маневар заустављања	22
3.3.3.2. Маневар мимоилажења	23
3.3.3.3. Маневар спашавања	23
3.3.4. Допунска разматрања о оцени својстава управљивости	24
4. МЕТОДЕ ЗА ПРЕДВИЂАЊЕ УПРАВЉИВОСТИ БРОДА – ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	27
4.1. Експериментална испитивања слободних модела	27
4.1.1. Димензије базена и дубина воде	28
4.1.2. Карактеристике модела	28
4.1.3. Поступак спровођења тестова	30
4.1.4. Мерење и анализа	31
5. МЕТОДЕ ЗА ПРЕДВИЂАЊЕ СВОЈСТАВА УПРАВЉИВОСТИ – МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ	33
5.1. Математички модел кретања брода у маневру	33
5.2. Силе и моменти који делују на брод при маневру	37
6. ЛИНЕАРНА ТЕОРИЈА УПРАВЉИВОСТИ БРОДА	39
6.1. Линеарне диференцијалне једначине кретања брода	39
6.2. Полупречник кривине и угао заносења при равномерном скретању брода	45
7. ИНДЕКСИ СТАБИЛНОСТИ БРОДА У КУРСУ	47
7.1. Индекси динамичке стабилности брода у курсу	47
7.2. Номотови индекси управљивости	51

7.2.1.	Одређивање Номотових коефицијената K и T применом теста окретања	55
7.2.2.	Одређивање Номотових коефицијената K и T применом Z теста	58
7.2.3.	Вредности Номотових индекса управљивости добијене мерењима	60
8.	ПРИМЕНА ЛИНЕАРНЕ ТЕОРИЈЕ ЗА ПРЕДВИЂАЊЕ ТРАЈЕКТОРИЈЕ БРОДА	63
8.1.	Поступак за одређивање трајекторије брода	65
8.2.	Нумерички пример	67
9.	НЕЛИНЕАРНА ТЕОРИЈА УПРАВЉИВОСТИ БРОДА	75
9.1.	Абковицев нелинеарни математички модел	76
9.2.	Модуларни математички модел	77
10.	ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ	80
	НОМЕНКЛАТУРА	85
	ЛИТЕРАТУРА	87
	ПРИЛОЗИ	89
	Прилог I	90
	Прилог II	95
	Прилог III	97

1. Увод

За разлику од већине других научних дисциплина из области бродоградње које већ имају завидну традицију, проблем управљивости брода до данас није у довољној мери разјашњен. Иако први забележени радови у којима се помиње управљивост брода потичу још из 18. века, углавном се водило рачуна искључиво о величини кормила (за које се показало да битно утиче на управљивост брода), техничким решењима и потребној снази кормиларске машине, односно о положају кормиларнице како би се обезбедила добра видљивост. О утицају форме брода није се знало готово ништа, те је овај аспект углавном занемариван. Бродови грађени на овај начин су углавном и одговарали потребама тадашњег времена. Мањи број заиста великих бродова, као и виткије форме уобичајене за то време, проблем управљивости брода потискивали су у други план.

Међутим, технолошки развој у последњих неколико деценија битно је утицао и на развој бродоградње. Промене које су уследиле нису се односиле само на примену нових технологија у градњи бродова, већ је дошло и до извесних промена форми па и величине бродова. Експанзија експлоатације нафте довела је, пре нешто више од три деценије, до појаве "супер танкера" - бродова чији су депласмани прелазили 300.000 тона. Били су то бродови пунијих форми и заиста, и за данашње време, импозантних димензија.

Опште уверење о сигурности ових бродова доведено је у питање након хаварије брода *Amoco Cadiz*, који је потонувши 16. марта 1978. године, изазвао праву еколошку катастрофу загадивши при том око 400 km британске обале са укупно 223.000 тона проливане сирове нафте. Након овог инцидента, и потврде да је до хаварије дошло услед квара кормиларске машине чиме му је у олујним условима, који су га задесили, био онемогућен правовремени маневар, у жижу интересовања релевантних бродограђевних кругова се ставља проблем управљивости брода.

Пажљивијом анализом утврђено је да је у више од 70% хаварија бродова широм света узрок неправовремено реаговање кормилара у критичним ситуацијама, при чему се у многим случајевима показало, да није само "људски фактор" узрок хаварије.

Како би се уочени проблем свео на најмању могућу меру и у будућности предупредили слични инциденти, поткомитет ИМО организације задужен за пројектовање и опрему бродова формирао је посебну радну групу. Њен задатак

је био да дефинише стандарде и да да смернице за процену својстава управљивости бродова.



Слика 1.1 - Хаварија брода *Amoco Cadiz*

Током вишегодишњег рада ове групе, уз сарадњу са многим компетентним институцијама широм света, формулисани су бројни прописи и препоруке. Временом су поједине одредбе кориговане и допуњаване или су додаване сасвим нове, да би, коначно, све биле обједињене ИМО резолуцијом А.751 (18) која је усвојена у новембру 1993. године.

Осим основних дефиниција главних бродских димензија и уобичајених термина који се употребљавају, у тексту резолуције су наведени и основни тестови за процену својстава управљивости брода, као и критеријуми који морају бити задовољени. Поменуте препоруке се могу посматрати на два начина:

- као критеријуми за проверу својстава управљивости већ изграђеног брода,
- као смернице при спровођењу моделских испитивања, односно при предвиђању својстава управљивости брода применом одговарајућег математичког модела, што је од посебног значаја у раним фазама пројектовања брода како би се избегле евентуалне грешке које би за последицу имале лоша маневарска својства брода.

Детаљније о овим, али и другим тестовима, као и о методама за предвиђање трајекторије брода у маневру, биће више речено у наредним поглављима.

Одредбе ове резолуције односе се на [1]:

- морске (прекоокеанске) бродове дужине од 100 m
- бродове за превоз хемикалија и гаса без обзира на дужину

који су изграђени након 1. јула 1994. године, без обзира на тип кормила и пропульзивног комплекса. Исто важи и за бродове који су изграђени пре 1. јула 1994. године уколико је на њима у међувремену обављена реконструкција која на било који начин може утицати на маневарске карактеристике брода:

- замена кормила,
- промена кормиларског уређаја,

- промена облика прамца и/или крме,
- промена пропульзивног комплекса,
- ...

Коначно, у децембру 2002. године на 76. заседању *Комитета за безбедност на мору (Maritime Safety Committee)* усвојена је последња ИМО резолуција под ознаком MSC.137 (76) са насловом "*Standards for Ship Manoeuvrability*". Овом резолуцијом допуњене су неке од претходних одредби.

Из свега поменутог, јасно се могу уочити разлози због којих се проблему управљивости није придавала потребна пажња у време када су постављани како теоријски тако и експериментални темељи на којима почива савремена бродоградња. Што због овог "кашњења", што због сложености проблема, иако је у међувремену урађено заиста пуно, још увек има питања која ће на праве одговоре сачекати још неко време.

Циљ овога рада је да укаже на бројне проблеме са којима се суочавамо у покушају предвиђања трајекторије брода у маневру, као и да се дâ пресек неких до данас познатих поступака за њихово решавање.

2. О УПРАВЉИВОСТИ БРОДА

Под управљивошћу брода подразумевамо све аспекте контроле трајекторије брода, његове брзине и курса. Тиме је обухваћено:

- покретање брода
- убрзавање брода
- успоравање брода
- заустављање брода
- вожња крмом
- држање курса
- промена курса
- зарањање
- израњање

Зарањање и израњање су кретања која су карактеристична за подморнице. Остала наведена кретања довољно су јасна те их не треба посебно објашњавати.

Како ће се брод у датим околностима понашати зависи пре свега од његове форме (облика и главних димензија), усвојеног пропулзивног комплекса као и величине и типа уграђеног кормила. Осим тога, на управљивост брода у великој мери утичу и услови под којима брод плови. Добра контрола наведених кретања, тј. добра управљивост брода, од нарочитог је значаја у случају пловидбе у "отежаним" условима:

- пловидба унутрашњим (ограниченим) водама
- пловидба у плиткој води
- пловидба под утицајем ветра, таласа, водених струја, ...

Коначно, од посебног је значаја могућност утицања на трајекторију, брзину и курс брода у случају квара погонског агрегата или кормиларске машине.

Дакле, сасвим је јасно да од маневарских карактеристика брода зависи не само његова ефикасност већ и његова безбедност. Због тога је добра управљивост брода од изузетног значаја и са правом заузима равноправно место у спирали компромиса који чине добро пројектован брод.

С обзиром да усвојена форма при изради пројекта брода знатно утиче на његову управљивост, о овоме треба водити рачуна још у најранијим фазама израде идејног пројекта. Тиме се посао пројектанта око избора главних димензија и облика трупа брода додатно компликује новим условима који поред основних (тип и намена брода) треба да буду задовољени.

Сва поменута кретања брода, а са циљем квалитативног и квантитативни вредновања, могу се груписати у три основна својства управљивости брода:

- стабилност брода у курсу,
- окретљивост брода и

- промена брзине брода (мисли се пре свега на покретање и заустављање).

Треба поменути да својства управљивости брода зависе од трима (нарочито стабилност у курсу и окретљивост), те да о томе треба водити рачуна посебно при пловидби брода у баласту када је пловидба са тримом често неизбежна.

2.1. Стабилност брода у курсу

Под стабилношћу брода у курсу подразумева се способност брода да након деловања спољашњег поремећаја који би га избацио из задатог курса, било са или без утицаја кормилара или аутопилота, заузме поново стабилан курс [4]. У том смислу могуће су следеће ситуације:

- I Уколико се не врши корекција угла отклона кормила:*

Динамичка стабилност брода

Брод који је у стању да након спољашњег утицаја који би га избацио из задатог праволинијског курса, без корекције угла отклона кормила, у релативно кратком временском периоду поново заузме праволинијски курс сматра се динамички стабилним. Одступање успостављеног од првобитног курса зависи од степена динамичке стабилности брода.



Слика 2.1 – Динамички стабилан брод

У противном брод улази у кружење и такав брод није динамички стабилан.



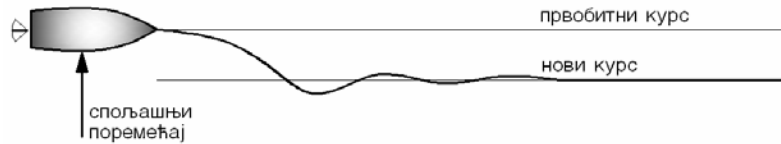
Слика 2.2 – Динамички нестабилан брод

- II Уколико се врши корекција угла отклона кормила:*

Стабилност брода по правцу

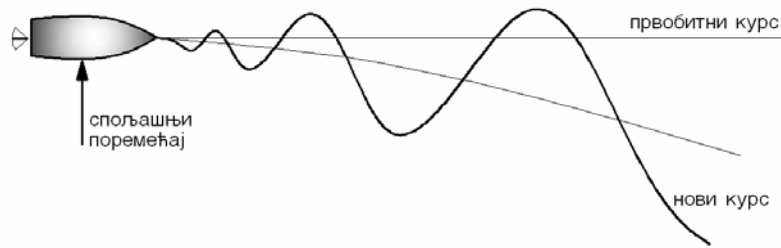
Брод који је у стању да након спољашњег утицаја који би га избацио из задатог праволинијског курса, уз умерену корекцију угла отклона кормила, у

релативно кратком временском периоду поново заузме праволинијски курс паралелан са првобитним, сматра се стабилним по правцу. Код бродова који нису динамички стабилни постоји стална потреба за кориговањем одступања курса од жељеног.



Слика 2.3 – Брод стабилан по правцу

Насупрот оваквим бродовима постоји реална могућност да брод коме је једном поремећен првобитни курс, без обзира на корекције угла отклона кормила, више не може да се умири. Тада је реч о броду који није стабилан по правцу.



Слика 2.4 – Брод нестабилан по правцу

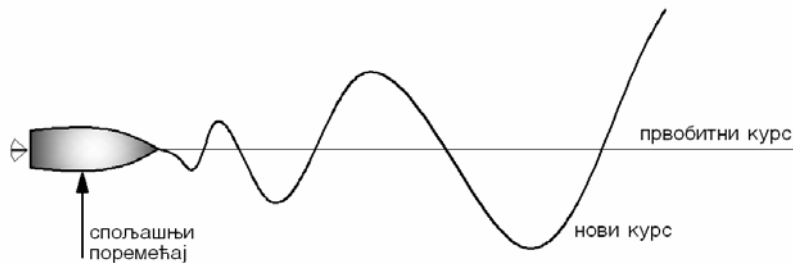
Стабилност брода по трајекторији

Да би брод био стабилан по трајекторији потребно је да се покlope праволинијски курс успостављен након деловања спољашњег поремећаја и почетни курс. Време потребно за успостављање равнотеже зависи од тога колико је брод стабилан.



Слика 2.5 – Брод стабилан по трајекторији

У противном, може се десити да уз сталну корекцију угла отклона кормила, иако осцилује око првобитног праволинијског курса, брод никако не може да се умири. Такав брод није стабилан по трајекторији.



Слика 2.6 – Брод нестабилан по трајекторији

Није на одмет напоменути да брод који није динамички стабилан не мора да буде и лош брод. Да би се са успехом контролисала трајекторија динамички нестабилног брода, треба се мало више потрудити. Наравно, динамичка стабилност брода је свакако пожељна особина. Насупрот ових, код бродова који нису стабилни по правцу свакако би требало размислити о побољшању маневарских својстава. Изузетак су бродови погоњени на једра код којих је ова нестабилност донекле прихватљива с обзиром да је реч о специфичној врсти бродова за посебне намене.

2.2. Окретљивост брода

Под окретљивошћу брода подразумевамо способност брода да реагује на промену угла отклона кормила, а са циљем постизања жељеног курса у што краћем времену и на што мањем простору. Силе и моменти који се јављају на кормилу које је отклоњено за неки угао су, наспрам огромне инертне масе брода, веома мале. Услед тога није немогуће да брод једноставно "игнорише" команде из кормиларнице. Не треба ни помињати какве последице могу бити у том случају. Класична кормила, која су данас најчешће у употреби, спадају у пасивне контролне уређаје што значи да енергију потребну за рад апсорбују из воде која их опструјава при кретању брода. Отуда је проблем слабе окретљивости нарочито изражен при малим брзинама кретања брода. Ово се данас доста успешно превазилази уградњом прамчаних пропелера. Ипак, са повећањем брзине, ефикасност прамчаних пропелера значајно опада због отежаних услова дострујавања воде, те је веома важно да брод добро реагује на кормило.

Интересантно је да конвенционални бродови који имају добра својства окретљивости, тешко одржавају стабилан курс и обратно – бродови који лако успостављају стабилан курс могу имати проблема при промени курса и скретању. Отуда је ово још једна од тачака у којој је потребно направити компромис како би брод имао добра својства управљивости.

2.3. Промена брзине брода

Промена брзине брода, као својство управљивости брода, подразумева пре свега способност брода да у што краћем времену и на што мањем простору реагује на команде погонског агрегата и постигне жељену брзину, било да је реч о убрзавању или успоравању, и без обзира да ли брод плови прамцем или крмом. Ово је од посебног значаја у условима пловидбе у ограниченим водама и лукама.

2.4. Како доћи до брода добрих маневарских својстава

Пројектовање брода добрих маневарских карактеристика подразумева, у општем смислу, решавање три задатка:

- утврђивање критеријума својстава управљивости,
- одређивање облика трупа као и контролних уређаја,
- експериментална провера постигнутих резултата.

Која су то својства управљивости која би брод требало да поседује да би га сматрали добрим, је питање на које је прилично тешко дати једнозначан и увек прихватљив, а ипак реалан, одговор. Тај одговор би требало да зависи од типа, величине и намене брода, као и од подручја пловидбе. Ипак, кроз досадашње искуство, наметнуле су се неке смернице које су пронашле своје место у међународним прописима.

Преостала два задатка тесно су везана, јер заправо резултати експерименталне провере постигнутих резултата треба да послуже као путоказ за отклањање евентуалних грешака у избору форме брода, односно контролних уређаја. Уколико при решавању другог задатка располажемо са поузданијим резултатима испитивања сличног брода (прототипа) утолико ће задатак бити лакши за решавање.

Досадашња искуства везана за проблем управљивости брода, осим на добрим примерима (већ изграђеним бродовима који су се у пракси добро показали) базирана су и на разним теоријским и експерименталним анализама. С обзиром да је реч о још увек недовољно истраженој области мало је објављених резултата мерења која би могла послужити као добра полазна основа при изради пројекта новог брода. Још је мање систематски уређених мерења која су објављена, а која би била од велике помоћи при анализи утицаја појединих карактеристика бродске форме на својства управљивости. Вероватно због тога међународни прописи који данас важе толеришу извесна одступања, уколико се покаже да је учињено све што је било на располагању како би се та одступања svela на најмању могућу меру.

Данас су на располагању два приступа проблему:

- експериментални и
- теоријски.

Експериментални приступ можемо поделити у два правца:

- испитивања бродова у природној величини и
- моделска испитивања,

при чему моделска испитивања могу бити:

- испитивања слободних модела и
- испитивања везаних модела.

Теоријска разматрања у последње време добијају на значају јер се њихова поузданост постепено побољшава те су већ могуће, мање или више прецизне, симулације (применом рачунара) маневарских могућности одређених типова бродова. При томе не треба занемарити ни финансијску страну јер је цена мерења маневарских карактеристика модела релативно велика. Оваква мерења могу трајати и дужи временски период што додатно компликује ствар.

О конкретним методама, и данас већ стандардним тестовима који су нам на располагању, много детаљније ће бити речи у наредним поглављима.

3. ИСПИТИВАЊА СВОЈСТАВА УПРАВЉИВОСТИ

Кроз тестове који се данас користе за процену својстава управљивост већ изграђених бродова, а који ће овде бити објашњени, упознаћемо се са основним параметрима који карактеришу кретање брода.

Шта је то што треба мерити и на који начин? Какви се закључци могу извести о својствима управљивости на бази измерених величина? Коначно, могу ли се изведени закључци употребити при изради пројекта новог брода како би му се обезбедила добра управљивост? Ово су кључна питања на које би ваљало потражити одговоре, а који би били добра полазна основа за детаљнију анализу.

3.1. Параметри који се мере

Кретање брода (као крутога тела) карактерише шест степени слободе и то:

три транслације:

- залетање - у правцу уздужне осе брода,
- заносење - у правцу попречне осе брода,
- понирање - у правцу вертикалне осе брода,

и три ротације:

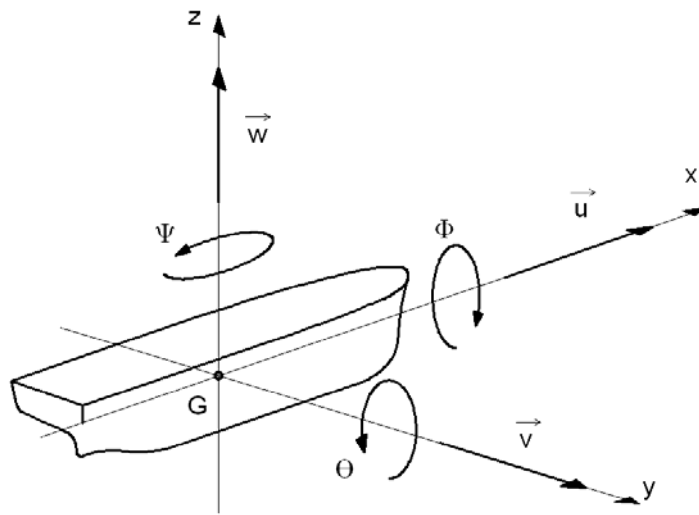
- ваљање - око уздужне осе брода,
- посртање - око попречне осе брода,
- закретање - око вертикалне осе брода.

Уобичајене ознаке и смерови ових величина показани су на слици 3.1.

У литератури се уместо закретања може срести још и термин *заошијање*.

Кретање брода по површини воде узроковано је сложеном интеракцијом између свих сила и момената који делују на труп. Ту се пре свега мисли на силе узроковане радом пропелера и кормила али и на силе којима вода (таласи) делује на брод укључујући утицај слободне површине, утицај дна (уколико постоји), као и низ других спољашњих утицаја. Иако није сасвим исправно посматрати једно кретање независно од осталих, данас је уобичајена подела теорије о кретању брода на две области:

- понашање брода на таласима и
- управљивост брода.



Слика 3.1 – Могућа кретања брода у простору

Понирање (w), посртање (Θ) и ваљање (Φ) су кретања која пре свега карактеришу понашање брода на таласима. У теорији о управљивости брода ова кретања се сматрају не нарочито битним те се најчешће занемарују. Дакле, залетање (u), заношење (v) и закретање (Ψ) су кретања која су од посебног значаја за управљивост брода и њима ће даље бити посвећена посебна пажња. Није на одмет поменути да поједини аутори разматрајући својства управљивости брода, узимају у обзир и ваљање јер брод при маневру добија и бочни нагиб. Ипак, сматра се да бочни нагиб не утиче у великој мери на трајекторију брода у маневру.

Сви данас стандардни тестови за проверу својстава управљивости брода подразумевају мерење:

- тренутне позиције брода,
- тренутног курса брода,
- брзине брода,
- угла отклона кормила као и брзину његове промене,
- броја обртаја пропелера,
- корака пропелера (уколико је променљив) и
- брзине ветра.

На бази ових информација могу се одредити:

- трајекторија тежишта масе брода,
- промена закретања (Ψ) и брзине залетања и заношења (u, v),
- промена брзине и убрзања закретања брода ($\dot{\Psi}, \ddot{\Psi}$) и
- промена убрзања залетања и заношења (\dot{u}, \dot{v})

у функцији од времена и угла отклона кормила (δ_R), односно брзине промене угла отклона кормила ($\dot{\delta}_R$). На основу последњих вредности могу се донети одговарајући закључци о својствима управљивости брода.

3.2. Околности потребне за провођење тестова

Дубина воде, стање мора као и атмосферске прилике могу битно утицати на резултате мерења својстава управљивости брода. Да би добијени резултати били прихватљиви, прописима су регулисане околности под којим је дозвољено спроводити мерења [2]. Према овим прописима потребно је да буде задовољено следеће:

<i>дубина воде</i>	потребно је да дубина воде не буде мања од четири средња газа брода како дно не би имало утицаја на резултате мерења;
<i>ветар</i>	стање ветра не би требало да прелази 5 бофора, при чему у случају да ветар ипак дува, тестове треба спроводити тако да прамац буде усмерен ка ветру у фази прилажења позицији од које мерење започиње; у том случају се примењују одговарајуће корекције које су такође прописане у [2];
<i>таласи</i>	таласи не би требало да буду већи од оних дефинисаних стањем мора 4;
<i>оптерећење брода</i>	брод би требало да буде максимално оптерећен при чему се толерише разлика у газу од 5% од пројектованог; разлог за овај захтев је уверење да су у овом случају својства управљивости брода најлошија [4];
<i>брзина брода</i>	брзина при којој треба спроводити мерења износи минимум 90% пројектоване брзине брода у служби, што одговара оптерећењу мотора од око 85%;

Интересантно је приметити да ветар од 5 бофора (скала се креће од 1 до 12), као и стање мора 4 (скала се креће од 0 до 9) прате таласи код којих је значајна висина ($H_{1/3}$) око 1.9 метара уз очекивани период од око 8.8 секунди [4]. Овакво стање према светској метеоролошкој организацији (WMO) одговара умереним околностима [3]. Због тога осим резултата мерења извештај обавезно треба да садржи и информације о временским условима при којима је тестирање спроведено укључујући и видљивост.

Ипак, генерална препорука је да је потребно мерења спроводити у што мирнијим околностима. Пожељно је да се мерења спроведу у заклоњеним областима, заливима и слично.

У току спровођења тестова команде погонског агрегата не треба дирати сем уколико то није другачије наглашено.

3.3. Стандардни тестови за испитивање управљивости брода

Данас нам је на располагању читав низ стандардних тестова које у зависности од намене можемо поделити у три групе:

1. тестови који служе за процену стабилности брода у курсу,
2. тестови који служе за оцену окретљивости брода и
3. тестови за процену маневарских могућности брода у случају опасности.

Који тест треба спровести зависи од тога шта се се испитује, односно шта прописи захтевају. Већина стандардних тестова који се данас спроводе нису обавезни, али су пожељни, јер имају за циљ упознавање са конкретним маневарским карактеристикама брода, што у различитим околностима може бити од изузетног значаја.

На конференцији ИТТС која је одржана 1999. године предложени су поступци за спровођење ових тестова, а који су детаљно приказани у тексту који следи.

3.3.1. Тестови који служе за оцену стабилности брода у курсу

3.3.1.1. *Спирални тест (Диедонов тест, С – маневар)*

Овај тест је у употребу уведен 1953. године и основи циљ му је провера стабилности брода по правцу. Испитивање се спроводи кроз следће кораке:

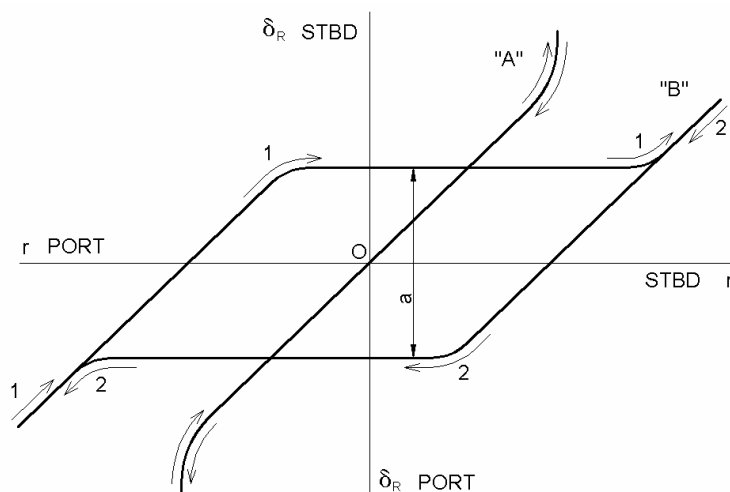
1. Брод се доведе у жељени курс при жељеној брзини и сачека се да се задати режим пловидбе устали. Након тога, док траје тест, команде погонског агрегата не треба дирати. Устаљено кретање треба да траје бар два минута пре преласка на следећи корак.
2. Други корак започиње издавањем комаде за закретање кормила за неки угао δ_R (нпр. 20°) на једну страну.
3. Након тога брод постепено реагује одговарајући на задату команду. Пошто се нови режим пловидбе устали, треба обавити мерење брзине промене курса ($\dot{\Psi}$), броја обртаја пропелера и забележити отклон кормила. После бар један минут пловидбе у претходно задатом режиму, угао отклона кормила се смањи за неки мали угао (нпр. 5°)
4. Поступак се понавља (враћамо се на корак 3) све док угао отклона кормила не достигне почетни угао δ_R али на другу страну. Како се кормило приближава углу нултог узгона ($\delta_R = 0^\circ$) корак промене се може смањити како би се добили потпунији подаци. Са удаљавањем од овога положаја корак промене се поново може повећати.
5. Потом се читав поступак понавља, али овога пута уз скретање на другу страну.

За спровођење овог теста потребно је да стање мора не прелази 3. У противном се добијени резултати не могу користити за процену стабилности брода у курсу. У случају да се из било ког разлога мора прекинути спровођење теста, када се за то поново стекну услови може се наставити од угла отклона кормила при коме је дошло до прекида.

Типичан карактер зависности брзине промене курса од угла отклона кормила приказан је на слици 3.2.

На ординати дијаграма је угао отклона кормила (STBD – на десно, PORT – на лево), а на апсциси брзина промене курса ($r \equiv \dot{\Psi}$).

У случају када је брод стабилан у курсу (случај "А") једној вредности угла отклона кормила δ_R одговара једна вредност угаоне брзине r , тако да се измерене вредности поклапају без обзира да ли брод скреће на лево или на десно.



Слика 3.2 – Резултати спиралног теста

Уколико брод није стабилан у курсу (случај "В") једној вредности угла отклона кормила δ_R може одговарати више вредности брзина закретања, па се тада криве:

- 1 – вредности измерене при скретању брода на лево
- 2 – вредности измерене при скретању брода на десно

не поклапају, образујући тзв. хистерезис.

Величина a (види слику 3.2) која представља опсег углова избачаја кормила који могу одговарати нултој угаоној брзини промене курса брода, мера је нестабилности брода у курсу. У појасу захваћеном хистерезисом тешко је заправо са сигурношћу тврдити како ће брод реаговати на избачај кормила, а на бази резултата спиралног теста.

Основни недостаци овога теста огледају се у следећем:

- потребно је пуно простора и времена за његово спровођење и
- при малим угловима отклона кормила добијени резултати нису нарочито поуздани.

3.3.1.2. Обрнути спирални тест (Бехов тест)

Циљ овога теста (примењује се од 1968. године) је да се код бродова који нису стабилни у курсу утврди промена $r = f(\delta_R)$ унутар хистерезиса, што није било могуће спиралним тестом. Основна идеја теста састоји се у томе да се утврди угао кормила који одговара унапред фиксираној вредности брзине промене курса.

Поступак спровођења теста је следећи:

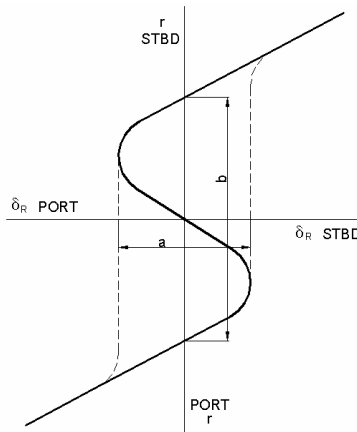
1. Броду се саопшти одговарајућа брзина и за унапред задату вредност брзине промене курса, кормило се контролише према следећој шеми.
2. Кормило се закрене за 5° на леву страну и мери се време до тренутка када уређај за мерење брзине промене курса не дође у нулти положај. Исто се понови при избачају кормила за 5° на десну страну. Уколико се испостави да је време измерено при скретању на лево краће од времена

које је измерено при скретању на десно, тада се поступак понавља уз избачај комила од 4° на лево, односно од 6° на десно. Овај поступак се понавља док се измерене вредности времена не изједначе. На тај начин се долази до информације о мери "асиметричности" при скретању на лево, односно десну страну.

3. Поступак треба понављати за различите вредности брзине промене курса док се не испита жељена област – област нестабилности утврђена спиралним тестом.

Типичан карактер зависности брзине промене курса од угла отклона кормила нестабилних бродова, измерен обрнутим спиралним тестом приказан је на слици 3.3.

У случају брода који је стабилан у курсу једнаким вредностима времена измереног при скретању у лево, односно десно, одговарале би једнаке вредности углова избачаја кормила. Тада би добијени резултати били исти као и резултати који су добијени спиралним тестом (случај "А" на слици 3.2). Величине a и b мере су нестабилности брода у курсу.



Слика 3.3 – Типични резултати обрнутог спиралног теста

За спровођење овог теста потребан је жирокомпас, као и одговарајућа опрема за аутоматско кормиларење.

3.3.1.3. Тест извлачења (Pull-out Test)

Висина хистерезиса (величина b на слици 3.3) код бродова који су нестабилни у курсу може се одредити на много једноставнији начин из теста извлачења. Овај тест је у примени од 1972. године.

Поступак спровођења теста се састоји у следећем:

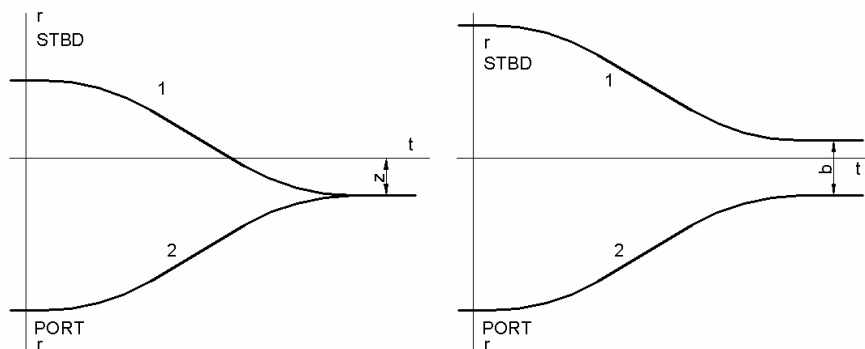
1. Кормило се отклони за неки угао на једну страну и сачека се да се режим пловидбе брода устали у складу са задатом командом. Тада се измери вредност брзине закретања брода и мерење може да почне.
2. На команду кормило се враћа у симетралу брода ($\delta_r = 0$) и у том положају остаје док брод не заузме нови курс при чему се мери промена брзине закретања у функцији од времена.

3. Исто треба поновити (од тачке 1), с тим што сада кормило треба отклонити на другу страну.

Стање мора при спровођењу овога теста не би требало да прелази 3 (значајна висина таласа око 0.9 метара).

Промена брзине закретања у зависности од времена показана је на слици 3.4.

Криве 1 на слици 3.4 одговарале би резултатима мерења при чему је кормило на почетку теста отклоњено на десну, а криве 2 на леву страну. Уколико се криве 1 и 2, како је то показано на левој слици, након одређеног времена преклопе, тада је брод стабилан у курсу. У противном (види десну слику) минимално растојање између њих одређује величину нестабилности брода у курсу, односно висину хистерезиса из обрнутог спиралног теста. На слици 3.4 показани су типични резултати који би одговарали броду са непарним бројем пропелера. Због хидродинамичке асиметрије таквих бродова, по правилу се јавља одступање z од апсцисе. У случају хидродинамички симетричних бродова, какви су бродови са парним бројем пропелера код којих се пропелери обрћу у супротну страну, овог одступања не би било.



Слика 3.4 – Резултати мерења теста извлачења

3.3.1.4. Модификовани Z тест

Модификовани Z тест, се, према ИТТС 1999, користи за оцену способности брода да одржи курс стабилним. Поступак спровођења овог теста идентичан је поступку спровођења Z теста, који ће нешто касније бити детаљно објашњен, с' том разликом што се спроводи при угловима отклона кормила од свега 5° , односно 10° , уз промене угла кормила када угао курса брода достигне 1° .

Разлог због чега је овај тест овде поменут, а није објашњен, је тај што модификовани Z тест служи за проверу стабилности брода у курсу, а изведен је из класичног Z теста који је један од најстаријих тестова којим се испитују својства окретљивости брода и способност кормиларске машине.

3.3.2. Тестови који служе за оцену окретљивости брода

3.3.2.1. Маневар окретања

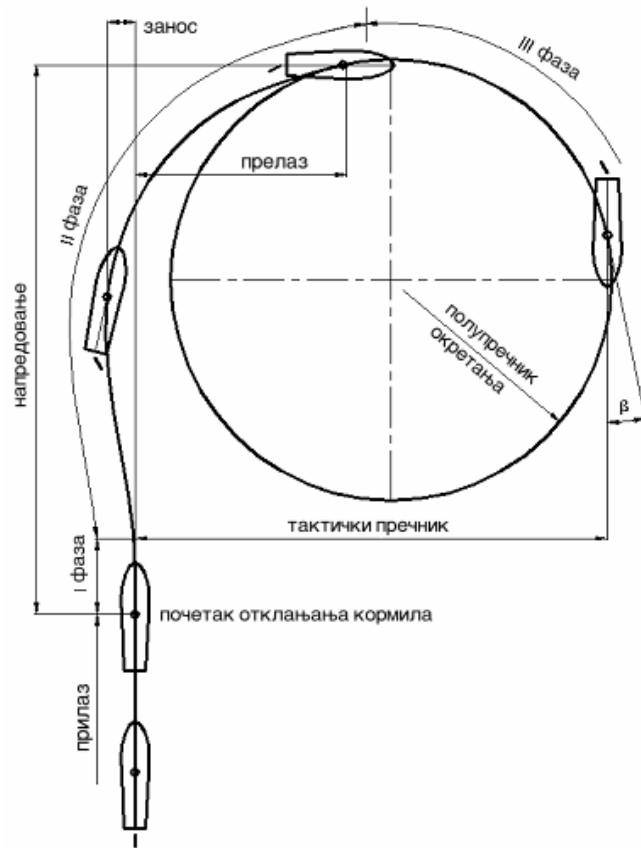
Маневар окретања један је од тестова које захтевају ИМО прописи, а помоћу кога се може утврдити како брод реагује на отклон кормила.

Тест се спроводи на следећи начин:

1. Броду се саопшти жељени праволинијски курс (кормило је у симетрали брода) и одређена брзина па се сачека да се задати режим пловидбе устали (брод се креће равномерно, праволинијски, константном брзином). По успостављању оваквог стања команде погонског агрегата се више не дирају до завршетка теста.
2. На команду, кормило се отклања на једну страну за жељени угао и од тог тренутка се више не дира чак и уколико у току спровођења теста дође до извесног одступања од задатог угла. Време почетка отклона кормила треба забележи.
3. Након овога брод реагујући на задату команду постепено почиње да скреће. Тест се завршава када угао курса достигне између 540° и 720° (што већи угао то боље). За то време се мери положај брода.

Тест треба спровести уз скретање и на леву и на десну страну при чему је пожељно да у оба случаја почетни курс буде исти. Препоручује се да се овај тест обави при више различитих брзина и уз више различитих углова отклона кормила.

На слици 3.5 су дати типични резултати маневра окретања при скретању брода у десно.



Слика 3.5 – Маневар окретања

Из добијене трајекторије брода могу се одредити:

- напредовање (*advance*) – растојање у правцу почетног курса између позиције брода у почетном тренутку спровођења теста (непосредно по закретању кормила) и позиције у којој је угао курса брода достигао 90° .
- прелаз (*transfer*) – растојање у правцу управном на почетни курс између позиције брода на почетку спровођења теста и позиције у којој је угао курса брода достигао 90° .
- тактички пречник (*tactical diameter*) – растојање у правцу управном на почетни курс између позиције брода на почетку спровођења теста и позиције у којој је угао курса брода достигао 180° .
- пречник круга окретања (*steady turning diameter*) – пречник круга скретања брода након што се усталио режим пловидбе задат отклоном кормила.

Угао заносења брода β је угао између правца брзине брода (увек тангира трајекторију брода који скреће) и симетрале брода. Емпиријски је утврђено да се вредност угла заносења налази у следећем интервалу:

$$18 \cdot \frac{L}{R} \leq \beta \leq 22.5 \cdot \frac{L}{R} + 1.45,$$

где је L дужина брода, а R полупречник кривине.

Да би брод имао задовољавајућа маневарска својства прописима [2] се захтева да при максималаном могућем угалу отклона кормила:

- напредовање не буде веће од 4.5 дужина брода и
- тактички пречник не буде већи од 5 дужина брода

Осим тога, при углу отклона кормила од 10° било на леву или на десну страну пут који брод пређе до тренутка када му се курс промени за 10° не би требало да буде дужи од 2.5 дужина брода.

Осим за максимални угао, уобичајено је мерења спровести и за угао отклона кормила од 15° .

Кретање брода у току трајања маневра окретања, како се то са слике 3.5 може уочити, може се поделити у три фазе:

1. Прва фаза започиње у тренутку када кормило изађе из осе брода и траје врло кратко, отприлике до тренутка када је постигнут максимални угао отклона кормила. Чим се кормило нађе под неким углом у односу на симетралу брода, услед утицаја воде која на њега наструјава, на кормилу долази до појаве силе и момента. Ова сила и момент су по интензитету мали, али довољни да доведу до одговарајућих убрзања стварајући услове за заносења брода.

$$\dot{v} \neq 0, \quad \dot{r} \neq 0, \quad \beta \approx 0, \quad r \approx 0, \quad v \approx 0$$

2. Другу фазу карактерише појава хидродинамичке силе и момента који су узроковани опструјавањем трупа брода који је у првој фази избачен из осе. Веома брзо ова допунска сила и момент постају по интензитету знатно већи од иницијалне силе и момента кормила, те доводе до скретања брода. У току ове фазе долази до појаве заносења брода, бочног нагиба, промене курса.

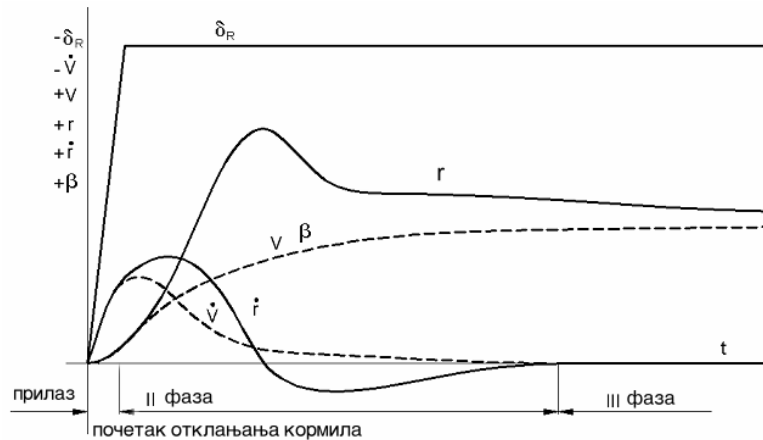
$$\dot{v} \neq 0, \quad \dot{r} \neq 0, \quad \beta \neq 0, \quad r \neq 0, \quad v \neq 0$$

3. Трећу фазу карактерише устаљено кружење након успостављања равнотеже сила које делују на брод.

$$\dot{v} = 0, \quad \dot{r} = 0, \quad \beta \neq 0, \quad r \neq 0, \quad v \neq 0.$$

Промена параметара који карактеришу скретање брода у току трајања маневра окретања показана је на слици 3.6.

Осим основног поступка спровођења маневра окретања, када брод у маневар улази при пуној брзини, према препорукама ИТТС 1999 уведен је и алтернативни поступак (*accelerating turning test*) када на почетку маневра брод мирује. Истовремено са отклањањем кормила издаје се команда за покретање брода у складу са тачком пропулзије која одговара тестираној брзини. Остатак теста се одвија на већ описани начин.



Слика 3.6 – Промена брзина и убрзања карактеристична за маневар окретања

3.3.2.2. Z тест (Кемпфов тест, Цик-цак тест)

Резултати овога теста (у употреби је још од 1944. године) указују на способност кормиларског уређаја и кормила да контролишу брод, односно указују на ефикасност кормила и кормиларске машине. Z тест је такође обавезан тест према ИМО прописима, којима је и дефинисан поступак његовог спровођења:

1. Брод треба довести у стање да се креће равномерно праволинијски по унапред задатом курсу константном брзином. Уколико је при томе угао отклона кормила различит од нуле тада се сви остали углови током трајања теста мере у односу на тај угао. По успостављању оваквог стања погонски агрегат не треба дирати до завршетка спровођења теста.
2. Максималном могућом брзином кормило треба отклонити за одређени угао δ_R (на пример 20°) на једну страну. У почетку, услед инерције, брод ће наставити да се креће праволинијски, али ће убрзо почети да реагује на отклон кормила и да скреће. Треба мерити време потребно да брод заузме одговарајући курс одређен углом (Ψ) који не мора бити једнак углу отклона кормила.
3. У тренутку када брод заузме жељени курс (Ψ), кормило се максималном брзином пребаци на угао δ_R али на супротну страну. Брод не може моментално реаговати на нову команду, али ће после извесног времена

почети да скреће. Од тога колико добро брод "слуша" кормило зависи колико времена ће проћи док брод не заузме нови курс одређен углом ($-\Psi$).

4. Након што брод достигне нови курс кормило се враћа у положај описан у тачки 2 и поступак се понавља два до три пута, зависно од тога како брод реагује.

Данас се за праћење промене курса брода користи GPS.

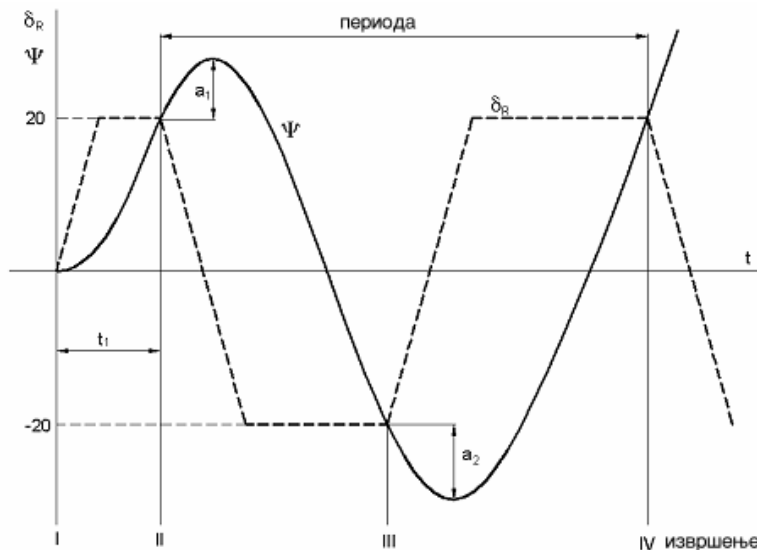
Промена угла курса брода у зависности од протеклог времена и угла отклона кормила, измерена на описани начин, показана је на слици 3.7.

Пуном линијом (види слику 3.7) представљена је промена угла курса брода, а испрекиданом промена угла отклона кормила. На слици 3.7 је показан случај када је $\Psi = \delta_R = 20^\circ$. Према томе, ознака овога теста би била "20°/20° Z тест", где први број означава угао отклона кормила, а други угао курса брода при коме се мења отклон кормила.

Параметри који служе за оцену својстава управљивости брода су:

- време првог извршења (t_1) – време потребно да у првом извршењу брод заузме курс одређен углом Ψ ,
- угао првог премашаја (a_1) – величина која одређује колико је брод, услед инертности, прекорачио жељени угао курса из првог извршења,
- време другог извршења (t_2) – време потребно да у другом извршењу брод заузме курс одређен углом Ψ ,
- угао другог премашаја (a_2) – величина која одређује колико је брод, услед инертности, прекорачио жељени угао курса из другог извршења,

...



Слика 3.7 - Z тест

Уколико брод боље реагује на отклон кормила, утолико ће време премашаја, бити мање, док ће угао премашаја бити већи [5]. Код гранично нестабилних бродова је могуће да на почетку теста извршења протичу коректно, а да у одређеном тренутку брод престане да "слуша" кормило.

Резултати Z теста зависе и од брзине којом се брод креће. Ако је брзина већа може се очекивати да време премашаја буде краће, а угао премашаја већи и обрнуто.

Према ИМО прописима потребно је да буде задовољено:

1. У случају $10^\circ/10^\circ$ Z теста, вредност угла првог премашаја не би требало да буде већа од:
 - 10° , уколико је L/V мање од 10 секунди,
 - 20° , уколико је L/V веће или једнако 30 секунди и
 - $a_{1\max} = \left(5 + 0.5 \cdot \frac{L}{V}\right) [^\circ]$, уколико је $10^\circ \leq L/V < 30^\circ$,

где је L [m] дужина брода, а V [m/s] његова брзина.

2. У случају $10^\circ/10^\circ$ Z теста вредност угла другог премашаја не би требало да буде већа од:

$$a_2 \leq a_1 + 15^\circ$$

3. У случају $20^\circ/20^\circ$ Z теста вредност угла првог премашаја не би требало да буде већа од 25° .

3.3.2.3. Z тест при малој брзини

Слично *модификованом Z тесту* који је раније поменут, а који служи за оцену способности брода да одржи курс стабилним, из класичног Z теста изведен је и *Z тест при малој брзини*.

Циљ овога теста је да се утврди минимална брзина при којој брод реагује на избачај кормила. Поступак спровођења овог теста би одговарао класичном $35^\circ/1^\circ$ Z тесту – кормило се закреће на $\pm 35^\circ$ сваки пут када угао курса брода достигне $\pm 1^\circ$. Суштинска разлика је у томе што се непосредно пре првог извршења главни бродски погонски мотор (мотори) заустави, тако да брод настави да се креће услед инерције, полако губећи брзину.

Прекретање кормила се прекида када брод престане да реагује на кормило и тада се констатује тренутна брзина брода. Тиме је овај тест завршен.

3.3.2.4. Маневар исправљања курса (*New Course Keeping Test*)

Овај тест нам даје информације о способности брода да након маневра скретања заузме стабилан праволинијски курс. Поступак за спровођење овог теста описан је следћим корацима:

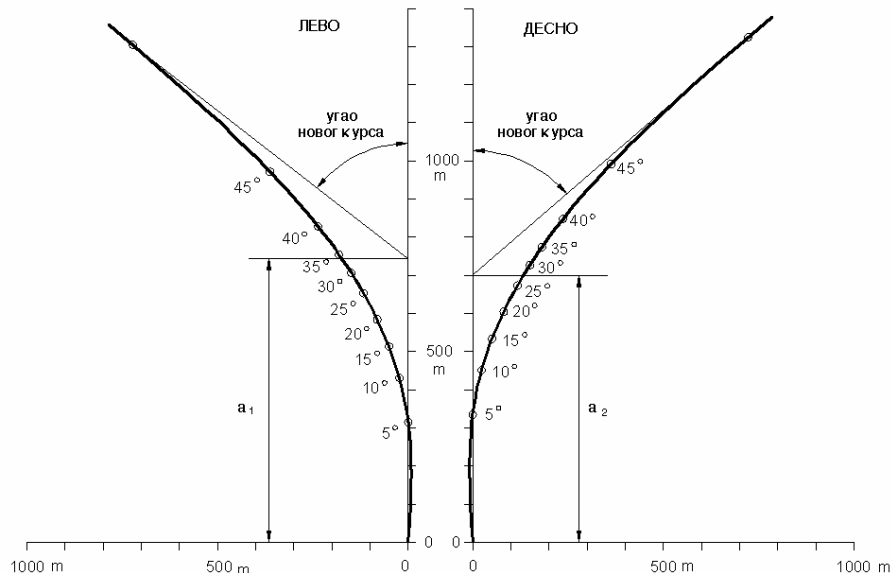
1. Као и у случају осталих сличних тестова, пре почетка спровођења теста потребно је брод довести у стање равномерног праволинијског кретања константном брзином. На растојању од отприлике једне дужине брода пре почетка теста треба активирати уређаје за праћење трајекторије брода и брзине закретања.
2. Кормило треба отклонити до угла од 15° на десну страну. Након извесног времена брод почиње да реагује на задату команду. Када се угао курса брода промени за, рецимо 25° на десно, кормило брзо треба пребацити у положај одређен углом од 15° на леву страну.

3. У тренутку када брзина промене курса (брзина закретања) достигне вредност од $0 \text{ }^\circ/\text{s}$ кормило треба вратити у симетралу брода. Након овога брод би требало да успостави нови праволинијски курс.
4. Исти поступак треба поновити, али овога пута уз скретање на леву страну.

Из добијених резултата (види слику 3.8) може се утврдити угао новог курса, као и параметар (a) који одређује пређени пут до успостављања новог курса. Са дијаграма се може уочити да се код хидродинамички асиметричних бродова, без обзира на идентичне полазне услове, параметри који одређују новоуспостављени курс при скретању на лево, односно на десно, разликују.

Уколико брод брже реагује на отклон кормила (боља окретљивост) тада ће коначни угао новог курса бити већи, а време потребно за његово успостављање мање, и обрнуто.

Исти тест се може спровести и при другим вредностима углова од ових који су поменути, као и при различитим брзинама.



Слика 3.8 – Маневар исправљања курса

Прописима садржаним у резолуцији MSC.136 (76) нису прецизирани критеријуми који би требало да буду испуњени када је о овом тесту реч. Циљ овог теста је да се упозна понашање брода у сличним ситуацијама, што је веома важно за кормилара брода.

3.3.2.5. Тест прамчаних потискивача (*Thruster Test*)

На већини бродова изграђених последњих година, како би биле побољшане маневарске карактеристике, уграђени су прамчани пропелери (један или више њих). Отуда је сасвим природно што је утврђен и поступак за тестирање њихове ефикасности. Применом овога теста добија се информација о окретљивости брода са уграђеним прамчаним пропелером (пропелерима) било да брод мирује или да се креће.

Тест се спроводи на следећи начин:

1. Уколико се тестирање обавља при кретању брода одређеном малом брзином, тада треба обезбедити да та брзина буде константна уз стабилан праволинијски курс. У противном, брод треба да мирује са угашеним гланним бродским моторима.
2. Мотору прамчаног пропелера се саопшти максималан број обртаја, чиме ће се обезбедити максималан потисак на пропелеру.
3. Након десет минута рада прамчаног пропелера, или пошто се угао курса брода промени за 30° , тест се прекида.
4. Исти поступак се понавља са променом смера окретања прамчаног пропелера.

На овај начин се добија информација о ефикасности уграђеног прамчаног пропелера која је од великог значаја за успешно маневрисање бродом.

Уколико се тест обавља при кретању брода, пожељно је да се обезбеди исти почетни курс за оба случаја – и при скретању на леву и при скретању на десну страну. Разлог за ово је да се избегне неповољан утицај атмосферских прилика, односно утицај таласа, на добијене резултате мерења.

При тестирању брода у баласту, треба водити рачуна о уроњености прамчаног пропелера како не би дошло до усисавања ваздуха, чиме би се у значајној мери утицало на потисак пропелера. Препоручује се да оса пропелера буде бар 0.8 пречника пропелера испод површине воде. Из истих разлога пожељно је да се тестирање спроводи при што је могуће мањим таласима.

3.3.3. Тестови за процену маневарских могућности брода у случају опасности

3.3.3.1. Маневар заустављања (*Stopping Test*)

Применом овога теста се одређује најмање време потребно да се брод заустави, као и пут који при томе пређе (напредовање и заношење), при одређеном броју обртаја уз пропелере прекренуте за вожњу:

- крмом уколико се брод кретао напред,
- напред колико се брод кретао крмом.

Информације о могућностима заустављања брода од посебног су значаја у условима опасности, односно од ефикасности пропульзивног комплекса и контролних уређаја, којима брод располаже, у доброј мери зависи и његова сигурност.

Поступак спровођења теста:

1. Брод се доведе у жељени курс при жељеној брзини и сачека се да се задати режим пловидбе устали. На удаљености од отприлике једне дужине брода од тренутка издавања команде за почетак спровођења теста треба активирати уређаје за праћење трајекторије брода.
2. Максималном могућом брзином мења се смер обртања пропелера (прекрећу се крила пропелера уколико за то постоји могућност), при чему су могуће три ситуације:
 - пуно оптерећење мотора,
 - средње оптерећење мотора и

- мало оптерећење мотора.

3. Без промене угла отклона кормила (у односу на тачку 1) тест траје док брзина брод не падне испод 0.25 m/s.

ИМО прописи захтевају да напредовање брода уз пуно оптерећење мотора при војњи крмом, не буде веће од 15 дужина брода, с тим да се у појединим ситуацијама, када то околности налажу, од овога може одступити уколико то надлежна институција одобри.

Врло сличан овом тесту је и тест (*stopping inertia test*) при коме се у тачки два главни бродски погонски мотори сасвим гасе, а што се отклона кормила тиче могућа су два случаја:

- $\delta_R = 0^0$ - слободно заустављање (*free stop*),
- $\delta_R = \pm 35^0$ - ИМО заустављање (*IMO stop*)

Овај тест се прекида када брзина брода падне испод 0.5 m/s.

Оба теста треба спровести како за потпуно оптерећен брод тако и за брод у баласту.

У складу са прописима дефинисаним резолуцијом ИМО.601 из 1987. године, информација о карактеристикама брода при ИМО заустављању треба да се налази на видном месту у кормиларници брода.

3.3.3.2. Маневар мимоилажења (*Parallel Course Maneuver Test*)

Основни циљ овог теста је утврђивање утицаја отклона кормила на попречно померање брода у односу на почетни курс. На тај начин се осигурава безбедно мимоилажење два брода или обилажење препреке на пловном путу. Овај тест се спроводи на следећи начин:

1. Брод се доведе у жељени курс при жељеној брзини и сачека се да се задати режим пловидбе устали. На удаљености од отприлике једне дужине брода од тренутка издавања команде за почетак спровођења теста треба активирати уређаје за праћење трајекторије брода.
2. Кормило се отклони за угао од 35^0 на једну страну.
3. Када се курс брода промени за 30^0 кормило се прекреће на угао 35^0 на другу страну.
4. Тестирање се прекида након поновног заузимања почетног курса.

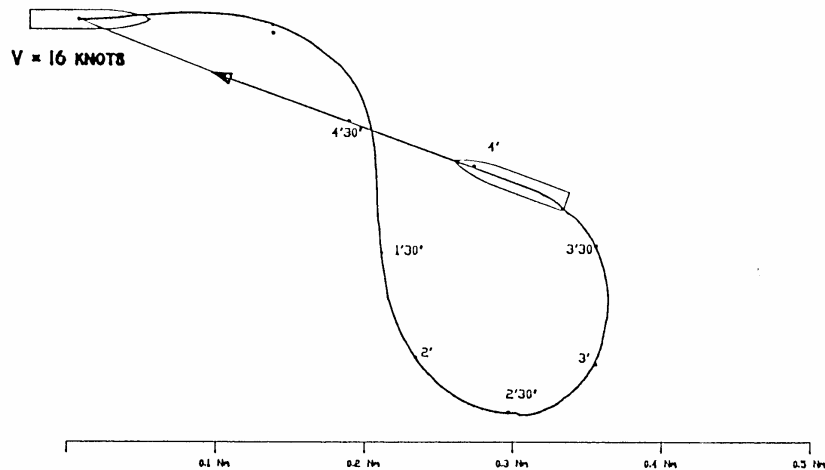
Описани поступак треба поновити уз скретање на обе стране. Осим тога, уместо промене курса од 30^0 може се ићи и на 60^0 , односно 90^0 , уз промену угла отклона кормила од 35^0 , 30^0 или 25^0 .

3.3.3.3. Маневар спашавања (*Man-Overboard Test*)

Овај тест је у ствари симулација спашавања особе која се нашла у мору. У току спровођења маневра спашавања треба пратити трајекторију брода и промену угла отклона кормила.

Поступак спровођења теста је следећи:

1. Брод се доведе у жељени курс при жељеној брзини и сачека се да се задати режим пловидбе устали. На удаљености од отприлике једне дужине брода од тренутка издавања команде за почетак спровођења теста треба активирати уређаје за праћење трајекторије брода.
2. Кормило се отклони за угао од 35° на једну страну.
3. Када се угао курса брода промени за 20° до 60° у односу на почетни, кормило се прекреће на угао од 35° на другу страну.
4. Након што угао курса брода достигне 120° до 150° у односу на почетни угао отклона кормила треба постепено смањивати све док угао курса брода не достигне 180° .



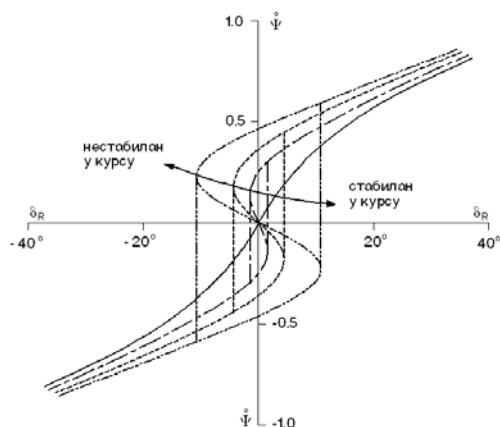
Слика 3.9 – Трајекторија брода при маневру спасавања [24]

3.3.4. Допунска разматрања о оцени својстава управљивости

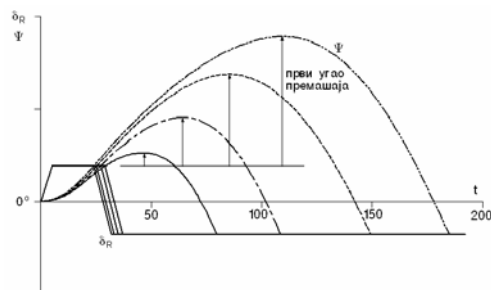
Иако је превасходни циљ Z теста оцена ефикасности контролног уређаја, на трајекторију брода ће свакако утицати и сама форма трупа брода. Отуда се поставља питање могућности употребе резултата који се добијају при спровођењу Z теста за оцену стабилности брода у курсу. На тај начин би се избегла потреба за спровођењем спиралног теста, а за шта је потребан велики простор и доста времена.

Познато је да се са повећањем стабилности брода време првог извршења повећава, док се угао првог премашаја смањује. Ово би се могло довести у везу са закључцима добијеним из спиралног теста да се са порастом стабилности брода у курсу ширина хистерезиса смањује. Дакле, смањењем стабилности брода повећава се и ширина хистерезиса и угао првог премашаја.

На слици 3.10 је дата промена карактера зависности брзине закретања од угла отклона кормила за четири брода различитог степена нестабилности, а на слици 3.11 је показан утицај нестабилности брода у курсу на промену курса у току Z маневра у зависности од времена.

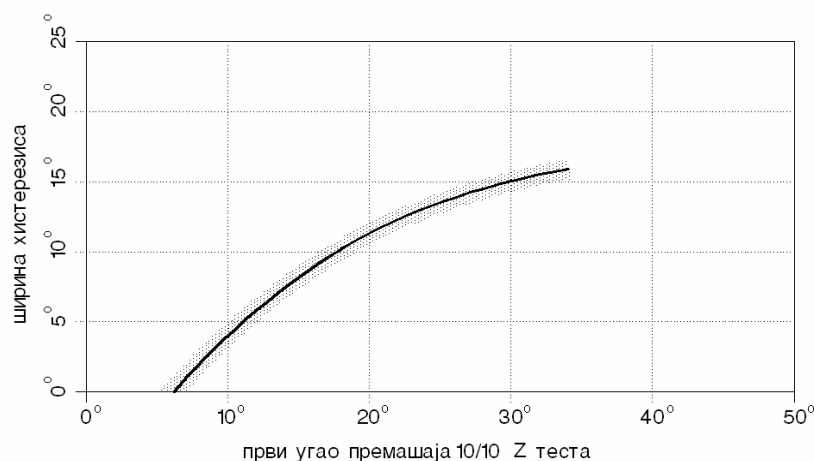


Слика 3.10 – Утицај нестабилности брода на резултате спиралног теста



Слика 3.11 – Утицај нестабилности брода на резултате Z теста

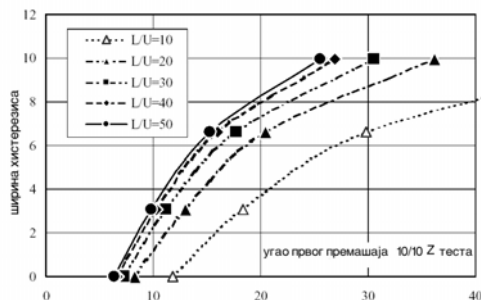
На основу резултата мерења на тридесет различитих бродова [6], при чему су сва мерења обављена под сличним околностима, карактерисаним приближно константним димензионим односом дужине брода и његове брзине ($L/V = const.$), може се констатовати зависност између ширине хистерезиса и угла првог премашаја $10^\circ/10^\circ$ Z теста, која је показана на слици 3.12.



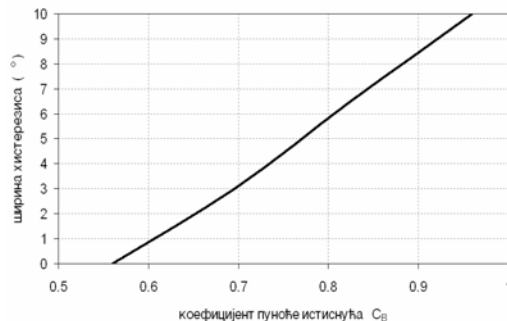
Слика 3.12 - Зависност између ширине хистерезиса и угла првог премашаја [6]

Због тога што у [6] није наведен тип, брзина, као ни геометријске специфичности разматраних бродова, показану зависност у квантитативном смислу треба прихватити са извесном резервом. Значај дијаграма датог на слици 3.12 био би пре свега статистички, јер су у њему садржана мерења различитих типова бродова који су данас у употреби.

На слици 3.13 су приказани резултати који су добијени испитивањем конкретног танкера депласмана од 95.000 тона дедвејта [7]. Овде је показано како се са променом односа L/V истог брода мења зависност ширине хистерезиса од угла првог премашаја. На нестабилност брода је при испитивању утицано променом коефицијента пуноће истиснућа. Овај утицај је показан на слици 3.14.



Слика 3.13 – Утицај промене односа L/V на зависност између ширне хистерезиса од угла првог премашаја

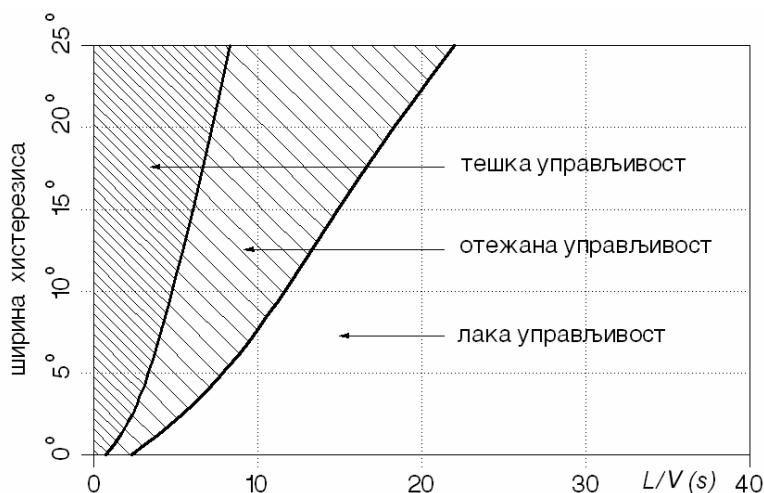


Слика 3.14 – Утицај коефицијента пуноће истиснућа на стабилност брода у курсу ($L/V \approx 30$)

Дакле, како се то из последњег разматрања може закључити стабилност брода у курсу у значајној мери зависи од брзине, дужине и коефицијента пуноће истиснућа брода. Било би интересантно успоставити везу између поменутих величина и поменутих критеријума који се данас користе за оцену својстава управљивости. Ипак, да би се о овоме могли донети прецизнији закључци потребно је располагати са великом базом измерених вредности.

Још један корак у покушају да се олакша поступак оцене својстава управљивости некога брода је и "дијаграм управљивости" који је добијен на основу већег броја тестираних бродова (слика 3.15). Овде се у зависности од ширине хистерезиса и димензионог односа дужине и брзине брода, може врло лако проценити колико је брод једноставан за управљање.

Према овом дијаграму, може се приметити да је лакше контролисати дужи брод при истом степену нестабилности у курсу и при истој брзини но краћи брод. Са друге стране, из дијаграма произилази и да је бродом нестабилном у курсу лакше управљати уколико је брзина којом се креће мања.



Слика 3.15 – Дијаграм "управљивости" бродова нестабилних у курсу [6]

4. МЕТОДЕ ЗА ПРЕДВИЋАЊЕ УПРАВЉИВОСТИ БРОДА – ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Тестови који су у претходном поглављу описани користе се пре свега за оцену својстава управљивости већ изграђених бродова. Међутим, резултати до којих се долази њиховом применом су од великог значаја и за пројектовање нових бродова истог типа. Позитивна искуства, проверена у пракси, у великој мери олакшавају избор форме и осталих битних елемената који могу утицати на својства управљивости будућег брода.

Међутим, уколико треба пројектовати брод за који се не располаже прототипом – бродом истог типа и довољно сличних карактеристика, а познатих својстава управљивости, тада су на располагању два суштински различита приступа:

- експериментална испитивања слободних модела и
- комбинација теоријског приступа и експерименталних испитивања везаних модела.

У првом случају, без нарочитог удубљивања у природу и узроке хидродинамичких сила које делују на модел брода у маневру, мери се понашање модела при различитим околностима којима се симулирају могуће реалне ситуације. Из овако добијених података се на одговарајући начин може проценити и понашање брода у природној величини.

У другом случају, хидродинамичке силе које узрокују понашање брода у различитим околностима се идентификују и одређују одговарајућим експерименталним или теоријским методама, а потом се решавањем једначина кретања, које те силе и моменте повезују са транслацијама, ротацијама, брзинама и убрзањима брода, долази до математичког модела погодног за симулацију кретања брода у маневру.

4.1. Експериментална испитивања слободних модела

Оваква испитивања представљају најдиректнији начин прогнозе маневарских карактеристика брода. На овај начин добијени резултати се могу користити не само за отклањање евентуалних грешака у избору форме и контролних уређаја, већ и за даље анализе.

При испитивању слободног модела, модел брода није везан за било какве спољашње уређаје на начин да та веза може утицати на његово кретање.

Препоруке за спровођење испитивања слободних модела које ће овде бити наведене, у складу су са препорукама које су усвојене на 23. заседању *Комитета за Управљивост* при ИТТС које је одржано 2002. године [8].

4.1.1. Димензије базена и дубина воде

Испитивања се могу обављати у класичним базенима који се користе и за остала данас позната моделска испитивања. У том случају базен би требало да је довољно широк и довољно дубок да би се избегао утицај бокова, односно дна на кретање модела. Што се дубине тиче, потребно је да не буде мања од:

$$h_{\min} > 4 \cdot T_m,$$

где је са T_m обележен газ модела. Уколико је потребно испитати маневаске карактеристике брода у условима пловидбе у плиткој води, тада дубина воде у базену може бити и мања. Осим тога, брзина кретања модела у току мерења не би требало да пређе:

$$V_m < 0.75 \cdot \sqrt{g \cdot h},$$

Уколико је за испитивање потребно више простора, мерења се могу обављати и на отвореном – језерима или заливима, уз услов да, осим довољне дубине, и временске прилике то дозволе.

4.1.2. Карактеристике модела

Да би се избегли допунски трошкови градње посебног модела за процену својстава управљивости, најчешће се користи исти модел који је већ употребљен при мерењима зависности отпора од брзине, односно при тесту аутопропулзије. Модел може бити потпуно аутономан, без икаквих веза са обалом или колицима за мерења, или делимично аутономан. Изнад делимично аутономног модела, при спровођењу тестова, крећу се колица са којима је повезан кабловима који не утичу на његово кретање, а преко којих се нападају поједини уређаји на моделу, односно добијају се информације о кретању модела са опреме за мерење. Није редак случај да се при испитивању делимично аутономних модела опрема за мерења налази и на самим колицима. Тада се релативни положај модела у односу на колица мери оптичким уређајима, док се апсолутни положај модела добија када се у обзир узме и положај колица.

Да би резултати који се добију мерењима били што поузданији потребно је да буде задовољено следеће:

- Ефекат размере, када је о управљивости реч, до данас није путпуно разјашњен. Због тога је пожељно да модел буде што је могуће већи, јер се на тај начин умањује утицај овог ефекта (пожељно је да Рејнолдсов број буде што већи). Тако се избегава могућност појаве ламинарног струјања дуж модела, а тиме и повећава поузданост тестова. Са друге стране, модел не треба да буде ни превелики јер би у том случају његова градња била превише скупа.
- На моделу треба да буду уграђени сви изданци који могу утицати на маневарске карактеристике.

- На моделу брода треба да буде уграђена следећа опрема:
 1. модел кормила и пропелера са одговарајућим електромотором,
 2. рачунар који контролише рад погонског уређаја (према потреби),
 3. сензори за мерење закретања, брзине закретања, као и угла ваљања (уколико се захтева),
 4. предајник преко кога се измерене информације шаљу на снимање и даљу обраду (у случају потпуне аутономије модела) и
 5. батерије за напајање набројаних уређаја (у случају потпуне аутономије модела).
- Ради што прецизније симулације, неопходно је обезбедити турбулентно струјање око модела. Ово се може постићи храпављењем оквашене површине модела брода, али и кормила, помоћу зрнаца песка, жице или на неки други начин.
- Како би била задовољена геометријска сличност брода и модела, све линеарне димензије треба да буду у складу са усвојеном размером:

$$\frac{L}{L_m} = \frac{B}{B_m} = \frac{T}{T_m} = \dots = \frac{D}{D_m} = \dots = \frac{LCG}{LCG_m} = \dots = \lambda,$$

где је са D обележен пречник пропелера (величине са индексом m се односе на модел), а са λ коефицијент размере.

Што се геометријске сличности пропелера тиче, основно је обезбедити модел одговарајућег пречника. Потом је потребно осигурати да однос корака и пречника (P/D) буде исти, док је број крила тек на трећем месту.

- Испитивања се спроводе уз једнаке углове оклона кормила на моделу и на броду. Осим тога, брзине оклона кормила на моделу и на броду, изражене у бездимензионом облику, треба да буду једнаке. Одавде се може одредити потребна брзина оклона кормила модела:

$$\dot{\delta}_{Rm} = \dot{\delta}_R \rightarrow \frac{\dot{\delta}_{Rm} \cdot L_m}{V_m} = \frac{\dot{\delta}_R \cdot L}{V}$$

- Тестови се најчешће спроводе при константном броју обртаја модела пропелера који је одређен једнакошћу Струхалових бројева (у теорији о раду пропелера Струхалов број нам је познат као коефицијент напредовања) за модел пропелера и за реалан пропелер:

$$S_{Rm} = S_R \rightarrow \frac{n_m \cdot D_m}{Va_m} = \frac{n \cdot D}{Va} \rightarrow n_m = n \cdot \sqrt{\lambda},$$

где је n број обртаја пропелера, а Va брзина којом вода дострујава пропелеру.

Да би била задовољена сличност Струхалових бројева код брода и модела, потребно је да склиз на моделу пропелера буде исти као и склиз на пропелеру иза брода. Ово је такође важно и за коректну симулацију ефикасности кормила. С обзиром да је модел пропелера оптерећенији у односу на пропелер иза брода (уколико му се ни на који начин не "помогне") брзина којом вода наструјава на модел кормила (које се налази иза модела пропелера) ће бити већа, те ће модел брода оштрије реаговати на отклон кормила. Да би се обезбедио допунски потисак, којим ће бити компензивано преоптерећење модела пропелера, на моделу брода се најчешће уграђује као допунски пропулзор елиса (ради у ваздуху), при чему се на интензитет допунске силе потиска може утицати променом броја обртаја елисе.

Одржавања броја обртаја модела пропелера константним у току трајања тестова утиче на немогућност да се адекватно симулира пад брзине услед маневра. Пад брзине при маневру је због тога мањи код модела него код реалног брода. Да би се ово избегло, потребно је обезбедити да карактеристика мотора који покреће модел пропелера одговара карактеристици главног бродског дизел мотора.

Овај недостатак је до сада углавном превазилажен разним корекцијама на бази искуства. Данас се све чешће примењују компјутери помоћу којих се регулацијом броја обртаја електромотора може довољно добро симулирати карактеристика дизел мотора, а тиме и одговарајући пад брзине при маневру.

- Смер обртања модела пропелера треба да буде исти као и код брода.
- Да би била задовољена сличност динамичких појава потребно је да бездимензиони момент инерције масе око z осе (I_z) буде једнак за модел и за брод:

$$I_{Zm} = I_z \rightarrow \frac{I_{Zm}}{0.5 \cdot \rho_m \cdot L_m^5} = \frac{I_z}{0.5 \cdot \rho \cdot L^5} \rightarrow I_{Zm} = I_z \cdot \lambda^{-5} \cdot \frac{\rho_m}{\rho},$$

где је ρ_m густина воде у базену, а ρ густина воде у којој је предвиђено да брод пливи.

Уколико желимо да симулирамо и бочни нагиб при скретању брода, тада треба осигурати једнакост бездимензионог момента инерције масе око x осе, као и бездимензионе попречне метацентарске висине. Последња два услова је у пракси врло тешко испунити.

4.1.3. Поступак спровођења тестова

Поступак спровођења сваког теста се може поделити у три фазе:

1. успостављање потребних почетних услова кретања модела,
2. симулација маневра и мерења кретања и понашања модела и
3. заустављање модела.

Пауза између два узастопна тестирања треба да траје довољно дуго да се површина воде у базену смири од последњег теста, како таласи или заостали вртлози не би утицали на резултате нових мерења.

С обзиром на то да физичке карактеристике воде зависе од њене температуре, а што се мора узети у обзир при анализи измерених вредности, повремено треба мерити температуру воде. Уобичајено је да се ово мерење обавља на дубини која одговара половини газа модела.

Убрзавање модела у првој фази, када треба успоставити равномерно праволинијско кретање модела константном брзином (у случају већине тестова) може се постићи на три начина:

- уз помоћ сопственог пропулзивног система; у том случају је за достизање потребних почетних услова потребна релативно дугачка деоница базена,
- уз помоћ посебног система тзв. катапулта и
- применом колица која се након постизања довољног убрзања откаче од модела, или га прате без утицаја на његово кретање.

Калибрацију мерне опреме треба спровести непосредно пре, као и непосредно после испитивања модела. На тај начин се могућност појаве грешке узроковане мерном опремом своди на минимум.

Уобичајени тестови који се примењују за оцену својстава управљивости брода мерењима на слободним моделима, исти су као и при мерењу на већ изграђеним бродовима у природној величини. С обзиром да су ови тестови детаљно објашњени у претходном поглављу, овде ће бити само набројани тестови који се најчешће спроводе:

- *тест окретања* – спроводи се при максималном могућем отклону кормила (најчешће 35°),
- *Z тест* – због ограничености простора који је на располагању (у случају да се мерења спроводе у базену), тест се зауставља када се одреди угао другог премашаја,
- *спирални тест* – угао отклона кормила иде од +25° до -25° са кораком од 5°,
- *обрнути спирални тест* – у околини угла нултог узгона кормила, угао отклона кормила се мења са кораком који је мањи или једнак 1°,
- *тест извлачења* и
- *круг окретања са убрзавањем (accelerating turning test)*.

4.1.4. Мерење и анализа

У току симулације маневра при спровођењу одговарајућег теста мере се следећи подаци:

- време,
- позиција модела,
- угао курса модела,
- брзина модела (укупна брзина, брзина залетања и брзина заношења),
- брзина закретања,

а у појединим случајевима, када се то допунски захтева и:

- угао нагиба модела,
- понирање модела и
- трим модела.

Осим тога, прати се и промена броја обртаја модела пропелера (уколико је променљив) и угао отклона модела кормила.

Учестаност регистрација информација при мерењима, зависно од уређаја и потреба, се креће и до 250 у минути. Подаци измерени у реалном времену се снимају и након сваког пролаза модела проверавају како би се на време уочиле евентуалне грешке при мерењу. Ове грешке се могу јавити као последица преурањеног почетка снимања, преоптерећења или неисправности мерних уређаја, допунских непланираних извора поремећаја и слично.

По завршетку тестирања измерени подаци се даље обрађују, при чему се подаци добијени у прелазним режимима, при стартовању или заустављању модела, не узимају у обзир.

Уколико су задовољене све поменуте препоруке, може се очекивати да се карактеристичне вредности, измерене при кретању модела, могу директно екстраполирати на услове кретања брода.

Најчешћи узроци грешака које се могу јавити могу се поделити у три групе:

1. Грешке услед несавршености модела:
 - грешке у форми, маси и положају тежишта масе модела,
 - погрешан број обртаја модела пропелера, односно угла модела кормила.
2. Грешке услед несавршености поступка мерења:
 - започињање мерења пре успостављања потребних почетних услова,
 - грешке услед постојања утицаја колица на кретање модела (уколико је реч о моделу са делимичном аутономијом),
 - грешке услед утицаја заосталог кретања површине базена од претходног пролаза.
3. Грешке услед ограничења базена и мерне опреме:
 - грешке услед постојања утицаја бокова и/или дна базена на трајекторију модела,
 - грешке услед промене конфигурације дна у случају испитивања модела у плиткој води,
 - грешке услед неисправности мерне опреме.

5. МЕТОДЕ ЗА ПРЕДВИЂАЊЕ СВОЈСТАВА УПРАВЉИВОСТИ – МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ

Упоредо са развојем поступака за моделска испитивања својстава управљивости, развијала се и идеја о теоријском приступу проблему управљивости, што због потребе за смањењем трошкова испитивања, што због настојања да се појава боље разуме. Идеја о могућностима симулације кретања брода у маневру, пре него што је и модел таквог брода направљен, еволуирала је са временом и до данас је доста урађено на том пољу. Упркос чињенице да коначан математички модел појаве, због њене сложености, још увек није у потпуности дефинисан, данас је овај поступак најчешће коришћен при процени својстава управљивости конвенционалних бродова.

Развој компјутерске технологије надовезао се на актуелна настојања. Енормно повећање брзине обраде информација у јединици времена омогућило је симулацију маневра у реалном времену. Ово значи да је у току саме симулације могуће мењати параметре који утичу на кретање брода и непосредно пратити како се уведене измене одражавају на понашање брода. Примена оваквог приступа омогућава прилично једноставне корекције форме и/или контролних уређаја и праћење њиховог утицаја на маневарске могућности брода. На тај начин, не само да се у почетним фазама израде пројекта брода може уочити сваки недостатак, већ се анализом утицаја појединих величина може доћи до уопштених препорука чије уважавање би имало за циљ брод добрих својстава управљивости.

Осим тога, примена симулација кретања брода се може користити и за обуку особља задуженог за управљање бродом. Ово је од посебног значаја у условима пловидбе у отежаним околностима – у лукама или у затвореним водама (рекама или каналима).

5.1. Математички модел кретања брода у маневру

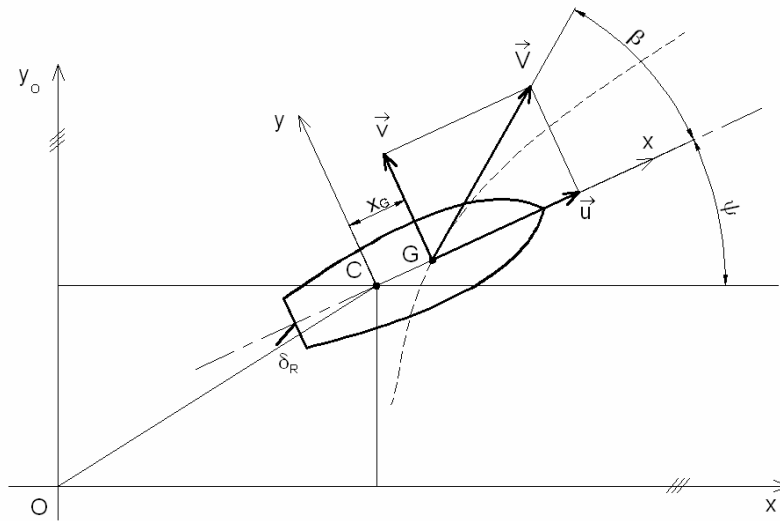
Могућности адекватне процене понашања брода у маневру применом симулације у реалном времену, ограничене су пре свега тачношћу примењеног математичког модела. Највећи могући степен поузданости подразумевао би математички модел који узима у обзир свих шест степени слободе кретања брода, као и све релевантне спољашње утицаје. На жалост, такав модел би био сувише гломазан и компликован за решавање. Практични разлози налажу

потребу за што једноставнијим моделом, а још увек прихватљиве поузданости. То је један од разлога за занемаривање ваљања, понирања и посртања брода.

Кретања брода описана са залетањем, заношењем и закретањем, која се најчешће узимају у обзир при анализи својстава управљивости, одређују кретање брода у хоризонталној равни. Ово упрошћење, када је о управљивости брода реч, има физичког оправдања.

Математички модел кретања брода заправо подразумева систем једначина које доводе у везу силе које делују на брод и могућа кретања брода узрокована тим силама. Први корак у формулисању једначина кретања брода је дефинисање координатног система и одговарајућих величина које одређују његово кретање.

Кретање брода у непокретном координатном систему са свим битним параметрима који то кретање одређују, показано је на слици 3.1.



Слика 5.1 – Усвојени координатни систем

Тачка G представља тежиште масе брода, а тачка C је произвољна тачка на оси симетрије брода за коју је везан покретни координатни систем xCy. Често се при извођењу једначина кретања полази од претпоставке да се координатни почетак покретног координатног система поклапа са тежиштем масе брода. У општем случају то не мора бити тако.

Кретање брода као крутога тела у хоризонталној равни одређено је основним законима динамике:

1. законом о промени количине кретања:

$$\frac{d(\Delta \cdot \vec{V})}{dt} = \Delta \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = \Delta \cdot \vec{a}_G = \vec{F}_R, \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

где су: \vec{F}_R - резултујућа сила која делује на брод,
 Δ - депласман брода,

\vec{a}_G - убрзање тежишта брода у односу на инерцијални систем,
 \vec{V} - брзина тежишта брода

2. законом о промени момента количине кретања:

$$\frac{d\vec{L}_G}{dt} = \vec{M}_G, \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

где су: \vec{L}_G - вектор момента количине кретања за тежиште брода,
 \vec{M}_G - главни момент за тежиште брода

Момент количине кретања брода одређен је производом момента инерције масе брода за главну тежишну осу I и угаоног убрзања ротације брода око те осе.

Једначина (5.1) се може пројектовати на осе непокретног система (види слику 5.1):

$$\begin{aligned} x_o : \quad X_o &= \Delta \cdot \ddot{x}_{oG}, \\ y_o : \quad Y_o &= \Delta \cdot \ddot{y}_{oG} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

где су: X_o - резултујућа сила у x_o правцу,
 Y_o - резултујућа сила у y_o правцу,

У почетном тренутку брод се налазио у координатном почетку непокретног координатног система:

$$t = 0: \quad x_{oC} = 0 \quad \text{и} \quad y_{oC} = 0.$$

Уколико са X , односно са Y обележимо пројекције резултујуће силе у правцу x , односно y , тада се може успоставити веза између покретног и непокретног координатног система:

$$\begin{aligned} X_o &= X \cdot \cos \Psi - Y \cdot \sin \Psi, \\ Y_o &= X \cdot \sin \Psi + Y \cdot \cos \Psi, \end{aligned}$$

односно

$$\begin{aligned} X &= X_o \cdot \cos \Psi + Y_o \cdot \sin \Psi, \\ Y &= -X_o \cdot \sin \Psi + Y_o \cdot \cos \Psi. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

На исти начин се могу довести у везу и брзине (u, v), односно убрзања (\dot{u}, \dot{v}) између покретног и непокретног координатног система:

$$\begin{aligned} x_{oG} = x_{oC} + x_G \cdot \cos \Psi &\rightarrow \dot{x}_{oG} = \dot{x}_{oC} - x_G \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi, \\ y_{oG} = y_{oC} + x_G \cdot \sin \Psi &\rightarrow \dot{y}_{oG} = \dot{y}_{oC} + x_G \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi, \end{aligned}$$

односно:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{oG} &= \ddot{x}_{oC} - \dot{x}_G \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi - x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \cos \Psi, \\ \ddot{y}_{oG} &= \ddot{y}_{oC} + \dot{x}_G \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \sin \Psi. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

С обзиром да важи:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{oC} &= u \cdot \cos \Psi - v \cdot \sin \Psi, \\ \dot{y}_{oC} &= u \cdot \sin \Psi + v \cdot \cos \Psi, \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{OC} &= \dot{u} \cdot \cos \Psi - u \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi - \dot{v} \cdot \sin \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi, \\ \ddot{y}_{OC} &= \dot{u} \cdot \sin \Psi + u \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi + \dot{v} \cdot \cos \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi,\end{aligned}$$

једначине (5.5) се могу написати у следећем облику:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{OG} &= \dot{u} \cdot \cos \Psi - u \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi - \dot{v} \cdot \sin \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \sin \Psi - x_G \cdot \dot{\Psi}^2 \cos \Psi, \\ \ddot{y}_{OG} &= \dot{u} \cdot \sin \Psi + u \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi + \dot{v} \cdot \cos \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi + x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \dot{\Psi}^2 \sin \Psi.\end{aligned}$$

Уколико сада последњи систем једначина заменимо у (5.3), па све то уврстимо у (5.4) добићемо:

$$\begin{aligned}X &= \Delta \cdot \cos \Psi \cdot \left[\dot{u} \cdot \cos \Psi - u \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi - \dot{v} \cdot \sin \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \sin \Psi - x_G \cdot \dot{\Psi}^2 \cos \Psi \right] + \\ &\quad + \Delta \cdot \sin \Psi \cdot \left[\dot{u} \cdot \sin \Psi + u \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi + \dot{v} \cdot \cos \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi + x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \dot{\Psi}^2 \sin \Psi \right] \\ Y &= \Delta \cdot \cos \Psi \cdot \left[\dot{u} \cdot \sin \Psi + u \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi + \dot{v} \cdot \cos \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi + x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \dot{\Psi}^2 \sin \Psi \right] - \\ &\quad - \Delta \cdot \sin \Psi \cdot \left[\dot{u} \cdot \cos \Psi - u \cdot \dot{\Psi} \cdot \sin \Psi - \dot{v} \cdot \sin \Psi - v \cdot \dot{\Psi} \cdot \cos \Psi - x_G \cdot \ddot{\Psi} \cdot \sin \Psi - x_G \cdot \dot{\Psi}^2 \cos \Psi \right]\end{aligned}$$

Након сређивања последњих једначина добија се:

$$\begin{aligned}X &= \Delta \cdot \dot{u} - \Delta \cdot v \cdot \dot{\Psi} - x_G \cdot \Delta \cdot \dot{\Psi}^2, \\ Y &= \Delta \cdot u \cdot \dot{\Psi} + \Delta \cdot \dot{v} + x_G \cdot \Delta \cdot \ddot{\Psi}.\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (5.6)$$

Пројектовањем једначине (5.2) на z осу покретног координатног система, водећи при том рачуна да та оса не пролази кроз тежиште масе брода и да је при томе $y_G = 0$, добија се израз за укупни момент око ове осе:

$$N = I_{zG} \cdot \ddot{\Psi} + x_G \cdot Y \rightarrow N = I_{zG} \cdot \ddot{\Psi} + x_G \cdot \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v} + x_G \cdot \ddot{\Psi}),$$

односно:

$$N = (I_{zG} + \Delta \cdot x_G^2) \cdot \ddot{\Psi} + x_G \cdot \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v}),$$

где је I_{zG} момент инерције за вертикалну осу која пролази кроз тежиште масе брода.

С обзиром да је према Штајнеровој теорему момент инерције масе брода за осу z покретног координатног система одређен изразом:

$$I_{zC} = I_{zG} + \Delta \cdot x_G^2.$$

Израз за момент се своди на:

$$N = I_{zC} \cdot \ddot{\Psi} + x_z \cdot \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v}) \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

Конечно, једначине (5.6) заједно са једначином (5.7) чине систем нелинеарних диференцијалних једначина кретања брода у хоризонталној равни:

$$\begin{aligned}
 X &= \Delta \cdot (\dot{u} - v \cdot \dot{\Psi} - x_G \cdot \dot{\Psi}^2), \\
 Y &= \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v} + x_G \cdot \ddot{\Psi}), \\
 N &= I_{zC} \cdot \ddot{\Psi} + x_G \cdot \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v}).
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Уколико би покретни координатни систем био постављен у тежиште масе брода (тачку G) тада би се систем једначина кретања брода свео на:

$$\begin{aligned}
 X &= \Delta \cdot (\dot{u} - v \cdot \dot{\Psi}), \\
 Y &= \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v}), \\
 N &= I_{zG} \cdot \ddot{\Psi}.
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Са десне стране знака једнакости су брзине и убрзања који одређују translације и ротацију брода у хоризонталној равни, а са леве су силе и моменти које доводе до кретања брода.

Овај систем једначина, иако на први поглед делује прилично једноставно, није могуће у потпуности решити. Ово би и било могуће када би постојао начин да се потпуно тачно одреде све силе и моменти који делују на брод, но, због сложености појаве, у овом тренутку то није могуће.

Међутим, до данас је развијено неколико приступа који омогућавају мање или више тачно решавање једначина кретања. Неки од њих пружају могућност мање или више поуздане процене сила које делују на брод при маневру, разврставајући при томе поједине узроке сила, док други посматрајући силе интегрално, одређују их применом експерименталних поступака.

5.2. Силе и моменти који делују на брод при маневру

Све силе и моменте који делују на брод приликом маневра можемо поделити на три основне групе:

1. Хидродинамичке силе које делују на труп брода, а које су узроковане његовим кретањем, радом погонског агрегата и контролних уређаја.
2. Спољашње силе услед утицаја ветра, таласа и струјања воде.
3. Спољашње силе које су последица радних активности брода (реморкер који вуче брод, потискивач који га гура, ...).

Хидродинамичке силе делују у хоризонталној равни и можемо их поделити у две групе:

- Силе пригушења – сразмерне су губицима енергије при кретању брода. Често се у анализама хидродинамичких сила, ради поједностављења проблема, занемарује вискозност воде. Чак и тада постоје силе пригушења.
- Силе услед додатне масе – сразмерне су убрзању брода при кретању кроз воду и узроковане су чињеницом да брод при кретању покреће велику количину воде.

У случају пловидбе у плиткој или ограниченој води долази до појаве допунских сложених ефеката који додатно компликују анализу хидродинамичких и инерцијалних сила.

Спољашње силе које на брод делују услед ветра, утицаја таласа или услед струјања воде (морске струје или ток реке) у значајној мери се одражавају на тренутне маневарске могућности брода. Услед утицаја ових сила брод који је иначе стабилан у курсу може имати проблема са одржањем жељеног курса. Осим тога, може доћи до пораста отпора што би изискивало додатну снагу мотора како би се одржала жељена брзина.

Утицај струјања воде при кретању брода се најчешће узима у обзир кроз корекцију хидродинамичких сила тако што се посматра релативна брзина кретања брода у односу на воду. Ово је олакшано чињеницом да је брзина струјања воде у највећем броју случајева приближно константна. Што се маневарских карактеристика брода тиче, кретање низ струју, нарочито у условима пловног пута ограничене ширине, је најнеповољнији случај. Тада је релативна брзина брода у односу на воду мала, па је ефикасност кормила у великој мери умањена.

У условима пловидбе брода под утицајем ветра долази до појаве аеродинамичких сила које додатно утичу на кретање брода. Чак и умерен ветар може изазвати доста проблема и отежати управљање бродом који се споро креће. Са порастом односа брзине ветра и брзине брода утицај ветра на маневарске могућности брода расте. Овај утицај директно је пропорционалан са:

1. релативном брзином ветра – брзином ветра у односу на брзину брода,
2. углом под којим ветар дува,
3. површином надводног дела брода,
4. растојањем између тежишта латералног плана надводног дела брода и тежишта масе брода,
5. обликом надводног дела брода.

У случају веће брзине ветра под неповољним углом, брод не може одржати жељени курс, иако је стабилан у курсу.

Силе које се јављају услед утицаја таласа у великој мери утичу на маневарске могућности брода. Честе промене отклона кормила су неопходне како би се одржао жељени правац. Анализа утицаја таласа, услед сложености појаве, подразумевала би узимање у обзир свих шест степени слободе.

Већ из овог, сасвим информативног пресека, може се уочити да је одређивање сила које могу деловати на брод при његовом кретању изузетно компликован задатак.

У зависности од начина на који се третирају поменуте силе, данас постоји неколико приступа решавању једначина кретања брода.

6. ЛИНЕАРНА ТЕОРИЈА УПРАВЉИВОСТИ БРОДА

6.1. Линеарне диференцијалне једначине кретања брода

Без посебног анализирања природе сила које делују на брод приликом маневра, може се претпоставити да оне зависе од брзина и убрзања брода. Појединачни утицаји спољашњих фактора, у овом тренутку, ће бити занемарени.

$$\begin{aligned} X &= F_X(u, v, \dot{u}, \dot{v}, \dot{\Psi}, \ddot{\Psi}), \\ Y &= F_Y(u, v, \dot{u}, \dot{v}, \dot{\Psi}, \ddot{\Psi}), \\ N &= F_\Psi(u, v, \dot{u}, \dot{v}, \dot{\Psi}, \ddot{\Psi}). \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

Како би се овако представљене силе могле употребити за квалитативну анализу својстава управљивост, неопходно их је трансформисати у употребљивији математички облик.

Уколико је нека функција $f(x)$ непрекидна и има изводе до укључиво $(n-1)$ -тог реда у одређеном интервалу и ако у свакој тачки унутар тог интервала постоји коначан извод $f^{(n)}(x)$, тада се она у том интервалу може представити у облику Тејлоровог реда:

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0) \cdot f'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2!} \cdot f''(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^n}{n!} \cdot f^{(n)}(x_0),$$

где је: x_0 - константа унутар посматраног интервала.

На врло сличан начин се и функције више променљивих, уколико задовољавају поменуте услове, могу трансформисати у Тејлоров ред.

Како су силе које делују на брод физичке величине, то се са правом може претпоставити да је њихова промена непрекидна и да једначине (6.1) задовољавају све потребне услове, те да се могу написати у облику:

- резултујућа сила у правцу x осе:

$$\begin{aligned} X &= F_X(u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\Psi}_1, \ddot{\Psi}_1) + (u - u_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial u} + (v - v_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial v} + (\dot{u} - \dot{u}_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial \dot{u}} + \\ &+ (\dot{v} - \dot{v}_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial \dot{v}} + (\dot{\Psi} - \dot{\Psi}_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial \dot{\Psi}} + (\ddot{\Psi} - \ddot{\Psi}_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial \ddot{\Psi}} + \frac{(u - u_1)^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 F_X}{\partial u^2} + \dots \end{aligned}$$

- резултујућа сила у правцу y осе:

$$Y = F_Y(u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\Psi}_1, \ddot{\Psi}_1) + (u - u_1) \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial u} + (v - v_1) \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial v} + (\dot{u} - \dot{u}_1) \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{u}} + \\ + (\dot{v} - \dot{v}_1) \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{v}} + (\dot{\Psi} - \dot{\Psi}_1) \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{\Psi}} + (\ddot{\Psi} - \ddot{\Psi}_1) \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \ddot{\Psi}} + \frac{(u - u_1)^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 F_Y}{\partial u^2} + \dots$$

- резултујући момент око z осе:

$$N = F_\Psi(u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\Psi}_1, \ddot{\Psi}_1) + (u - u_1) \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial u} + (v - v_1) \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial v} + (\dot{u} - \dot{u}_1) \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{u}} + \\ + (\dot{v} - \dot{v}_1) \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{v}} + (\dot{\Psi} - \dot{\Psi}_1) \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{\Psi}} + (\ddot{\Psi} - \ddot{\Psi}_1) \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \ddot{\Psi}} + \frac{(u - u_1)^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 F_\Psi}{\partial u^2} + \dots$$

Величине са индексом 1 се односе на почетни тренутак који је окарактерисан праволијским кретањем брода константном брзином. Изрази који су овде дати представљају развој у Тејлоров ред у околини почетног стања.

Уколико су промене довољно мале, може се очекивати да се са повећањем броја чланова реда тачност написаних израза повећава, асимптотски се приближавајући тачној вредности. Међутим, на тај начин се изрази вишеструко компликују. Са практичне стране, показало се да нема никаквог смисла ићи преко чланова другог реда. Одбацивањем чланова вишег реда се уноси извесна грешка, али је она таква да суштински не може утицати на квалитет изведених закључака.

Када је циљ провера стабилности брода у курсу или процена трајекторије брода при умереним угловима отклона кормила, мали поремећаји који доводе до малих померања су сасвим довољни за оцену. Због тога је у физичком смислу сасвим оправдано зауставити се већ на члановима првог реда. Такав приступ – линеаран – је најједноставнији теоријски приступ који се данас користи. Од линеарног модела не треба очекивати да се може користити за довољно поуздане симулације кретања брода у сваком маневру, али се на бази њега свакако могу донети коректне оцене које се тичу стабилности брода у курсу.

Осим занемарења чланова вишег реда, услед геометријских карактеристика брода и почетних услова, написане једначине се могу додатно упростити:

- С обзиром да је у почетном тренутку кретање брода равномерно и праволијско, оправдано је претпоставити да нема убрзања залетања, занешења ни закретања брода одакле проистиче:

$$F_x(u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\Psi}_1, \ddot{\Psi}_1) = 0, \\ F_y(u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\Psi}_1, \ddot{\Psi}_1) = 0, \\ F_\Psi(u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\Psi}_1, \ddot{\Psi}_1) = 0,$$

односно:

$$\dot{u}_1 = \dot{v}_1 = \dot{\Psi}_1 = \ddot{\Psi}_1 = 0.$$

- Резултујућа сила у правцу x осе, због симетрије брода у односу на xz раван, не може довести до занешења ни закретања брода:

$$\frac{\partial F_x}{\partial v} = \frac{\partial F_x}{\partial \dot{v}} = 0, \quad \frac{\partial F_x}{\partial \Psi} = \frac{\partial F_x}{\partial \dot{\Psi}} = 0$$

- Резултујућа сила у правцу y осе, због симетрије брода у односу на xz раван, не утиче на брзину ни на убрзање залетања:

$$\frac{\partial F_Y}{\partial u} = \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{u}} = 0$$

- Резултујући момент око z осе не утиче на брзину ни на убрзање залетања:

$$\frac{\partial F_\Psi}{\partial u} = \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{u}} = 0$$

- Услед симетрије брода праволинијско кретање подразумева да се симетрала брода поклапа са трајекторијом. Због тога се може претпоставити да је у почетном тренутку брзина заносења брода једнака нули:

$$v_1 = 0.$$

Уколико овако упрошћене изразе за силе уврстимо у једначине кретања (5.9), након линеаризације леве стране једначина, добићемо:

$$\begin{aligned} \Delta \cdot \dot{u} &= (u - u_1) \cdot \frac{\partial F_X}{\partial u} + \dot{u} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial \dot{u}}, \\ \Delta \cdot (\dot{\Psi} + \dot{v}) &= v \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial v} + \dot{v} \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{v}} + \dot{\Psi} \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{\Psi}} + \ddot{\Psi} \cdot \frac{\partial F_Y}{\partial \ddot{\Psi}}, \\ I_{zG} \cdot \ddot{\Psi} &= v \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial v} + \dot{v} \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{v}} + \dot{\Psi} \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{\Psi}} + \ddot{\Psi} \cdot \frac{\partial F_\Psi}{\partial \ddot{\Psi}}. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

Овако је добијен систем линеарних диференцијалних једначина кретања брода у хоризонталној равни у димензионом облику. Иако се ове једначине могу учинити компликованије од једначина у систему (5.9), то није тако јер се ове једначине за разлику од претходних могу решити. Упрошћења која су уведена ограничавају примену система линеарних једначина на мале промене брзина и убрзања, али са друге стране омогућавају њихово решавање.

Изводи резултујућих сила и момента по брзинама и убрзањима, са десна стране знака једнакости, се називају хидродинамичким изводима и одређују се експериментално – испитивањима "везаних" модела [19], или теоријски (применом теорије о витком броду [20]), али уз ограничену поузданост.

Ради упрошћења записа, данас се у литератури могу срести следеће, општеприхваћене ознаке:

$$\begin{array}{cccc} \dot{\Psi} \equiv r & \ddot{\Psi} \equiv \dot{r} & \frac{\partial F_X}{\partial u} \equiv X_u & \frac{\partial F_X}{\partial \dot{u}} \equiv X_{\dot{u}} \\ \frac{\partial F_Y}{\partial v} \equiv Y_v & \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{v}} \equiv Y_{\dot{v}} & \frac{\partial F_Y}{\partial \dot{\Psi}} \equiv Y_r & \frac{\partial F_Y}{\partial \ddot{\Psi}} \equiv Y_{\ddot{\Psi}} \\ \frac{\partial F_\Psi}{\partial v} \equiv N_v & \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{v}} \equiv N_{\dot{v}} & \frac{\partial F_\Psi}{\partial \dot{\Psi}} \equiv N_r & \frac{\partial F_\Psi}{\partial \ddot{\Psi}} \equiv N_{\ddot{\Psi}} \end{array}$$

Димензије извода сила по брзинама и убрзањима који се јављају у једначинама кретања могу се одредити на основу њихове дефиниције:

$$\begin{array}{ccccc} X_u & [t/s] & Y_v & [t/s] & Y_r & [t \cdot m/s] & N_v & [t \cdot m/s] & N_r & [t \cdot m^2/s] \\ X_{\dot{u}} & [t] & Y_{\dot{v}} & [t] & Y_{\ddot{\Psi}} & [t \cdot m] & N_{\dot{v}} & [t \cdot m] & N_{\ddot{\Psi}} & [t \cdot m^2] \end{array}$$

Увођењем ових ознака и након мале трансформације, систем једначина (6.2) добија облик:

$$\begin{cases} \dot{u} \cdot (\Delta - X_{\dot{u}}) - u \cdot X_u + u_1 \cdot X_{u_1} = 0, \\ \dot{v} \cdot (\Delta - Y_{\dot{v}}) - v \cdot Y_v - \dot{r} \cdot Y_{\dot{r}} - r \cdot Y_r + \Delta \cdot r = 0, \\ \dot{r} \cdot (I_{zG} - N_{\dot{r}}) - r \cdot N_r - \dot{v} \cdot N_{\dot{v}} - v \cdot N_v = 0. \end{cases} \dots\dots\dots (6.3)$$

Овим је добијен уобичајени облик система линеарних диференцијалних једначина кретања брода у хоризонталној равни у димензионом облику.

Сваки члан прве две једначине има димензију силе (N), а сваки члан последње једначине има димензију момента (Nm).

Да би се изведене једначине кретања могле користити за оцену својстава управљивости брода, како је то већ поменуто, промене брзине и угла курса брода би морале бити мале. Међутим изведени, димензиони облик није погодан за вредновање у којој мери су поменуте величине мале и у односу на шта су мале. Због тога је потребно систем једначина (6.3) свести на бездимензиони облик. Први корак у том смислу је усвајање одговарајућих размера. С обзиром да су једначине кретања изведене тако што су једначине (6.1) развијене у Тејлоров ред у околини стања које је окарактерисано као равнотежно, и да решавањем једначина очекујемо да до параметара за оцену својстава управљивости дођемо из података о променама у околини тог стања, логично је узети као размере за брзину V_o (одговара почетној брзини) и за дужину L_o (одговара дужини брода). Дакле, да би промена брзине брода биле прихватљива потребно је да буде за ред величине мања од почетне брзине брода, и да при томе промена угла курса буде таква да дужина брода буде мала у односу на карактеристичну дужину којом је описан одговарајући маневар.

Имајући ово у виду сада се могу увести одговарајуће бездимензионе величине:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{u}{V_o} & v' &= \frac{v}{V_o} & r' &= \frac{r \cdot L_o}{V_o} & \dot{u}' &= \frac{\dot{u} \cdot L_o}{V_o^2} & \dot{v}' &= \frac{\dot{v} \cdot L_o}{V_o^2} & \dot{r}' &= \frac{\dot{r} \cdot L_o^2}{V_o^2} \\ X'_u &= \frac{X_u}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^2 \cdot V_o} & X'_{\dot{u}} &= \frac{X_{\dot{u}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^3} & \Delta' &= \frac{\Delta}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^3} & I'_{zG} &= \frac{I_{zG}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^5} \\ Y'_v &= \frac{Y_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^2 \cdot V_o} & Y'_r &= \frac{Y_r}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^3 \cdot V_o} & Y'_{\dot{v}} &= \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^3} & Y'_{\dot{r}} &= \frac{Y_{\dot{r}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^4} \\ N'_v &= \frac{N_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^3 \cdot V_o} & N'_r &= \frac{N_r}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^4 \cdot V_o} & N'_{\dot{v}} &= \frac{N_{\dot{v}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^4} & N'_{\dot{r}} &= \frac{N_{\dot{r}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^5} \end{aligned}$$

Заменом бездимензионих величина у једначине система (6.3), након сређивања, добијамо:

$$\begin{aligned}
 \dot{u}' \cdot (\Delta' - X'_u) - u' \cdot X'_u + X'_u &= 0, \\
 \dot{v}' \cdot (\Delta' - Y'_v) - v' \cdot Y'_v - \dot{r}' \cdot Y'_r - r' \cdot Y'_r + \Delta' \cdot r' &= 0, \\
 \dot{r}' \cdot (I'_{zG} - N'_r) - r' \cdot N'_r - \dot{v}' \cdot N'_v - v' \cdot N'_v &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

Једначине (6.4) су, на изглед, скоро идентичне једначинама (6.3). Међутим, све величине су сада бездимензионе па се могу адекватно упоређивати са усвојеним размерама. У првој једначини се може уочити да у односу на димензиони облик недостаје члан u_1 . Разлог је тај што је, с обзиром на усвојену размеру за брзину:

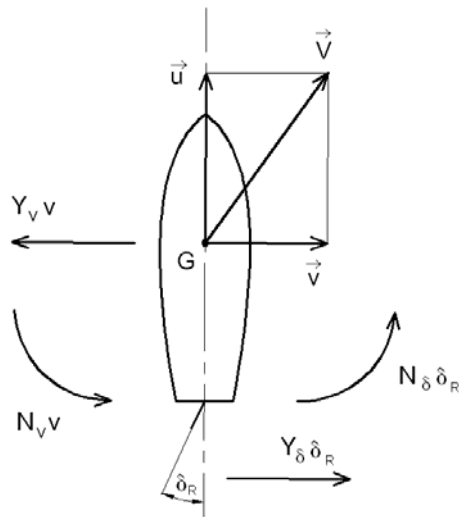
$$u_1' \approx 1.$$

Величине:

- Y_r - утицај брзине закретања на резултујућу попречну силу
- $Y_{\dot{r}}$ - утицај убрзања закретања на резултујућу попречну силу
- N_v - утицај брзине заносења на резултујући момент око веритлане осе
- $N_{\dot{v}}$ - утицај убрзања заносења на резултујући момента око веритлане осе

су по интензитетима мале и од нуле се разликују само услед асиметрије брода у односу на уз раван, због разлика у облику прамца и крме.

Систем једначина (6.4) је изведен уз претпоставку да је кормило у симетрали брода, односно да угао отклоне кормила одговара нултом нападном углу. Уколико ово није случај, услед избачаја кормила се јавља допунска сила и момент, што је показано на слици 6.1.



Слика 6.1 – Линеаризован утицај кормила

Сила у правцу симетрале брода је по интензитету знатно мања од попречне силе, те се у овом случају може занемарити.

Уколико се изрази за попречну силу и момент који се јављају услед отклона кормила

$$F_R = f_1(\delta_R) \quad \text{и} \quad N_R = f_2(\delta_R)$$

развију у Тејлоров ред у околини почетног угла добијају се следеће једначине:

$$F_R = f_1(\delta_{R1}) + (\delta_R - \delta_{R1}) \cdot \frac{df_1}{d\delta_R} + \frac{(\delta_R - \delta_{R1})^2}{2} \cdot \frac{d^2 f_1}{d\delta_R^2} + \frac{(\delta_R - \delta_{R1})^3}{6} \cdot \frac{d^3 f_1}{d\delta_R^3} + \dots$$

$$N_R = f_2(\delta_{R1}) + (\delta_R - \delta_{R1}) \cdot \frac{df_2}{d\delta_R} + \frac{(\delta_R - \delta_{R1})^2}{2} \cdot \frac{d^2 f_2}{d\delta_R^2} + \frac{(\delta_R - \delta_{R1})^3}{6} \cdot \frac{d^3 f_2}{d\delta_R^3} + \dots$$

Уз претпоставку да је у почетном тренутку угао отклона кормила био

$$\delta_{R1} = 0$$

и уколико се занемаре чланови вишег реда, добијају се линеаризовани изрази за силу односно момент:

$$F_R = \delta_R \cdot Y_\delta \quad \text{и} \quad N_R = \delta_R \cdot N_\delta \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

Линеаризацијом утицаја кормила ограничили смо се на мале поремећаје, односно на мале углове отклона кормила, што је сасвим у складу са целокупним линеарним приступом који се овде разматра.

Свођењем израза (6.5) у бездимензиони облик увођењем бездимензионих величина:

$$Y'_\delta = \frac{Y_\delta}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^2 \cdot V_o^2} \quad \text{и} \quad N'_\delta = \frac{N_\delta}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_o^3 \cdot V_o^2}$$

и њиховим увођењем у једначине система (6.4) за заношење и закретање добија се:

$$\dot{v}' \cdot (\Delta' - Y'_v) - v' \cdot Y'_v - \dot{r}' \cdot Y'_r - r' \cdot Y'_r + \Delta' \cdot r' = \delta'_R \cdot Y'_\delta,$$

$$\dot{r}' \cdot (I'_{zG} - N'_r) - r' \cdot N'_r - \dot{v}' \cdot N'_v - v' \cdot N'_v = \delta'_R \cdot N'_\delta. \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

Претпоставља се да мале промене угла отклона кормила не утичу у значајној мери на Y'_v , Y'_r , N'_v и N'_r . Са друге стране, према [5], утицај попречне силе на убрзање закретања Y'_r и утицај момента на убрзање заношења N'_v се могу занемарити, те се систем једначина (6.6) своди на:

$$\dot{v}' \cdot (\Delta' - Y'_v) - v' \cdot Y'_v - r' \cdot Y'_r + \Delta' \cdot r' = \delta'_R \cdot Y'_\delta,$$

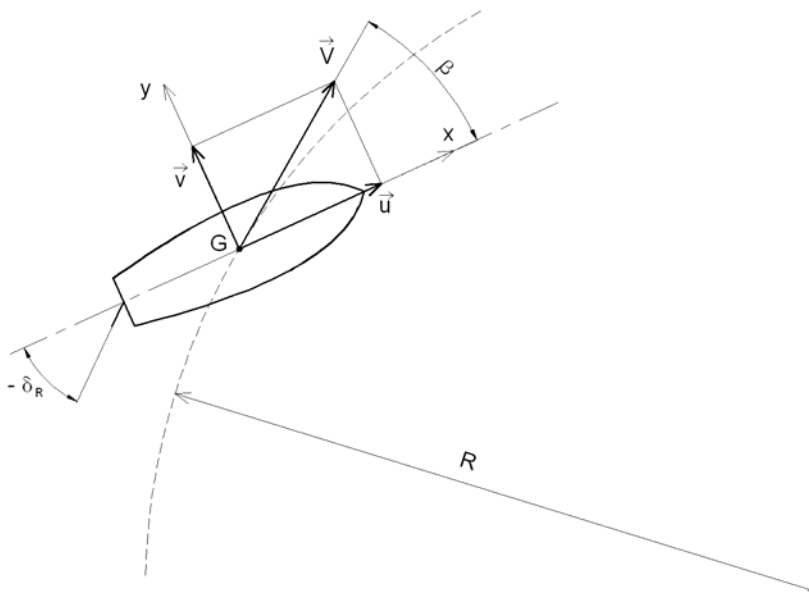
$$\dot{r}' \cdot (I'_{zG} - N'_r) - r' \cdot N'_r - v' \cdot N'_v = \delta'_R \cdot N'_\delta.$$

\dots\dots\dots (6.7)

Овако су добијене линеарне диференцијалне једначине заношења и закретања брода у хоризонталној равни под утицајем малог поремећаја узрокованог отклоном кормила за мали угао.

6.2. Полупречник кривине и угао заношења при равномерном скретању брода

Иако доста ограничена претпоставкама на којима је базирана, линеарна теорија се са приличном поузданошћу може применити за процену полупречника кривине и угла заношења брода при скретању, уколико је то скретање окарактерисано умереном брзином и умереним отклоном кормила. На слици 6.2 су приказане основне величине које одређују овакво кретање брода.



Слика 6.2 – Равномерно скретање брода

Равномерно скретање брода је карактеристично за трећу фазу при тесту окретања када су услед уравнотежења сила које делују на брод убрзања залетања, заношења и закретања постала занемарљиво мала. У том случају систем једначина (6.7) се своди на следећи облик:

$$\begin{aligned} -v' \cdot Y_v' + r' \cdot (\Delta' - Y_r') &= \delta_R' \cdot Y_\delta', \\ -v' \cdot N_v' - r' \cdot N_r' &= \delta_R' \cdot N_\delta'. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6.8)$$

Овако су добијене две једначине чијим решавањем се могу одредити бездимензионе брзине промене курса и заношења при равномерном скретању брода:

$$r' = \frac{\delta_R' \cdot (Y_\delta' \cdot N_v' - Y_v' \cdot N_\delta')}{Y_v' \cdot N_r' + N_v' \cdot (\Delta' - Y_r')} \quad \dots\dots\dots (6.9)$$

$$v' = \frac{-\delta_R' \cdot [Y_\delta' \cdot N_r' + N_\delta' \cdot (\Delta' - Y_r')]}{Y_v' \cdot N_r' + N_v' \cdot (\Delta' - Y_r')} \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

С обзиром да је полупречник кривине трајекторије одређен количником брзине брода и угаоне брзине:

$$R = \frac{V}{r},$$

и да је бездимензиона вредност угаоне брзине, како је то раније поменуто:

$$r' = \frac{L_O}{V_O} \cdot r,$$

уз претпоставку о малој промени брзине у односу на почетну, може се извести следећа зависност:

$$r' = \frac{L_O}{R}.$$

Уколико се овај израз уврсти у једначину (3.32) добија се:

$$\frac{L_O}{R} = \frac{\delta'_R \cdot (Y'_\delta \cdot N'_v - Y'_v \cdot N'_\delta)}{Y'_v \cdot N'_r + N'_v \cdot (\Delta' - Y'_r)},$$

одакле следи:

$$R = \frac{L_O}{\delta'_R} \cdot \frac{Y'_v \cdot N'_r + N'_v \cdot (\Delta' - Y'_r)}{Y'_\delta \cdot N'_v - Y'_v \cdot N'_\delta} \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

На овај начин је добијен израз за полупречник кривине при равномерном скретању брода. Може се приметити да је полупречник кривине директно пропорционалан са дужином брода, а обрнуто пропорционалан са углом избачаја кормила.

Са слике 6.2 може се уочити и следећа зависност:

$$v = V \cdot \sin \beta,$$

односно, уз претпоставку о малој промени брзине:

$$v' \cdot V_O = V \cdot \sin \beta \rightarrow v' = \sin \beta.$$

Уколико је угао заносења мали:

$$\sin \beta \approx \beta \rightarrow v' = \beta.$$

Дакле, угао заносења брода при равномерном скретању је одређен следећом релацијом:

$$\beta = \frac{-\delta'_R \cdot [Y'_\delta \cdot N'_r + N'_\delta \cdot (\Delta' - Y'_r)]}{Y'_v \cdot N'_r + N'_v \cdot (\Delta' - Y'_r)} \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

Из последњег израза се може уочити да са повећањем угла отклона кормила расте и угао заносења брода.

Изрази (6.11) и (6.12) се могу применити за процену кретања брода само уколико је брод динамички стабилан. У противном линеарна теорија даје бесмислене резултате, те би за адекватну анализу трајекторије динамички нестабилних бродова решења требало тражити у оквирима нелинеарне теорије.

7. ИНДЕКСИ СТАБИЛНОСТИ БРОДА У КУРСУ

7.1. Индекси динамичке стабилности брода у курсу

Раније је било речи о тестовима помоћу којих се може проверити да ли је неки брод стабилан у курсу или није. До истих закључака се може доћи и на основу изведених линеарних диференцијалних једначина кретања брода. Да би се ово разумело, прво треба разјаснити шта подразумева стабилност брода у курсу.

Да би неки брод био стабилан у курсу (мисли се на динамичку стабилност брода) потребно је да брзине заносења и закретања (v и r), које су се јавиле услед деловања спољашњег поремећаја, у што краћем временском интервалу, без утицаја кормила, спонтано нестану. Утицај спољашњег поремећаја на брзину и убрзање залетања (u и \dot{u}) није од нарочитог значаја за процену стабилности брода у курсу. Због тога се у овој анализи једначина за напредовање не разматра, већ се полази од једначине заносења и једначине закретања система (6.4).

$$\begin{aligned} \dot{v}' \cdot (\Delta' - Y_v') - v' \cdot Y_v' - \dot{r}' \cdot Y_r' - r' \cdot Y_r' + \Delta' \cdot r' &= 0, \\ \dot{r}' \cdot (I'_{zG} - N_r') - r' \cdot N_r' - \dot{v}' \cdot N_v' - v' \cdot N_v' &= 0. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

Једначине (7.1) представљају систем диференцијалних једначина првога реда. Решавањем овог система се долази до законитости према којима се мењају брзина заносења и брзина закретања у зависности од времена:

$$v = v(t) \quad \text{и} \quad r = r(t),$$

а одавде се лако може уочити шта је то што треба да буде задовољено да би био испуњен следећи услов:

$$t \nearrow \Rightarrow v \rightarrow 0, \quad r \rightarrow 0.$$

У поступку решавања система једначина (7.1) који следи, ради поједностављења записа, неће бити посебно наглашавано да су све величине у бездимензионом облику. Погодно је увести следеће смене:

$$\begin{array}{llll} A = Y_r' & B = Y_v' - \Delta' & C = Y_r' - \Delta' & D = Y_v' \\ E = N_r' - I'_{zG} & F = N_v' & G = N_r' & H = N_v' \end{array}$$

Уводећи претпостављене смене, систем једначина (7.1) се може написати као:

$$\begin{aligned} \dot{r} \cdot A + \dot{v} \cdot B + r \cdot C + v \cdot D &= 0, \\ \dot{r} \cdot E + \dot{v} \cdot F + r \cdot G + v \cdot H &= 0. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

Уколико прву једначину помножимо са F , а другу са $-B$, па их потом саберемо добиће се:

$$\dot{r} \cdot (A \cdot F - E \cdot B) + r \cdot (C \cdot F - G \cdot B) = v \cdot (H \cdot B - D \cdot F),$$

односно:

$$v = \dot{r} \cdot \frac{A \cdot F - E \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F} + r \cdot \frac{C \cdot F - G \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F} \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

Потражимо ли извод једначине (7.3) по времену добија се:

$$\dot{v} = \ddot{r} \cdot \frac{A \cdot F - E \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F} + \dot{r} \cdot \frac{C \cdot F - G \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F}$$

Заменимо сада последња два израза за брзину и убрзање заносења у прву једначину система (7.2) и добићемо:

$$\ddot{r} \cdot i + \dot{r} \cdot j + r \cdot k = 0, \quad \dots\dots\dots (7.4)$$

где су:

$$\begin{aligned} i &= B \cdot F \cdot \frac{A \cdot F - E \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F}, \\ j &= A \cdot F + B \cdot F \cdot \frac{C \cdot F - G \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F} + D \cdot F \cdot \frac{A \cdot F - E \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F} \quad \text{и} \\ k &= C \cdot F + D \cdot F \cdot \frac{C \cdot F - G \cdot B}{H \cdot B - D \cdot F}. \end{aligned}$$

Овако смо из система једначина (7.2) извели једну диференцијалну једначину другог реда са једном непознатом функцијом r .

Опште решење једначине (7.4) има облик:

$$r(t) = c_1 \cdot e^{\sigma_1 t} + c_2 \cdot e^{\sigma_2 t}, \quad \dots\dots\dots (7.5)$$

где су: c_1, c_2 константе интеграције које би се могле одредити из почетних услова за брзину закретања и σ_1, σ_2 корени карактеристичне једначине: $i \cdot \sigma^2 + j \cdot \sigma + k = 0$

$$\sigma_{1/2} = \frac{-j \pm \sqrt{j^2 - 4 \cdot i \cdot k}}{2 \cdot i}.$$

Заменимо ли сада једначину (7.5) у једначину (7.3) добићемо:

$$v(t) = c_3 \cdot e^{\sigma_1 t} + c_4 \cdot e^{\sigma_2 t}, \quad \dots\dots\dots (7.6)$$

где су: c_3, c_4 константе интеграције које би се могле одредити из почетних услова за брзину заносења.

Једначине (7.5) и (7.6) представљају тражене законитости према којима се мењају брзина заносења и брзина закретања у зависности од времена. На основу облика ових израза може се извести следећи закључак:

Да би брод био динамички стабилан у курсу, односно да би са порастом времена брзине заносења и закретања тежиле нули, потребно је да корени карактеристичне једначине σ_1 и σ_2 буду негативни.

Због тога се корени карактеристичне једначине σ_1 и σ_2 сматрају индексима стабилности брода.

Што су вредности индекса стабилности мање, уз услов да су оба негативна, брод ће бити динамички стабилнији, тј. пре ће се успоставити праволинијски курс уколико га било какав спољашњи утицај поремети.

Уколико би индекси стабилности били већи од нуле тада би како време одмиче брзине заносења, односно закретања, постепено расле и могло би се десити да при нултом отклону кормила брод уђе у кружење.

Индиректно се може закључити да је за динамичку стабилност брода потребно да буде задовољено:

$$j > 0 \quad \text{и} \quad i \cdot k > 0.$$

Осим поменутог критеријума за оцену динамичке стабилности брода често се користи и тзв. *крал динамичке стабилности* који се према [9] дефинише као:

$$l_d = l_r - l_v,$$

где су: l_r - крал пригушења – одређује подужни положај нападне тачке момента у односу на положај тежишта масе брода:

$$l_r = \frac{N'_r}{Y'_r - \Delta'},$$

l_v - крал статичке стабилности – одређује подужни положај нападне тачке силе у односу на положај тежишта масе брода:

$$l_v = \frac{N'_v}{Y'_v}.$$

Према овом критеријуму, да би брод био динамички стабилан потребно је да буде задовољено:

$$l_d > 0.$$

Ово практично значи да је потребно да нападна тачка резултујућег момента буде ближа прамцу од нападне тачке резултујуће попречне силе која делује на брод. Уколико је разлика између ове две тачке већа брод би требало да је динамички стабилнији.

Дакле, индекси стабилности се директно могу употребити за процену динамичке стабилности брода. Ово је посебно корисно у раним фазама пројектовања брода када се избором димензија брода може утицати на својства

управљивости. Уколико се, због услова дефинисаних пројектним задатком, не може избећи динамичка нестабилност, тада се применом индекса стабилности то може на време учити, те се правилним избором контролних уређаја овај “недостатак” може превазићи.

Примера ради, применом описаних критеријума, проверена је стабилност бродова MARAD серије [9] и утврђено је да су свих 16 испитаних форми динамички нестабилне. Основне карактеристике бродова ове серије, као и добијене вредности индекса стабилности приказане су у табели 7.1. Хидродинамички изводи који су коришћени при процени динамичке стабилности бродова MARAD серије приказани су у прилогу 1. Вредности хидродинамичких извода су добијене испитивањем везаних модела ове серије применом *PMM* тестова, а потом су прерачунате на услове који карактеришу брод депласмана 350.000 тона. На моделима који су испитивани били су уграђени кормило и пропелер чије су карактеристике такође дате у прилогу 1.

Форма	L/B	B/T	Cb	L/T	σ_1	σ_2	lr	lv	ld
A	5.5	3.00	0.875	16.500	0.3678	-2.4005	0.2492	0.5620	-0.3127
B	6.0	3.00	0.875	18.000	0.3773	-2.3874	0.2466	0.5658	-0.3192
C	6.5	3.00	0.875	19.500	0.3913	-2.3153	0.2403	0.5658	-0.3256
D	4.5	3.00	0.850	13.500	0.2706	-2.4848	0.2931	0.5436	-0.2504
E	5.0	3.00	0.850	15.000	0.3231	-2.4755	0.2714	0.5543	-0.2829
F	5.5	3.00	0.850	16.500	0.3520	-2.4045	0.2590	0.5620	-0.3030
G	5.0	3.00	0.800	15.000	0.2863	-2.4724	0.2950	0.5543	-0.2594
H	6.5	3.00	0.850	19.500	0.3760	-2.3230	0.2498	0.5658	-0.3160
I	6.0	3.75	0.850	22.500	0.4204	-2.3012	0.2202	0.5413	-0.3211
J	6.0	4.50	0.850	27.000	0.3986	-2.2470	0.2005	0.4836	-0.2831
K	5.0	3.75	0.850	18.750	0.3961	-2.3713	0.2194	0.5304	-0.3111
L	5.0	4.50	0.850	22.500	0.3553	-2.3602	0.2038	0.4709	-0.2671
M	6.5	3.75	0.875	24.375	0.4558	-2.2058	0.2105	0.5465	-0.3360
N	5.0	3.75	0.800	18.750	0.3654	-2.3747	0.2367	0.5304	-0.2937
O	5.5	3.75	0.875	20.625	0.4280	-2.2876	0.2072	0.5361	-0.3289
P	5.0	4.50	0.800	22.500	0.3283	-2.3702	0.2194	0.4709	-0.2515

Табела 7.1 – Индекси стабилности бродова MARAD серије

Из добијених вредности се може приметити да форме D и G имају најниже вредности коефицијента σ_1 (мање од 0.3) што указује да су ове две форме најмање нестабилне. Из табеле I.2 (види прилог 1) може се учити да управо ове две форме имају кормила са највећим површинама. О утицају површине кормила на својства управљивости брода биће речено нешто више мало касније.

Као пример динамички стабилног брода овде ће бити поменут брод MARINER серије за који је било могуће пронаћи у литератури вредности хидродинамичких извода:

L/B	B/T	Cb	L/T	σ_1	σ_2	lr	lv	ld
6.84	3.1	0.61	21.19	-0.11246	-2.77865	0.29267	0.22745	0.06521

Табела 7.2 – Индекси стабилности брода MARINER серије

Бездимензиони хидродинамички изводи и момент инерције разматраног брода, који су преузети из [5], дати су у табели I.3 у прилогу 1.

7.2. Номотови индекси управљивости

Систем једначина (6.7) се може трансформисати у систем две независне линеарне диференцијалне једначине другог реда [10]:

$$\begin{aligned} T_1' \cdot T_2' \cdot \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \cdot \dot{r}' + r' &= K' \cdot \delta_R' + K' \cdot T_3' \cdot \dot{\delta}_R' \\ T_1' \cdot T_2' \cdot \ddot{v}' + (T_1' + T_2') \cdot \dot{v}' + v' &= K_v' \cdot \delta_R' + K_v' \cdot T_4' \cdot \dot{\delta}_R' \end{aligned} \quad (7.7)$$

Ове једначине је први пут извео Номото 1957. године. Може се уочити да је овде раздвојено закретање од заносења брода и да су се појавили додатни коефицијенти које је могуће довести у везу са раније помињаним хидродинамичким изводима [10].

$$\begin{aligned} T_1' \cdot T_2' &= \frac{(Y_v' - \Delta') \cdot (N_r' - I_{zG}') - Y_r' \cdot N_v'}{Y_v' \cdot N_r' - N_v' \cdot (Y_r' - \Delta')}, \\ T_1' + T_2' &= \frac{(Y_v' - \Delta') \cdot N_r' + (N_r' - I_{zG}') \cdot Y_v' - Y_r' \cdot N_v' - N_v' \cdot (Y_r' - \Delta')}{Y_v' \cdot N_r' - N_v' \cdot (Y_r' - \Delta')}, \\ T_3' &= \frac{N_v' \cdot Y_\delta' - (Y_v' - \Delta') \cdot N_\delta'}{Y_\delta' \cdot N_v' - N_\delta' \cdot Y_v'}, \\ T_4' &= \frac{(N_r' - I_{zG}') \cdot Y_\delta' - Y_r' \cdot N_\delta'}{Y_\delta' \cdot N_r' - N_\delta' \cdot (Y_r' - \Delta')}, \\ K' &= \frac{Y_\delta' \cdot N_v' - N_\delta' \cdot Y_v'}{N_r' \cdot Y_v' - (Y_r' - \Delta') \cdot N_v'}, \\ K_v' &= \frac{(Y_r' - \Delta') \cdot N_\delta' - N_r' \cdot Y_\delta'}{Y_v' \cdot N_r' - N_v' \cdot (Y_r' - \Delta')}. \end{aligned}$$

Коефицијенти T_1' , T_2' , T_3' , T_4' и K' који зависе од карактеристика брода и услова под којима брод пливи се могу користити за оцену својстава управљивости брода.

Једначине система (7.7) су у општем случају нехомогене. Дакле, опште решење сваке од њих би се састојало од општег решења одговарајуће хомогене једначине и партикуларног дела решења. Одговарајућа хомогена

диференцијална једначина се добија када се занемари утицај кормила ($\delta_R' = \dot{\delta}_R' = 0$). Карактеристична једначина би према томе имала облик:

$$T_1' \cdot T_2' \cdot \sigma^2 + (T_1' + T_2') \cdot \sigma + 1 = 0$$

Решавањем ове једначине по σ , чији је утицај на динамичку стабилност брода раније објашњен, се може показати да важи:

$$\sigma_{1/2} = \frac{-(T_1' + T_2') \pm \sqrt{(T_1' + T_2')^2 - 4 \cdot T_1' \cdot T_2'}}{2 \cdot T_1' \cdot T_2'}$$

односно:

$$\sigma_1 = -\frac{1}{T_1'} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = -\frac{1}{T_2'}$$

С обзиром да је за динамичку стабилност брода потребно да индекси стабилности σ_1 и σ_2 буду негативни и по апсолутној вредности што већи, може се закључити да Номотови коефицијенти T_1' и T_2' треба да буду позитивани и што мањи. Није тешко показати да је T_1' увек веће од T_2' те се код динамички стабилних бродова коефицијент T_1' може користити као мера стабилности.

Номотови коефицијенти T_3' и T_4' указују на утицај брзине прекрета кормила на маневарске способности брода, а коефицијенти K' , односно K_v' представљају показатеље окретљивости брода. Да би брод боље реаговао на отклон кормила пожељно је да K' буде што мање, али позитивно. Гранично стабилни бродови при нултом отклону кормила имају велико K' .

Једначине система (6.7) су међусобно директно повезане преко чланова $r' \cdot Y_r'$ и $v' \cdot N_v'$ за које је раније речено да су код уобичајених бродова по вредностима мали и да се од нуле разликују само услед асиметрије брода у односу на уз раван. Уколико занемаримо члан $v' \cdot N_v'$ једначина за закретање система (6.7) ће се свести на облик:

$$\dot{r}' \cdot (I_{zG}' - N_r') - r' \cdot N_r' = \delta_R' \cdot N_\delta'$$

Уколико овај израз поделимо се N_r' :

$$\dot{r}' \cdot \frac{I_{zG}' - N_r'}{N_r'} - r' = \delta_R' \cdot \frac{N_\delta'}{N_r'}$$

и уведемо следеће смене:

$$T' = \frac{I_{zG}' - N_r'}{N_r'} \quad \text{и} \quad K' = \frac{N_\delta'}{N_r'}$$

једначина за закретање се, према [5] може написати у параметарском облику:

$$\boxed{T' \cdot \dot{r}' + r' = K' \cdot \delta_R'} \quad \dots\dots\dots (7.8)$$

Овако је добијен најједноставнији облик Номотове једначине првог реда који се данас веома често користи за прелиминарну оцену својстава управљивости брода.

С обзиром на начин како су дефинисани, може се приметити да коефицијент T заправо представља однос коефицијента укупног момента инерције масе брода и коефицијента хидродинамичког пригушења, односно да коефицијент K представља однос коефицијента спољашњег момента (који је узрокован радом кормила) и коефицијента хидродинамичког пригушења.

Димензиони облик ове једначине, с обзиром да су димензиони Номотови коефицијенти T и K одређени са:

$$T = \frac{T'}{V_o / L_o} \quad \text{и} \quad K = \frac{K'}{L_o / V_o}$$

се своди на:

$$T \cdot \dot{r} + r = K \cdot \delta_R \quad \dots\dots\dots (7.9)$$

За разлику од једначина система (7.7) које се решавају нумеричком интеграцијом, једначина (7.9) се лако може решити аналитички.

$$T \cdot \dot{r} + r = K \cdot \delta_R \rightarrow T \cdot \frac{dr}{dt} = K \cdot \delta_R - r \rightarrow r = K \cdot \delta_R - \frac{e^{-t/T}}{e^{C/T}},$$

где је C константа интеграције која се може одредити из почетног услова према коме се у почетном тренутку брод кретао без закретања:

$$t = 0: \quad r = 0, \quad \delta_R = \text{const.} \neq 0$$

$$0 = K \cdot \delta_R - \frac{1}{e^{C/T}} \rightarrow C = T \cdot \ln(K \cdot \delta_R)^{-1}$$

Уколико се сада замени израз за константу C у једначину закретања брода добија се:

$$r = K \cdot \delta_R \cdot (1 - e^{-t/T}).$$

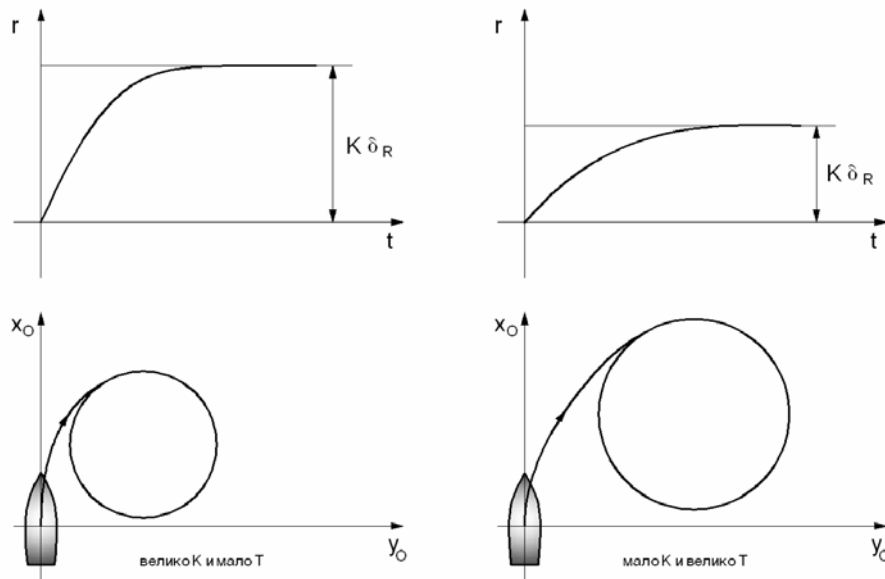
Из последњег израза се може закључити:

- Уколико је T позитивно али мало, брод ће реагујући на отклон кормила пре ући у режим стационарног кружења одређен угаоном брзином закретања:

$$r = K \cdot \delta_R.$$

Ово значи да ће у том случају брод брже реаговати на отклон кормила, што за последицу има бољу окретљивост.

- Да би брзина промене угла курса била већа приликом маневра, потребно је да K буде позитивно и што је могуће веће. У том случају би и тактички пречник био мањи.



Слика 7.1 – Утицај K и T на трајекторију брода при кружењу

Дакле, да би брод имао боља својства управљивости пожељно је да:

- Номотов коефицијент T буде позитиван и што је могуће мањи,
- Номотов коефицијент K буде позитиван и што је могуће већи.

Уколико се присетимо везе између коефицијената K и T која је дефинисана релацијом (7.9), може се приметити да су поменуте препоруке међусобно контрадикторне. Већој вредности коефицијента K би према (7.9) одговарала већа вредност коефицијента T и обратно. Да би се ово разјаснило уведен је нови критеријум према коме однос коефицијената K/T треба да буде што већи како би брод имао боља својства управљивости.

Зависност Номотових коефицијената од главних димензија брода, према [5], одређена је следећим релацијама:

$$K' \propto \frac{A_R}{L \cdot T} \quad \text{и} \quad T' \propto \frac{\nabla}{L^2 \cdot T},$$

где је A_R површина листа кормила.

Према томе, да би однос ових коефицијената био што већи

$$\frac{K'}{T'} \propto \frac{A_R \cdot L}{\nabla} = c_1 \cdot \frac{A_R \cdot L}{\nabla},$$

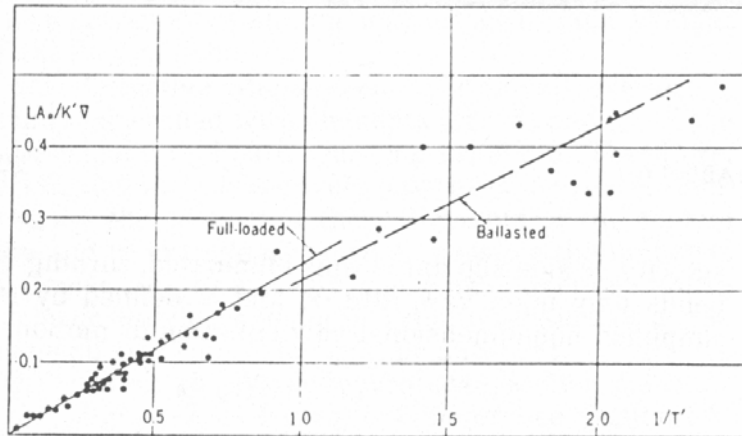
(c_1 – коефицијент пропорционалности) пожељно је да:

- површина листа кормила буде што већа,
- брод при истом депласману буде што дужи или
- брод при истој дужини има што мањи депласман.

Одавде се може закључити да се на већ изграђеном броду само уградњом већег кормила могу побољшати својства управљивости.

Са слике 7.2 на којој је дата експериментално потврђена зависност између Номотових коефицијената и главних димензија брода се може уочити да

коэффициент пропорциональности c_1 не зависи у великој мери од типа брода и угла отклонa кормила. Нешто веће расипање тачака се јавља у случају бродова који плове у баластном режиму.



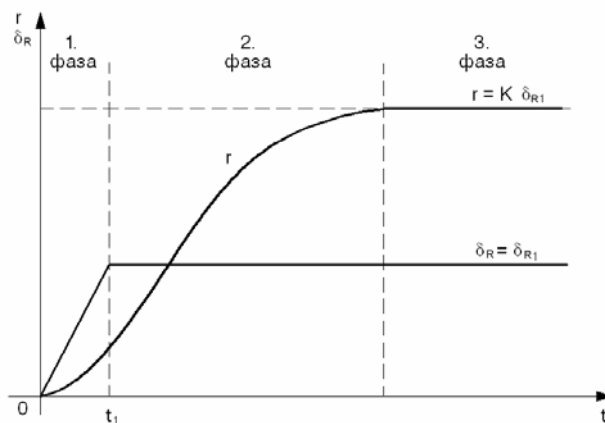
Слика 7.2 - K' - T' дијаграм, [5]

Уопштено, због нелинеарности појава које прате кретање брода при маневру не постоји линеарна веза између брзине и убрзања промене угла курса и угла отклонa кормила. Уколико су нам познате вредности хидродинамичких извода, могу се одредити Номотови коефицијенти K и T . Међутим, најједноставнији начин за њихово одређивање произилази из непосредне везе ових коефицијената са резултатима експерименталних испитивања својстава управљивости брода, односно слободног модела. Тестови који се директно могу користити су:

- тест окретања и
- Z тест.

7.2.1. Одређивање Номотових коефицијената K и T применом теста окретања

Промена угла отклонa кормила и промена брзине закретања брода/модела у току трајања теста је показана на слици 7.3.



Слика 7.3 – Тест окретања

У првој фази, како је то раније објашњено, повећава се угао отклона кормила до максималне задате вредности од δ_{R1} . Кроз другу и трећу фазу угао отклона кормила се не мења. У складу са тим, решење једначине (7.9) можемо посматрати у два одвојена интервала:

1. Уколико је $0 \leq t \leq t_1$ промена угла отклона кормила је линеарна и може се описати следећом релацијом:

$$\delta_R = \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot t,$$

t_1 – време потребно за постизање максималног угла отклона кормила.

У овом интервалу Номотову једначину првог реда можемо написати у облику:

$$T \cdot \dot{r} + r = K \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot t$$

До релације која описује промену брзине заносења у зависности од времена, у интервалу $0 \leq t \leq t_1$, долази се решавањем последње једначине. Увођењем параметра $p = \dot{r}$:

$$r = K \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot t - Tp \rightarrow \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left(K \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot t - Tp \right) \rightarrow p = K \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} - T \frac{dp}{dt}$$

сада се могу раздвојити променљиве:

$$T \cdot \left(K \frac{\delta_{R1}}{t_1} - p \right)^{-1} \cdot dp = dt$$

Након интегралјења последњег израза добија се:

$$t = -T \cdot \ln \left(K \frac{\delta_{R1}}{t_1} - p \right) + C \rightarrow p = K \frac{\delta_{R1}}{t_1} - e^{\frac{-t+C}{T}}$$

Константа интеграције се може одредити из почетног услова:

$$t = 0: \quad \dot{r} = p = 0$$

$$0 = K \frac{\delta_{R1}}{t_1} - e^{\frac{C}{T}} \rightarrow C = T \cdot \ln \left(K \frac{\delta_{R1}}{t_1} \right).$$

Сада можемо написати израз за убрзање закретања:

$$p = K \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T}} \right).$$

Остало је још да се последњи израз интеграл по времену и уз услов да је у почетном тренутку брзина закретања брода била једнака нули добија се:

$$r = K \cdot T \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(\frac{t}{T} - 1 + e^{\frac{-t}{T}} \right) \quad \text{за } 0 \leq t \leq t_1.$$

2. Уколико је $t \geq t_1$ угао отклона кормила је константан и износи δ_{R1} те се Номотова једначина (7.9) своди на:

$$T \cdot \dot{r} + r = K \cdot \delta_{R1}.$$

Решење ове једначине се може написати у облику:

$$r = C \cdot e^{-\frac{t}{T}} + K \cdot \delta_{R1}$$

Константа интеграције C се може одредити из услова да је брзина закретања у тренутку t_1 позната – одређена је изразом који карактерише прву фазу маневра за $t = t_1$:

$$K \cdot T \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(\frac{t_1}{T} - 1 + e^{-\frac{t_1}{T}} \right) = C \cdot e^{-\frac{t_1}{T}} + K \cdot \delta_{R1}$$

одакле следи:

$$C = K \cdot T \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}} \right).$$

Коначно једначина промене брзине закретања у другој, односно трећој фази маневра скретања је одређена изразом:

$$r = K \cdot T \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(\frac{t_1}{T} - \frac{e^{-\frac{t_1}{T}}}{e^{-\frac{t}{T}}} + e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \text{за } t \geq t_1.$$

Из последњег израза се може констатовати да уколико време тежи бесконачности брзина закретања тежи константној вредности одређеној производом угла отклона кормила и Номотовог коефицијента K .

$$t \rightarrow \infty : \quad r = K \cdot \delta_{R1}$$

Ово су услови који карактеришу трећу фазу.

Дакле, уколико нам је позната брзина промене угла курса и угао отклона кормила, након успостављеног стационарног кружења брода, веома лако се може одредити Номотов индекс управљивости K .

Потражимо сада релацију која одређује промену угла курса брода у зависности од времена у току трајања маневра окретања. До ове зависности можемо доћи уколико интегралимо израз за угаону брзину r , при чему, с обзиром на карактер промене угла кормила можемо писати:

$$\Psi(t) = \int_0^{t_1} K \cdot T \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(\frac{t}{T} - 1 + e^{-\frac{t}{T}} \right) \cdot dt + \int_{t_1}^t K \cdot T \cdot \frac{\delta_{R1}}{t_1} \cdot \left(\frac{t_1}{T} - e^{-\frac{t_1}{T}} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T}} + e^{-\frac{t-t_1}{T}} \right) \cdot dt^*.$$

Решавањем овога интеграла добија се:

$$\Psi(t) = K \cdot \delta_{R1} \cdot \left[t - \left(T - \frac{t_1}{2} \right) + \frac{T^2}{t_1} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot \left(e^{-\frac{t_1}{T}} - 1 \right) \right].$$

Последњи израз можемо написати у облику:

$$\Psi(t) = a + b \cdot t + c \cdot e^{\frac{-t}{T}},$$

где су: $a = -K \cdot \delta_{R1} \cdot \left(T + \frac{t_1}{2}\right)$, $b = K \cdot \delta_{R1}$ и $c = K \cdot \delta_{R1} \cdot \frac{T^2}{t_1} \cdot \left(e^{\frac{t_1}{T}} - 1\right)$.

Како време тежи бесконачности израз за промену курса се своди на асимптотску функцију:

$$\Psi(t) = a + b \cdot t$$

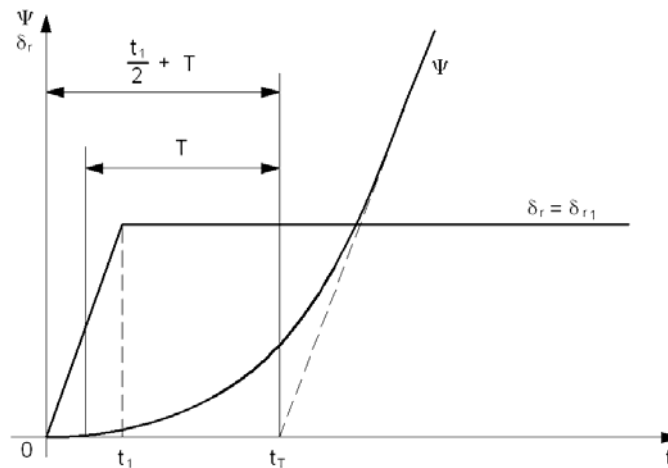
која апсцису сече у тренутку t_T (слика 7.4). Према томе:

$$\Psi(t_T) = 0,$$

односно:

$$0 = a + b \cdot t_T \rightarrow t_T = -\frac{a}{b} \rightarrow t_T = T + \frac{t_1}{2} \rightarrow T = t_T - \frac{t_1}{2}.$$

Конечно, уколико нам је познато време закретања кормила и време t_T , које се може одредити графички из познате трајекторије брода, може се одредити Номотов индекс управљивости T .



Слика 7.4 – Одређивање коефицијента T

7.2.2. Одређивање Номотових коефицијената K и T применом Z теста

Код бродова са непарним бројем пропелера који су хидродинамички асиметрични Номотова једначина првога реда се може написати у облику [4]:

$$T \cdot \dot{r} + r = K \cdot (\delta_R + \delta_C). \quad \dots\dots\dots (7.10)$$

Корекција угла δ_C заправо представља угао отклона кормила при пловидби по праволинијском курсу који је у случају хидродинамички асиметричних бродова различит од нуле.

На слици 7.5 су показани типични резултати Z теста са основим величинама које се могу измерити, а на основу којих се могу одредити вредности Номотових индекса управљивости брода.

Номотова једначина (7.10) се може написати на следећи начин:

$$T \cdot \frac{d\dot{\Psi}}{dt} + \frac{d\Psi}{dt} = K \cdot \delta_C + K \cdot \delta_R,$$

односно:

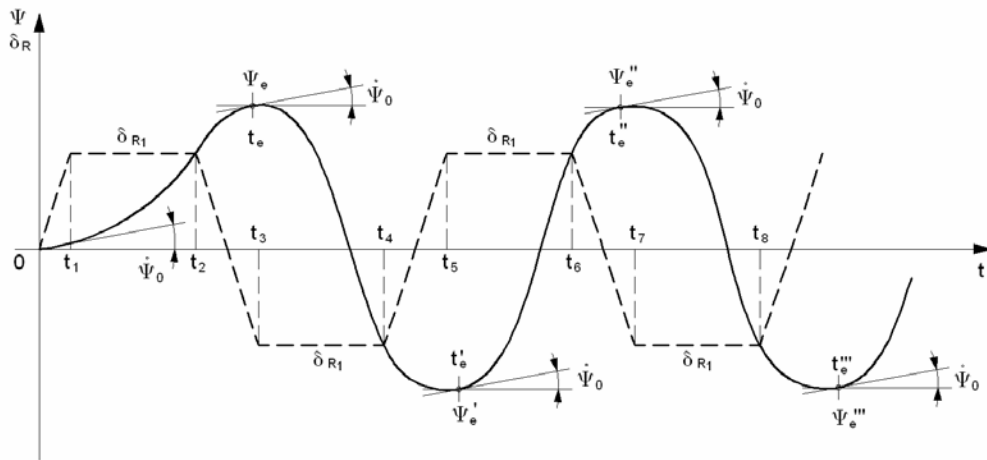
$$T \cdot d\dot{\Psi} + d\Psi = K \cdot \delta_C \cdot dt + K \cdot \delta_R \cdot dt.$$

Интеграљењем последњег израза у интервалу од $t=0$ до $t=t_e$, при чему границама интервала одговарају једнаке вредности угаоних брзина $\dot{\Psi}_0$ добија се:

$$T \cdot \int_{\dot{\Psi}_0}^{\dot{\Psi}_0} d\dot{\Psi} + \int_{\Psi_0}^{\Psi_e} d\Psi = K \cdot \delta_C \cdot \int_0^{t_e} dt + K \cdot \int_0^{t_e} \delta_R \cdot dt,$$

одакле следи:

$$\Psi_e = K \cdot \delta_C \cdot t_e + K \cdot \int_0^{t_e} \delta_R dt. \quad \dots\dots\dots (7.11)$$



Слика 7.5 – Границе интеграљења при одређивању индекса управљивости K и T, [4]

На сличан начин, померањем интервала, може се доћи до следећих релација:

$$\Psi_e' = K \cdot \delta_C \cdot t_e' + K \cdot \int_0^{t_e'} \delta_R dt, \quad \dots\dots\dots (7.12)$$

$$\Psi_e'' = K \cdot \delta_C \cdot t_e'' + K \cdot \int_0^{t_e''} \delta_R dt, \quad \dots\dots\dots (7.13)$$

које би одговарале каснијим извршењима.

Интеграл функције којом је представљена промена угла отклона кормила се може нумерички одредити. Из система једначина (7.12) и (7.13), у којима су једине непознате K и δ_C , може се одредити Номотов индекс управљивости K . Осим тога, може се одредити и корекциони угао δ_C . Једначина (7.11) се најчешће не узима у разматрање из разлога што се жели избећи утицај прелазног режима на почетку спровођења теста.

Интеграљењем израза (7.10) по трајекторији од тренутка када брод достигне курс који му је задат кормилом ($t = t_2$) до тренутка $t = t_e$ добија се:

$$T \cdot \dot{\psi} \Big|_{\dot{\psi}_2}^{\dot{\psi}_0} + \psi \Big|_{\psi_2}^{\psi_e} = K \cdot \delta_C \cdot t \Big|_{t_2}^{t_e} + K \cdot \int_{t_2}^{t_e} \delta_R \cdot dt,$$

односно, за каснија извршења:

$$T \cdot \dot{\psi} \Big|_{\dot{\psi}_4}^{\dot{\psi}_0} + \psi \Big|_{\psi_4}^{\psi_{e'}} = K \cdot \delta_C \cdot t \Big|_{t_4}^{t_{e'}} + K \cdot \int_{t_4}^{t_{e'}} \delta_R \cdot dt,$$

$$T \cdot \dot{\psi} \Big|_{\dot{\psi}_6}^{\dot{\psi}_0} + \psi \Big|_{\psi_6}^{\psi_{e''}} = K \cdot \delta_C \cdot t \Big|_{t_6}^{t_{e''}} + K \cdot \int_{t_6}^{t_{e''}} \delta_R \cdot dt.$$

Сређивањем последња два израза:

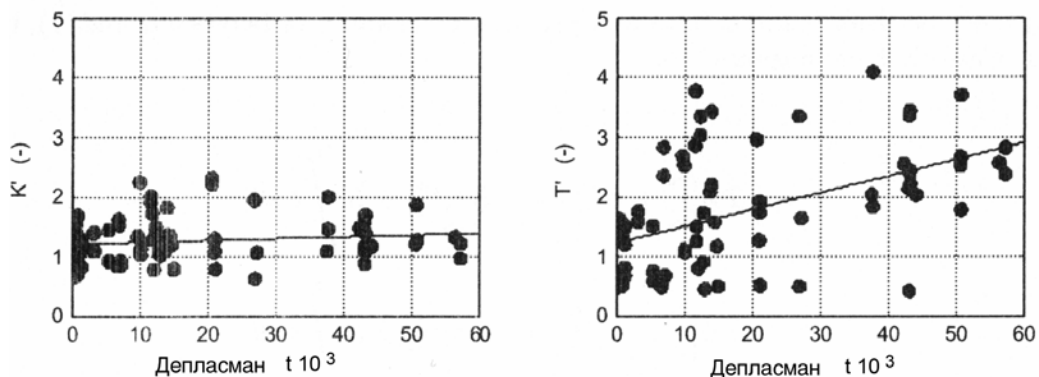
$$T \cdot (\dot{\psi}_0 - \dot{\psi}_4) = (\psi_4 - \psi_{e'}) + K \cdot \delta_C \cdot (t_{e'} - t_4) + K \cdot \int_{t_4}^{t_{e'}} \delta_R \cdot dt, \quad \dots (7.14)$$

$$T \cdot (\dot{\psi}_0 - \dot{\psi}_6) = (\psi_6 - \psi_{e''}) + K \cdot \delta_C \cdot (t_{e''} - t_6) + K \cdot \int_{t_6}^{t_{e''}} \delta_R \cdot dt, \quad \dots (7.15)$$

Из једначина (7.14) и (7.15) може се одредити и коефицијент T . Поново је прва једначина изостављена из већ поменутих разлога.

7.2.3. Вредности Номотових индекса управљивости добијене мерењима

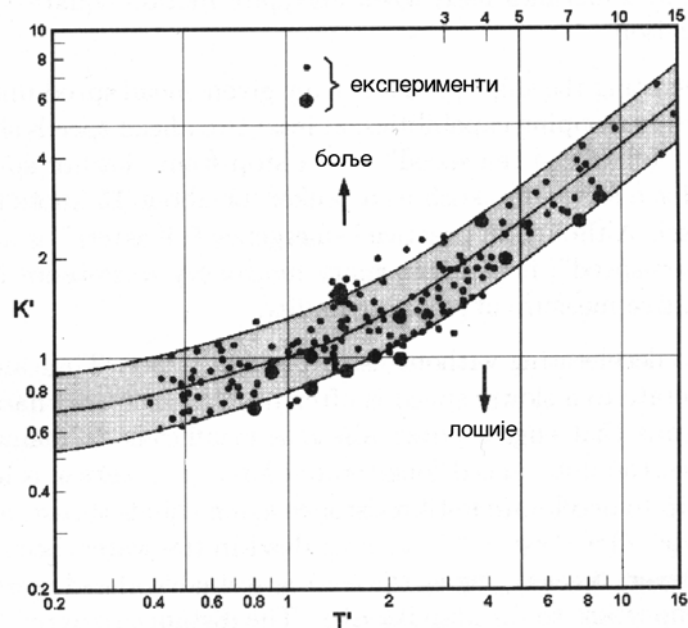
Применом описаних поступака за одређивање Номотових индекса управљивости, а на основу великог броја резултата добијених испитивањем бродова различите намене у природној величини, утврђена је следећа зависност индекса K и T од депласмана брода:



Слика 7.6 – Зависност Номотових индекса управљивости од депласмана брода [4]

Упркост приличном расипању добијених вредности може се приметити да индекс K скоро да и не зависи од депласмана брода, док индекс T са порастом депласмана постепено расте. Дакле, са порастом депласмана однос K/T опада па према томе може се очекивати да и својства управљивости постају лошија.

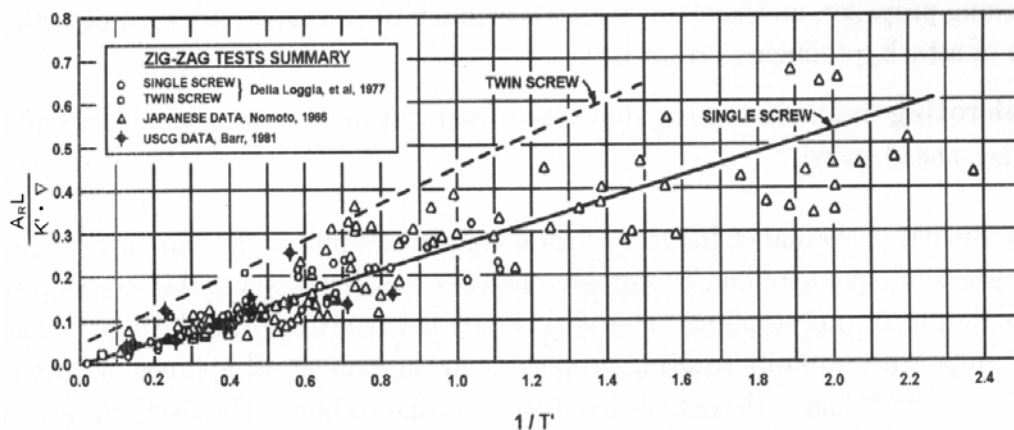
На скици 7.7 је показана зависност индекса управљивости K од T која је добијена на основу великог броја резултата Z тестова различитих бродова.



Слика 7.7 – Зависност K од T [5]

Осенчена област на дијаграму обухвата интервал од приближно $\pm 25\%$ у односу на средњу вредност, где се и налази највише бродова који су испитани. Бродови који се налазе испод доње границе имају лошија маневарска својства.

Са слике 7.8 на којој је дат утицај броја пропелера на маневарска својства брода, исказана преко Номотових индекса управљивости, се може приметити да је једнопропелерна конфигурација повољнија.



Слика 7.8 – Утицај броја пропелера на Номотове индексе управљивости [5]

Уколико је $1/T' = const.$, односно $T' = const.$, двопропелерним бродовима одговара већа вредност $1/K'$, тј. мање K' што има за последицу мањи однос K'/T' . С обзиром да је пожељно да овај однос буде што већи, намеће се закључак да је, са гледишта управљивости, повољнија опција са једним пропелером.

8. Примена линеарне теорије за предвиђање трајекторије брода

Уколико су испуњене претпоставке потребне за примену линеарне теорије, решавањем једначина кретања може се пратити промена брзина и убрзања брода у току трајања маневра. На основу ових величина, уколико је брод динамички стабилан, може се проценити његов положај као и курс у ма ком тренутку.

Систем линеарних диференцијалних једначина кретања брода у бездимензионом облику, који узима у обзир утицај кормила, како је раније показано, има облик:

$$\begin{aligned} \dot{u}' \cdot (\Delta' - X'_u) - u' \cdot X'_u + X'_u &= 0 \\ \dot{v}' \cdot (\Delta' - Y'_v) - v' \cdot Y'_v - r' \cdot Y'_r + \Delta' \cdot r' &= \delta'_R \cdot Y'_\delta, \\ \dot{r}' \cdot (I'_{zG} - N'_r) - r' \cdot N'_r - v' \cdot N'_v &= \delta'_R \cdot N'_\delta. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

Уколико су познате вредности хидродинамичких извода, овај систем једначина се може решити аналитички, или применом неке од нумеричких метода, чиме се у било ком врменском тренутку могу проценити вредности убрзања, односно брзина брода. Уколико су познати почетни курс и брзина брода на основу промене убрзања, односно брзина, може се реконструисати његова трајекторја.

Из трајекторије брода се могу извести одговарајући закључци који се односе на његова својства управљивости.

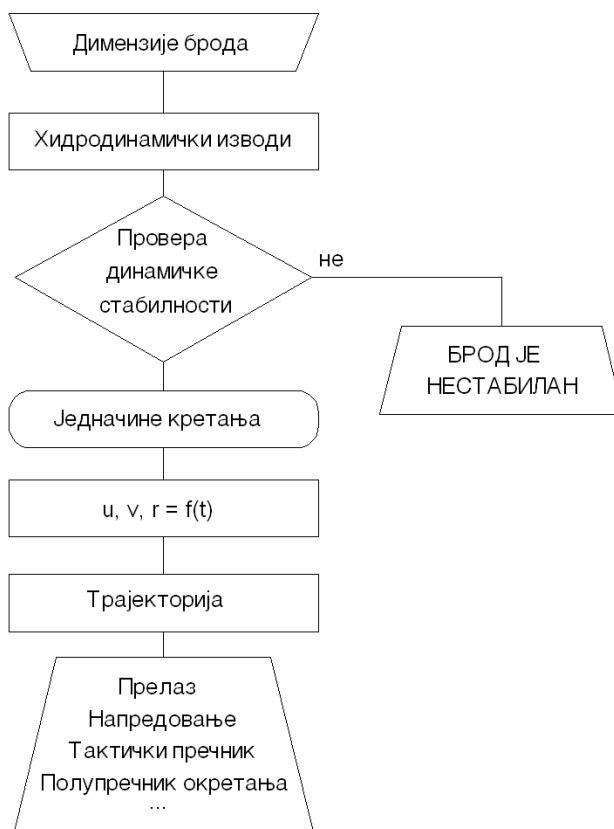
Резултати који се добијају линеарном теоријом се, на жалост, не могу користити за проверу маневарских карактеристика бродова у случају оштријих маневара, што је неопходно при провери да ли су и у којој мери задовољени ИМО прописи. Ипак, ови резултати су, свакако, веома корисни јер се на основу добијених вредности може стећи боља слика о маневарским могућностина испитаног брода.

На бази описаних поступака, написан је програм у *Visual Basic* - у коме се применом нумеричке методе *Runge-Kutta* четвртог реда за решавање система диференцијалних једначина [11] (поступак је укратко описан у прилогу 2), може симулирати тест окретања (листинг програма је дат у прилогу 3).

На слици 8.1 је шематски приказан основни концепт програма.

Најосетљивије место у целом прорачуну представља одређивање хидродинамичких извода за брод. Најпоузданији начин је непосредно мерење при испитивањима везаних модела (праволинијска испитивања, испитивања помоћу ротационе полуге у кружним базенима и испитивања помоћу ПММ уређаја). Овакав приступ подразумева и прерачунавање добијених резултата са модела на брод. Обзиром да ефекат размере до данас није у потпуности разјашњен, уз претпоставку о довољно великом моделу чиме би се избегло ламинарно струјање при спровођењу мерења, сматра се да се вредности хидродинамичких извода измерене на моделу могу директно употребити за брод. Ово подразумева занемаривање како гравитационих, тако и вискозних појава што значи да сличност између модела и брода не подразумева једнакост ни Фрудових ни Рејнолдсових бројева. Одавде се може извести закључак да измерене вредности хидродинамичких извода не зависе од брзине.

На жалост, до резултата испитивања није лако доћи. Тек понегде се у литератури могу пронаћи измерене вредности и то углавном за бродове старијих генерација. Због тога до данас нема ни довољно поузданих поступака који би се могли користити за процену вредности хидродинамичких извода.

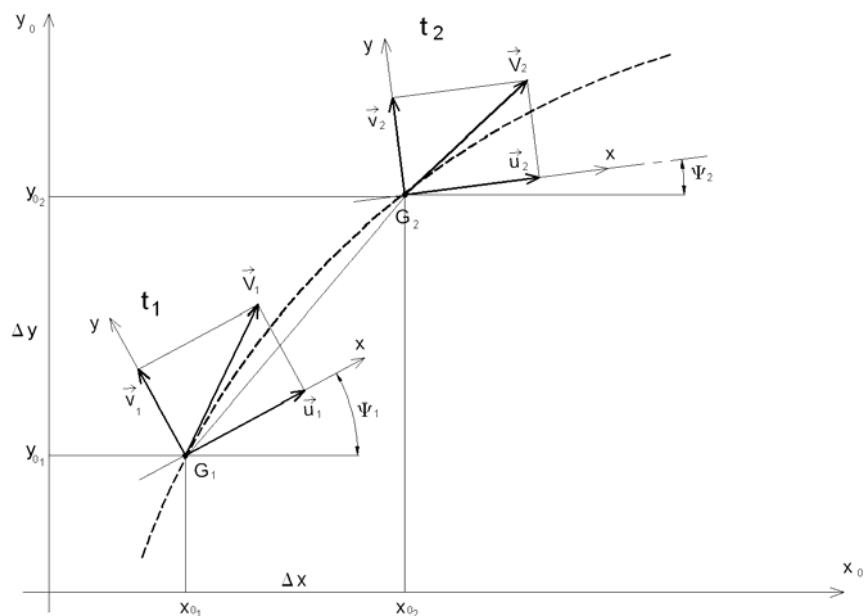


Слика 8.1 – Алгоритам програма за предвиђање трајекторије брода при скретању уз константан угао одклона кормила

8.1. Поступак за одређивање трајекторије брода

Уколико су познате вредности брзина залетања заносења и промене курса брода у два довољно блиска тренутка, за познати положај брода у првом тренутку може се одредити његов положај у другом тренутку.

На слици 8.2 су приказане карактеристичне величине помоћу којих се може одредити померај брода у временском интервалу одређеном разликом између уочених тренутака.



Слика 8.2 – Кинематске величине које одређују кретање брода при скретању

Промена угла курса брода на уоченом интервалу је одређена следећом зависношћу:

$$\Delta\Psi = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot \alpha},$$

где је $\alpha \equiv \dot{r}$ угаоно убрзање које се може одредити из следећег израза:

$$r_2 = r_1 + \alpha \cdot \Delta t \rightarrow \alpha = \frac{r_2 - r_1}{\Delta t}.$$

Уколико је познат угао курса брода у тренутку t_1 тада се може одредити и угао курса у тренутку t_2 :

$$\Psi_2 = \Psi_1 + \Delta\Psi.$$

Напредовање брода у правцу осе x_0 , односно осе y_0 одређено је са:

$$\Delta x = x_{02} - x_{01} \quad \text{и} \quad \Delta y = y_{02} - y_{01},$$

односно:

$$\Delta x = V_{1x} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot a_{x_0} \quad \text{и} \quad \Delta y = V_{1y} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot a_{y_0},$$

где су: V_{1x} - пројекција брзине у првом тренутку на осу x_0 ,
 V_{1y} - пројекција брзине у првом тренутку на осу y_0 ,
 Δt - време трајања кретања брода,
 a_{x0} - убрзање брода у правцу осе x_0 и
 a_{y0} - убрзање брода у правцу осе y_0 .

Убрзања се могу одредити из услова да је позната промена брзине на уоченом интервалу:

$$V_{2x} = V_{1x} + a_{x0} \cdot \Delta t \rightarrow a_{x0} = \frac{V_{2x} - V_{1x}}{\Delta t} \quad \text{и} \quad V_{2y} = V_{1y} + a_{y0} \cdot \Delta t \rightarrow a_{y0} = \frac{V_{2y} - V_{1y}}{\Delta t}$$

Уколико се овако добијени изрази за убрзања замене у изразима за напредовања долази се до:

$$\Delta x = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot (V_{1x} + V_{2x}) \quad \text{и} \quad \Delta y = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot (V_{1y} + V_{2y}).$$

Обзиром да су познате вредности брзина u_1 , v_1 , u_2 и v_2 , као и углови курса Ψ_1 и Ψ_2 , положај брода у тренутку t_2 је одређен са:

$$x_{02} = x_{01} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot (u_1 \cdot \cos \Psi_1 - v_1 \cdot \sin \Psi_1 + u_2 \cdot \cos \Psi_2 - v_2 \cdot \sin \Psi_2),$$

$$y_{02} = y_{01} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot (u_1 \cdot \sin \Psi_1 + v_1 \cdot \cos \Psi_1 + u_2 \cdot \sin \Psi_2 + v_2 \cdot \cos \Psi_2).$$

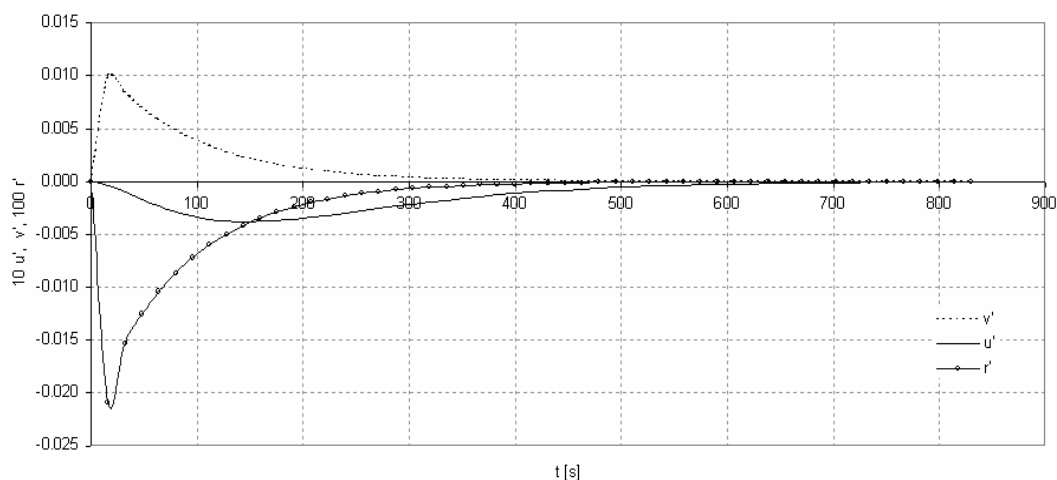
На описани начин се уз довољно кратке временске интервале за познате вредности брзина и њихове промене може реконструисати читаву трајекторија брода у току трајања маневра.

8.2. Нумерички пример

У недостатку измерених вредности хидродинамичких извода различитих типова бродова, у овом раду ће на примеру брода MARINER класе бити показани резултати до којих се долази решавањем линеарних диференцијалних једначина кретања брода.

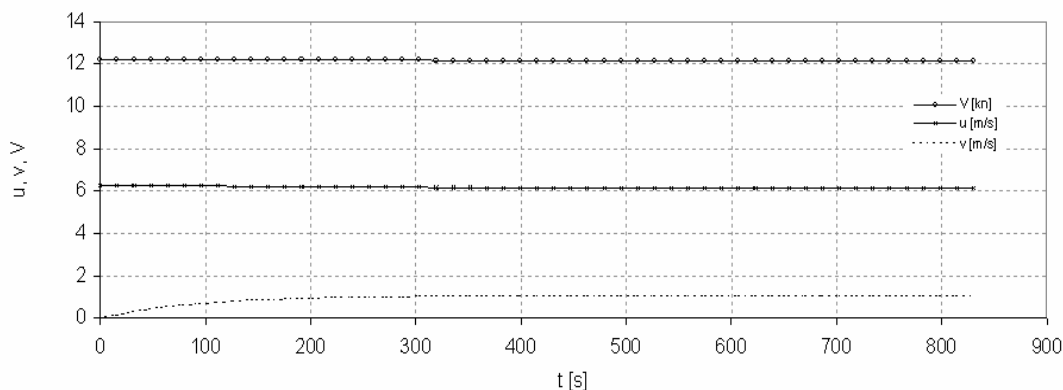
Геометријске карактеристике брода MARINER класе као и хидродинамички изводи који су у прорачуну коришћени приказани су у табели I.3 у прилогу 1.

Рецимо, за случај брода дужине 100 m, и брзину одређену Фрудовим бројем од 0.2, за отклон кормила од 5 степени промена убрзања залетања, занешења и закретања која је добијена решавањем једначина кретања је приказана на слици 8.3.

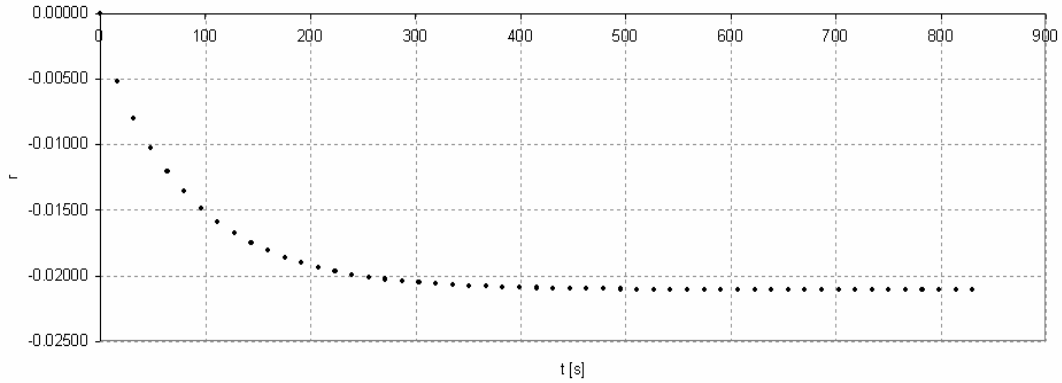


Слика 8.3 – Промена убрзања (димензиони облик) при скретању брода

Као последица овакве расподеле убрзања долази до промене брзина које су показане на следеће две слике:

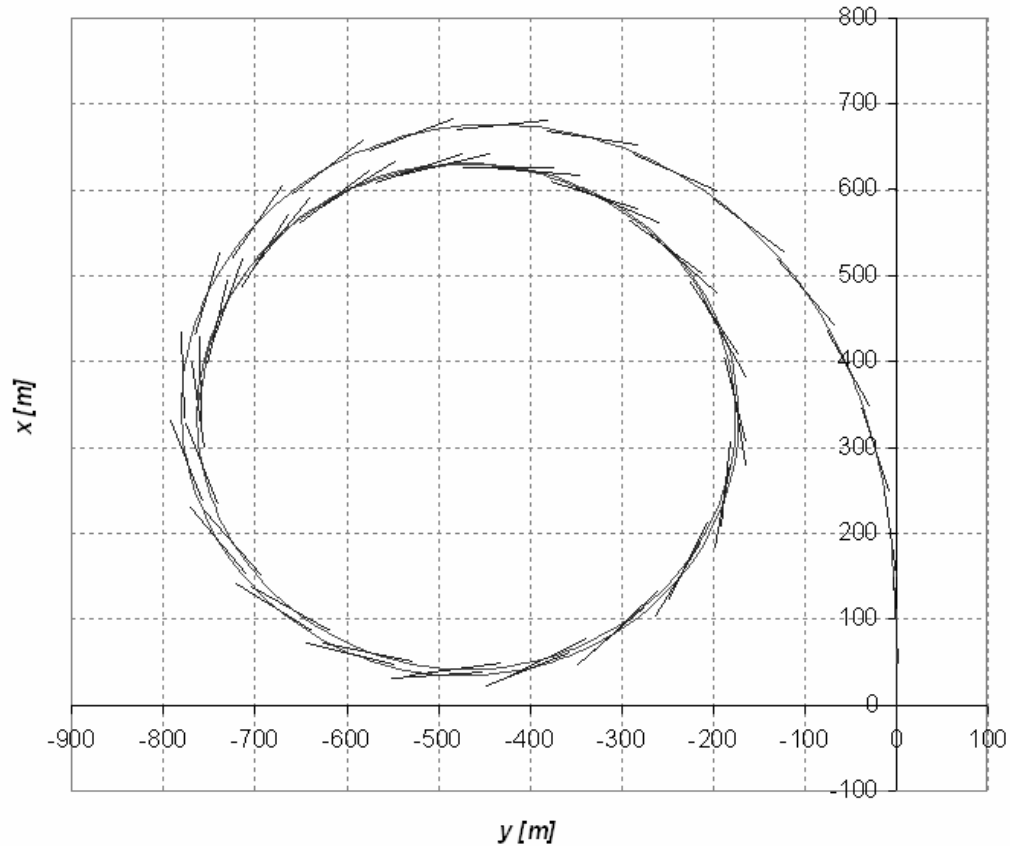


Слика 8.4 – Промена брзине залетања, занешења и укупне брзине кретања брода



Слика 8.5 – Промена брзине промене курса брода при скретању

Коначно, на основу показаних промена брзина могуће је реконструисати трајекторију брода при скретању уколико се угао отклона кормила не мења:



Слика 8.6 – Трајекторија брода

Из добијених вредности се може уочити да након отприлике 400 секунди, у овом случају, убрзања која су изазвана поремећајем узрокованим отклоном кормила ишчезавају, када брод улази у равномерно кружење уз константне брзине.

Заменом вредности хидродинамичких извода у израз за полупречник кривине скретања (6.11) добија се:

$$R = 297.43 \text{ m} \rightarrow D = 2 \cdot R = 594.86 \text{ m},$$

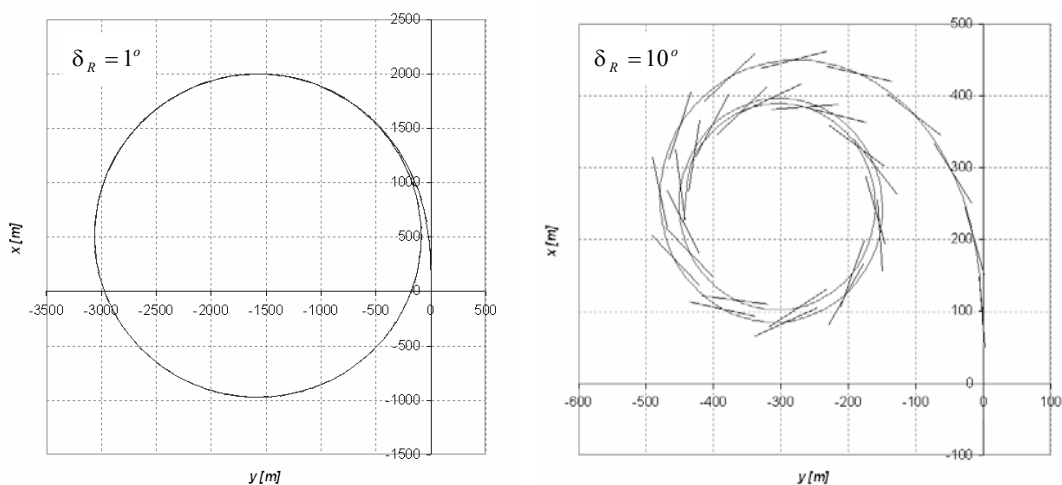
што се може потврдити са слике 8.6.

Угао занешења брода би у овом случају према изразу 6.12 износио:

$$\beta = 9.47^\circ.$$

Уколико би кормило било отклоњено на другу страну једина разлика у трајекторији би била та што би брод скретао у десну страну. Дакле, линеарна теорија не може да региструје хидродинамичку асиметричност брода. Без обзира на коју страну се обртао пропелер, линеарна теорија даје идентичну трајекторију.

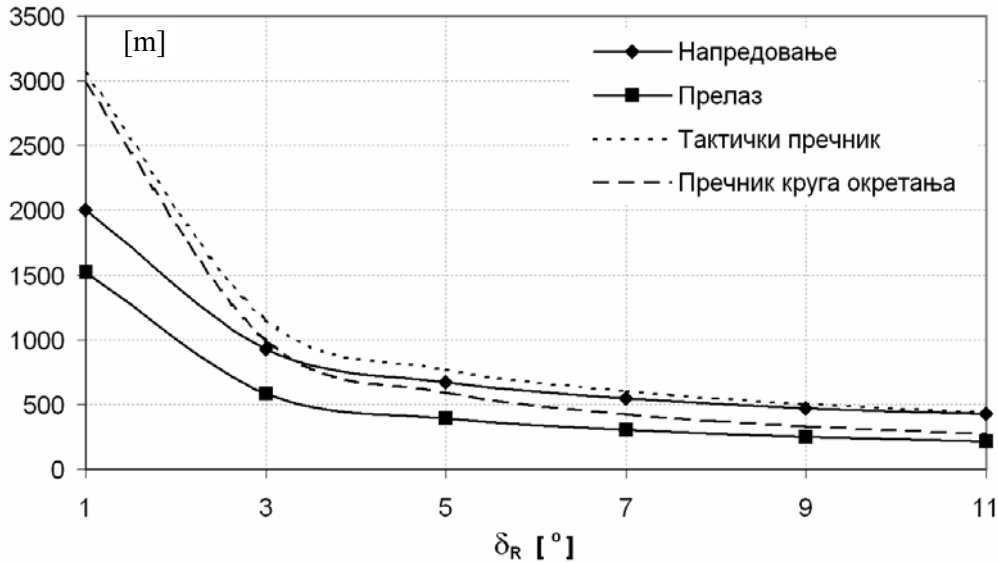
Са променом угла отклона кормила мења се и трајекторија брода што је показано на слици 8.7.



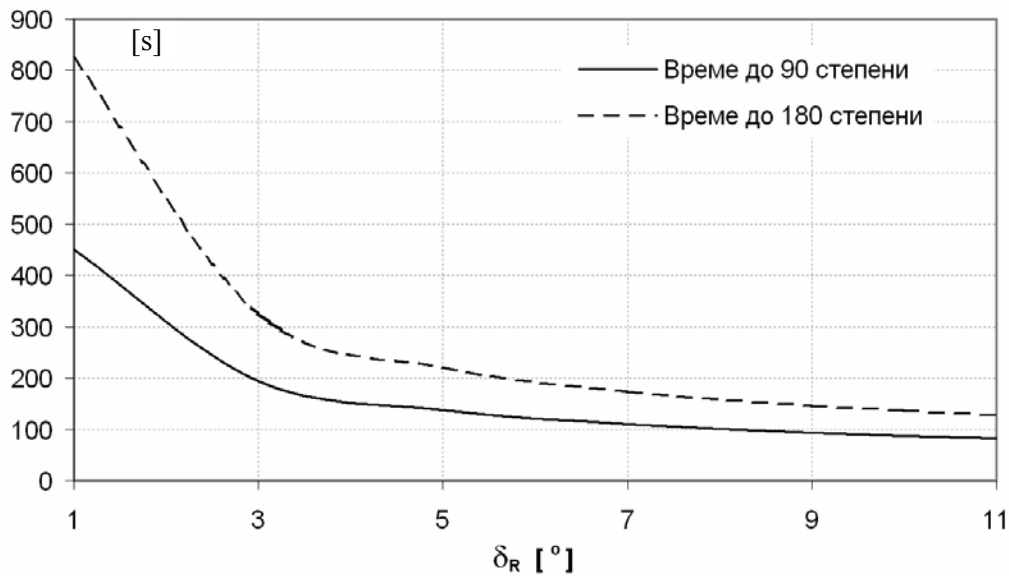
Слика 8.7 – Утицај угла отклона кормила на трајекторију брода према линеарној теорији

Уколико је угао отклона кормила мањи тада је пречник круга окретања већи, односно већи је однос пречника и дужине брода. Имајући у виду претпоставку на бази које су линеаризоване иначе нелинеарне једначине кретања, намеће се закључак да је поузданост добијених резултата већа уколико је угао отклона кормила мањи. Дакле, при већим вредностима углова отклона кормила линеарна теорија не даје добре резултате.

Утицај промене угла отклона кормила на параметре којима се на основу теста окретања вреднују својства управљивости брода, за брод MARINER класе дужине 100 m, је показан на сликама 8.8 и 8.9.



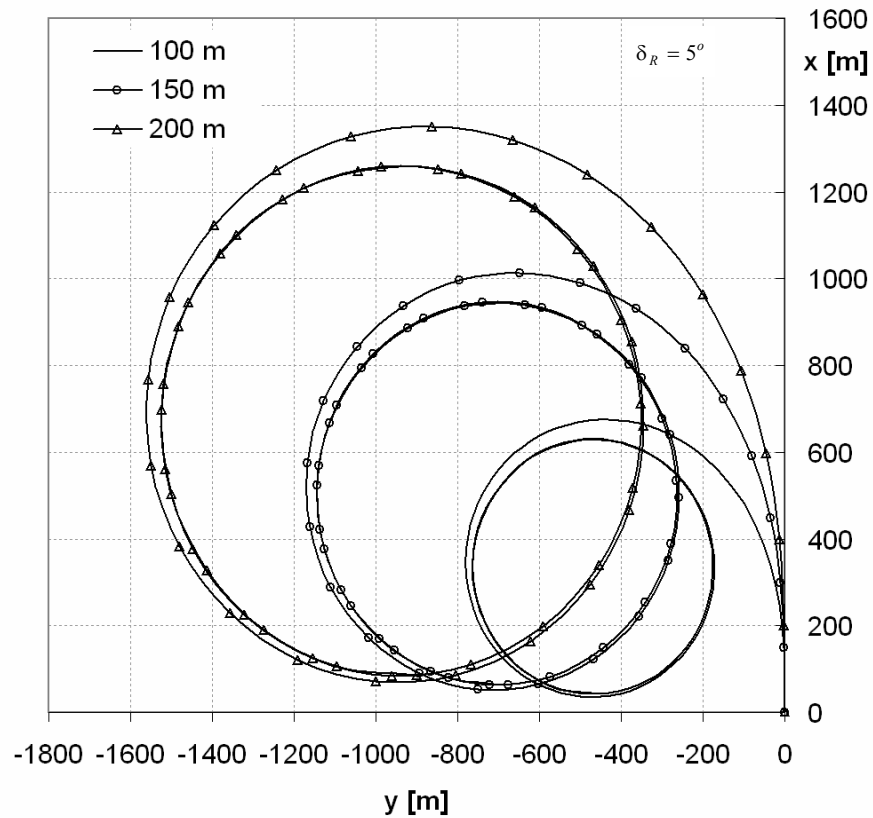
Слика 8.8 – Зависност напредовања, прелаза, тактичког пречника и пречника круга окретања од угла отклона кормила



Слика 8.9 – Утицај угла отклона кормила на време потребно за достизање курса од 90° , односно 180°

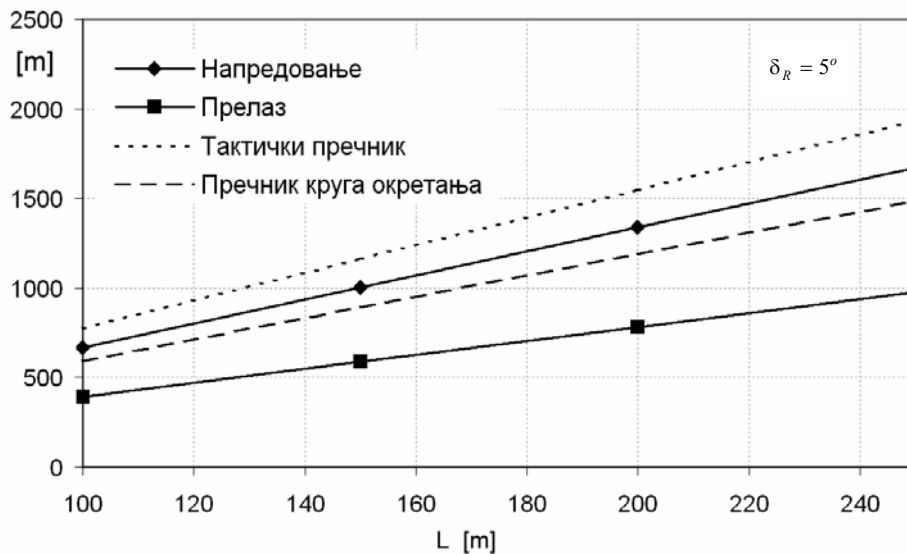
Резултати приказани на претходна два дијаграма су добијени помоћу поменутог програма, и може се уочити да се повећањем угла отклона кормила, поменути параметри опадају.

Утицај дужине брода на трајекторију при константној вредности угла отклона кормила од 5 степени је приказан на слици 8.10.

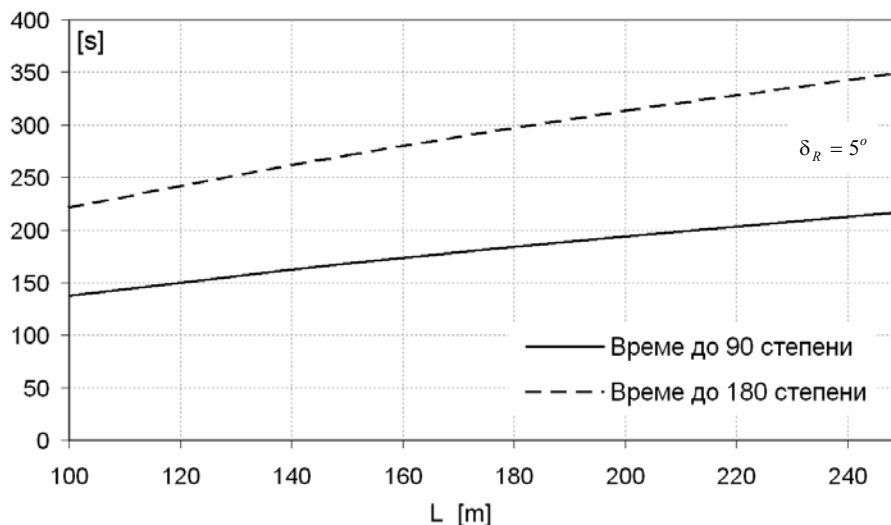


Слика 8.10 – Утицај дужине брода на трајекторију

Уколико је брод дужи истој вредности угла отклона кормила одговара већи круг окретања што се може видети и са слике 8.11.



Слика 8.11 - Зависност напредовања, прелаза, тактичког пречника и пречника круга окретања од дужине брода



Слика 8.12 – Утицај дужине брода на време потребно за достигање курса од 90°, односно 180°

Према добијеним резултатима се може констатовати да анализирани параметри практично линеарно зависе од дужине брода. Овде не треба заборавити да се са повећањем дужине брода, с обзиром да се не мењају односи L/B и B/T , заправо повећава и депласман брода:

$$\Delta = L^3 \cdot \frac{1}{L/B} \cdot \frac{1}{(L/B) \cdot (B/T)} \cdot C_B \cdot \rho$$

Хидродинамички изводи који су у приказаном примеру коришћени односе се на одређену конфигурацију: брод + пропелер + кормило која је употребљена при њиховом мерењу. Уколико би на брод било уграђено другачије кормило, било да се од основног разликује само по површини или и по усвојеном профилу, требало би извршити корекцију коефицијента Y_{δ} и N_{δ} . Ова корекција се може спровести на следећи начин [9]:

1. За познате димензије кормила и коефицијент узгона усвојеног профила може се одредити вредност:

$$Y_{\delta o} = 57.3 \cdot C_{L\alpha} \cdot \frac{A_T}{L^2},$$

где су: $C_{L\alpha}$ - коефицијент узгона усвојеног профила при одређеном углу
 A_T - површина листа кормила
 L - дужина брода

2. Пошто се мерењима одреди стварна вредност утицаја кормила на попречну силу $Y_{\delta 1}$ може се израчунати коефицијент:

$$K = \frac{Y_{\delta 1}}{Y_{\delta o}}$$

3. Уколико се промене димензије кормила и/или усвоји други профил, коригована вредности хидродинамичког извода Y_{δ} се добија из следеће релације:

$$Y_{\delta} = K \cdot Y_{\delta o}' ,$$

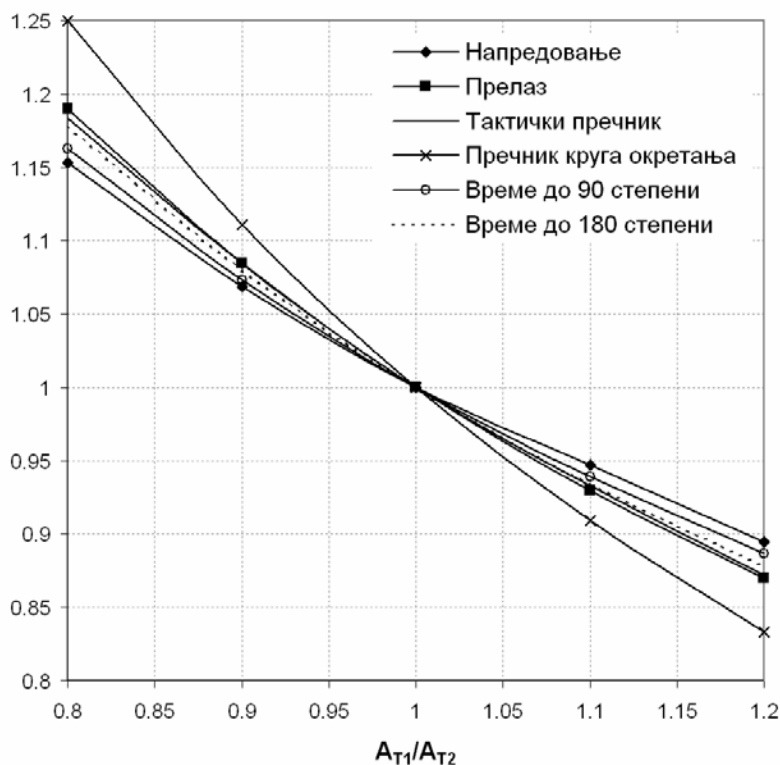
где је:

$$Y_{\delta o}' = 57.3 \cdot C_{L\alpha}' \cdot \frac{A_T'}{L^2} .$$

4. На сличан начин се може извршити и корекција хидродинамичког извода N_{δ} .

Из показаног поступка се може приметити да са повећањем било површине листа кормила, било коефицијента узгона усвајањем ефикаснијег профила расту и вредности хидродинамичких извода Y_{δ} и N_{δ} . Утицај ове промене је за случај промене површине кормила показан на слици 8.13. На апсциси је дат бездимензиони однос површина кормила, а на ординати процентуална промена величина карактеристичних за тест окретања.

Са дијаграма се може констатовати да у разматраном примеру – повећању површине листа кормила од 10% – одговара смањење пречника круга окретања од око 9%.



Слика 8.13 – Утицај површине листа кормила на резултате теста окретања

Било би добро када би на располагању били резултати непосредних испитивања. То би омогућило проверу резултата који су добијени линеарном теоријом и дефинисање граница њене применљивости.

Утицај дубине воде, или ограничености пловног пута, подразумевао би допунске корекције хидродинамичких извода, али о томе овде неће бити посебног разматрања.

Уколико би се приложени програм модификовао на начин да се дефинише законитост према којој би се мењао угао отклона кормила у току трајања маневра, било би могуће симулирати трајекторију брода у различитим околностима.

9. НЕЛИНЕАРНА ТЕОРИЈА УПРАВЉИВОСТИ БРОДА

Потреба за математичким моделом који би и при већим угловима отклона кормила, без обзира на динамичку стабилност брода у курсу, давао довољно добре резултате, довела је до појаве нелинеарне теорије управљивости брода.

Већи угао отклона кормила подразумева "оштрији" маневар, односно значајније промене убрзања брода. Ово је праћено већим углом заношења и бржим променама угла курса брода. Међусобни утицај између трупа, пропелера и кормила постаје утицајнији. Ове појаве се не могу регистровати описаним линеарним једначинама кретања брода.

Из система линеарних диференцијалних једначина кретања брода (6.3), може се уочити да прва једначина – једначина залетања – није спрегнута са преостале две. То значи да нема утицаја заношења ни закретања брода на брзину залетања. Ово при већим угловима отклона кормила није тачно. Зависно од форме, пад брзине при скретању брода, може прећи 40%. Код бродова пунијих форми пад брзине је мањи него код виткијих бродова. Ова зависност је показана на слици 9.1.



Слика 9.1 – Пад брзине при скретању брода [5]

Данас постоје два суштински различита приступа за добијање нелинеарног система диференцијалних једначина кретања брода.

9.1. Абковицев нелинеарни математички модел

Овај поступак, уведен још 1964. године [21], посматрајући проблем чисто математички, једначине кретања брода добија тако што узима у обзир више чланове развоја у Тејлоров ред система једначина (6.1):

$$\begin{aligned} \dot{u}' \cdot (\Delta' - X_{\dot{u}}') &= u' \cdot X_u' - X_u' + f_1(u, v, r, \delta_R), \\ \dot{v}' \cdot (\Delta' - Y_{\dot{v}}') &= v' \cdot Y_v' + \dot{r}' \cdot Y_{\dot{r}}' + r' \cdot Y_r' - \Delta' \cdot r' + f_2(u, v, r, \delta_R), \\ \dot{r}' \cdot (I_{zG}' - N_{\dot{r}}') &= +r' \cdot N_r' + \dot{v}' \cdot N_{\dot{v}}' + v' \cdot N_v' + f_3(u, v, r, \delta_R) \quad \dots\dots\dots 9.1 \end{aligned}$$

Виши чланови су садржани у функцијама $f_1(u, v, r, \delta_R)$, $f_2(u, v, r, \delta_R)$ и $f_3(u, v, r, \delta_R)$.

Овако добијене једначине кретања брода се додатно компликују јер се у њима јављају допунски хидродинамички изводи који су последица мешовитих извода:

$$f_i(u, v, r, \delta_R) = f(Y_{uu}, Y_{vu}, Y_{ru}, Y_{\dot{u}}, Y_{uuu}, Y_{uvv}, \dots, Y_{vuu}, Y_{vvv}, \dots, Y_{rvv}, \dots) \quad i = 1, 3,$$

а који по својој природи не морају имати карактер физичких величина, те се отуда често називају хидродинамичким коефицијентима.

Уколико је следећи члан у Тејлоровом развоју за ред величине мањи од претходног, његовим узимањем у обзир, повећава се тачност добијених резултата. С друге стране, вредности хидродинамичких коефицијената, које се одређују експериментално, такође утичу на тачност. Дакле, повећање тачности једначина (узимањем у обзир виших чланова развоја), праћено је смањењем тачности улазних података неопходних за њихово решавање, па се зато најчешће заустављамо већ на члановима трећег реда.

Уз допунску анализу утицаја појединих чланова на кретање брода имајући у виду симетрију бродске форме, као и природу опструјавања брода водом при његовом кретању, добијене су нелинеарне диференцијалне једначине кретања брода [5]:

$$\begin{aligned} (\Delta - X_{\dot{u}}) \cdot \dot{u} &= X^0 + X_u \cdot (u - u_1) + \frac{1}{2} X_{uu} \cdot (u - u_1)^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} \cdot (u - u_1)^3 + \frac{1}{2} X_{vv} \cdot v^2 + \\ &+ \frac{1}{2} X_{rr} \cdot r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \cdot \delta_R^2 + \frac{1}{2} X_{vuu} \cdot v^2 \cdot (u - u_1) + \frac{1}{2} X_{rvu} \cdot r^2 \cdot (u - u_1) + \\ &+ \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \cdot \delta_R^2 \cdot (u - u_1) + (X_{vr} + \Delta) \cdot v \cdot r + X_{v\delta} \cdot v \cdot \delta_R + X_{r\delta} \cdot r \cdot \delta_R + \\ &+ X_{vru} \cdot v \cdot r \cdot (u - u_1) + X_{v\delta u} \cdot v \cdot \delta_R \cdot (u - u_1) + X_{r\delta u} \cdot r \cdot \delta_R \cdot (u - u_1) \\ (\Delta - Y_{\dot{v}}) \cdot \dot{v} - Y_{\dot{r}} \cdot \dot{r} &= Y^0 + Y_u^0 \cdot (u - u_1) + Y_{uu}^0 \cdot (u - u_1)^2 + Y_v \cdot v + \frac{1}{6} Y_{vvv} \cdot v^3 + \frac{1}{2} Y_{vrv} \cdot v \cdot r^2 + \\ &+ \frac{1}{2} Y_{v\delta\delta} \cdot v \cdot \delta_R^2 + Y_{vu} \cdot v \cdot (u - u_1) + \frac{1}{2} Y_{vuu} \cdot v \cdot (u - u_1)^2 + (Y_r - \Delta \cdot u_1) \cdot r + \\ &+ \frac{1}{6} Y_{rrr} \cdot r^3 + \frac{1}{2} Y_{rvv} \cdot r \cdot v^2 + \frac{1}{2} Y_{r\delta\delta} \cdot r \cdot \delta_R^2 + Y_{ru} \cdot r \cdot (u - u_1) + \frac{1}{2} Y_{ruu} \cdot r \cdot (u - u_1)^2 + \\ &+ Y_{\delta} \cdot \delta_R + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \cdot \delta_R^3 + \frac{1}{2} Y_{\delta vv} \cdot \delta_R \cdot v^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta rr} \cdot \delta_R \cdot r^2 + Y_{\delta u} \cdot \delta_R \cdot (u - u_1) + \\ &+ \frac{1}{2} Y_{\delta uu} \cdot \delta_R \cdot (u - u_1)^2 + Y_{vr\delta} \cdot v \cdot r \cdot \delta_R \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -N_{\dot{v}} \cdot \dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}}) \cdot \dot{r} = & N^0 + N_u^0 \cdot (u - u_1) + N_{uu}^0 \cdot (u - u_1)^2 + N_v \cdot v + \frac{1}{6} N_{vvv} \cdot v^3 + \\
 & + \frac{1}{2} N_{vrr} \cdot v \cdot r^2 + \frac{1}{2} N_{v\delta\delta} \cdot v \cdot \delta_R^2 + N_{vu} \cdot v \cdot (u - u_1) + \frac{1}{2} N_{vuuv} \cdot v \cdot (u - u_1)^2 + \\
 & + N_r \cdot r + \frac{1}{6} N_{rrr} \cdot r^3 + \frac{1}{2} N_{rvv} \cdot r \cdot v^2 + \frac{1}{2} N_{r\delta\delta} \cdot r \cdot \delta_R^2 + N_{ru} \cdot r \cdot (u - u_1) + \\
 & + \frac{1}{2} N_{ruu} \cdot r \cdot (u - u_1)^2 + N_{\delta} \cdot \delta_R + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \cdot \delta_R^3 + \frac{1}{2} N_{\delta vv} \cdot \delta_R \cdot v^2 + \\
 & + \frac{1}{2} N_{\delta rr} \cdot \delta_R \cdot r^2 + N_{\delta u} \cdot \delta_R \cdot (u - u_1) + \frac{1}{2} N_{\delta uu} \cdot \delta_R \cdot (u - u_1)^2 + N_{vr\delta} \cdot v \cdot r \cdot \delta_R
 \end{aligned}$$

..... 9.2

Са X^0 у првој једначини је означена сила у x правцу која карактерише равномерно праволинијско кретање брода константном брзином u_1 . Сила Y^0 , односно момент N^0 , последице су рада пропелера при нултом заносу брода, односно при нултом углу отклона кормила. Ове величине зависе од брзине напредовања, те се отуда у једначинама јављају и одговарајући изводи.

Дакле, уколико је позната форма брода, одакле је могуће одредити отпор при кретању одговарајућом брзином, као и потребне хидродинамичке коефицијенте, и уколико су познате карактеристике усвојеног пропелера, односно кормила, решавањем наведених нелинеарних диференцијалних једначина кретања се може симулирати практично сваки маневар, без обзира на динамичку стабилност брода. Спољашњи утицаји таласа, струјања и дубине воде, или других објеката поред који брод пролази се посебно разматрају.

Програм који је коришћен за решавање линеарног модела, а чији листинг је дат у прилогу, се уз мале корекције може употребити и у нелинеарној области, с обзиром да је систем једначина решаван нумерички. Уз увођење одговарајућих законитости према којима би се мењао угао отклона кормила, приложеним програмом би се могли симулирати не само тестови које захтевају ИМО прописи, већ и други о којима је било речи у трећем поглављу.

9.2. Модуларни математички модел

Други, тзв. модуларни математички приступ, уведен је осамдесетих година и представља покушај да се рашчлане силе и моменти који делујући на труп брода утичу на кретање брода у маневару. Овакав приступ много је ближи физичком тумачењу појава које прате кретање брода у току маневра. Према тзв. модуларном концепту силе које делују на труп брода се могу поделити у три основне групе:

- силе које су последица кретања самог трупа,
- силе које су последица рада пропелера и
- силе које су узроковане утицајем кормила.

Осим тога, међусобни утицаји који представљају интеракцију између трупа, пропелера и кормила, као и допунски спољашњи поремећаји узроковани радним активностима брода се посебно узимају у разматрање.

Према томе, диференцијалне једначине кретања брода (5.9) се могу написати у следећем облику:

$$\begin{aligned} \Delta \cdot (\dot{u} - v \cdot \dot{\Psi}) &= X_H + X_P + X_R + X_{EXT} \\ \Delta \cdot (u \cdot \dot{\Psi} + \dot{v}) &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_{EXT} \\ I_{zG} \cdot \ddot{\Psi} &= N_H + N_P + N_R + N_{EXT} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 9.3$$

У неким случајевима се у разматрање узима и једначина ваљања брода:

$$I_x \cdot \ddot{\Phi} = K_H + K_P + K_R + K_{EXT} \quad \dots\dots\dots 9.4$$

Овакав приступ је у суштини јако уопштен и оставља доста простора за примену различитих поступака за одређивање појединих компоненти сила, зависно од специфичности постављених захтева.

Према једном од приступа, за рибарске бродове, како је то показано у [23] силе које су последица утицаја трупа се могу одредити из следећих једначина:

$$\begin{aligned} X_H &= -m_x \cdot \dot{u} + \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot d \cdot V^2 \cdot [X_0' + X'_{\beta\beta} \cdot \beta^2 + (X'_{\beta r} - m_y') \cdot \beta \cdot r' + X'_{rr} \cdot r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \cdot \beta^3] \\ Y_H &= -m_y \cdot \dot{v} + \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot d \cdot V^2 \cdot [Y_\beta' \cdot \beta + (Y_r' - m_x') \cdot r' + Y'_{\beta\beta\beta} \cdot \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \cdot \beta^2 \cdot r' + Y'_{\beta rr} \cdot \beta \cdot r'^2 + Y'_{rrr} \cdot r'^3] \\ N_H &= -I_{zG} \cdot \dot{r} + \frac{1}{2} \rho \cdot L^2 \cdot d \cdot V^2 \cdot [N_\beta' \cdot \beta + N_r' \cdot r' + N'_{\beta\beta\beta} \cdot \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \cdot \beta^2 \cdot r' + N'_{\beta rr} \cdot \beta \cdot r'^2 + N'_{rrr} \cdot r'^3] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 9.5$$

Са m_x и m_y су означене додатне масе, а са V укупна брзина којом се брод креће.

Према [23] доминантан утицај на хидродинамичке силе које се јављају услед кретања брода имају угао заносења β и брзина промене курса r .

Силе које су последица рада пропелера, односно утицаја кормила, су одређене следећим изразима [23]:

$$\begin{aligned} X_P &= (1 - t_P) \cdot \rho \cdot K_T \cdot D_P^4 \cdot n^2 \\ Y_P &= 0 \\ N_P &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 9.6$$

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) \cdot F_N \cdot \sin \delta_R \\ Y_R &= -(1 - a_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta_R \\ N_R &= -(x_R + a_H \cdot x_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta_R \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 9.7$$

где су: $x_R = -L/2$ - положај кормила по дужини брода,
 t_P, t_R, a_H и x_H - коефицијенти сила које су последице интеракције између трупа, пропелера и кормила,
 K_T - коефицијент потиска пропелера.

Сила узгона која се јавља на кормилу које је отклоњено за угао δ_R одређена је са:

$$F_N = \frac{\rho}{2} A_R \cdot f_\alpha \cdot V_R^2 \cdot \sin \alpha_R \quad \dots\dots\dots 9.8$$

где су: A_R - површина листа кормила,
 V_R - брзина којом вода наструјава на кормило

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2},$$

$$u_R = \varepsilon(1-w)u\sqrt{\eta\left[1+\kappa\left(\sqrt{1+8K_T/\pi J^2}-1\right)\right]^2+(1-\eta)},$$

$$v_R = \gamma_R(v-rl_R),$$

$\varepsilon, \kappa, \gamma_R, l_R$ - параметри који одређују дострујавање воде кормилу (одређују се експериментално),

$(1-w)$ - коефицијент суструјања,

η - однос пречника пропелера и висине кормила,

α_R - угао под којим вода наструјава на кормило

$$\alpha_R = \delta_R - \tan^{-1}(-v_R/u_R),$$

f_α - коефицијент узгона

$$f_\alpha \approx 6.13 \cdot \Lambda / (2.25 + \Lambda),$$

Λ - коефицијент виткости кормила.

Ово је један од начина како се, уз познавање вредности потребних хидродинамичких коефицијента, могу одредити силе које су неопходне за решавање једначина кретања. Нешто другачији приступи су показани у [9] и у [22]. Различити приступи подразумевају и различите хидродинамичке коефицијенте. За разлику од хидродинамичких извода који су потребни за решавање система линеарних једначина кретања брода, а који се уз одговарајућа упрошћења, могу проценити и применом теоријских разматрања [20], хидродинамички коефицијенти у нелинеарним једначинама се могу одредити искључиво експериментално.

С обзиром на разлике у начину на који се могу проценити вредности сила које су одговорне за кретање брода у маневру, у литератури се могу наћи одговарајуће групе хидродинамичких коефицијената.

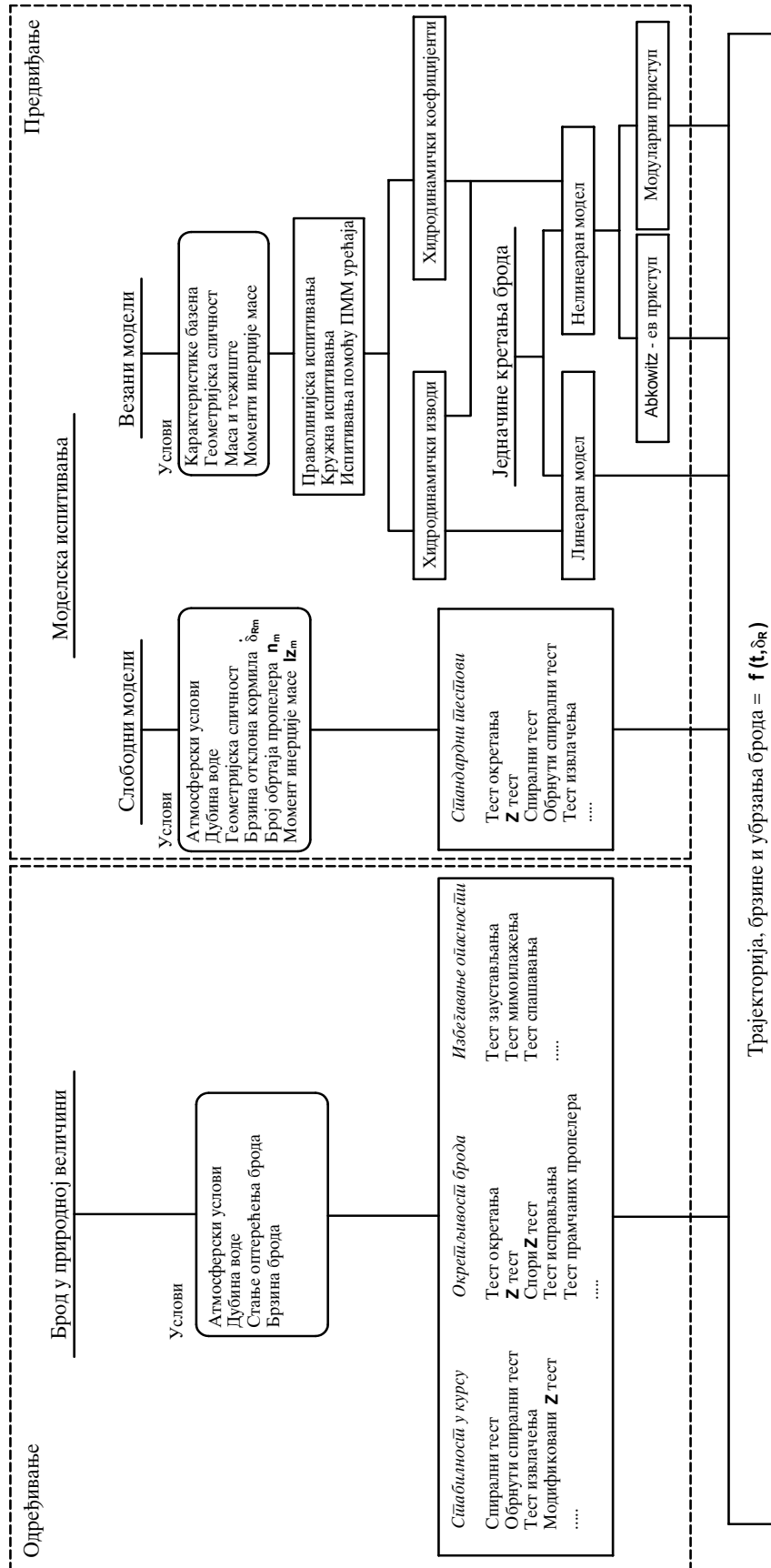
10. ЗАКЉУЧНЕ НАПОМЕНЕ

Приликом израде пројекта брода, осим основних захтева који се тичу носивости, захтеване брзине и потребне аутономије, и подразумеваних захтева где се пре свега мисли на потребну чврстоћу и добар стабилитет, треба водити рачуна и о маневарским могућностима брода. Од тога како брод реагује на кормило не зависи само колико ће бити ефикасан у пловидби, већ директно зависи и безбедност путника, односно терета, посаде и самог брода.

Ово питање постаје посебно значајно уколико се има у виду да је смањење дужине при истој носивости генерални тренд у развоју појединих типова теретних бродова. Овакве промене неповољно се одражавају на маневарске могућности бродова. Појава супер-танкера, и растућа забринутост за њихову безбедност, довеле су до видног помака у области управљивости брода. Међународним прописима је данас дефинисан низ тестова помоћу којих се може оценити колико добро брод реагује на контролне уређаје, а и дате су препоруке које би требало да буду задовољене. С обзиром на значај проблема, може се очекивати да ће у догледном периоду прописи постати обавезујући и да ће сваки брод који напушта бродоградилште морати да их задовољи. То би пред пројектанте поставило додатни задатак.

У овом раду, у поглављу 3, дат је преглед најважнијих експерименталних поступака за оцену маневарских карактеристика брода. Сви тестови подељени су у три групе: тестове за оцену стабилности брода у курсу, тестове за оцену окретљивости брода, и тестове којима се симулира потенцијална опасност са циљем да се утврде могућности брода за њено избегавање. Овим тестовима се мери трајекторија брода уз одговарајућу законитост промене угла отклона кормила, као и промена брзине и убрзања брода у току трајања маневра. Сазнања о својствима управљивости бродова која се на овај начин добијају су од великог значаја и при изради нових бродова. Уколико је брод који се пројектује довољно сличан броду за који се располаже резултатима испитивања, тада се ови резултати могу искористити да би се обезбедила добра управљивост новог брода.

На слици 10.1 је дата основна шема у којој су груписани до сада познати поступци за одређивање, односно предвиђање својстава управљивости брода, а којима је у раду посвећена посебна пажња.



Слика 10.1 – Поступци за испитивање својстава управљивости брода

Уколико се при изради пројекта брода не респолаже одговарајућим прототипом, на располагању су два поступка за предвиђање маневарских карактеристика:

- Испитивање слободних модела је у овом тренутку најпоузданији начин. Тестови који се у том случају спроводе исти су као и у случају испитивања на бродовима у правој величини. Недостатак овога поступка је што је потребно пуно простора за спровођење тестова, као и мирна површина воде. Осим тога, резултати до којих се долази су коначни и не могу се употребити за анализу маневарских могућности под другачијим околностима. Односно, уколико је спроведен нпр. тест окретања уз једну вредност угла отклона кормила, да би се проценило како ће се брод понашати при другој вредности отклона кормила потребно је поново спровести мерење.
- Други начин представља симбиозу теоријског приступа, којим се долази до једначина кретања брода, и експеримената са везаним моделима помоћу којих се одређују хидродинамички коефицијенти који су неопходни за решавање једначина кретања. Једначине кретања брода, које су изведене у поглављу 5, доводе у везу силе које делују на брод и кретања брода у хоризонталној равни. Када се једном одреде хидродинамички коефицијенти, решавањем једначина кретања се може предвидети промена брзина и убрзања при кретању брода у маневру, односно може се симулирати било који маневар брода. Отуда се намеће закључак да се на овај начин може проценити реакција брода на промену угла отклона кормила у било ком тренутку, односно да није потребно поновно моделско испитивање. Осим тога, испитивања везаних модела су једноставнија и спроводе се у базенима.

Шира област применљивости је суштинска предност другог поступка у односу на први. Ово је један од разлога што актуелна настојања за решавање проблема управљивости брода иду управо у овом смеру.

Тежиште овог рада је базирано на линеарном математичком моделу кретања брода у хоризонталној равни и могућностима његове примене при пројектовању брода. У поглављу 6 је дат поступак којим се једначине кретања брода у хоризонталној равни, које су по својој природи нелинеарне, уз одговарајуће претпоставке, своде на линеаран облик. Овим се, с обзиром на упрошћења која су уведена, ограничава примена модела на динамички стабилне бродове у спором маневру са умереним вредностима углова отклона кормила.

У поглављу 7 су изведени и објашњени тзв. индекси стабилности брода у курсу, који пружају могућност да се на основу познатих вредности хидродинамичких извода (измерених или процењених применом теоријских поступака) провери да ли је брод динамички стабилан, односно, да ли се линеарна теорија може применити. Применом описаних поступака утврђено је да су све форме MARAD серије динамички нестабилне, па се према томе, иако то у [9] где је дат детаљан опис серије није поменуто, у овом случају на основу линеарне теорије не могу добити поуздани закључци. Индекси стабилности се могу употребити и као смернице за побољшање својстава управљивости у почетку пројектовања брода. На основу зависности Номотових коефицијентата од геометријских карактеристика брода (која је добијена емпиријски), може се констатовати да је повећање површине листа кормила најједноставнији, а уједно и веома ефикасан начин да се побољшају маневарске особине брода.

Да линеарна теорија, уколико су испоштована ограничења за примену, даје доста добре резултате, може се констатовати из нумеричког примера који је детаљно описан у поглављу 8. Овде је применом програма који је написан у *Visual Basic*-у симулирана трајекторија брода *MARINER* класе у случају маневра окретања. Овај брод је одабран јер су познате тачне вредности свих хидродинамичких извода неопходних за решавање једначина кретања. Добијене вредности указују на следеће закључке:

- Вредности убрзања брода, које су у почетку спровођења маневра највеће, постепено опадају, приближавајући се нули, када брод улази у равномерно кружење константном брзином.
- Хидродинамичка асиметрија једнопропелерних бродова се не може регистровати линеарном теоријом.
- Пад укупне брзине у току маневра, такође није могуће одредити јер линеарне једначине кретања искључују директан утицај заносења и закретања брода на брзину напредовања.
- Са повећањем угла отклона кормила опадају основни параметри којима се вреднују резултати добијени на основу теста окретања (напредовање, прелаз, тактички пречник, пречник круга окретања, као и време за достизање угла курса од 90, односно 180 степени). Граница до које има смисла повећавати угао кормила, а да се не изађе из граница применљивости линеарне теорије, би се могла одредити уколико би на располагању били резултати са пробних вожњи.
- Са повећањем дужине брода (уз одговарајуће повећање депласмана) вредности величина које су наведене у претходнј тачки расту практично линеарно. Ово би свакако било интересантно проверити са реалним вредности, које на жалост нису биле на располагању у току израде овог рада.
- Повећањем површине кормила се значајно могу побољшати својства управљивости брода. Према линеарној теорији, у случају показаног примера, повећање површине кормила од 10% има за последицу смањене свих битних параметара којима је описан маневар окретања за 5 до 10%.

На исти начин, применом датог програма, уз познавање вредности потребних коефицијената, било би могуће симулирати трајекторију било ког другог брода. Уз дефинисање законитости према којој би се мењао угао отклона кормила, приложеним програмом би било могуће у реалном времену симулирати било који маневар (уколико је спор и благ). Програм би се, уз узимање у обзир одговарајућих корекционих фактора којима се коригују хидродинамички изводи, могао користити и за процену маневарских карактеристика у условима плитвидбе у плиткој, односно ограниченој води.

У поглављу 9 је дат кратак приказ до данас познатих нелинеарних приступа којима је могуће превазићи недостатке линеарне теорије. Овим се проблем недостатка потребних улазних података додатно компликује, док се са друге стране стварају услови за процену маневарских способности брода у свакој околности, без обзира на брзину или угао отклона кормила.

Мана овог рада је заправо недостатак резултата реалних испитивања бродова односно модела, како би на већем броју урађених примера било могуће утврдити меродавније закључке који се односе на квалитет резултата добијених линеарном теоријом и на границе њене применљивости.

Осим прикупљања што већег броја објављених резултата испитивања својстава управљивости бродова, односно побољшања поменутог програма (линеарна теорија), даљи рад се може усмерити у два правца:

- детаљније упознавање са нелинеарним математичким моделом и његовим могућностима,
- упознавање са савременим експерименталним и теоријским приступима за процену хидродинамичких коефицијената.

Ово би омогућило свеобухватнији приступ проблему управљивости бродова, како при пројектовању нових, тако и при побољшању маневарских својстава постојећих бродова.

Треба рећи и да је сврха овог рада била детаљније упознавање са проблемом управљивости брода. Тиме су, у неку руку, створени услови да се кроз даљи рад и уз стално праћење достигнућа у овој области, може одговорити све сложенијим захтевима које пред нас постављају међународни стандарди о безбедности пловидбе.

НОМЕНКЛАТУРА

(у заградама су дате алтернативне ознаке)

A_R	(A_T)	m^2	- површина листа кормила
B		m	- ширина брода
C_B			- коефицијент пуноће истиснућа
$C_{L\alpha}$			- коефицијент узгона профила кормила
D	(D_P)	m	- пречник пропелера
$\overset{\cdot}{F}_R$		N	- резултујућа сила која делује на брод
I_Z		$kg \cdot m^2$	- момент инерције за осу z
K_T			- коефицијент потиска пропелера
L	(L_0)	m	- дужина брода на водној линији
LCG		m	- тежиште система по дужини
\vec{M}_G		Nm	- главни момент за тежиште брода
N		Nm	- резултујући момент око тежишне осе
P		m	- корак пропелера
R		m	- полупречник круга окретања
S_R			- Струхалов број
T		m	- газ брода
V		m/s	- брзина брода
V_a		m/s	- брзина дострујавања воде пропелеру
V_0		m/s	- почетна брзина брода
V_R		m/s	- брзина дострујавања воде кормилу
X		N	- резултујућа сила у правцу x осе
Y		N	- резултујућа сила у правцу y осе
a_G		m/s^2	- убрзање тежишта брода у односу на инерцијални систем
g		m/s^2	- гравитационо убрзање
h		m	- дубина воде
l_r		m	- крак пригушења
l_v		m	- крак статичке стабилности
n		$^\circ/s$	- број обртаја пропелера
r	($\dot{\Psi}$)	$^\circ/s$	- брзина промене курса
t		s	- време
t_P			- коефицијент смањеног потиска
u		m/s	- брзина залетања
v		m/s	- брзина занешења
w		m/s	- брзина понирања
($1-w$)			- коефицијент суструјања
x_G		m	- положај тежишта брода у односу на покретни координатни систем
x_R		m	- положај кормила по дужини брода у односу на главно ребро
α_R		$^\circ$	- угао дострујавања воде кормилу
β		$^\circ$	- угао занешења брода
Δ		kg	- депласман брода
δ_R		$^\circ$	- угао отклона кормила

η		- однос пречника пропелера и висине кормила
θ	°	- угао посртања
Λ		- коефицијент виткости кормила
λ		- коефицијент размере
ρ	kg/m ³	- густина воде
σ_1, σ_2		- индекси стабилности брода у курсу
Φ	°	- угао ваљања
ψ	°	- угао закретања (заошијања)

СКРАЋЕНИЦЕ

GPS	Global Positioning System
IMO	International Maritime Organization
ITTC	International Towing Tank Conference
MARAD	Maritime Administration
MSC	Maritime Safety Committee
PMM	Planar Motion Mechanism
WMO	World Meteorological Organisation

ЛИТЕРАТУРА

1. MSC/Circ.644, (1994), *Explanatory notes to the interim standards for ship manoeuvrability*, IMO
2. MSC/Circ.1053, (2002), *Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability*, IMO
3. A R J M Lloyd, (1989), *SEAKEEPING: Ship behaviour in rough weather*, UK
4. J. M. J. Journée, Jakob Pinkster, (2002), *Introduction in ship hydromechanics*, Delft University of Technology
5. Edward V. Lewis, (1989), *Principles of naval architecture, Volume III*, SNAME
6. Y. Yoshimura, K. Kose, T. Haraguchi, (2002), *Criteria for yaw-checking and course-keeping abilities in IMO's interim standards for ship manoeuvrability*, MARSIM 2000
7. Y. Yoshimura, (2001), *Investigation into the yaw-checking ability in ship manoeuvrability standard*, Proceedings of prediction of ship manoeuvring performance, Japan
8. 23rd ITTC Manoeuvring Committee, (2002), *ITTC – Recommendations: Free-Sailing Model Test Procedure*
9. Donald P. Roseman, (1987), *The Marad systematic series of full-form ship models*, SNAME
10. D. Clarke, (1983), *The Application of Manoeuvring Criteria in Hull Design Using Linear Theory*, The Naval Architect, RINA
11. Д. Тошић, (1978), *Увод у нумеричку анализу*, Научна књига, Београд
12. P. A. Bailey, D. A. Hudson, W. G. Price, P. Temarel, (2001), *Time simulation of manoeuvring and seakeeping assessments using a unified mathematical model*, RINA Transactions, pp. 57-78
13. J. P. Hooft, U. Nienhuis, (1994), *The prediction of the ship's maneuverability in the design stage*, SNAME Transactions, Vol. 102., pp. 419-445
14. J. M. J. Journée, (1970), *A simple method for determining the manoeuvring indices K and T from the zigzag trial data*, Report 267, Delft University of Technology
15. M. R. Haddara, Y. Wang, (1999), *Parametric identification of manoeuvring models for ships*, International Shipbuilding Progress, Vol. 46, No. 445, pp. 5-27
16. C. G. Biancardi, (1989), *Practical calculation method of ship manoeuvring characteristics at the design stage*, International Shipbuilding Progress, Vol. 37, No. 411, pp. 221-245
17. A. Ogawa, H. Kasai, (1978), *On the Mathematical Of Manoeuvring motion of ships*, International Shipbuilding Progress, Vol. 25, No. 292, pp. 306-319
18. М. Ракамарић, (1974), *Осврт на проблеме и развој управљивости брода*, Бродоградња бр. 25, Загреб
19. 23rd ITTC Manoeuvring Committee, (2002), *ITTC – Recommendations: Captive Model Tests Procedure*
20. N. J. Newman, (1977), *Marine Hydrodynamics*, The Massachusetts Institute of Technology
21. M. A. Abkowitz, (1964), *Lectures of Ship Hydrodynamics – Steering and Maneuverability*, Report No. Hy-5, Hydrodynamics Department, Lyngby, Denmark
22. P. Kaplan, V. Ankudinov, B. K. Jakobsen, (2002), *Modular Mathematical Models for Ship Maneuvering*, T&R Report No. 56, SNAME

23. Y. Yoshimura, N. Ma, (2003), *Manoeuvring Prediction of Fishing Vessels*, Proceedings of MARSIM-2003, p.RC-29-1-10
24. F. Cavanna, E. Tortarolo, (1997), *Speed and Manoeuvrability Seatrails of M/V 'Pietro Barbaro' C147 SEC Shipyard Viareggio*, Cantieri Navali SEC - Viareggio

Прилози

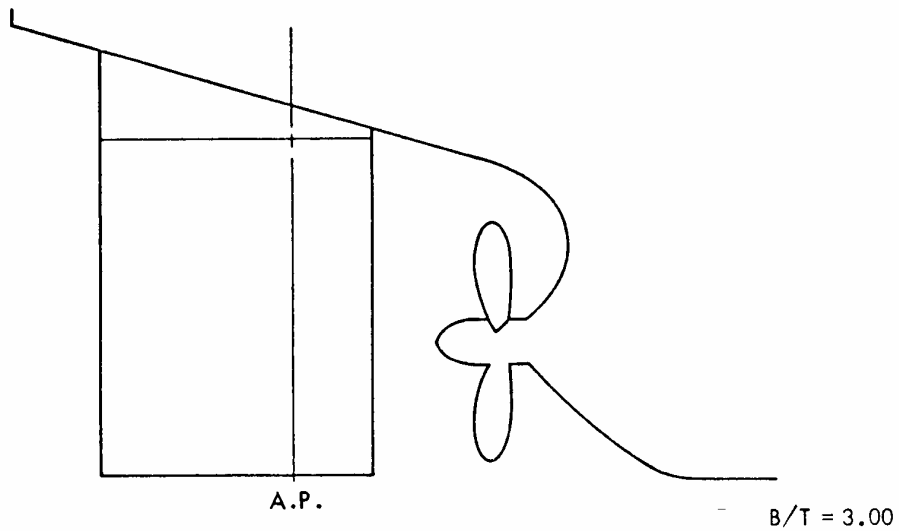
Прилог 1

Форма	Yv	Nv	Yr	Nr	Yv̄	Nv̄	Yr̄	Nr̄	Yδ	Nδ	Iz
A	-0.01513	-0.00855	0.00458	-0.00365	-0.01726	-0.00003	-0.00025	-0.00117	0.00479	-0.00249	0.001205
B	-0.01268	-0.0072	0.00394	-0.00294	-0.0146	-0.00005	-0.00025	-0.00096	0.00416	-0.00216	0.001013
C	-0.01141	-0.00649	0.00335	-0.0025	-0.01254	-0.00005	-0.00025	-0.00081	0.00381	-0.00198	0.000863
D	-0.0235	-0.01273	0.00788	-0.00582	-0.02473	0.0001	-0.00035	-0.00169	0.00716	-0.00373	0.001749
E	-0.0192	-0.01069	0.00557	-0.00462	-0.02017	0.00002	-0.00035	-0.00136	0.00555	-0.00289	0.001417
F	-0.01553	-0.00878	0.00437	-0.00351	-0.01677	-0.00002	-0.00035	-0.0011	0.0045	-0.00235	0.001171
G	-0.01852	-0.01	0.00583	-0.00428	-0.01899	0.00004	-0.00051	-0.0012	0.00548	-0.00288	0.001333
H	-0.01165	-0.00665	0.00346	-0.0024	-0.01218	-0.00004	-0.00035	-0.00076	0.00335	-0.00174	0.000838
I	-0.00895	-0.00485	0.00259	-0.00212	-0.00951	-0.0002	-0.00024	-0.00058	0.00313	-0.00163	0.000787
J	-0.00666	-0.0033	0.00209	-0.00165	-0.00691	-0.0002	-0.00011	-0.00039	0.00243	-0.00126	0.000656
K	-0.01294	-0.00687	0.00342	-0.00314	-0.01349	-0.00016	-0.00024	-0.00086	0.00456	-0.00238	0.001133
L	-0.00935	-0.00448	0.00251	-0.0025	-0.00981	-0.00016	-0.00011	-0.00059	0.00359	-0.00187	0.000944
M	-0.00795	-0.00435	0.00255	-0.00178	-0.00841	-0.0002	-0.00012	-0.00051	0.003	-0.00156	0.00069
N	-0.012	-0.00617	0.00367	-0.00303	-0.01268	-0.00014	-0.0004	-0.00076	0.00449	-0.00234	0.001067
O	-0.01022	-0.00556	0.00273	-0.00272	-0.01157	-0.00019	-0.00012	-0.00074	0.00388	-0.00202	0.000964
P	-0.00874	-0.00402	0.00282	-0.00253	-0.00923	-0.00014	-0.00029	-0.00052	0.00352	-0.00184	0.000889

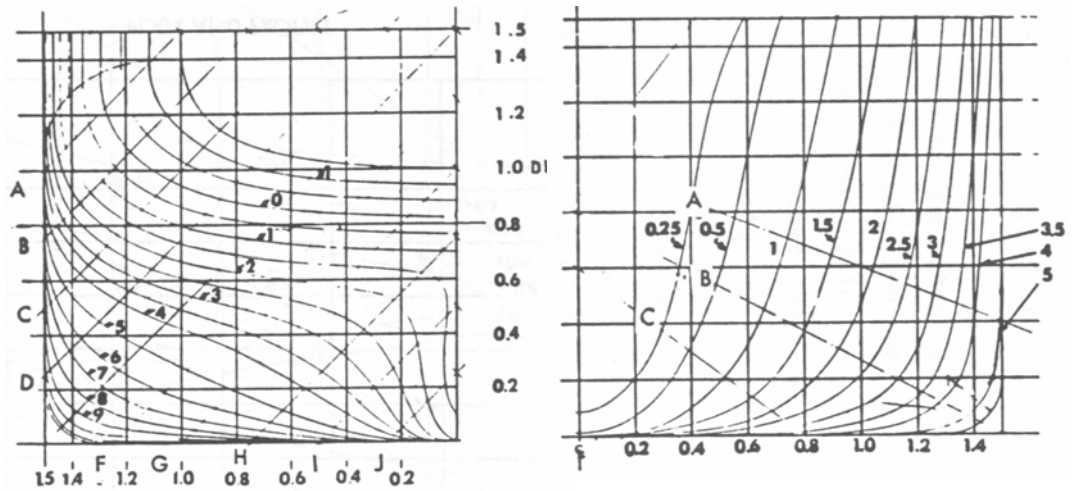
Табела I.1 - Хидродинамички изводи бродова MARAD серије [9]

Форма	Кормило m ²			Пропелер m
	фиксни део	покретни део	укупно	
A	25.18	174.56	199.74	10.34
B	23.78	164.72	188.50	10.05
C	22.48	156.17	178.65	9.78
D	29.36	203.46	232.82	11.16
E	27.41	189.62	217.02	10.78
F	25.64	178.00	203.64	10.44
G	28.43	197.42	225.85	11.00
H	22.95	159.24	182.18	9.88
I	23.97	158.21	182.18	9.58
J	17.74	130.99	148.74	8.89
K	27.03	178.65	205.69	10.18
L	20.07	147.90	167.97	9.45
M	22.30	147.07	169.36	9.24
N	28.15	186.08	214.23	10.39
O	24.90	164.44	189.34	9.77
P	20.90	154.03	174.94	9.64

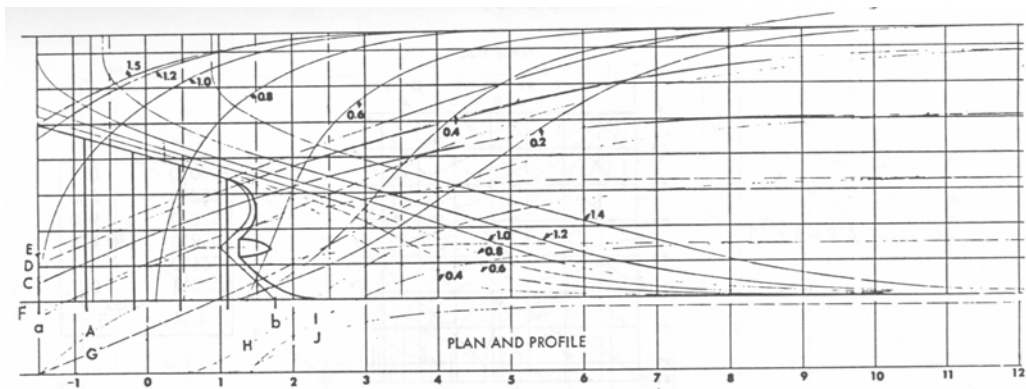
Табела I.2 - Површине кормила и пречник пропелера форми MARAD серије



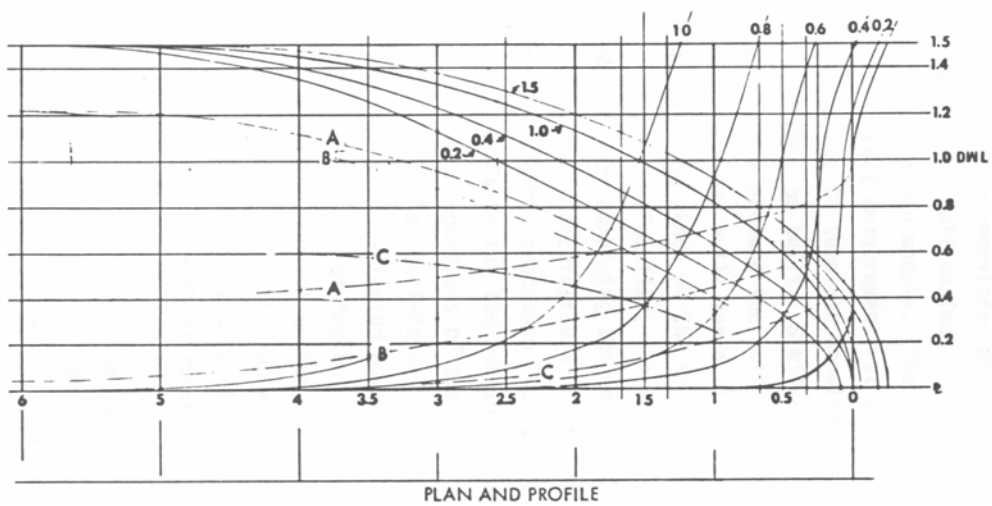
Слика I.1 – Скица кормила и пропелера



Слика 1.2 – План ребара MARAD серије



Слика 1.3 – План водних и уздужних линија креног дела MARAD серије



Слика 1.4 – План водних и уздужних линија прамчаног дела MARAD серије

L/B = 6.84		B/T = 3.1		C _B = 0.61		L/T = 21.19	
Подужна сила		Попречна сила		Момент		Момент инерције	
X _u	-0.0253	Y _v	-0.244	N _v	-0.0555	I _z	0.00046
X _ū	-0.16858	Y _r	-0.09658	N _r	-0.0349		
		Y _{v̇}	-0.31858	N _{v̇}	0.00478		
		Y _{ṙ}	0.0018	N _{ṙ}	-0.01704		
		Y _δ	0.0586	N _δ	-0.0293		

Табела 1.3 - Хидродинамички изводи брода MARINER класе [5]

Прилог 2

ПОСТУПАК РЕШАВАЊА СИСТЕМА ДИФЕРЕНЦИЈАЛНИХ ЈЕДНАЧИНА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ *RUNGE-KUTTA*

Нека је познат систем диференцијалних једначина од три једначине са три зависне променљиве:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(t, x, y, z), \quad \dot{y} = \frac{dy}{dt} = g(t, x, y, z), \quad \dot{z} = \frac{dz}{dt} = j(t, x, y, z)$$

и нека су познати почетни услови:

$$t = 0 \rightarrow x_0, y_0, z_0,$$

функционалне зависности:

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t)$$

се према методи *Runge-Kutta* четвртога реда могу нумерички одредити итеративно на следећи начин:

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= x_n + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4), \\y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_2 + 2 \cdot l_3 + l_4), \\z_{n+1} &= z_n + \frac{1}{6} \cdot (m_1 + 2 \cdot m_2 + 2 \cdot m_3 + m_4),\end{aligned}$$

где су:

$$k_1 = h \cdot f(t_n, x_n, y_n, z_n)$$

$$l_1 = h \cdot g(t_n, x_n, y_n, z_n)$$

$$m_1 = h \cdot j(t_n, x_n, y_n, z_n)$$

$$k_2 = h \cdot f(t_n + 0.5 \cdot h, x_n + 0.5 \cdot k_1, y_n + 0.5 \cdot l_1, z_n + 0.5 \cdot m_1)$$

$$l_2 = h \cdot g(t_n + 0.5 \cdot h, x_n + 0.5 \cdot k_1, y_n + 0.5 \cdot l_1, z_n + 0.5 \cdot m_1)$$

$$m_2 = h \cdot j(t_n + 0.5 \cdot h, x_n + 0.5 \cdot k_1, y_n + 0.5 \cdot l_1, z_n + 0.5 \cdot m_1)$$

$$k_3 = h \cdot f(t_n + 0.5 \cdot h, x_n + 0.5 \cdot k_2, y_n + 0.5 \cdot l_2, z_n + 0.5 \cdot m_2)$$

$$l_3 = h \cdot g(t_n + 0.5 \cdot h, x_n + 0.5 \cdot k_2, y_n + 0.5 \cdot l_2, z_n + 0.5 \cdot m_2)$$

$$m_3 = h \cdot j(t_n + 0.5 \cdot h, x_n + 0.5 \cdot k_2, y_n + 0.5 \cdot l_2, z_n + 0.5 \cdot m_2)$$

$$k_4 = h \cdot f(t_n + h, x_n + k_3, y_n + l_3, z_n + m_3)$$

$$l_4 = h \cdot g(t_n + h, x_n + k_3, y_n + l_3, z_n + m_3)$$

$$m_4 = h \cdot j(t_n + h, x_n + k_3, y_n + l_3, z_n + m_3)$$

при чему је h корак нумеричког прорачуна. Што је усвојена вредност корака мања резултати који се добијају су ближи по вредностима тачном решењу.

Прилог 3

**ЛИСТИНГ ПРОГРАМА ПОМОЋУ КОГА ЈЕ СИМУЛИРАН МАНЕВАР ОКРЕТАЊА НА ОСНОВУ
ЛИНЕАРНЕ ТЕОРИЈЕ**

Sub Krug_okretanja()
ro = Sheet1.Cells(13, 4)

*Ucitavanje hidrodinamickih koeficijenata potrebnih za odredjivanje koeficijenata u
jedinicama kretanja broda*

Call Hidrodinamicki_koeficijenti

Ucitavanje osnovnih karakteristika broda MARINER serije i odredjivanje deplasmana

LB = Sheet1.Cells(4, 4)
BT = Sheet1.Cells(5, 4)
LT = Sheet1.Cells(6, 4)
CB = Sheet1.Cells(7, 4)
m = 2 * CB / LB / LT

Zadavanje ugla otklona kormila i pocetnih uslova

dr = Sheet2.Cells(8, 4) * 3.141592 / 180

L = 1
Vo = Sheet1.Cells(9, 4) * 0.5144
Lo = Sheet1.Cells(8, 4)

Proracun taktickog precnika i ugla zanosenja broda prema linearnoj teoriji

Sheet2.Range("I11:I12") = ""
RK = Lo / dr * (Nr * Yv + Nv * (m - Yr)) / (Yd * Nv - Nd * Yv)
Sheet2.Cells(11, 9) = Abs(RK) * 2
beta = -dr * (Nr * Yd + Nd * (m - Yr)) / (Nr * Yv + Nv * (m - Yr))
Sheet2.Cells(12, 9) = Abs(beta) * 180 / 3.141592

Korak numerickog proracuna

h = 0.001

Definisanje pocetnih uslova proracuna

u = 1
v = 0
r = 0

Priprema za upisivanje dobijenih rezultata

Sheet2.Range("b16:p10000") = ""
Sheet2.Cells(16, 2) = 0
Sheet2.Cells(16, 3) = u * Vo
Sheet2.Cells(16, 4) = v
Sheet2.Cells(16, 5) = r
Sheet2.Cells(16, 6) = 0


```

Sheet2.Cells(16, 7) = 0
Sheet2.Cells(16, 8) = 0
Sheet2.Cells(16, 9) = -L / 2 * Lo
Sheet2.Cells(16, 10) = L / 2 * Lo
Sheet2.Cells(16, 11) = 0
Sheet2.Cells(16, 12) = 0
Sheet2.Cells(16, 13) = Vo / 0.5144
Sheet2.Cells(16, 14) = 0
Sheet2.Cells(16, 15) = 0
Sheet2.Cells(16, 16) = 0

```

Postupak resavanja jednacina kretanja

```

us = u: vs = v: rs = r: fis = 0
lok = 17

```

```

For t = 0 To 9001 Step h
    k1 = h * i(t, u, v, r)
    l1 = h * g(t, u, v, r)
    m1 = h * j(t, u, v, r)
    k2 = h * i(t + h / 2, u + k1 / 2, v + l1 / 2, r + m1 / 2)
    l2 = h * g(t + h / 2, u + k1 / 2, v + l1 / 2, r + m1 / 2)
    m2 = h * j(t + h / 2, u + k1 / 2, v + l1 / 2, r + m1 / 2)
    k3 = h * i(t + h / 2, u + k2 / 2, v + l2 / 2, r + m2 / 2)
    l3 = h * g(t + h / 2, u + k2 / 2, v + l2 / 2, r + m2 / 2)
    m3 = h * j(t + h / 2, u + k2 / 2, v + l2 / 2, r + m2 / 2)
    k4 = h * i(t + h, u + k3, v + l3, r + m3)
    l4 = h * g(t + h, u + k3, v + l3, r + m3)
    m4 = h * j(t + h, u + k3, v + l3, r + m3)

    u = u + (k1 + 2 * k2 + 2 * k3 + k4) / 6
    v = v + (l1 + 2 * l2 + 2 * l3 + l4) / 6
    r = r + (m1 + 2 * m2 + 2 * m3 + m4) / 6

    If Int(t) <> 0 And Abs(Int(t / 1) - t / 1) < h / 1 Then
        Sheet2.Cells(lok, 2) = Int(t) * Lo / Vo
        Sheet2.Cells(lok, 3) = u * Vo
        Sheet2.Cells(lok, 4) = v * Vo
        Sheet2.Cells(lok, 5) = r * Vo / Lo
        fi = 1 * (r + rs) / 2 + Sheet2.Cells(lok - 1, 8) * 3.141592 / 180
        deltax = 0.5 * 1 * (us * Cos(fis) + u * Cos(fi) - vs * Sin(fis) - v *
            Sin(fi)) * Lo
        deltay = 0.5 * 1 * (us * Sin(fis) + u * Sin(fi) + vs * Cos(fis) + v *
            Cos(fi)) * Lo
        Sheet2.Cells(lok, 6) = deltax + Sheet2.Cells(lok - 1, 6)
        Sheet2.Cells(lok, 7) = deltay + Sheet2.Cells(lok - 1, 7)
        Sheet2.Cells(lok, 8) = fi * 180 / 3.141592
        Sheet2.Cells(lok, 9) = Sheet2.Cells(lok, 6) - 0.5 * L * Lo *
            Cos(Sheet2.Cells(lok, 8) * 3.141592 /
            180)
        Sheet2.Cells(lok, 10) = Sheet2.Cells(lok, 6) + 0.5 * L * Lo *
            Cos(Sheet2.Cells(lok, 8) * 3.141592 /
            180)
        Sheet2.Cells(lok, 11) = Sheet2.Cells(lok, 7) - 0.5 * L * Lo *
            Sin(Sheet2.Cells(lok, 8) * 3.141592 /

```

```

180)
Sheet2.Cells(lok, 12) = Sheet2.Cells(lok, 7) + 0.5 * L * Lo *
Sin(Sheet2.Cells(lok, 8) * 3.141592 /
180)
Sheet2.Cells(lok, 13) = Sqr(u ^ 2 + v ^ 2) / 0.5144 * Vo
Sheet2.Cells(lok, 14) = 10 * i(t, u, v, r) * Vo ^ 2 / Lo
Sheet2.Cells(lok, 15) = g(t, u, v, r) * Vo ^ 2 / Lo
Sheet2.Cells(lok, 16) = 100 * j(t, u, v, r) * Vo ^ 2 / Lo ^ 2
If Abs(Sheet2.Cells(lok, 8)) > Sheet2.Cells(4, 4) Then End
us = u: vs = v: rs = r: fis = fi
lok = lok + 1
Sheet2.Cells(lok, 1).Select
End If
Next t
kraj:
End Sub

```

Funkcija kojom se učitavaju hidrodinamicki izvodi i moment inercije

```

Function Hidrodinamicki_koeficijenti()
Xu = Sheet1.Cells(4, 7) 'Xu
Xu_p = Sheet1.Cells(5, 7) 'Xu'
Yv_p = Sheet1.Cells(6, 10) 'Yv'
Yv = Sheet1.Cells(4, 10) 'Yv'
Yr = Sheet1.Cells(5, 10) 'Yr'
Yr_p = Sheet1.Cells(7, 10) 'Yr'
Yd = Sheet1.Cells(8, 10) 'Yd'
Nr_p = Sheet1.Cells(7, 13) 'Nr'
Nv = Sheet1.Cells(4, 13) 'Nv'
Nr = Sheet1.Cells(5, 13) 'Nr'
Nv_p = Sheet1.Cells(6, 13) 'Nv'
Nd = Sheet1.Cells(8, 13) 'Nd'
Iz = Sheet1.Cells(4, 16)
End Function

```

Funkcije koje racunaju medjuvrednosti potrebne za resavanje jednacina kretanja

```

Function i(t, u, v, r)
i = (m * v * r - Xu * (1 - u)) / (m - Xu_p)
End Function

Function g(t, u, v, r)
g = (Yd * dr - m * r + r * Yr + v * Yv) / (m - Yv_p)
End Function

Function j(t, u, v, r)
j = (Nd * dr + v * Nv + r * Nr) / (Iz - Nr_p)
End Function

```