

МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО У ПРАКСИ

Бродоградња као део МАШИНСТВА

Бродоградња је стара и класична струка, са дугом традицијом која сеже у античко доба: основе хидростатике поставио је још Архимед. Бродоградња је, међутим, врло динамична грана машинске индустрије, а самим тим и научна област. Пред савремене бродоградитеље готово свакодневно се постављају нови изазови. С обзиром да се 90% светске трговине одвија поморским путем, граде се све већи бродови: најновији контејнерски бродови дуги су 400 m, широки 59 m а предвиђено је да носе 18000 контејнера (слика 1). Да би се повећавала ефикасност бродова, како трговачке тако и ратне морнарице, пројектују се тзв. „неконвенционалне“ бродске форме, а инжењери, између осталог, треба да реше проблеме динамичког стабилитета на таласима специфичне за овакве бродове. Применом нових материјала и типова градње (композитни материјали, „сендвич“ конструкција) бродоградитељи теже да испројектују брод лакше конструкције а одговарајуће чврстоће.

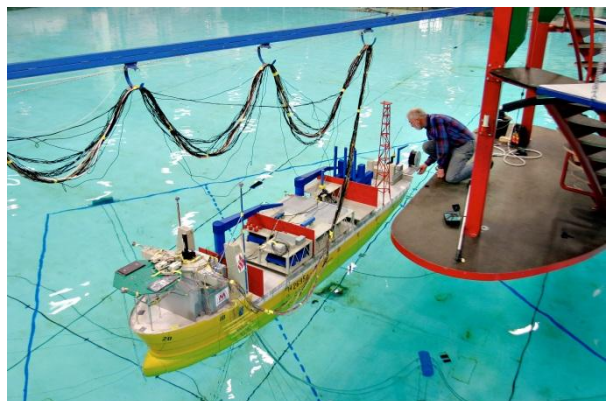
Климатске промене и потреба за заштитом животне средине условљавају смањење емисија угљен-диоксида и загађења атмосфере издувним гасовима бродских мотора. Због тога, инжењери бродоградње истражују примену разноврсних техничких мера, како би побољшали пропусивна својства, смањили отпор и потрошњу горива. Смањење атмосферског загађења оксидима азота и сумпора, употребом алтернативних горива, као што су природни гас или гориве ћелије, постаје део бродоградњевне праксе.



Сл. 1 Контејнерски брод *Triple E* класе [maersk.com]

С друге стране, управо захваљујући глобалном отопљавању, отварају се нови поморски путеви. Пловидба Северним леденим океаном омогућила би бржу везу између европских лука и Далеког Истока, а бродоградитељи имају задатак да реше читав низ проблема специфичних за пловидбу у леду.

Инжењери бродоградње не раде само у бродоградилиштима и пројектним бироима. Они који су више наклоњени експерименталном и истраживачком раду, имају могућност да се у једном од бродарских института баве проблемима бродске хидродинамике у тзв. моделским испитивањима (слика 2). Нафтна индустрија је такође незамислива без бродоградњевне струке. Инжењери бродоградње пројектују не само танкере, већ и нафтне платформе и читав низ специјалних пловила: бродове снабдеваче, FPSO бродове, итд.



Сл. 2 Моделска испитивања у Маринтеку, Норвешка [motorship.com]

Ове и друге проблеме, бродоградитељи решавају применом знања из математике, механике чврстих тела и флуида, отпорности материјала и других наука, као и савременим инжењерским методама и рачунарским алатима (CAD/CAM, FEM, CFD, итд.).

Саставни део бродоградње је неговање својеврсног осећаја за лепоту бродске форме (о чему ће у наставку бити више речи), а то можда нарочито важи за инжењере који се баве пројектовањем и градњом моторних јахти, једрилица и сл.

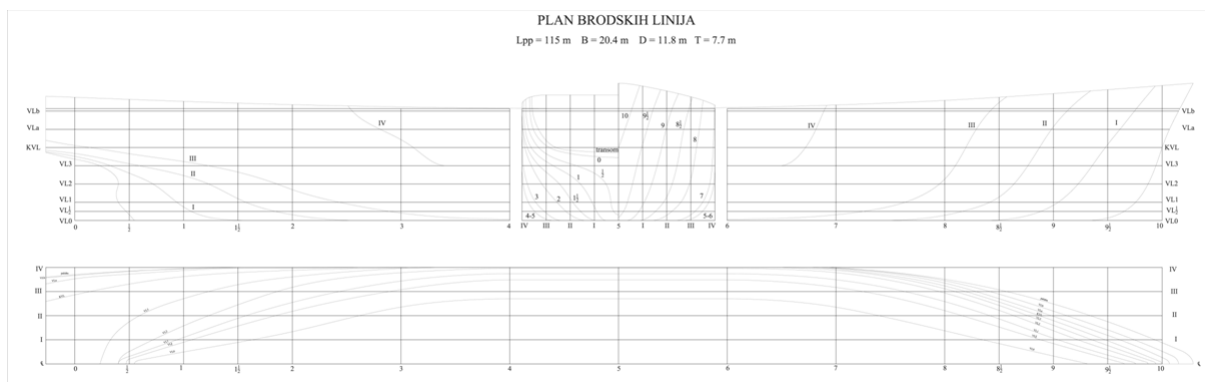


Сл. 3 Дрвени глисер *Mazokist*, произведен у Србији [artofkinetik.com]

Пловност и стабилитет брода

Геометрија трупа брода

Naval Architect, енглески термин који се користи за инжењера бродоградње указује на то да је обликовање геометрије брода, како са техничког, тако и са естетског становишта, саставни део посла бродоградитеља. Геометрија бродског трупа утиче на пловност и стабилитет брода, хидродинамичка својства и поморственост, технологију градње и многе друге карактеристике брода. Због тога је бродска форма одувек била предмет изучавања и оптимизације.

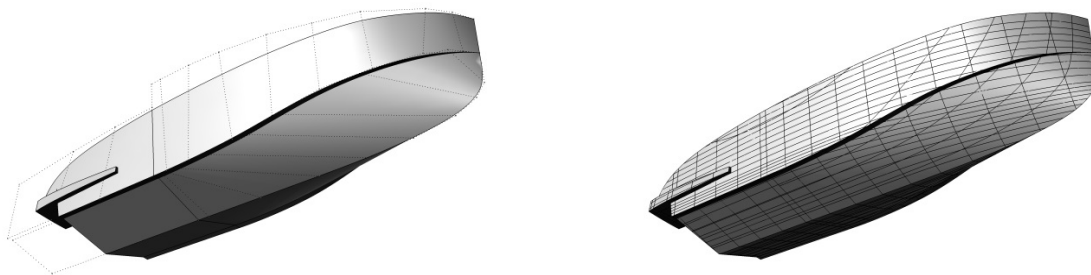


Сл. 4 План бродских линија

Оснивање бродских линија, тј. моделирање форме трупа представља један од првих и најважнијих задатака у поступку пројектовања брода. Отпор брода, односно потребна снага мотора, стабилитет, понашање брода на таласима, специфичности које су последица типа брода (нпр. потреба за обликом складишта повољним за утовар контејнера или распоред палуба) често су међусобно супротстављени захтеви уско везани за избор главних димензија и других геометријских карактеристика трупа. Да бисмо описали труп брода, користимо коефицијенте бродске форме, карактеристичне односе главних димензија, положаје геометријских тежишта подводног дела трупа, моменте инерције водних линија и ребара и друге геометријске величине. Због тога, прорачунавамо коефицијент пуноће истиснућа, коефицијент пуноће водне линије, вертикални призматични коефицијент и др., занима нас однос дужине и ширине, или дужине и висине трупа, одређујемо да ли се тежиште запремине

подводног дела (тежиште истиснућа) налази испред или иза средине брода (главног ребра). У зависности од вредности поменутих параметара, за брод можемо казати да је „пуне форме“, да је „витак“ или да има „фине“ линије и сл. Овакви, наизглед естетски описи, заправо доста говоре о техничким карактеристикама брода. Нпр. брод већег коефицијента пуноће водне линије (уз непромењене главне димензије) имаће боље поморствене карактеристике (мање ће осциловати) на таласима који долазе с прамца. Брод пунје форме (већег коефицијента пуноће истиснућа) имаће повољнији облик теретног простора, али и већи отпор, па ће за постизање исте брзине бити потребан јачи мотор, итд.

План бродских линија (слика 4) представља један од основних бродских цртежа. Попречни пресеци трупа представљају теоријска ребра, у пресеку хоризонталних равни са трупом добијају се водне линије, а уздужни пресеци називају се уздужницама. Савремени рачунарски алати омогућавају другачији приступ оснивању бродске форме: прелаз са дводимензионалног цртежа на 3D модел (слика 5). Бродске линије треба да испуне два основна захтева: да буду „лепе“ и да дводимензионалне пројекције (план ребара, план водних линија, план уздужних пресека) тродимензионалног тела, трупа брода, буду међусобно усклађене. Док је други захтев сам по себи разумљив, термин „лепе“ линије требало би објаснити. Формално, „лепим“ називамо оне бродске линије које су математички глатке криве јер је брод, у начелу, тело оптимизовано са аспекта хидродинамике. Прецизна граница, међутим, између техничког и естетског значења лепих линија не постоји, а бродоградитељ са стицањем искуства развија осећај за лепу форму која уједно испуњава техничке захтеве пројекта.



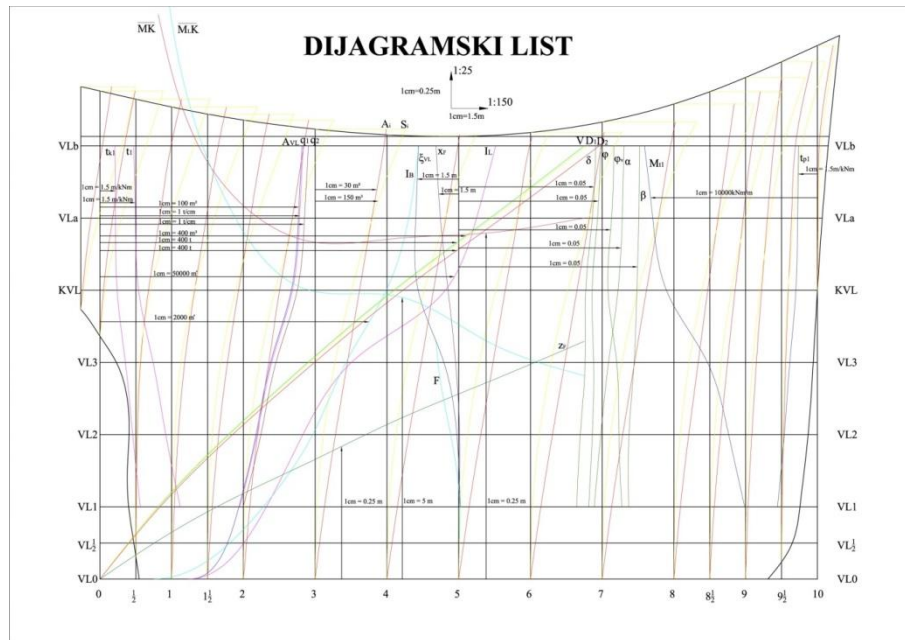
Сл. 5 Оснивање бродских линија применом савременог софтвера за 3D моделирање

Хидростатички прорачуни и стабилитет брода

Када је геометрија бродског трупа дефинисана, бродоградитељ израђује дијаграмски лист (слика 6), цртеж који је неопходан како током пројектовања, тако и у експлоатацији брода. Криве приказане на дијаграмском листу представљају промену геометријских величина брода у функцији газа. Дијаграмски лист садржи криве површина и статичких момената ребара, површина и момената инерције водних линија, криву истиснућа, криве метацентра, коефицијената форме и многе друге. Криве дијаграмског листа користе се у решавању разноврсних проблема пловности и стабилитета брода.

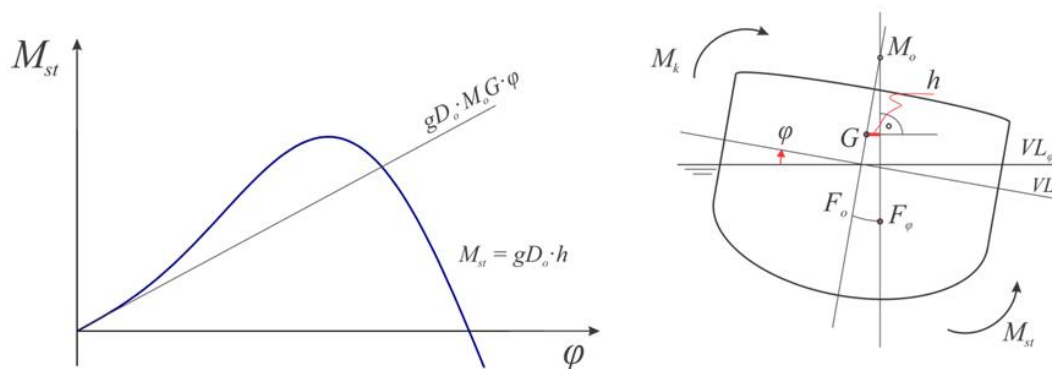
Под дејством ветра, приликом утовара односно истовара терета, током тегљења другог брода или приликом маневра скретања, брод се накреће из равнотежног положаја. Накретању брода супротставља се момент стабилитета (слика 7). Да ли ће се брод вратити у равнотежни положај или ће наставити да се накреће и евентуално преврнути, зависи од карактеристика момента

стабилитета. Због тога, прорачун стабилитета брода, у оквиру којег се црта крива момента стабилитета за низ различитих, карактеристичних ситуација представља још један основни документ сваког брода. У сваком од разматраних случајева, стабилитет брода треба да буде задовољавајући, односно, треба да буду испуњени захтеви прописа о стабилитету.



Сл. 6 Дијаграмски лист

Поред основних критеријума стабилитета, везаних за карактеристике момента стабилитета, брод треба да задовољи и тзв. Критеријум временских услова (*Weather Criterion*). Наиме, брод мора бити стабилан и у олуји, на отвореном мору, када је изложен ударима ветра и таласа. Критеријум временских услова представља сценарио у којем се прорачунава угао динамичког накретања брода под дејством бочних таласа и ветра брзине преко 90 km/h. Угао накретања брода, у таквим временским условима, треба да буде мањи од најмањег међу следећа три: угла превртања, угла продора воде кроз незаштићене отворе или од 50°. То уједно значи да не треба спречити само превртање, већ и да сувише велики углови нагиба такође могу бити потенцијално опасни. Наиме, услед великог угла нагиба, може доћи до продирања воде у брод кроз отворе који нису заштићени водонепропусним поклопцима или до клизања терета на палуби, што може покренути низ догађаја са фаталним исходом за посаду, терет или брод.



Сл. 7 Момент стабилитета

Осим пловности и стабилитета брода у редовним условима експлоатације (утовар, истовар, пловидба), хидростатички прорачуни су неопходни и у случају насукања брода. До насукања може доћи у несрећи (насукање на хрид, подводну стену, спруд) или намерно, при доковању брода или током транспорта пловних објеката специјалним *flo-flo* бродовима. У зависности од проблема, задатак инжењера бродоградње може бити да, након хаварије, насукани брод „спасе“ и доведе у стање пловности или да осигура да брод током доковања остане стабилан.

До сада је било речи о стабилитету брода у неоштећеном стању (*intact stability*). Проблем непотопивости и стабилитета брода у оштећеном стању (*damage stability*), предмет је проучавања још од несреће Титаника (види: www.brodogradnja.org/materijali/Titanik.pdf) а актуелан је и данас. Инжењер бродоградње има задатак да, на адекватан начин, подели брод на водонепропусна одељења односно да одреди број и распоред водонепропусних преграда, тако да, уколико до несреће ипак дође, оштећени брод не потоне, не преврне се и буде довољно времена за евакуацију путника. Метод прорачуна непотопивости се током протеклог века више пута мењао, а криву наплављивих дужина сменила је пробабилистичка анализа ризика од наплављивања. Укратко, у оквиру тог поступка, најпре треба проценити вероватноћу да ће неко одељење (или група одељења) бити оштећено и наплављено, а затим и вероватноћу да ће у том случају брод остати плован. То значи да статистичка анализа и прорачун вероватноће постају део свакодневне инжењерске праксе.

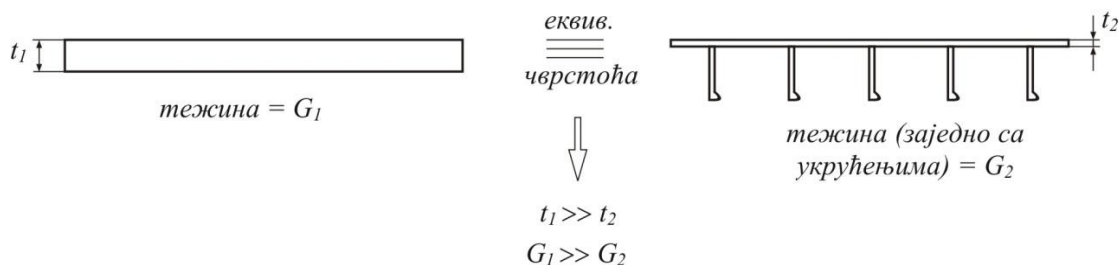
Конструкција трупа брода

У овим разматрањима, ако посебно није наглашено другачије, под бродском конструкцијом ћемо подразумевати заварену челичну конструкцију трупа брода.

Прецизне представе о изгледу те конструкције, називима појединих елемената, начину њихове израде и обраде, конструктивним детаљима и материјалима који се користе – стичу се у предметима Бродске конструкције и Технологија бродоградње. Елементарне ствари у погледу глобалног концепта и материјала за градњу трупа, укратко ћемо објаснити и овде.

Концепт градње бродског трупа

Труп брода сачињен је од оребрених плоча. Тај концепт намећу захтеви у погледу чврстоће, сопствене тежине конструкције и технологије градње. Наиме, неоробрена и оребрена плоча еквивалентне чврстоће, драматично се разликују у погледу дебљине, па тако и у погледу сопствене тежине и лакоће обраде (слика 8).



Када бисмо желели да труп брода саградимо од неоробрених лимова они би морали да имају тако велику дебљину - да би сопствена тежина конструкције "појела" сву корисну носивост а лимове тако великих дебљина било би немогуће квалитетно уобличити (исећи, савити, заварити) у жељену форму.

Греде које укрућују лимове трупа брода, по правцу пружања делимо на *уздужне* (оне које се пружају дуж брода) и *попречне* (оне које леже у попречним пресецима трупа). По јачини и размаку на ком су постављене, делимо их на *примарне* (јаки носачи на релативно великом међусобном растојању) и *секундарне* (густо постављене греде слабијег попречног пресека). Тако се греде у решеткама које укрућују лимове дна, бокова и палуба могу класификовати у четири категорије:

ПРИМАРНИ УЗДУЖНИ ЕЛЕМЕНТИ

(провезе дна и бокова, подвезе палуба)

ПРИМАРНИ ПОПРЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

(оквирне односно пуне ребренице, оквирна ребра, оквирне споње)

СЕКУНДАРНИ УЗДУЖНИ ЕЛЕМЕНТИ

(уздужнице дна, бокова и палуба)

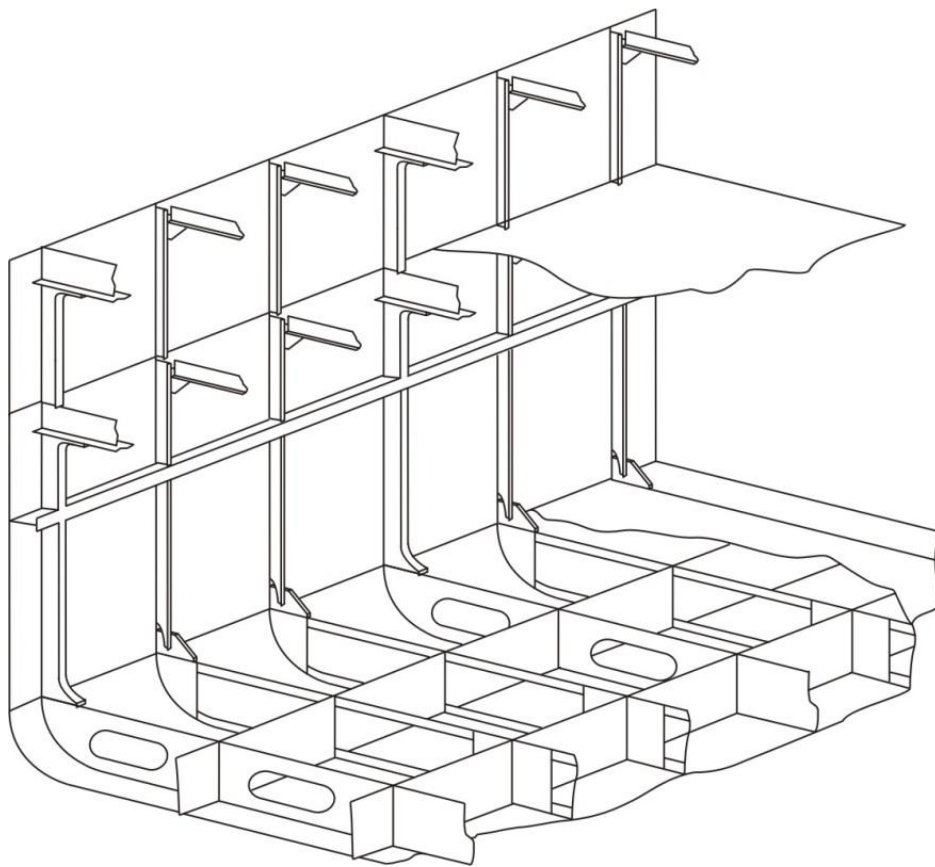
СЕКУНДАРНИ ПОПРЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

(обичне односно отворене или лаке ребренице, обична ребра, обичне споње).

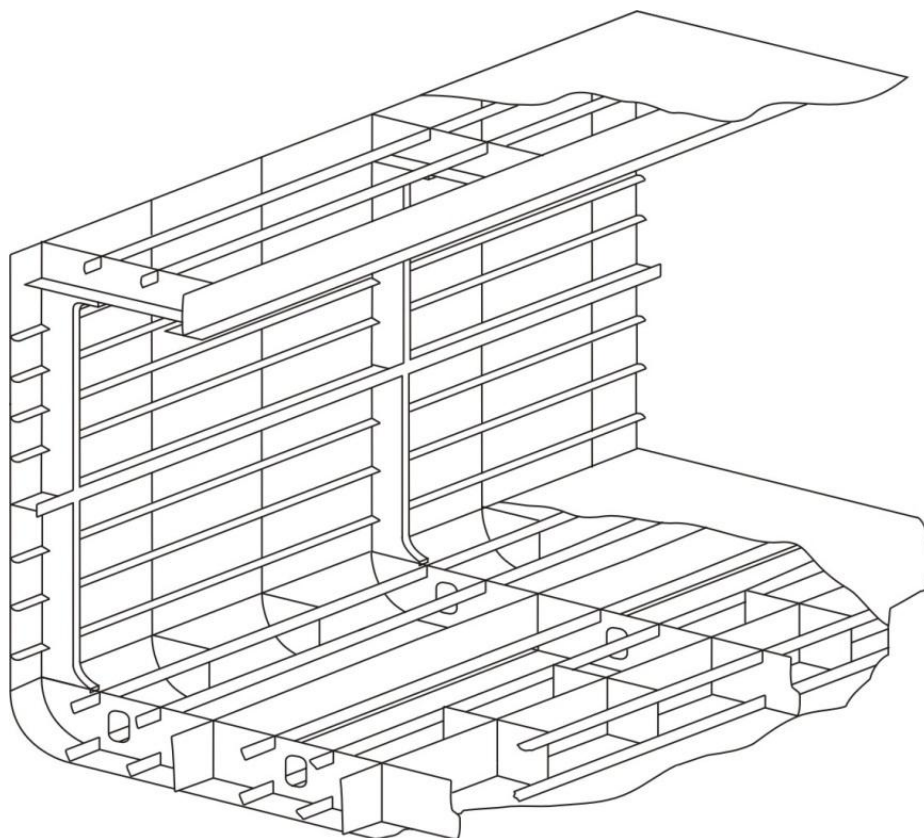
Елементи примарне структуре, и уздужни и попречни, су увек присутни у конструкцији. Они чине јаку тродимензионалну решетку која пружа ослонац елементима секундарне структуре.

Секундарна структура, која непосредно укрућује лимове оплате, је *или* попречна *или* уздужна – чиме је дефинисан *систем градње*:

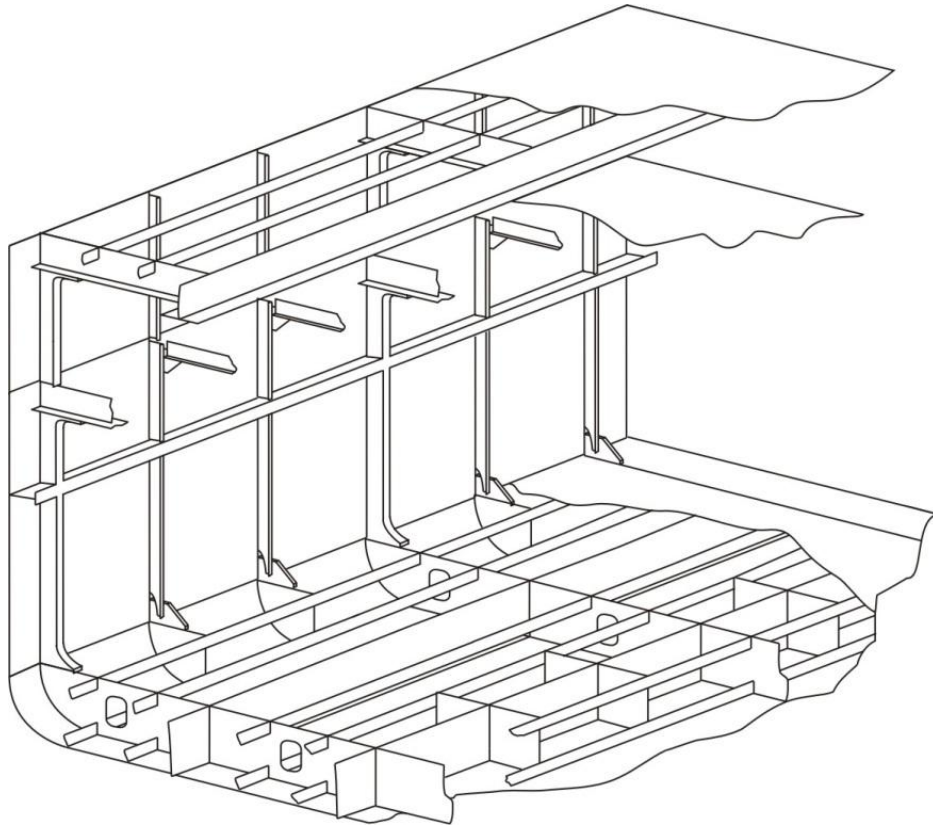
- ако је секундарна структура и дна и бокова и палуба попречна, кажемо да је труп грађен потпуно по попречном систему градње (слика 9);
- ако је секундарна структура и дна и бокова и палуба уздужна, кажемо да је труп грађен потпуно по уздужном систему градње (слика 10);
- ако су неки делови трупа грађени уздужним а неки попречним системом, кажемо да је примењен мешовити систем градње. То најчешће подразумева уздужну градњу дводна и временске палубе и попречну градњу преосталог дела трупа (слика 11).



Сл. 9 Попречни систем градње



Сл. 10 Уздужни систем градње



Сл. 11 Мешовити систем градње

Материјали за градњу бродског трупа

Основни материјал у бродоградњи је тзв. *обичан бродоградњевни челик*, следећих основних карактеристика: граница течења $\sigma_F = 235 \text{ N/mm}^2$; граница кидања $\sigma_{\max} = 490 \text{ N/mm}^2$; модул еластичности $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

На ниским температурама жилавост челика значајно опада и тако се, посебно у лимовима већих дебљина, повећава опасност од појаве тзв. *кртог лома*. Одговарајућим технолошким поступцима у процесу производње, карактеристике челика у овом контексту се могу побољшати. Тако добијамо различите *класе* обичног бродоградњевног челика: *A, B, D* и *E* (тим редоследом све отпорније на крти лом; класа *C* данас више не постоји).

Најоптерећенији делови структуре трупа, а ретко и цела његова конструкција, могу се градити и од *челика повишене чврстоће*, коме су одговарајућим технолошким поступцима основна механичка својства, али не и модул еластичности, значајно побољшана (граница течења и до $\sigma_F = 490 \text{ N/mm}^2$, граница кидања и до $\sigma_{\max} = 590 \text{ N/mm}^2$, модул еластичности $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$). И овај челик се производи у четири класе, од *A* до *E*, уз исто објашњене као малочас. Не треба сметнути са ума да, с обзиром на исти модул еластичности, увођењем челика повишене чврстоће нећемо смањити ни деформације ни критичне напоне за извијање.

Од метала, као материјал за израду бродске конструкције, интересантан је још једино алуминијум (тачније речено неке његове легуре). Уз сасвим ретке изузетке, разматрања и прорачуни објашњени у овој књизи могу се дословце применити и на алуминијумске конструкције.

Од неметала, данас се за израду трупа брода често користе различити композитни материјали (стаклопластика). Њихова анизотропија (различите еластичне карактеристике у различитим правцима), захтева сасвим специфичне методе прорачуна чврстоће. Употреба дрвета као основног материјала за градњу трупа већ припада прошлости.

Оптерећење бродске конструкције

Оптерећења бродске конструкције су многобројна и различита, и могу се систематизовати по различитим критеријумима. На карактер прорачуна којима одређујемо њихове последице највише утиче то: да ли се она, и како, мењају у току времена.

Статичка оптерећења

Строго гледано, то су само оптерећења која делују на труп брода који *плута на мирној води*. То су тежине свега што у и *на* броду постоји (почев од сопствене тежине конструкције) и узгон који их уравнотежује. Одређивање одзива структуре (следствених померања, деформација, напона) спроводи се статичким прорачунима – који су, начелно, једноставнији од динамичких.

Квазистатичка оптерећења

Ефекти динамичких оптерећења, чија је промена у току времена спора (период промене дуг односно фреквенција ниска) често се могу, са прихватљивом тачношћу анализирати и на статичким моделима – дакле квазистатички. У ову категорију спадају углавном оптерећења која потичу од таласа – нека непосредно (промена облика водне линије па тако и расподеле узгона дуж брода) а нека посредно (инерцијалне силе као последица убрзања која брод добија крећући се по узбурканом мору).

Динамичка оптерећења

Ефекти оптерећења чији је период промена кратак, односно фреквенција висока, морају се анализирати на "правим" динамичким моделима - који укључују и динамичке карактеристике саме конструкције. У ову категорију спадају вибрације побуђене погонским и помоћним машинама, пропелером, пропелерским вратилом и сл., али и специјални случајеви неких оптерећења која потичу од таласа (резонанца сопствене фреквенције осциловања трупа брода и фреквенције таласа, на енглеском "*springing*").

Димензионисање елемената бродске конструкције

Поједностављено речено, у димензионисању бродске конструкције постоје два екстремна приступа. Избор минималних димензија елемената можемо извршити или на основу готових формула које дају класификациона друштва – или на основу егзактног (директног) прорачуна чврстоће. У пракси, ова два концепта су ретко сасвим раздвојена: у правилима класификационих друштава данас су прописани и многи егзактни прорачуни; са друге стране, и ако се одлучимо за директни прорачун чврстоће, вероватно ћемо у моделирању, дефинисању контурних услова, оптерећења, критеријума - користити и препоруке класификационих друштава.

Класификациона друштва

Да бисмо на прави начин схватили данашњу позицију и улогу класификационих друштава, морамо направити кратак историјски преглед њиховог настанка и развоја.

Најстарије, а по многим аспектима и данас најзначајније класификационо друштво, је Лојд Регистар (пуно име: *Lloyd's Register of Shipping*, скраћена ознака *LR*). Његови зачеци су у лондонској кафани, власништву Едварда Лојда, о којој први писани подаци постоје још 1688. године. То је било место на коме су се окупљали људи, на различите начине заинтересовани за бродове – бродовласници, крцатељи терета (изнајмљивачи бродова), осигуравачи терета и бродова, бродоградитељи. На основу размена различитих информација о бродовима, али пре свега оних које су се тичале њихове поузданости, ту почињу да се праве и спискови “добрих” бродова (*Ship Lists*, доцније *Register Book*). Временом, у тим списковим је све више коментара и препорука техничке природе – и она прерастају у врло детаљна *правила за градњу бродова* каква познајемо данас. Брод мора бити изграђен у складу са тим правилима да би га класификационо друштво уврстило у свој регистар “добрих” бродова - доделило му одговарајућу класу. Раније је унутар класа постојала и даља категоризација на боље и лошије бродове. Од тога се одустало (брод или има класу или је нема), али су уведени многи други додатни атрибути класе који дефинишу тип брода, подручје пловидбе, или испуњеност неких специјалних захтева.

Основни смисао класификације бродова је да пружи објективну процену сигурности бродске конструкције и оним заинтересованим странама које нужно не морају бити експерти у области бродоградње - бродовласници, крцатељи терета, лучке власти, капетаније, осигуравајућа друштва; (од самог зачетка класификација је најтешње повезана са осигурањем бродова и терета; једно од највећих светских осигуравајућих друштава такође се зове Лојд - *Lloyd's underwriters association*; оно има заједничко порекло са Регистром о коме ми говоримо, али их не треба мешати јер су већ одавно потпуно одвојене институције).

По угледу на Лојд Регистар, развила су се и друга класификациона друштва (регистри бродова). Иако потпуно независна, она су често у свом називу задржавала име “Лојд”, као синоним за делатност којом су се бавили. Данас скоро свака земља са развијеном бродоградњом и/или бродарствима има своје национално класификационо друштво. Најпознатија су: француски *Bureau Veritas (BV)*, немачки *Germanischer Lloyd (GL)*, норвешки *Det Norske Veritas (DNV)*, амерички *American Bureau of Shipping (ABS)*, јапански *Nippon Kaiji Kyokai (NK)*. Њихова правила за градњу бродова нису идентична, али су разлике у коначним захтевима минималне (прелазак брода “из класе у класу ” готово аутоматски). Постоји и међународно удружење класификационих друштава *IACS (International Association of Classification Societies)* у оквиру кога она раде на даљем унапређивању и усаглашавању својих правила. Наше класификационо друштво је *Југословенски регистар бродова (JP)*.

Делатност и позиција класификационих друштава је врло специфична. Поједностављено речено, она живе од издавања потврда о поузданости бродова – али се оградају од било каквих формално правних последица уколико се покаже да су погрешили. То, међутим, не умањује њихову одговорност у послу, јер губитак ауторитета за њих значи и губитак прихода - захтеве за доделу класе добијаће само док се њихове процене потврђују у пракси.

Са друге стране, добри бродови се могу изградити и без потврде класификационих друштава о томе, али су такви случајеви сасвим ретки. Потврду о класи траже скоро све инстанце које се бродом баве током његовог живота: бродовласник (већ у уговору са бродоградилиштем); осигуравајуће друштво (брод без класе скоро да се не може осигурати, или се то мора учинити

под врло неповољним условима); лучке власти (брод без класе је потенцијална опасност); капетаније (класа је услов за добијање пловидбене дозволе) итд.

Данас је поље делатности класификационих друштава проширено. Њихове разгранате мреже експерата и искуство у праћењу стања брода током читавог његовог радног века, чине их идеалним и за обављање других послова. Тако владе већине земаља, контролу испуњености обавеза које проистичу из различитих међународних и интерних конвенција везаних са водни транспорт и саобраћај - преносе на класификациона друштва.

Многа класификациона друштва су данас ауторизована и за увођење *система контроле квалитета* према нормама *ISO* (и то у разним делатностима, невезаним за бродоградњу). Лојдово одљење *LRQA (Lloyd's Register Quality Assurance)* је данас једна од водећих светских агенција у тој врсти посла.

Правила за градњу бродова

Увођење брода у регистар (додељивање класе) је завршни чин сложеног процеса. Претходи му провера, и пројекта и изведених радова, која треба да покаже да је све у складу са правилима. Темелј свега су сама правила.

Прва правила за градњу бродова била су штура, базирана искључиво на искуству и односила су се само на конструкцију трупа и неке важније делове опреме. Временом, област њихове примене се шири на машински комплекс и друге бродске системе. Нова сазнања, пре свега науке о чврстоћи, врло брзо налазе своје место у правилима, али је, због сложености бродске конструкције, удео емпирије у њима и данас значајан.

У основним цртама, концепт правила која се односе на структуру трупа, данас је следећи:

- полумемпириским формулама експлицитно су дефинисане минималне дебљине лимова оплате и минимални отпорни моменти попречних пресека њихових укрућења; тако димензионисана конструкција углавном задовољава захтеве локалне и попречне чврстоће;
- за тако димензионисан труп, ако му је дужина већа од 60 - 65 m, мора се спровести и прорачун уздужне чврстоће (савијања еквивалентног носача у вертикалној равни), укључујући и проверу стабилности притиснутих зона (дно или палуба); начин прорачуна и критеријуми оцене дефинисани су правилима;
- данас се у многим случајевима захтевају и додатни директни прорачуни (најчешће обимни нумерички прорачуни методом коначних елемената).

Бродска хидродинамика

Кретању брода жељеном брзином кроз воду супротставља се сила отпора која је последица деловања низа хидродинамичких и аеродинамичких ефеката. При мањим брзинама брода доминира трење, док при већим брзинама доминира отпор који је последица поремећаја поља притиска у околини брода. Осим поменутих ефеката читав низ других пратећих појава углавном неповољно утичу повећавајући силу која се мора савладати да би се брод кретао жељеном брзином. Савладавање силе отпора кретању брода се обезбеђује пропульзивним

комплексом брода чије су основне компоненте: погонски мотор и пропулзор, као и систем за пренос снаге од мотора до пропулзора.

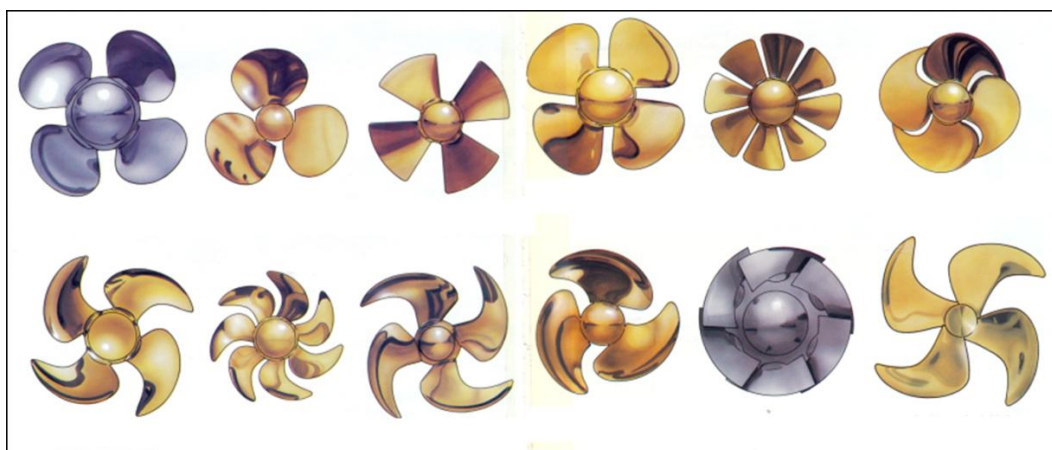
Бродски пропулзор је направа која механичку енергију (снагу) добијену од мотора претвара у потисак који обезбеђује кретање брода. Постоји више типова бродских пропулзора који се међусобно разликују по начину деловања, по начину уградње на брод, као и по преносу снаге од мотора до пропулзора. Овде ће укратко бити описани неки уобичајени типови бродских пропулзора.

Један од најстаријих типова бродских пропулзора је бродски точак који се и данас, мада ретко, може видети на старим речним бродовима. Најчешће су уграђивани на бок брода, док су на бродовима који су пловили Мисисипијем често уграђивани на крми брода. Доста су робусни и захтевају мали број обртаја при раду, те је са нестанком парне клипне машине и бродски точак ишчезао из употребе.



Сл. 12 Бродски точак

Средином 19. века бродски точак је заменио пропелер који је и данас најчешћи бродски пропулзор, који се користи за покретање уобичајених типова бродова. Данас постоје различите врсте пропелера које су прилагођене различитим типовима пловних објеката.



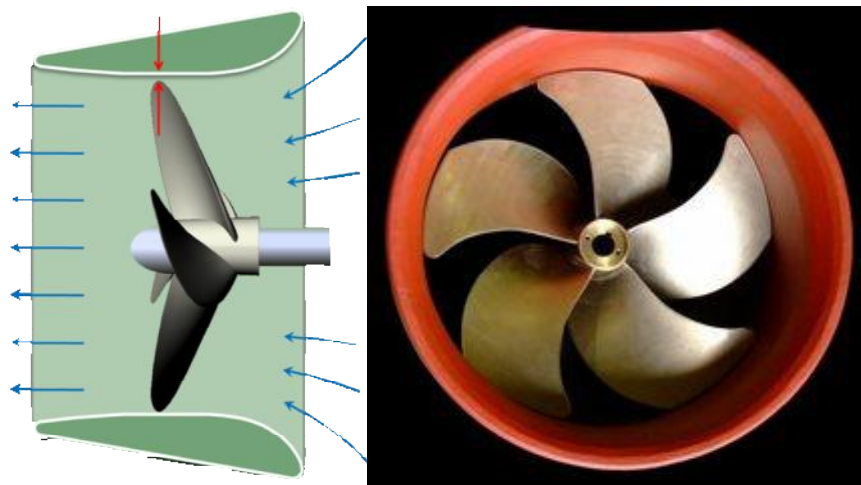
Сл. 13 Различити типови савремених бродских пропелера

Неке од основних геометријских карактеристика пропелера су: пречник, број крила, геометрија крила, површина пропелера и корак пропелера. Данас постоје пропелери који имају од 2 до 7 крила (ретко и више), с тим да се најчешће користе пропелери са 3 или 4 крила. Корак пропелера донекле одговара углу под којим се налазе крила пропелера у односу на осу

симетрије брода. Најчешће се израђују од бронзе, мада постоје и челични пропелери или пропелери израђени од других материјала. Бродови обично имају један или два пропелера, мада постоје бродови који имају и више пропелера. Обично су смештени на задњем крају брода - крми брода, те су добро заштићени од могућих удара. Најчешће добијају погон са мотора директно, преко хоризонталног пропелерског вратила. У неким случајевима, када је неопходно умањити број обртаја мотора, између мотора и пропелера уграђује се редуктор.

Пропелер у сапници

Када се око пропелера постави профилисани прстен причвршћен за труп брода али тако да зазор између пропелера и прстена – сапнице – буде врло мали добија се пропелер у сапници (млазници), видети слику 14, који значајно повећава ефикасност пропелера али само при врло малим брзинама. Пропелери у сапницама се користе само када услед ограниченог газа брода није могуће уградити пропелер довољно великог – оптималног пречника, те се на овај начин донекле повећава ефикасност пропелера који је могуће уградити. Ово и јесте разлог што се пропелери у сапницама користе код реморкера и потискивача код којих су услед радних активности пропелери веома оптерећени, као и код самоходних речних бродова којима је газ ограничен малом дубином пловног пута. Сапница додатно штити пропелер од удараца, мада јој то није примарна намена.



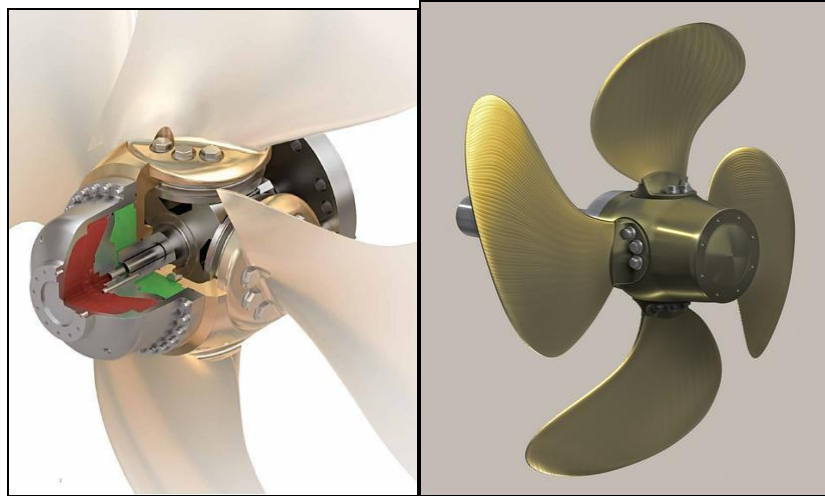
Сл. 14 Пропелер у сапници

Пропелер са прстеном

Ако се профилисани прстен причврсти за врхове крила пропелера и ротира заједно са њим добија се тзв. пропелер са прстеном. Овакви пропелери су нешто ефикаснији од пропелера без прстена, али су компликованији за израду те се ретко користе.

Пропелер са прекретним крилима

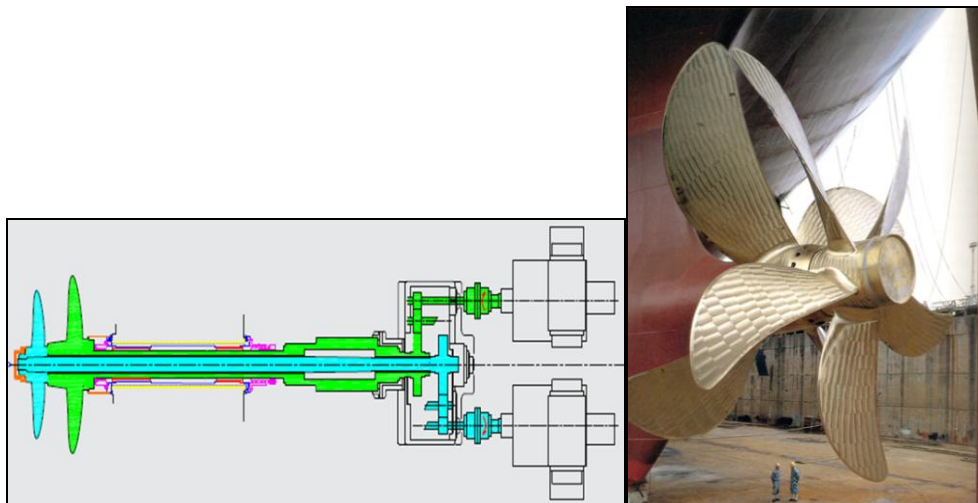
Код ових пропелера могуће је мењати корак (угао крила) пропелера у току рада. Овим се постиже оптимална ефикасност пропелера при различитим условима рада који значајније мењају оптерећење пропелера. Неки типови пропелера са прекретним крилима омогућавају и пловидбу крмом, а без мењања смера обртања. Пропелери са прекретним крилима имају доста компликован уређај за прекрет крила те су зато и значајно скупљи од пропелера са фиксним крилима.



Сл. 15 Пропелер са прекретним крилима

Контра-ротирајући пропелери

У случају да се два пропелера који се налазе у истој оси, непосредно један иза другог, окрећу при раду у супротним смеровима тада је реч о контра-ротирајућим пропелерима (слика 16). Овакви пропелери се одликују великом ефикасношћу и последњих година све више добијају на значају. Веома су скупи јер, због специфичних услова рада, кроз једно погонско вратило пролази друго погонско вратило, с тим да се ова вратила обрћу у различитим смеровима.



Сл. 16 Контра-ротирајући пропелер

Тандем пропелери

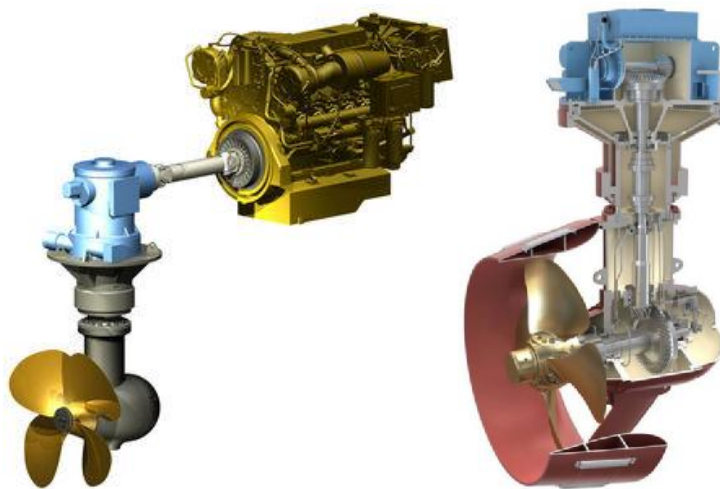
Ако се на истом пропелерском вратилу налази више пропелера, један иза другог, а обрћу се у истом смеру добијамо тзв. тандем пропелере. Тада се оптерећење дели на више пропелера па се могу уградити пропелери мањег пречника. Упркос нешто повољнијој ефикасности овог решења у односу на један пропелер, због цене, али и лошије вожње крмом, ово решење се ретко користи.

Код свих до сада споменутих пропулзора неопходна је и уградња кормила (које се по правилу смешта иза пропелера) ради могућности кормиларења брода. Уколико се, у случају погона брода помоћу пропелера у сапници, сапница изведе тако да може да се закреће око

вертикалне осе добија се тзв. окретна сапница. Закретањем сапнице се сила потиска коју развија пропелер може усмеравати на жељену страну чиме се добијају боља маневарска својства брода у односу на класичну конфигурацију са кормилом. Тада се мора обезбедити већи зазор између сапнице и врхова крила пропелера ради несметаног рада система.

Кормиларско-пропулзивни уређај

Када довод снаге пропелеру није преко хоризонталног, него преко вертикалног вратила, могуће је пропелер закретати око вертикалне осе и тиме остварити активно управљање бродом. У том случају кормило више није потребно. Постојећа техничка решења најчешће омогућавају да се пропелер може закретати за свих 360° па се потисак пропелера може усмерити у свим правцима. На тај начин се обезбеђују изузетно добре маневарске могућности брода.



Сл. 17 Кормиларско-пропулзивни уређај

Кормиларско-пропулзивни уређај (слика 17) може бити са класичним пропелером, са пропелером у сапници или са контра-ротирајућим пропелером. Основни недостаци овог система, у односу на решења са хоризонталним доводом снаге, су компликованост (вертикални довод снаге) и механички губици у преносу снаге и цена система.

На речним бродовима са сопвеним погоном често се користе кормиларско-пропулзивни уређаји који имају погонски мотор на палуби (слично ванбродским моторима код чамаца), као што је показано на слици 18.



Слика 18 Кормиларско-пропулзивни уређаји са погонским моторима на палуби

Поред до сада споменутих пропулзора који се у основи сви базирају на пропелеру данас постоје и другачија решења погона пловних објеката.

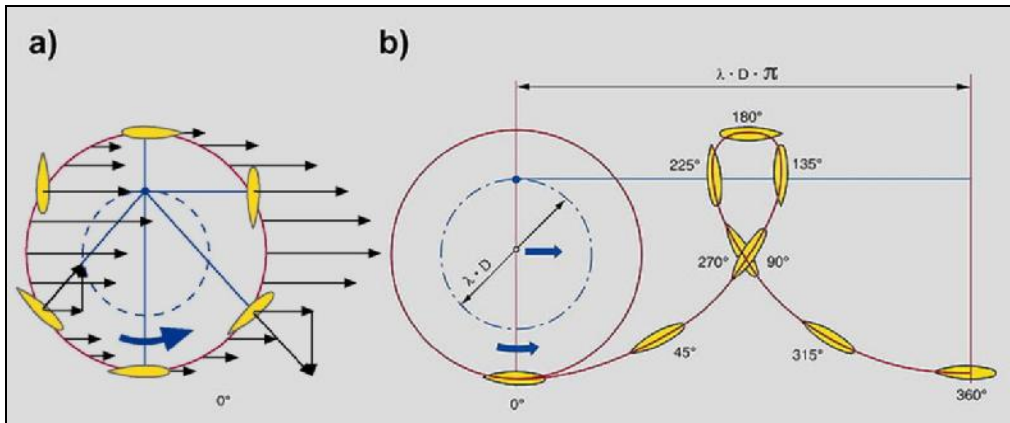
Пропулзор са вертикалним крилима тзв. Фоит-Шнајдеров пропулзор (*Voith-Schneired*)

На хоризонталном диску који се ротира око вертикалне осе има 4 до 6 вертикалних крила која се независно могу ротирати око својих вертикалних оса (видети слику 19).



Слика 19 Фоит-Шнајдеров пропулзор

Принцип рада овог пропулзора је приказан на слици 20. Основна предност овог пропулзора у односу на класичан пропелер се огледа у томе што је регулацијом угла вертикалних крила могуће потисак усмеравати у било ком смеру, што броду обезбеђује веома добре маневарске карактеристике. Основни недостатак је велика цена система. Користе се код бродова који услед радних околности често маневришу.



Слика 20 Фойт-Шнајдеров пропулзор: а) регулација потиска, б) трајекторија једног крила

Џетови (водомлазни пропулзори)

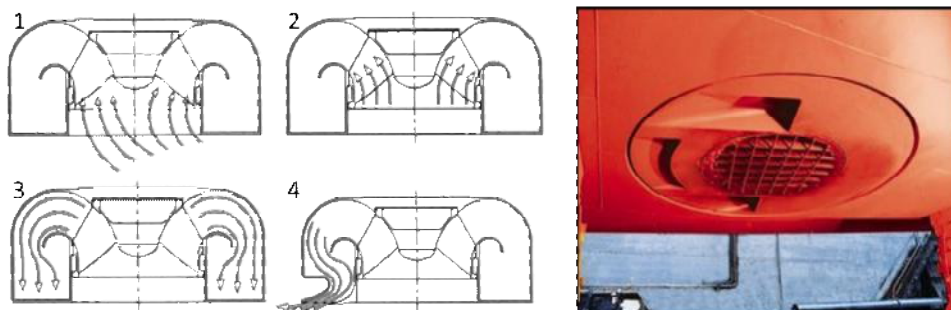
Користе се за погон бржих бродова или за погон споријих пловних објеката када је важно имати мали газ уз добре маневарске карактеристике без обзира на степен корисног дејства.



Слика 21 Водомлазни пропулзори за веће брзине

Вода улази у систем преко усиса на дну, импелер је убрзава и избацује иза брода кроз млазницу. Услед реакције која се објашњава трећим Њутновим законом генерише се сила потиска која покреће пловни објекат. Помоћу клапни које се налазе на излазној млазници могуће је усмеравати силу потиска у жељеном смеру чиме се обезбеђују добра маневарска својства.

Џетови који се користе за мање брзине при раду и у веома плиткој води користе исти принцип али имају другачију конструкцију (видети слику 22).



Сл 22 Водомлазни пропулзор: принцип рада и пример монтаже на дну брода

Поред споменутих пропулзора постоје и разне покретне и непокретне направе које се монтирају испред или иза пропулзора у циљу побољшања дострујавања воде пропелеру или додатног искоришћења енергије која се губи у одлазном млазу воде. Ова решења имају за циљ побољшање ефикасности пропулзије брода.

Овде је дат приказ најчешће коришћених пропулзора који покрећу данашње бродове. Врло је важно нагласити да се приликом одређивања параметара пропулзора мора водити рачуна о погонској машини (дизел мотор, електромотор, турбина), кормилу као и броду у целини.