

# JEDAN PRISTUP ANALIZI DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA SUSTAV HLAĐENJA DIZELSKOGA MOTORA

## *An Approach to the Analysis of Dynamic Characteristics of Marine Diesel Engine Cooling System*

dr. sc. Mate Jurjević

Sveučilište u Dubrovniku  
Branitelja Dubrovnika 29  
20000 Dubrovnik  
E-mail: mate.jurjevic@unidu.hr

Nataša Jurjević, dipl. ing.

Sveučilište u Dubrovniku  
Branitelja Dubrovnika 29  
20000 Dubrovnik  
E-mail: natasa.jurjevic@unidu.hr

mr. sc. Ivona Milić-Beran

Sveučilište u Dubrovniku  
Branitelja Dubrovnika 29  
20000 Dubrovnik  
E-mail: ivona.milic-beran@unidu.hr

UDK 621.436:621.565

### **Sažetak**

*Suvremeni pristup ispitivanju dinamičkih karakteristika elemenata ili sustava nekog uređaja omogućava sistemsku dinamiku. Sistemsku dinamiku izvanredno je softversko sredstvo za proučavanje dinamike ponašanja prirodnih, tehničkih i društvenih realiteta, to jest sustava različite prirode i obilježja među kojima postoji relativno visok stupanj analogije. Metodologija njezina rada, uključujući i uporabu digitalnih kompjutera, u dosadašnjoj se praksi pokazala kao učinkovito sredstvo za rješavanje problematike: upravljanja, ponašanja, osjetljivosti, fleksibilnosti i proučavanja dinamike ponašanja sustava koji imaju visok stupanj složenosti, i to kompjutorskim simuliranjem, dakle "laboratorijski", što znači bez opasnosti za promatrane realitete. Za uporabu sustavne dinamike u rješavanju složenih problema potrebna su kompleksna znanja iz više znanstvenih disciplina, ali i dobro poznavanje prirode samog problema koji se analizira.*

*U članku se razmatraju dinamičke karakteristike rashladnog sustava u brodskim dizelskim motorima (BDM) uz pomoć sistemske dinamike.*

*Sustav hlađenja porivnih BDM-a je složen sustav na koji djeluju raznovrsni poremećaji, i oni zbog svojega promjenljivog djelovanja rezultiraju promjenom radne temperature BDM-a. Sustav dinamičkog pristupa u analizi rada BDM-a omogućava dobivanje odgovora na pitanje "što ako se dogodi..."; drugim riječima, saznaje se kakva će biti reakcija na promjenu bilo koje varijable u sustavu hlađenja.*

*Dan je kratak osvrt na dinamički i statički režim rada, matematički model sustava hlađenja BDM-a, simulacijski model u POWERSIM programskom jeziku, te dijagrami tokova.*

*Ključne riječi: simulacija, porivni dizelski motor, sustav hlađenja.*

## Summary

The modern approach of the exploration of dynamic characteristic of elements or system of some device has been enabled by system dynamics. System dynamics is an excellent software system for studying the dynamic of the behaviour of natural, technical and societal realities i.e. system of various natures and features in which there exist relatively high analogy rate. The methodology of its work, including even the use of digital computers has shown to be an efficient mean for solving the problems: management, behaviour, sensitivity, flexibility and studying of dynamics of the behaviour of the systems of high complexity by computer simulation, in laboratory what means without danger for the realities observed. For the usage of system dynamics in the solution of complex problems, various complex knowledge from various scientific disciplines are required, but good knowledge of the nature of the problem itself, which is being analyzed. The paper has analyzed dynamic characteristic of cooling system in marine diesel engines by means of system dynamics.

The cooling system of propulsion of MDE is a complex system onto which various disorders act and due to their changeable act result into the changes of working temperature of MDE. System dynamic approach in the analysis of MDE enable us to obtain the answer to the question "What if..." in other words we arrive at the solution what the reaction would be at the changes of any variable in the cooling system.

The paper has shown: dynamic and static regime of work, mathematic model of the cooling system of MDE, simulation model in POWERSIM programme language and diagrams of the flows of water.

**Key words:** simulation, diesel engine propulsion, cooling system

## UVOD / Introduction

Sustavom hlađenja hlade se dijelovi koji se zagrijevaju izgaranjem goriva i trenjem, te se njime odvodi toplina iz ulja, goriva, vode i zraka za nabijanje cilindara.

Održavati dopuštene temperature u radnom režimu dizelskih motora moguće je samo ako se dio topline nastale izgaranjem goriva odvodi rashladnim sredstvom i ako se podmazuju dijelovi koji se tijekom rada taru.

Pritom, hlađenjem se smanjuje količina topline koja se pretvara u mehanički rad u motoru, pa zbog toga toplina odvedena hlađenjem mora biti minimalna kako bi se osigurao siguran rad motoru.

U brodskim dizelskim motorima rabe se ovi sustavi hlađenja:

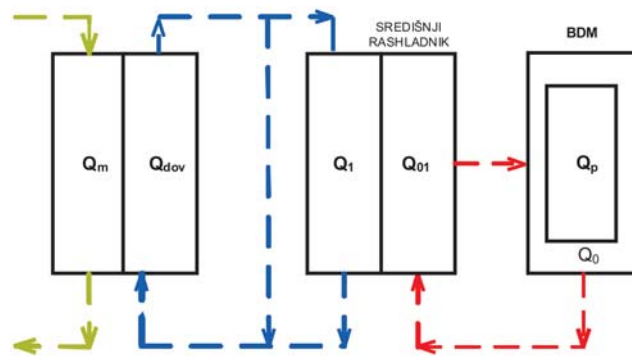
- cirkulacijski sustav u kojemu se motor hladi slatkom vodom što cirkulira u zatvorenom krugu; njime se hlade košuljica i poklopac cilindra te turbopuhalo za nabijanje zraka,
- sustav hlađenja stapa slatkom vodom ili uljem,
- sustav hlađenja rasprskavača slatkom vodom ili gorivom;
- sustav morske vode za hlađenje cirkulacijske vode i ulja u sustavu hlađenja i podmazivanja motora; ovim se sustavom hladi i zrak za nabijanje u međuhladjacima.

Bez obzira na vrstu hlađenja motora potrebno je osigurati ravnotežni režim rada rashladnog sustava kako bi se postigao stabilan, siguran i ekonomičan rad BDM-a.

## MATEMATIČKI MODEL ZA SUSTAV HLAĐENJA BRODSKOGA DIZELSKOG MOTORA / Mathematic model for the marine diesel engine cooling system

Objekt regulacije može biti u statičkome i dinamičkome radnom režimu.

Statički režim pretpostavlja ravnotežno stanje objekta regulacije i on se ne mijenja ako su dovedena i odvedena količina energije jednake [1]. Proces hlađenja dizelskih motora događa se po statičkoj karakteristici pri kojoj je količina topline dovedena rashladnom mediju jednaka odvedenoj a temperatura medija koji hladimo približno je konstantna. Statičke karakteristike mogu se prikazati formulama, tablicama i dijagramima, a mogu biti linearne ili nelinearne.



Slika 1. Blok-dijagram modela sustava za hlađenje motora  
Figure 1. Block diagram of the model of system of marine diesel engine cooling system

U sustavu hlađenja motora postoje tri podsustava ili kruga. Rashladna slatka voda visoke temperature, koja hladi BDM hladi se u središnjem rashladniku slatkom vodom niske temperature, a ta se voda hladi u rashladniku morske vode.

Glavna karakteristika ovoga promatranog sustava je samo jedan izmjenjivač topline između sustava morske vode i sustava slatke vode niske temperature.

### Statički i dinamički režim hlađenja / *Static and dynamic regime of cooling*

Sustav hlađenja sastoji se od tri podsustava:

- pod sustav rashladne slatke vode niske temperature (*low temperature cooling water system*),
- pod sustav hlađenja BDM-a sa slatkom vodom visoke temperature (*high temperature cooling water system*),
- pod sustav morske vode za hlađenje vode niske temperature središnjeg rashladnika (*sea water system*).

#### Pod sustav rashladne slatke vode niske temperature / *Subsystem of cooling fresh water of low temperature*

Statički ili ravnotežni režim rada u rashladniku kojemu se hladi voda visoke temperature za hlađenje BDM-a rashladnom slatkom vodom niske temperature, matematički se izražava jednadžbom:

$$Q_{01} - Q_1 = 0 \quad (1)$$

$Q_{01}$  - količina predane topline od rashladne vode visoke temperature,

$Q_1$  - količina topline odvedene rashladnom vodom niske temperature.

Količina topline  $Q_{01}$  koja se predaje vodi niske temperature u rashladniku može se izraziti funkcionalnom ovisnošću temperature vode visoke temperature na ulazu u motor, temperature vode na izlazu iz motora i temperature rashladne vode niske temperature na izlazu iz rashladnika [1] [2].

Dinamički režim rashladnika za hlađenje rashladne vode visoke temperature kojom se hladi BDM nastaje narušavanjem ravnotežnog režima zbog promjene  $Q_{01}$  ili  $Q_1$  u sustavu hlađenja slatke vode visoke temperature za hlađenje BDM-a pa se tako mijenja količina akumulirane topline:

$$Q_{01} - Q_1 \neq 0 \quad (2)$$

#### Pod sustav hlađenja BDM-a sa slatkom vodom visoke temperature / *Subsystem of cooling of MDE with fresh water of high temperature*

Statički režim hlađenja broskog dizelskog motora može se izraziti sljedećom jednadžbom:

$$Q_{pl} - Q_o = 0 \quad (3)$$

$Q_{pl}$  - količina topline koja s BDM-a prelazi na vodu visoke temperature,

$Q_o$  - količina topline koja se odvodi rashladnom vodom visoke temperature.

Količina topline s BDM-a koja se predaje vodi visoke temperature izražava se u funkciji temperature BDM-a i temperature rashladne vode visoke temperature na izlazu iz motora.

Promjena režima rada dizelskih motora izravno narušava odnos između dovedene i odvedene količine topline u sustavu hlađenja dizelskoga motora. Taj se proces naziva *prijelaznim* ili *dinamičkim procesom*. Dinamički se proces kvalitetnom regulacijom sustava ponovno dovodi u ravnotežno stanje [1][2].

Narušavanjem statičke ravnoteže između dovedene i odvedene topline u sustavu hlađenja motora mijenja se količina akumulirane topline i u sustavu se događaju prijelazni ili dinamički procesi.

$$Q_{pl} - Q_o \neq 0 \quad (4)$$

#### Pod sustav morske vode za hlađenje središnjeg rashladnika / *Subsystem of seawater for cooling of central cooling plant*

Statički ili ravnotežni režim hlađenja rashladne vode prikazan je izrazom:

$$Q_{dov} - Q_m = 0 \quad (5)$$

$Q_{dov}$  - količina topline koja se dovodi rashladnom vodom niske temperature,

$Q_m$  - količina topline odvedene morskom vodom.

Toplina koja se predaje morskoj vodi u središnjem rashladniku dana je funkcionalnom ovisnošću temperature morske vode na ulazu u središnji rashladnik, temperature morske vode na izlazu iz rashladnika i temperature vode na izlazu iz središnjeg rashladnika.

Dinamički režim hlađenja rashladne vode niske temperature događa se pri narušavanju statičke ravnoteže između količine topline ( $Q_{dov}$ ) koja se predaje morskoj vodi i količine topline ( $Q_m$ ) koja se odvodi morskom vodom, što se može iskazati sljedećim izrazom:

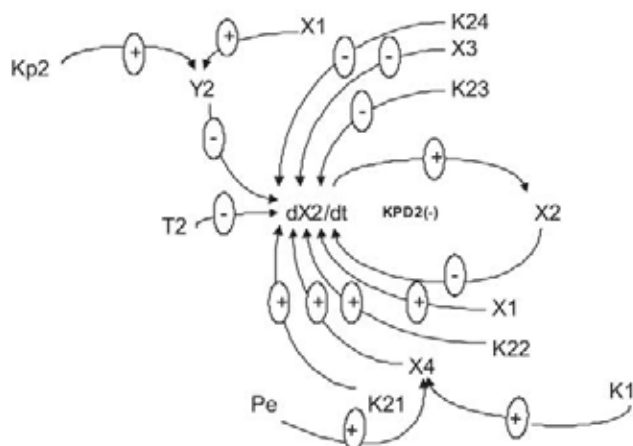
$$Q_{dov} - Q_m \neq 0 \quad (6)$$

## SUSTAVNODINAMIČKI KONTINUIRANI KOMPJUTORSKI SIMULACIJSKI MODEL ZA SUSTAV HLAĐENJA BRODSKOGA DIZELSKOG MOTORA / *Systemdynamic continuous computer simulation model for the marine diesel engine cooling system*

Uz pomoć matematičkog modela sustava za hlađenje dizelskog motora i njegovih podsustava hlađenja formira se dinamički strukturni model [1][3][4]. Model sustava hlađenja dizelskog motora podijeljen je u tri podsustava prikazana dinamičkim kvalitativnim strukturnim modelima za svaki podsustav na slikama 2., 3. i 4.

### Podsustav rashladne vode niske temperature kojom se hladi voda visoke temperature za hlađenje broskog dizelskog motora / *Subsystem of cooling water of low temperature by which high-temperature water is cooled for marine diesel engine*

Sustavnoodinamički kvalitativni strukturni model za podsustav hlađenja vode visoke temperature i model regulacije hlađenja vode visoke temperature mogu se dati prema matematičkom modelu odgovarajućeg sustava hlađenja i regulatora koji se rabi za regulaciju temperature rashladne vode. Na slici 2. prikazan je model prema jednadžbama (7) i (8).



Slika 2. Sustavnoodinamički kvalitativni strukturni model podsustava hlađenja vode visoke temperature s vodom niske temperature i model regulacije toga hlađenja

Figure 2. Systemdynamic qualitative structural model of sub-system of cooling of high-temperature water with low-temperature water and model regulation of the cooling

$X_2$  - relativna vrijednost promjene temperature vode niske temperature za hlađenje vode visoke temperature na izlazu iz rashladnika;

$T_2$  - vremenska konstanta kruga hlađenja vode visoke temperature;

$K_{21}$  - koeficijent pojačanja prema predanoj toplini vode visoke temperature na ulazu u BDM;

$X_4$  - relativna vrijednost promjene temperature vode visoke temperature za hlađenje BDM-a na ulazu u njega;

$K_{22}$  - koeficijent pojačanja prema predanoj toplini vode visoke temperature na izlazu iz BDM-a;

$X_1$  - relativna vrijednost promjene temperature vode visoke temperature na izlazu iz BDM-a;

$K_{23}$  - koeficijent pojačanja prema odvedenoj toplini hlađenjem;

$X_3$  - relativna vrijednost promjene temperature vode niske temperature na ulazu u rashladnik;

$K_{24}$  - koeficijent pojačanja prema odvedenoj toplini promjenom protoka rashladne vode;

$Y_2$  - relativna vrijednost promjene otvorenosti ventila na ulazu u rashladnik vode.

Diferencijalna jednadžba kruga rashladne vode za hlađenje vode uz košuljice motora glasi:

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{1}{T_2} (K_{21}X_4 + K_{22}X_1 - K_{23}X_3 - K_{24}Y_2 - X_2) \quad (7)$$

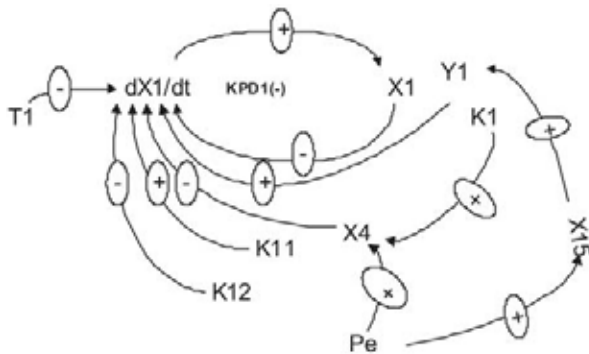
Izraz za sustavnoodinamički kvalitativni model relativne vrijednosti promjene otvorenosti ventila na ulazu u hladnjak vode za proporcionalni regulator, bit će [1][4]:

$$Y_2 = K_{p2} X_1 \quad (8)$$

$K_{p2}$  - proporcionalan koeficijent pojačanja.

### Podsustav rashladne vode visoke temperature za hlađenje BDM-a / *Subsystem of cooling water of high temperature for cooling MDE*

Sustavnoodinamički kvalitativni strukturni model za krug hlađenja BDM-a, model relativne vrijednosti promjene temperature vode visoke temperature za hlađenje košuljica na izlazu iz motora i model relativne promjene temperature BDM-a [1][3] dan je prema jednadžbama (9), (10) i (11).



Slika 3. Sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model pod sustava hlađenja košuljice dizelskog motora, model relativne vrijednosti promjene temperature vode visoke temperature za hlađenje košuljica na izlazu iz motora i model relativne promjene temperature plinova

Figure 3. System dynamic qualitative structural model of cooling sub-system of diesel engine shell, model of relative value of changes of high temperature water for cooling shells at the exit from the engine and model of relative changes of the temperature of gases

$T_1$  - vremenska konstanta kruga hlađenja košuljica motora;

$K_{11}$  - koeficijent pojačanja prema predanoj toplini od BDM-a;

$Y_1$  - relativna promjena temperature BDM-a;

$K_{12}$  - koeficijent pojačanja prema odvedenoj toplini hlađenjem.

Diferencijalna jednačina pod sustava rashladne vode visoke temperature za hlađenje košuljice motora glasi:

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{1}{T_1} (K_{11}Y_1 - K_{12}X_4 - X_1) \quad (9)$$

Izraz sustavnodinamičkoga kvalitativnog modela za relativnu promjenu temperature plinova bit će:

$$Y_1 = P_e \cdot X_{15} \quad (10)$$

$P_e$  - efektivna snaga motora;

$X_{15}$  - relativna promjena temperature BDM-a.

Izraz sustavnodinamičkoga kvalitativnog modela za relativne vrijednosti promjene temperature vode za hlađenje BDM-a na izlazu iz njega iznosi:

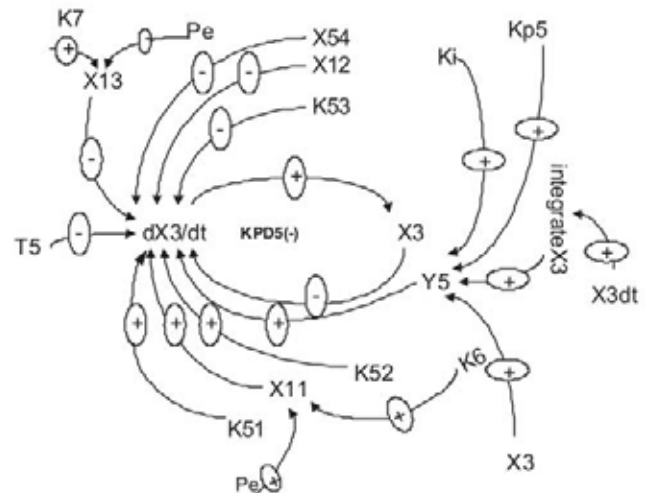
$$X_4 = K_1 \cdot P_e \quad (11)$$

$K_1$  - koeficijent pojačanja prema temperaturi vode visoke temperature za hlađenje BDM-a na izlazu iz njega.

### Podsustav morske vode za hlađenje vode u središnjem rashladniku / Subsystem of seawater for cooling water in central cooling plant

Sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model kruga morske vode za hlađenje vode niske temperature u središnjem rashladniku s relativnom promjenom

temperature morske vode na izlazu i model relativne promjene temperature rashladne vode niske temperature na ulazu u središnji rashladnik i rashladne vode na ulazu u središnji rashladnik [1][3] izrađeni su prema jednačbama (12) i (13).



Slika 4. Sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model pod sustava morske vode za hlađenje vode niske temperature središnjeg rashladnika s relativnom promjenom temperature morske vode na izlazu, modela relativne promjene temperature rashladne vode na ulazu u središnji rashladnik i rashladne vode na ulazu u središnji rashladnik

Figure 4. Systemdynamic qualitative structural model of subsystem of seawater for cooling low temperature water of central cooling plant with relative changes of temperature of seawater at the exit, model of relative changes of temperature of cooling water at the entrance in central cooling plant and cooling water at the entrance into central cooling plant

$T_5$  - vremenska konstanta kruga hlađenja rashladne vode niske temperature u središnjem rashladniku;

$K_{51}$  - koeficijent pojačanja prema predanoj toplini od rashladne vode visoke temperature koja se dovodi u središnji rashladnik;

$X_{11}$  - relativna promjena temperature rashladne vode niske temperature na ulazu u središnji rashladnik;

$K_{52}$  - koeficijent pojačanja prema predanoj toplini promjena protoka rashladne vode niske temperature;

$Y_5$  - relativna vrijednost promjene otvorenosti ventila na ulazu u rashladnik vode niske temperature;

$K_{53}$  - koeficijent pojačanja prema odvedenoj toplini morske vode koja se dovodi u rashladnik;

$X_{12}$  - relativna promjena temperature na ulazu u središnji rashladnik;

$K_{54}$  - koeficijent pojačanja prema odvedenoj toplini morem koja se odvodi iz rashladnika.

Diferencijalna jednačba kruga za hlađenje vode niske temperature u središnjem rashladniku s morskom vodom glasi:

$$\frac{dX_3}{dt} = \frac{1}{T_5} (K_{51}X_{11} + K_{52}Y_5 - K_{53}X_{12} - K_{54}X_{13} - X_3) \quad (12)$$

Izraz za sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model relativne promjene temperature rashladne vode na ulazu u središnji rashladnik, bit će:

$$X_{13} = K_7 \cdot P_e \quad (13)$$

$X_{13}$  - relativna promjena temperature morske vode na izlazu iz središnjeg rashladnika;

$K_7$  - koeficijent pojačanja prema toplini koja se predaje morskoj vodi iz središnjeg rashladnika.

$$X_{11} = K_6 \cdot P_e \quad (14)$$

$K_6$  - koeficijent pojačanja prema toplini koja se predaje rashladnoj vodi niske temperature na ulazu u središnji rashladnik.

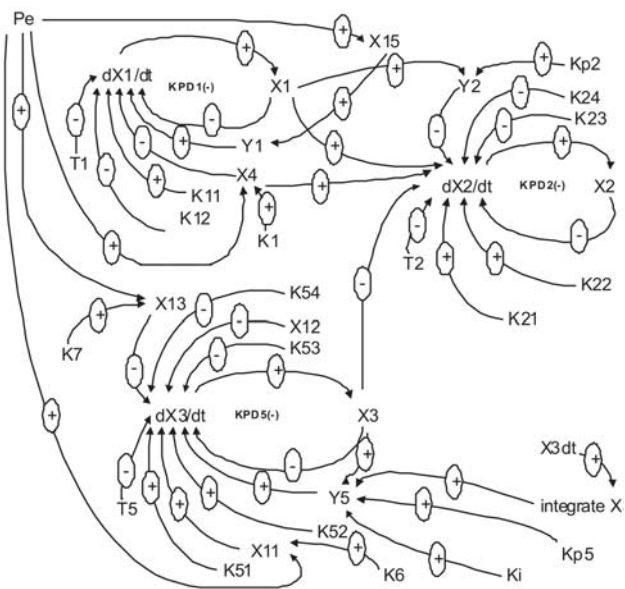
Izraz za sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model regulacije hlađenja vode niske temperature u središnjem rashladniku [1][2][4][5], bit će:

$$Y_5 = K_{p5} X_3 + K_i \int_{t_1}^{t_2} X_3 dt \quad (15)$$

$K_{p5}$  - proporcionalni koeficijent pojačanja;

$K_i$  - integralni koeficijent pojačanja.

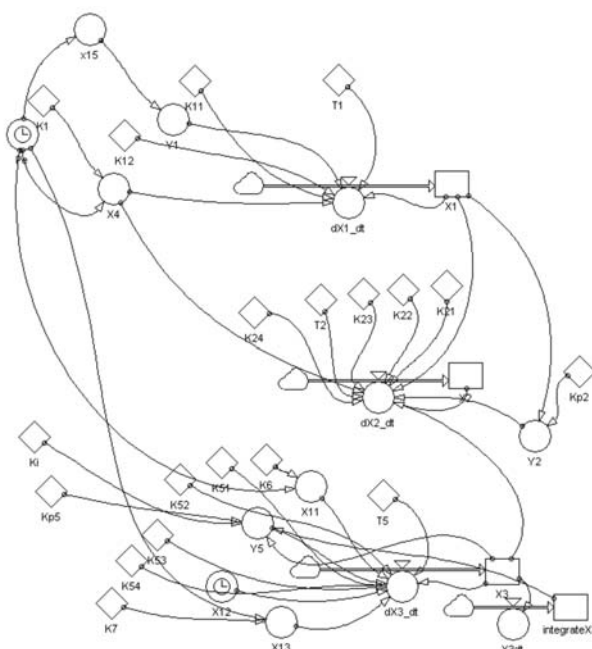
Cjelokupni sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model sustava za hlađenje dizelskog motora prikazan je na slici 5.



Slika 5. Sustavnodinamički kvalitativni strukturalni model sustava za hlađenje brodskog dizelskog motora  
Figure 5. Systemdynamic qualitative structural model of the marine diesel engine cooling system

### SUSTAVNODINAMIČKI KONTINUIRANI KOMPJUTORSKI MODEL HLAĐENJA BDM-a UZ POMOĆ POWERSIM-SIMBOLIKE / Systemdynamic continuous computer model of the MDE cooling system aided by POWERSIM symbolism

Uz pomoć mentalno-verbalnog i strukturalnog modela izvodi se dijagram toka za sustav hlađenja brodskoga porivnog sustava.



Slika 6. Strukturalni sustavnodinamički model sustava za hlađenje dizelskog motora u POWERSIM-simbolici  
Figure 6. Structural systemdynamic model of the marine diesel engine cooling system in POWERSIM symbolism

Uz uporabu sustavnodinamičkoga kompjutorsko-simulacijskog modela za rashladni sustav brodskoga dizelskog motora u POWERSIM-programskom jeziku na temelju početnih vrijednosti varijabla i parametara danih u samome modelu - dobiveni su numerički podaci i dijagrami u vremenskom intervalu od 0 do 90 sekunda.

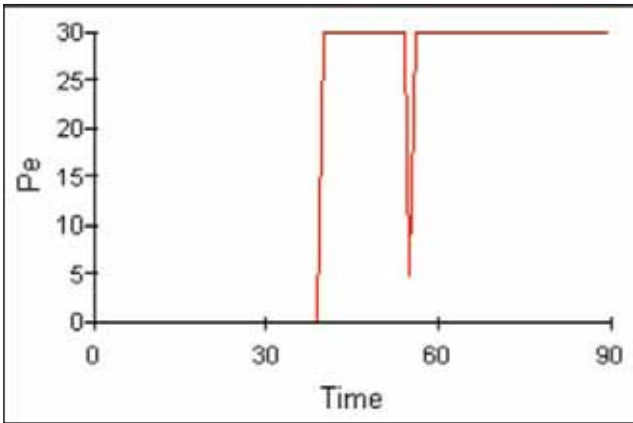
Ispitivanje validnosti kompjutorskog modela za rashladni sustav brodskoga dizelskog motora izvršeno je prema sljedećem scenariju:

snaga motora ne mijenja se do 38. sekunde, a u 38. sekundi dolazi do promjene opterećenja prema **odskočnoj funkciji** za 30%, ta se snaga zadržava do 56. sekunde, kad se snaga mijenja prema **impulsnoj funkciji** za 24% i dalje se zadržava nepromijenjenom.

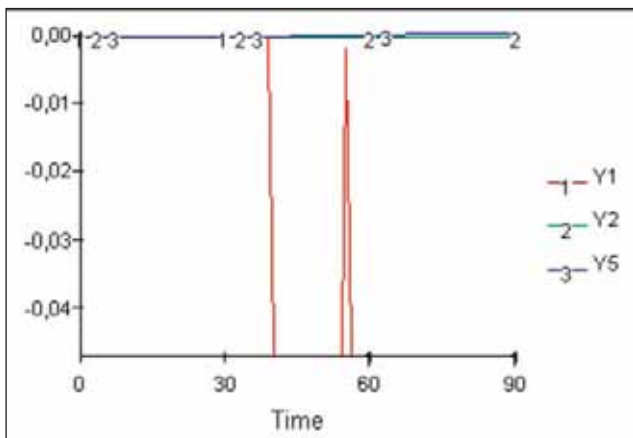
U ispisu je dana shema kompjutorskog modela,

s vrijednostima zadanih koeficijenata i vrijednostima konstanta vremena ( $T1$  do  $T5$ ), koji iznose (0 - 90).

Dijagrami prikazuju odziv na definirane promjene snage motora, i to za svaki dio kruga sustava.



a)



b)

Slika 7.

a) Relativna promjena snage dizelskog motora ( $T1 - T5$ ) (0 - 90).

b) Relativna vrijednost promjene:

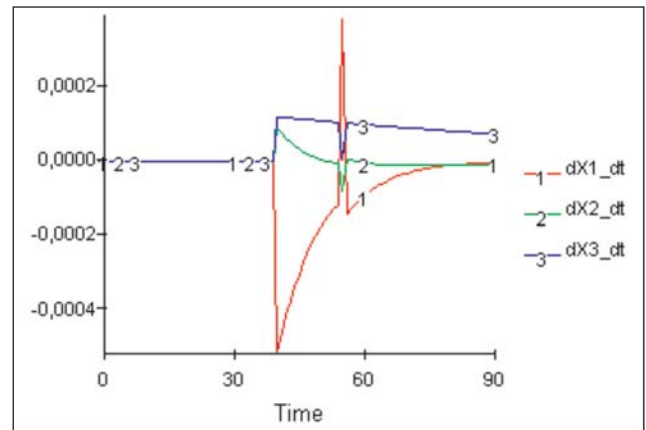
- temperature plinova ( $Y1$ ),
- otvorenosti ventila na ulazu u rashladnik vode ( $Y2$ ),
- otvorenosti ventila na ulazu u središnji rashladnik ( $Y5$ ).

Figure 7.

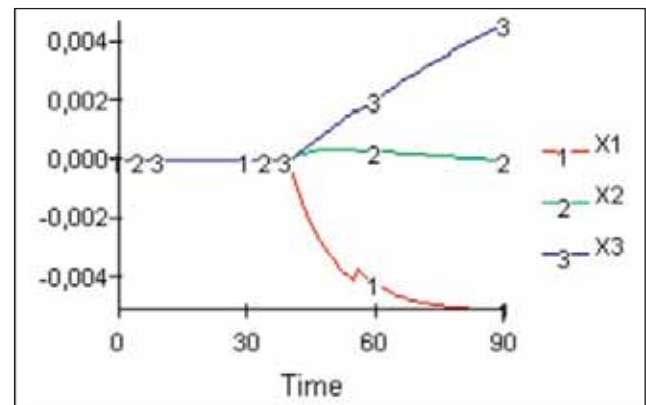
a) Relative change of the power of diesel engine ( $T1 - T5$ ) (0 - 90).

b) Relative value of the changes:

- temperature of gases  $Y1$
- openness of the valve at the entrance in water-cooling
- openness of the valve at the entrance in central-cooling plant



a)



b)

Slika 8.

a) Brzina relativne promjene temperature vode:

- na izlazu iz dizelskog motora ( $dX1\_dt$ ),
- za hlađenje rashladnika vode ( $dX2\_dt$ ) (izlaz iz rashladnika),
- na ulaz u rashladnik vode za hlađenje košuljica dizelskoga motora ( $dX3\_dt$ ).

b) Relativna vrijednost temperature vode:

- na izlazu iz dizelskog motora ( $X1$ ),
- za hlađenje rashladnika vode ( $X2$ ) (izlaz iz rashladnika),
- na ulaz u rashladnik vode za hlađenje košuljica dizelskoga motora ( $X3$ ).

Figure 8.

a) Speed of relative changes of water temperature:

- at the entrance from diesel engine ( $dX1\_dt$ ),
- for cooling of water cooling plant ( $dX2\_dt$ ) exit from cooling plant
- at the entrance of water cooling plant for cooling of the shell of marine diesel engine ( $dX3\_dt$ ).

b) Relative values of water temperature:

- at the exit from diesel engine
- for cooling water cooling plant ( $X2$ ) (exit from cooling plant),
- at the entrance of cooling water plant for cooling shell of marine diesel engine ( $X3$ )

## ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH SIMULACIJOM ZA DANI SCENARIJ / Analysis of the results obtained by simulation for scenario available

U promatranom scenariju snaga se ne mijenja do 40. sekunde, a u 40. sekundi nastaje promjena opterećenja prema odskočnoj funkciji za 30%, te se snaga zadržava do 56. sekunde, kada se mijenja prema impulsnoj funkciji za 24%. Dalje se snaga zadržava nepromijenjenom - slika 7.a.

Prema ovim uvjetima, iz dijagrama i numeričkih podataka može se istaknuti sljedeće:

- relativna promjena temperature na izlazu iz motora ( $dX1\_dt$ ) mijenja se u zanemarivo uskim granicama od  $-0,00045$  do  $0,00045$ ; brzina promjene ove temperature, dana na slici 8.a, ilustrira inertnost ovoga sustava;
- brzina relativne promjene temperature vode za hlađenje rashladnika vode (izlaz iz rashladnika ( $dX2\_dt$ )) konstantna je do 40. sekunde, a u 40. sekundi nastaje promjena opterećenja prema odskočnoj funkciji, pa nakon 63. sekunde ponovno postaje konstantna - slika 8.a;
- brzina relativne promjene temperature vode na ulazu u rashladnik vode za hlađenje košuljica dizelskoga motora ( $dX3\_dt$ ) prema slici 8.a konstantna je do 40. sekunde, a zatim raste u 40. sekundi pa u 55. sekundi nastaje promjena prema odskočnoj funkciji;
- prema slici 8.b relativna vrijednost temperature vode na ulazu u rashladnik vode se ne mijenja do 40. sekunde, a u 40. sekundi nastaje promjena opterećenja koja se mijenja se u uskim granicama od  $-0,0045$  do  $0,0045$ ;
- do 40. sekunde vrijednost je konstantna za  $X1$ ,  $X2$  i  $X3$ , a nakon 40. sekunde  $X1$  pada do 90. sekunde i postaje konstantna,  $X2$  u 80. sekundi postaje konstantna, a  $X3$  nakon 40. sekunde prestaje biti konstantna i raste do 90. sekunde;
- odziv na promjenu opterećenja u rashladniku vode (dijagram prikazan na slici 7.b) daje relativnu vrijednost promjene otvorenosti ventila na ulazu u rashladnik vode, što omogućava potrebnu brzinu mijenjanja protoka tekućine, odnosno sposobnosti promjene hlađenja vode;
- do 40. sekunde vrijednost je konstantna za  $Y1$ ,  $Y2$  i  $Y3$ , a nakon 40. sekunde  $Y1$  pada do 55. sekunde, zatim reagira prema odskočnoj funkciji pa se vraća u 57. sekundi i postaje konstantna do 90. sekunde. Relativna vrijednost promjene otvorenosti ventila na ulazu u hladnjak vode ( $Y2$ ) do 90. sekunde ostaje konstantna, a isto tako i relativna vrijednost promjene  $X3$ .

Na izlazu iz rashladnika nastoji se zadržati konstantna temperatura za sustav, što je postignuto za krug s proporcionalnim regulatorom, a za središnji rashladnik koji je hlađen morskom vodom proporcionalno-integralnim regulatorom.

Dobiveni numerički podaci predstavljeni dijagramom, pokazuju da sustav hlađenja brodskoga dizelskog motora sa svojim podsustavima, koji su opisani u ovom radu, u potpunosti funkcionira, te da dobiveni rezultati odgovaraju zadanim uvjetima automatskog sustava za regulaciju temperature. To znači da neosjetljivost automatskog sustava regulacije temperatura za sve podsustave ne smije biti veća od  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , neravnomjernost (statičko odstupanje regulatora) ne smije biti veće od  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  i odstupanje temperature u prijelaznom procesu ne smije biti veće od  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  za zadani scenarij. Takvi su zahtjevi odabrani jer te uvjete mora zadovoljiti svaki kvalitetan automatski regulacijski sustav temperature [6].

## ZAKLJUČAK / Conclusion

Kompjutor i *softverski* modeli omogućavaju provedbu eksperimenata bez opasnosti da se naruši funkcioniranje realiteta i financijskih i drugih posljedica koje bi mogle nastati u obavljanju sličnih eksperimenata na realitetu.

Nadalje, na istomu kompjutorskom modelu obavljena je heuristička optimizacija parametara usuglašeni prema sustavu hlađenja BDM-a. Na osnovi izvršenih znanstvenih istraživanja dokazana je sva složenost sustavu hlađenja BDM-a, njegove dinamike ponašanja i mogućnost odgovarajuće optimizacije.

Modeli su lagani za uporabu i jeftiniji od eksperimenata, manje remete odvijanje procesa nego eksperimenti koji se provode u okviru realnoga sustava.

Modeli osiguravaju sustavni pristup rješavanju problema i omogućuju vizualno sagledavanje interakcijskog djelovanja pojedinih čimbenika u procesu, te povećavaju razumijevanje problema i olakšavaju njegovo rješavanje.

Od korisnika se zahtijeva da budu određeni glede ograničenja i ciljeva u odnosu prema analiziranom problemu.

Modeli osiguravaju standardiziran način u analiziranju problema i služe kao konzistentan alat za procjenjivanje. Matematički i kompjutorski modeli omogućavaju preciznu, sažetu i brzu raščlambu složenih situacija i dobivanje odgovora na pitanja "što ako".



## LITERATURA / References

1. Jurjević, M., *Sustavno dinamičko modeliranje diesel motora s turbo puhalom*, Magistarski rad, FESB, Split, 2001.
2. Milić, L., Milić, I., *Osnove automatizacije*, Pomorski fakultet, Dubrovnik, 1995.
3. Munitić, A., *Kompjuterska simulacija uz pomoć systemske dinamike*, Brodosplit, Split, 1989.
4. Milić, L., Bupić, M., Jurjević, M., *Računalni simulacijski model rashladnog sustava dizelskog motora uz pomoć Dynamo programskog jezika*, Zbornik radova
3. Međunarodnog znanstveno stručnog savjetovanja "Energetska i procesna postrojenja", Zagreb, 1998.
5. Milić, L., Martinović, D., Jurjević, N., „Računalni simulacijski model automatske regulacije plovidbe broda“, *Naše more*, Dubrovnik, 45(1998.)
6. Dvornik, S., Milić, L., Dvornik, J., „Modeliranje dinamičkih uvjeta rada broskoga parnog kotla“, *Naše more*, Dubrovnik, 45(1998.)
7. Munitić, A., Ristov, P., *Systemska dinamika*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Split, 2009.

---

Rukopis primljen: 1. 10. 2010.

