

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ДИЗЕЛГЕНЕРАТОРНА ЧАСТ НА ИНТЕГРИРАНА  
КОРАБНА ЕЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Георги П. Стоилов, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна  
Момчил Г. Манов, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

MATHEMATICAL MODELLING OF DIESEL - ELECTRIC  
POWER GENERATION PART OF SHIP INTEGRATED ELECTRIC POWER STATION

Georgi P. Stoilov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna  
Momchil G. Manov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

**Abstract:** This article presents a mathematical model of diesel - electric power generation part as unit of ship integrated electrical power system. The model is written in a state - space form suitable for the purpose of simulation and control design. The load is specified with an aggregated active and reactive power load demand.

**Key words:** mathematical modelling, power generation part, ship integrated electric power station.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електропропульсивните системи намират все по-широко приложение на съвременните кораби. Те са особено актуални за кораби, чиято специфика предполага работа в различни скоростни режими и висока маневреност.

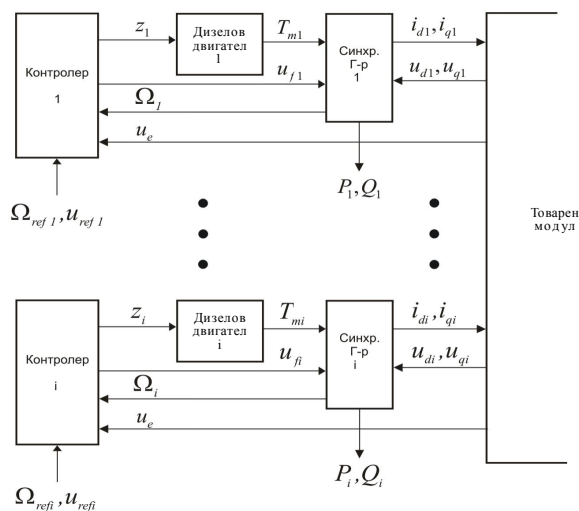
Основната идея в използването на такива системи е да се заменят главните корабни дизелови двигатели с електродвигатели и да се разпредели производството на консумираната електроенергия в няколко дизел-генератора.

Електрическите двигатели се характеризират със много висока ефективност по отношение на скоростните характеристики и изходната мощност в целия им работен диапазон, докато при дизеловите двигатели тя се концентрира само в една малка област около номиналната им работна точка. Това определя необходимостта от използването на интегрирана корабна електроенергетична система /ИКЕС/ на кораби, които плават при честа смяна на скоростния режим. При използване на традиционна пропульсивна система с дизелови двигатели ефективността ще се понижи значително при работа извън номиналната им област.

Като основен мотив за моделирането на дизел-генераторната част в състава на ИКЕС можем да определим използването на модела в симулации за представяне режимите и стабилността на работа на електростанцията и нейните елементи, както и подобряване ефективността на работа на системата за енергийно управление по отношение понижаване разхода на гориво и повишаване безопасността. Това налага при моделирането да се използват алгоритми за намиране на оптималния брой дизелгенератори, които да разпределят товара по между си и използването на нелинеен математичен модел в компактна векторна форма в пространството на състоянията.

2. СТРУКТУРА НА МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

Дизелгенераторната част от състава на ИКЕС се състои от среднооборотни дизелови двигатели, синхронни генератори, регулатори на оборотите и напрежението /обикновено контролери от ПИД тип/ и товарен модул. Тя представя взаимната връзка между генераторите, скоростния регулатор и автоматичните стабилизатори на напрежението. За всеки от елементите са използвани известни модели, като е обърнато специално внимание на взаимната връзка между синхронните генератори в товарния модул. На фиг. 1 е показана схематично дизелгенераторната част от състава на ИКЕС с входните и изходните величини.



Фиг. 1

Интегрираните корабните електроенергетични системи са изолирани и за представения модел ъгловата скорост на ротора на единия генератор е избрана за базова а силовите ъгли на останалите генератори са изчислени към базовия. Силовият ъгъл между съответния генератор и напрежението на шината е изчислен по товарния модул като функция на токовете

на генераторите.

Математичния модел е представен в относителни единици по номиналните стойности на най-големия синхронен генератор като еталон. Това има отношение, ако различни по параметри генератори се използват в един модел, защото това налага да се изчислят параметрите на останалите генератори.

- Фазно напрежение  $U_{ref}, V; U_{ref} = \sqrt{2/3}U_N$ ,

където  $U_N$  е номиналното напрежение на шината,  $V$ .

- Фазов ток  $I_{ref}, A; I_{ref} = \sqrt{2}I_N$ , където  $I_N$  е номиналният ток,  $A$ .

- Пълна мощност  $S_{ref}, VA; S_{ref} = 3/2U_{ref} \cdot I_{ref}$ .

- Електрическа ъглова честота,  $rad/s: \omega_N = 2\pi f_N$ ,

където  $f_N$  е номиналната честота на шината,  $1/s$ .

- Механична ъглова честота,  $rad/s:$

$$\Omega_{ref} = \omega_N / (p / 2),$$

където  $p$  е броят на полюсите на генератора.

- Въртящ момент,  $Nm: T_{ref} = S_{ref} / \Omega_{ref}$ .

### 2.1. Дизелови двигатели

Като приближение на динамичните характеристики на среднооборотния дизелов двигател е използван модел от първи ред.

$$(1) \quad \dot{T} = \frac{1}{T_{DE}}(-T_m + z),$$

където  $T_m$  е механичният въртящ момент,  $pu$ ;  $T_{DE}$  - дизеловата динамична константа,  $s$ , а  $z$  е индексът на горивната помпа,  $pu$ . Уравнение (1) е написано така, че индексът на горивната помпа се изменя от 0 до 1 (от 0 до 100% от капацитета на горивната помпа).

Допълнително опростена нелинейна функция описва специфичния разход на гориво:

$$(2) \quad \rho = f(z), g / kWh$$

Функция  $f$  в уравнение (2) е приета за конвексна за  $z \in [0, 1]$  с минимум от мощността на дизеловия двигател, обикновено около 90% от максималната.

Математичният модел на дизеловия двигател е адекватен, тъй като е разгледана работата основно на електрическата част. За това не са отчетени работните условия на дизеловия двигател като температура на околната среда, температурата на свежия заряд и изходящите газове.

### 2.2. Синхронни генератори

За описанието на всеки синхронен генератор е използвана  $d-q$  координатна система. Включени са диференциалните уравнения, описващи динамиката на навивките на ротора, статора и успокоителната намотка. Пренебрегнати са магнитното насищане,

хистерезиса и вихровите токове. Те са сумирани за да имат минимално въздействие върху динамичната работа на системата.

За съставяне на математичния модел на всеки генератор са използвани следните променливи величини и параметри:

#### Механични:

$\Delta\delta$ : Относителен ъгъл на натоварването. Това е ъгъл между  $q$  оста на дадения генератор и  $q$  оста на съответния генератор.

$\Omega$ : Ъглова скорост на вала на двигателя,  $pu$ .

#### Електрически:

-  $\Psi_d$ : Потокосцепление на статорната намотка по ос  $d$ ,  $pu$ .

-  $\Psi_q$ : Потокосцепление на статорната намотка по ос  $q$ ,  $pu$ .

-  $\Psi_D$ : Потокосцепление на успокоителната намотка по ос  $d$ ,  $pu$ .

-  $\Psi_Q$ : Потокосцепление на успокоителната намотка по ос  $q$ ,  $pu$ .

-  $\Psi_f$ : Потокосцепление на възбудителната намотка,  $pu$ .

#### Входни:

-  $u_d$ : Напрежение на клемите на генератора по ос  $d$ ,  $pu$ .

-  $u_q$ : Напрежение на клемите на генератора по ос  $q$ ,  $pu$ .

-  $\Omega_1$ : Ъглова скорост на вала на двигателя за съответния генератор,  $pu$ .

-  $T_m$ : Механичен въртящ момент,  $pu$ .

-  $u_f$ : Напрежение на възбудителната намотка,  $pu$ .

#### Изходни:

-  $i_d$ : Съставна на статорния ток по ос  $d$ ,  $pu$ .

-  $i_q$ : Съставна на статорния ток по ос  $q$ ,  $pu$ .

-  $\Omega$ : Ъглова скорост на вала на двигателя,  $pu$ .

-  $\Delta\delta$ : Относителен ъгъл на натоварването,  $rad$ .

-  $P$ : Активна мощност,  $pu$ .

-  $Q$ : Реактивна мощност,  $pu$ .

#### Параметри:

-  $\omega_N$ : Номинална електрическа ъглова честота,  $rad/s$ .

-  $T_a$ : Механична константа,  $s; T_a = \Omega_{ref} \frac{J}{T_{ref}}$ , където  $J$  е инерционният момент.

-  $r_s$ : Активно съпротивление,  $pu$ .

-  $x_d$ : Реактивно съпротивление по ос  $d$ ,  $pu$ .

-  $x_q$ : Реактивно съпротивление по ос  $q$ ,  $pu$ .

$T_D$  : Времекопстанта на успокоителната намотка по ос  $d$ ,  $s$ .

$T_Q$  : Времекопстанта на успокоителната намотка по ос  $q$ ,  $s$ .

$T_f$  : Времекопстанта на възбудителната намотка,  $s$ .

$\sigma_D$  : Коефициент на разсейването (успокоителна/статорна намотка) по ос  $d$ , *безразмерен*.

$\sigma_Q$  : Коефициент на разсейването (успокоителна/статорна намотка) по ос  $q$ , *безразмерен*.

$\sigma_f$  : Коефициент на разсейването (възбудителна/статорна намотка), *безразмерен*.

$\mu_D$  : Коефициент на връзката (успокоителна/възбудителна намотка), *безразмерен*.

$\mu_f$  : Коефициент на връзката (възбудителна/успокоителна намотка), *безразмерен*.

Уравненията на електрическото състояние (баланс на напреженията във всяка намотка) са:

$$(3a) \quad \dot{\Psi}_d = \omega_N (\Omega \Psi_q + i_d r_s + u_d) ,$$

$$(3b) \quad \dot{\Psi}_q = \omega_N (-\Omega \Psi_d + i_q r_s + u_q) ,$$

$$(3c) \quad \dot{\Psi}_D = -\frac{1}{T_D} i_D ,$$

$$(3d) \quad \dot{\Psi}_Q = -\frac{1}{T_Q} i_Q ,$$

$$(3e) \quad \dot{\Psi}_f = \frac{1}{T_f} (-i_f + u_f) ,$$

където потокосцепленията са:

$$(4a) \quad \Psi_d = -x_d i_d + i_D + i_f ,$$

$$(4b) \quad \Psi_q = -x_q i_q + i_Q ,$$

$$(4c) \quad \Psi_D = -(1 - \sigma_D) x_d i_d + i_D + \mu_D i_f ,$$

$$(4d) \quad \Psi_Q = -(1 - \sigma_Q) x_q i_q + i_Q ,$$

$$(4e) \quad \Psi_f = -(1 - \sigma_f) x_d i_d + \mu_f i_D + i_f .$$

Уравненията на механичното състояние са:

$$(5) \quad \dot{\Omega} = \frac{1}{T_a} (T_m - T_e) ,$$

$$(6) \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_N (\Omega - \Omega_l) ,$$

където електромагнитният въртящ момент е

$$(7) \quad T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d .$$

За разглеждания генератор (генератор 1), от тук намираме  $\Delta \dot{\delta} = 0$ .

Изходните уравнения по отношение на изходния

ток  $(i_d, i_q)$  и механичните величини  $(\Omega, \Delta \delta)$  са:

$$(8) \quad P = u_d i_d + u_q i_q ,$$

$$(9) \quad P = u_q i_d - u_d i_q .$$

Уравнения (3) и (4) могат да бъдат записани в компактна форма в пространството на състоянията.

Определяме векторите

$$\Psi = [\Psi_d, \Psi_q, \Psi_D, \Psi_Q, \Psi_f]^T ; i = [i_d, i_q, i_D, i_Q, i_f]^T ;$$

$$u_g = [u_d, u_q]^T .$$

$$(10) \quad \dot{\Psi} = K(\Omega) \Psi + Ri + Eu_g + bu_f ,$$

$$(11) \quad \Psi = Xi \Rightarrow i = X^{-1} \Psi ,$$

където:

$$K(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N \Omega & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ,$$

$$R = \begin{bmatrix} \omega_N r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_Q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_f} \end{bmatrix} ,$$

$$E = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ,$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1 - \sigma_D) x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_D \\ 0 & -(1 - \sigma_Q) x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1 - \sigma_f) x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_f} \end{bmatrix}.$$

За  $\psi$  имаме:

$$(12a) \quad \dot{\psi} = (K(\Omega) + RX^{-1})\psi + Eu_g + bu_f,$$

$$(12b) \quad \dot{\Omega} = \frac{1}{T_a}(T_m - h(\psi)),$$

$$(12c) \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_N(\Omega - \Omega_1),$$

където  $h(\psi)$  е функция, дадена от (7). По-нататък оп-

ределяме векторите  $\psi_s = [\psi_d, \psi_q]^T$  и  $i_s = [i_d, i_q]^T$ , които съдържат само статорните стойности на потокосцепленията и токовете вектори.

Тогава:

$$(13) \quad h(\psi) = \psi_s^T H i_s = \psi^T (G^T H G) X^{-1} \psi,$$

където:

$$(14) \quad H = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$(15) \quad G^T H G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

За изходните величини  $i_s, P, Q$  следват изразите:

$$(16) \quad i_s = GX^{-1}\psi,$$

$$(17) \quad P = u_g^T i_s = u_g^T GX^{-1}\psi,$$

$$(18) \quad Q = -u_g^T H i_s = -u_g^T H G X^{-1}\psi.$$

За да обобщим математичния модел в пространството на състоянията за един генератор, записваме:

$$(19a) \quad \dot{\psi} = (K(\Omega) + RX^{-1})\psi + Eu_g + bu_f,$$

$$(20b) \quad \dot{\Omega} = \frac{1}{T_a}(T_m - h(\psi)),$$

$$(21c) \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_N(\Omega - \Omega_1).$$

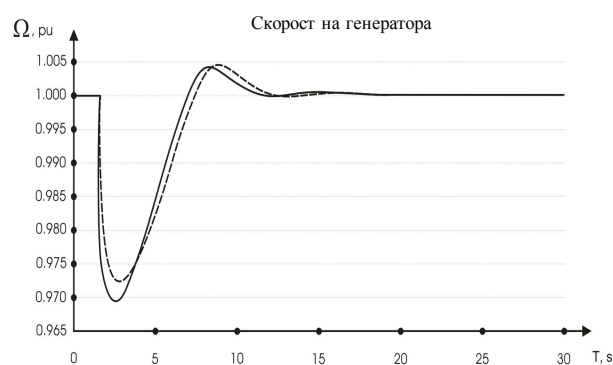
### 2.3. Симулации с математичния модел

Полученият математичен модел е въведен в Matlab-Simulink с цел провеждане на различни симулации за да придобием представа за поведението му при различни режими на работа. Изследваните генератори са с еднакви параметри /60 Hz, 6MW/, като за изследване на динамичното им поведение са симулирани

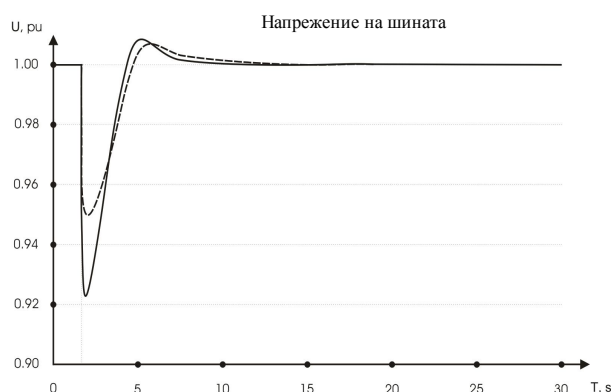
различни типове товари (работа при постоянен импеданс и приблизително постоянна мощност).

Началната изходна мощност при направената симулация е 0,5 pu (50% от пълната) с активна и реактивна съставна.

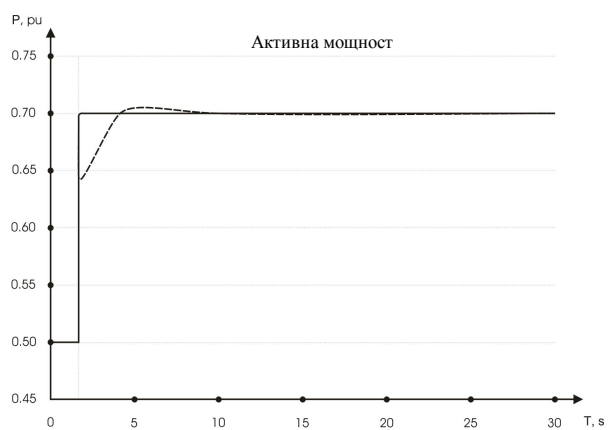
На фиг. 2, фиг. 3 и фиг. 4 са показани резултатите от сравнение с различни товари. С пунктирна линия е показана симулацията с товар с постоянен импеданс а с пълтна линия симулация с товар с приблизително постоянна мощност. Настройката на ПИД контролерите е осъществена опитно и чрез симулиране на грешка в изследвания модел. Избрани са параметри осигуряващи задоволителна работа на системата по отношение на претоварване и устойчивост при преходни процеси.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

### 3. ИЗВОДИ

Интегрираните корабни електростанции навлизат с все по-големи темпове на съвременните кораби. Това определя въпросът за разработването и изследването на математични модели на ИКЕС и елементите и като особено актуален. Дизел-генераторната част от състава на ИКЕС е съществен момент от моделирането на електростанцията. Създаването и изследването на такива модели дава възможности за разработване на нови начини за управление на мощностите, изследване и подобряване работата на уредбата за генериране на електроенергия, икономия на гориво и снижаване на експлоатационните разходи. Това от своя страна дава възможност за окриване на нови направления за изследване и оптимизация на интегрираната корабна електростанция.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A l l E l e c t r i c Ship, Evolving Benefits for Maritime Applications. Institute of Marine Engineers /IMarE/, 1998.

2. D o e r r y, N.H., J. C. Davis. Integrated power system for marine application. Naval Engineering, 2003.

3. H i l l, W. A., G. F. Creelman, L. M. Misschke. Control strategy for an icebreaker propulsion system. IEEE, 2002.

4. O r d y s, A.W., A. W. Pike, M. A. Johnson, R. M. Katebi, M. J. Grimble. Modelling and simulation of power generation plants. Advances in industrial control. Springer-Verlag, 1999.

5. P a r k e r, D.S. and C.G. Hodge. The electric warship. Power Engineering, 2006.

6. R a y a n, M. S., M. J. Sterling, M. R.I rving. Real time power system simulation. IEE, 2001.

7. S a l l a b a n k, P. H., A. J. Whitehead. The practical application of modern simulation tools throughout the design and trials of a diesel electric propulsion system. IMarE, 1997.

8. S c h r i e k, D. M., J. W. de Nijs. Royal Netherlands Navy M Class Frigate. Integrated monitoring and control system and electrical installation. IMarE, 2005.

9. S e c o n d International Conference on Diesel Electric Propulsion. Norwegian Society of Chartered Engineers, 1999.

10. W a n g, Y. D., D. J. Hill. Robust nonlinear coordinated control of power systems. Automatica, 1999.

11. W e t t e r h u s, T. M. Comparison of fuel consumption in electric propulsion systems with fixed speed and variable speed thruster motors. Norwegian Institute Of Technology, 1999.