

УДК 629.12.066(076)

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ ВАЖКИХ ПАЛИВ

**Сіманенков А. Л.**, аспірант кафедри суднового електрообладнання та засобів автоматизації Херсонської державної морської академії, E-mail: [symon2007@ukr.net](mailto:symon2007@ukr.net);

**Рожков С. О.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри суднового електрообладнання та засобів автоматизації Херсонської державної морської академії, E-mail: [ecezakaf@gmail.com](mailto:ecezakaf@gmail.com);

**Тимофєєв К. В.**, к.т.н., доцент кафедри суднового електрообладнання та засобів автоматизації Херсонської державної морської академії, E-mail: [ecezakaf@gmail.com](mailto:ecezakaf@gmail.com)

*У статті досліджується математична модель паро-підігрівача, де визначаються оптимальні параметри налаштування ПІ-регулятора подачі пари, за характеристиками замкненої системи на межі стійкості. Розглянуто особливості роботи системи регулювання в'язкості важких палив за динамічною моделлю трубчастого парового теплообмінника у підсистемах головного суднового двигуна внутрішнього згорання. В якості об'єкту дослідження використано трубчастий паровий підігрівач фірми Alfa-Laval. При аналізі передавальної функції здійснено ряд припущень, стосовно перенесення тепла, параметрів потоку та термічного опору стінок труб парового підігрівача.*

*За результатами дослідження виявлено, що для експериментального визначення коефіцієнта посилення і граничного періоду коливань достатньо провести декілька вимірів, а за дискретною згасання першої отриманої кривої можна визначити близькість коефіцієнта посилення до критичного значення.*

**Ключові слова:** паливopідготовка, моделювання систем автоматизації, паливо, парові теплообмінники, контроль температури.

**Аналіз проблеми.** Багатопаливні системи потребують визначеного режиму роботи з різними сортами палив. Оптимальна робота системи підготовки палива або мастила має свої особливості, котрі істотно впливають на ефективність та довговічність експлуатації суднових двигунів внутрішнього згорання (СДВЗ) [1, 2]. Неефективна експлуатація таких систем призводить до значних порушень в роботі головної суднової енергетичної установки та знижує ефективність роботи енергетичної системи в цілому[3].

Для цього повинна бути виконана підготовка палива, за такими основними параметрами, як в'язкість ( $cSt$ ) та температура ( $^{\circ}C$ ). Оскільки характеристики палива, що поставляється на судна торговельного флоту, як правило не відповідають вказаним у відповідних сертифікатах на нього, ефективна автоматична робота системи паливо підготовки стає неможливою. Тому сьогодні такі системи потребують нових алгоритмів та законів роботи.

**Мета статті:** аналіз і моделювання теплообмінних процесів у парових теплообмінниках, що призначені для нагрівання важких видів палива, а також визначення критичного коефіцієнта посилення і граничного періоду коливань ПІ-регулятора подачі пари.

**Аналіз останніх публікацій.** Дослідження процесів теплообміну та моделювання дозволяє вивчати енергетичні процеси та витрати енергії на системи паливopідготовки при роботі СДВЗ на паливах, які відповідають актуальним вимогам ІМО. В роботах [4, 5, 6,] показано особливості роботи ПІ-регуляторів у об'єктах зі значним транспортним запізнюванням, а також моделювання систем паливо підготовки та вивчення їх характеристик роботи.

Основна частина. Динамічні характеристики парових теплообмінників.

У парових теплообмінниках на зовнішній поверхні труб конденсується пара, унаслідок чого температура їх стінок являється постійною. Ця обставина істотно полегшує аналіз динамічних властивостей таких підігрівачів. На (рис. 1) зображено трубчастий паровий підігрівач палива, в якого по трубках протікає мазут, а на зовнішній поверхні відбувається конденсація пари. Температура палива на виході підігрівача

залежить від витрати палива (збурююча дія) і тиску гріючої пари в підігрівачі, відкриття парорегулюючого клапана, що визначається мірою (регулююча дія). Якщо в парі не міститься домішки газів, що не конденсуються, то температура конденсації однозначно визначається тиском насиченої пари [7, 8].

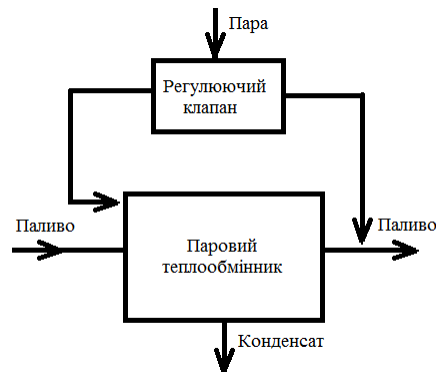


Рисунок 1 – Функціональна схема паро рідинного теплообмінника

Пристаюючи до виведення передавальної функції, що характеризує динаміку температури палива на виході підігрівача, зробимо наступні допущення:

- перенесення тепла в аксіальному напрямі відсутнє;
- усі параметри потоку середовища (палива), що обігрівається, на вході в підігрівач незмінні;
- термічним опором стінок труб, а також тепловою ємкістю плівки конденсату можна знехтувати.

Рівняння теплового балансу для потоку палива на елементарній ділянці труби має вигляд:

$$c_T M_T \frac{\partial \theta}{\partial t} dl + c_T B \frac{\partial \theta}{\partial l} dl = K_1 F_1 (\theta_{CT} - \theta) dl ,$$

або

$$T_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} + v T_1 \frac{\partial \theta}{\partial l} dl = \theta_{CT} - \theta . \quad (1)$$

Тут  $T_1 = \frac{c_T M_T}{K_1 F_1}$  – постійна часу, с;  $c_T$  – питома теплоємність палива, кДж/(кг·°С);

$M_T$  – маса палива на одиницю довжини трубки, кг/м;  $K_1$  – коефіцієнт теплопередачі на внутрішній поверхні трубки, кДж/(м<sup>2</sup>·с·°С);  $F_1$  – площа внутрішньої поверхні теплообмінника, м<sup>2</sup>/м;  $v = \frac{B}{M_T}$  – швидкість рідини, м/с.

Рівняння теплового балансу для стінки:

$$c_{CT} M_{CT} \frac{\partial \theta_{CT}}{\partial t} dl = K_2 F_2 (\theta_{II} - \theta_{CT}) dl - K_1 F_1 (\theta_{CT} - \theta) dl ,$$

або

$$T_2 \frac{\partial \theta_{CT}}{\partial t} = (\theta_{II} - \theta_{CT}) - \frac{T_2}{T_{1,2}} (\theta_{CT} - \theta) , \quad (2)$$

де  $T_2 = \frac{c_{CT} M_{CT}}{K_2 F_2}$  – постійна часу, с;  $T_{1,2} = \frac{c_{CT} M_{CT}}{K_1 F_1}$  – постійна часу, с;  $c_{CT}$  – питома теплоємність металу стінки, кДж/(кг·°C);  $M_{CT}$  – маса трубки на одиницю довжини, кг/м;  $K_2$  – коефіцієнт теплопередачі на зовнішній поверхні труби, кДж/(м<sup>2</sup>·с·°C);  $F_2$  – площа зовнішньої поверхні, м<sup>2</sup>/м.

Для вирішення системи рівнянь (1–2,) у часткових похідних скористаємося методами операційного числення. Вводячи в ці рівняння перетворення Лапласа-Карсона відносно незалежної змінної, отримуємо систему звичайних лінійних диференціальованих рівнянь відносно змінної:

$$\left. \begin{aligned} sT_1 \Theta + \nu T_1 \frac{d\Theta}{dl} &= \Theta_{CT} - \Theta; \\ sT_2 \Theta_{CT} &= \Theta_{II} - \Theta_{CT} - \frac{T_2}{T_{1,2}} (\Theta_{CT} - \Theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Виключивши температуру стінки трубки, отримуємо диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{\nu}{A(s)} \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \Theta = \frac{B(s)}{A(s)} \Theta_{II}, \quad (4)$$

у якому

$$\left. \begin{aligned} A(s) &= \frac{(sT_1 + 1)(sT_1 T_{1,2} + T_2 + T_{1,2}) - T_2}{T_1 (sT_2 T_{1,2} + T_2 + T_{1,2})}; \\ B(s) &= \frac{1}{s^2 T_1 T_2 + \left( T_1 + T_2 + \frac{T_1 T_2}{T_{1,2}} \right) s + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Вирішення рівняння (3) для граничної умови:

$$l = 0; \quad \Theta(s, 0) = 0. \quad (6)$$

(відхилення температури палива відлічуються від її постійного значення на вході в підігрівач) представляє собою реакцію ланки першого порядку на ступінчасте збурення:

$$\frac{\Theta(s, l)}{\Theta_{II}(s, l)} = \frac{B(s)}{A(s)} \left\{ 1 - \exp \left[ -A(s) \frac{l}{\nu} \right] \right\}. \quad (7)$$

Відношення  $\frac{l}{\nu}$  – час проходження палива через підігрівач (транспортне запізнювання  $z$ ), тому:

$$W_T(s) = \frac{\Theta(s)}{\Theta_{II}(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} \{ 1 - \exp[-zA(s)] \}. \quad (8)$$

Моделювання автоматичної системи контролю температури важкого палива.

На борту судна встановлений паровий нагрівач фірми Alfa Laval. Такий тип нагрівача моделюється тому, що легше моделювати пристрої, в яких не відбувається зміна фази. Паливо нагрівається за допомогою трубчастого теплообмінника. Завдання полягає в досягненні стабільної температури мазуту, крім збурень, які виникають при зміні температури або витрати рідкого палива на вході в теплообмінник.

На (рис. 2) зображено схему моделювання системи у середовищі Matlab [9, 10, 11, 12].

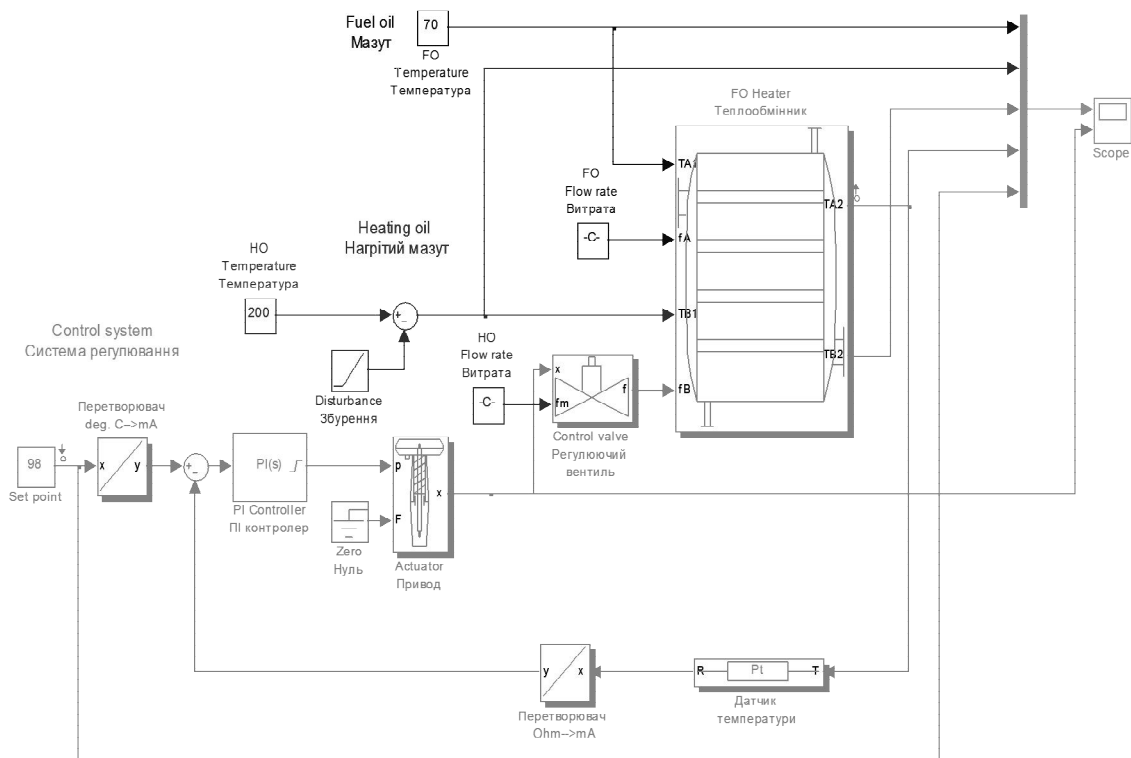


Рисунок 2 – Схема моделювання системи контролю температури мазуту у середовищі Matlab

Система складається з:

– двох лінійних датчиків. Один датчик перетворює задане значення до поточного значення в мА. Другий датчик перетворює поточне значення електричного опору датчика температури в мА, та має передавальну функцію:

$$y(x) = ax + b, \tag{9}$$

де  $y$  – вихідний сигнал;  $x$  – вхідний сигнал;

$$a = \frac{y_r - y_o}{x_r - x_o}; \quad b = ax_o + y_o,$$

– ПІ контролера. Що має наступну модель:

$$\begin{cases} e(t) = y_o(t) - y(t) \\ u(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_c} \int_0^t e(\theta) d\theta + f(t) \right), \\ \tau \frac{df(t)}{dt} + f(t) = \tau_d \frac{de(t)}{dt} \end{cases} \tag{10}$$

де  $e$  – сигнал помилки;  $y_o$  – величина уставки;  $y$  – регульований параметр;  $u$  – керуючий вихід;  $\theta$  – допоміжна змінна часу для інтегруючого елементу;  $f$  – допоміжна функція для диференціюючого елементу;  $k_p$  – коефіцієнт посилення.

Або у спрощеному вигляді:

$$H_{PID}(s) = kp \left( 1 + \frac{1}{\tau_c s} + \frac{\tau_d s}{\tau s + 1} \right). \quad (11)$$

В залежності від величини помилки сигналу він посилає сигнал тиску до приводу. Сигнал помилки неузгодженості в поточних одиницях, між уставкою і фактичним значенням температури мазуту. Тиск сигналу, що посилається з контролера, перетворюється на зміщення штока, який діє на регулюючий клапан:

– привода для керування клапаном. Пристрій регулює значення об'ємної витрати мазуту на вході в теплообмінник, та має модель:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + cx(t) + F_f(x(t)) + F_e(t) = A[p(t) - p_{\min}], \quad (12)$$

де  $p[Pa]$  – підведений тиск повітря;  $x[m]$  – зміщення пари;  $F_f[N]$  – сила статичного тертя між парою та паро-спрямовувачем;  $F_e[N]$  – зовнішня сила;  $A[m^2]$  – ефективна площа поверхні діафрагми;  $m[kg]$  – рухаюча маса;  $b[\frac{kg}{s}]$  – коефіцієнт демпфірування;

$c = \frac{A(p_{\max} - p_{\min})}{x_{\max}} [\frac{N}{m}]$  – постійна пружини.

– обігрівача-теплообмінника (Fuel oil heater). У цьому пристрої мазут нагрівають до необхідного значення 128-138°C:

$$\begin{cases} p_A c_A V_A * \frac{dT_A(t)}{dt} = p_A c_A * f_A(t) [T_{A1}(t) - T_{A2}(t)] + h_A A_A * [T_w(t) - T_A(t)] \\ p_w c_w V_w * \frac{dT_A(t)}{dt} = h_B A_B * [T_B(t) - T_w(t)] - h_A A_A * [T_w(t) - T_A(t)] \\ p_B c_B V_B * \frac{dT_B(t)}{dt} = h_B A_B * f_B(t) [T_{B1}(t) - T_{B2}(t)] - h_B A_B * [T_B(t) - T_w(t)] \end{cases}, \quad (13)$$

– датчика температури, за допомогою якого температура мазуту на виході з теплообмінника перетворюється в електричний опір:

$$R(T) = kT + R(0^\circ C), \quad (14)$$

де  $R$  – опір сенсора;  $T$  – температура сенсора;

$$k = \begin{cases} 0.3546 \frac{\Omega}{^\circ C}, \text{ for Pt100} \\ 1.933 \frac{\Omega}{^\circ C}, \text{ for Pt500} \\ 3.866 \frac{\Omega}{^\circ C}, \text{ for Pt1000} \end{cases} \text{ – коефіцієнт посилення;}$$

$$R(0^\circ C) = \begin{cases} 100\Omega, \text{ for Pt100} \\ 500\Omega, \text{ for Pt500} \\ 1000\Omega, \text{ for Pt1000} \end{cases} \text{ – опір при } (0^\circ C).$$

Результати моделювання системи показано на рис. 3.

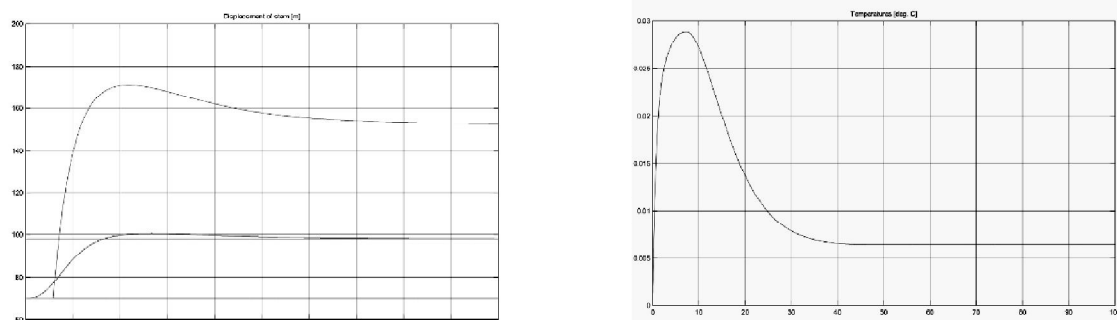


Рисунок 3 – Результати моделювання системи контролю температури мазуту:  
а) перехідна характеристика; б) похибка регулювання

Окрім методів налаштування регулятора по характеристиках розімкненої системи існують методи налаштування регуляторів по характеристиках замкнутої системи [13, 14]. Існують два методи розрахунку оптимальних параметрів налаштування, засновані на характеристиках перехідних процесів або у формі незгасаючих коливань (при  $K_R/K_R \cdot kp = 1$ ), або при дискременті загасання 0,25. Розроблений також експрес-метод оцінки параметрів налаштування в замкнутому контурі по величині запізнювання.

Для визначення оптимальних параметрів налаштування САР в'язкості палива по методу незгасаючих коливань перш за все встановлюють час інтеграції регулятора рівним нескінченності [15, 16]. Далі, поступово збільшуючи коефіцієнт посилення регулятора, погіршують стійкість системи, добиваючись її виходу в режим незгасаючих коливань. Досягши цих умов, фіксується значення коефіцієнта посилення  $K_R \cdot kp$  і період коливань  $T_{nn}$ . Тоді оптимальні настроювальні параметри визначаються  $K_R = 0,45 \cdot K_R \cdot kp$ ;  $T_I = 0,83 \cdot T_{nn}$ . У даному випадку вихідний сигнал (тиск Р) знімається на виході з регулятора.

**Висновки.** Якщо в замкненій системі виникають сталі коливання на межі стійкості, то частота їх буде однаковою на виході будь-якої з ланок системи: об'єкту, сервоприводу, вимірювача, регулятора. Тому аналіз амплітудно-фазних коливань проводять там, де амплітуда добре виявляється.

Для експериментального визначення значень критичного коефіцієнта посилення  $K_R \cdot kp$  і граничного періоду коливань  $T_{np}$ , враховуючи тиск на виході з регулятора, досить провести декілька вимірів. За дискрементом загасання першої отриманої кривої перехідного процесу можна судити про те, наскільки коефіцієнт посилення близький до критичного значення. В експерименті, при режимі незгасаючих коливань, було зафіксовано  $K_R \cdot kp = 12,5$  і  $T_{nn} = 4$  хв. Таким чином, оптимальними параметрами налаштування регулятора будуть  $K_R = 0,45 \cdot K_R \cdot kp = 0,45 \cdot 12,5 = 5,63$ ;  $T_I = 0,83 \cdot T_{nn} = 0,83 \cdot 4 = 3,3$  хв.

Отримані розрахункові дані дають змогу продовжити розробку системи паливо-підготовки для головних СДВЗ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сіманенков А. Л. Ефективність роботи підсистем регулювання температури суднового двигуна внутрішнього згорання. / А. Л. Сіманенков, С. О. Рожков // Матеріали ІV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління / Під ред. В. В. Марасанова та ін. – Херсон : ХНТУ, 2016. – С. 180–183.
2. Константинов В. Н. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок / В. Н. Константинов. – 1988. – 312 с.

3. Пахомов Ю. А. Судовые электроэнергетические установки с двигателями внутреннего сгорания : учебник. – М. : ТрансЛит, 2007. - 528 с.
4. Беляев И. Г. Автоматизация процессов в судовой энергетике : учебник для студентов высших учебных заведений. / [И. Г. Беляев, Н. Г. Курзенков, В. И. Седых, В. Н. Слесаренко] – Владивосток, 1999. - 414 с.
5. Добровольский В. В. Подготовка в'язких топлив судових малооборотних двигателей. / В. В. Добровольский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки/ – 2010/ – № 26. – С. 46–55.
6. Bimal K. Bose. Power electronics and variable frequency drives: technology and applications / edited by Bimal K. Bose // p.cm. Includes bibliographic references and index, 1997. - 659 p.
7. Michalski L. Temperature Measurement / L. Michalski, K. Eckersdorf and J. McGhee // Includes bibliographic references and index, 1991. - 496 p.
8. Hall, Dennis T. Practical Marine Electrical Knowledge. Second edition. – London, 1999. – 225 p.
9. Mateusz Blonski. Marine fuel heating system. Marine Systems Simulator (MSS), 2010.
10. Flexible dual fuel combustion by SAACKE Marine Systems for M/S Viking Grace. <http://www.saacke.com/ru/novosti-i-rekomendacii/novosti/flexible-dual-fuel-combustion-by-saacke-marine-systems-for-ms-viking-grace/>
11. Alva Laval: Documentation of FOPX Separation Systems and Modules. GMPSE Edition, book No. 1817254-02 V1
12. [http://faculty.ksu.edu.sa/Alhumaizi/Documents/GE501-Alhumaizi/CHAP02\\_ff.doc](http://faculty.ksu.edu.sa/Alhumaizi/Documents/GE501-Alhumaizi/CHAP02_ff.doc)
13. Czemplik, A. Modele dynamiki ukiadow fizycznych dla inżynierow. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
14. Hobler, T.: Ruch ciepła i wymienniki. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979.
15. Сыромятников В. Ф. Наладка автоматики судових энергетических установок : справочник. – Л. : Судостроение, 1989. – 352 с.
16. Ісаєв Є. О. Аналіз систем нечіткого керування судновими енергетичними комплексами на прикладі автоматичних регуляторів температури. / Є. О. Ісаєв, А. Л. Сіманенков // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : Науковий журнал. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2015. - № 1 (12). – С. 35–41.

## REFERENCES

1. Simanenkov A. L., (2016). Efektivnist robotu pidsistem regulyuvannya temperatury sudnovogo dvugyna vnytrishneogo zgoryannya. / A. L. Simanenkov, S. O. Rogkov // Materialu IV Vseykrainskoi naukovo-praktichnoi konferencii studentiv, aspirantiv ta molodux vchenux z avtomatichnogo upravlinnya / Pid red. V.V. Marasanova ta in. – Kherson: HNTU. - 232 s., 180 - 183 ss.
2. Konstantinov V. N. Sistemih i ustroystva avtomatizacii sudovihkh ehlektroehnergeticheskikh ustanovok. – 312 s. il. ISBN 5-7355-0068-6
3. Pakhomov Yu. A., (2007). Sudovihe ehlektroehnergeticheskie ustanovki s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya. Uchebnik. – M.: TransLit. - 528 s. il. ISBN 978-5-9476-644-6
4. Belyaev I. G., (1999). Avtomatizaciya procesov v sudovoyj ehnergetike / I. G. Belyaev, N. G. Kurzenkov, V. I. Sedihkh, V. N. Slesarenko // Uchebnik dlya studentov vihsshikh uchebnykh zavedeniyj. –Vladivostok. - 414 s.
5. Dobrovoljskiyj V. V. (2010). Podgotovka vyazkikh topliv sudovihkh malooborotnykh dvigatelej. / V. V. Dobrovoljskiyj, S. A. Khanmamedov // Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki (№26), - 202 s. –ss. 46-55.

6. Bimal K. Bose., (1997) Power electronics and variable frequency drives: technology and applications / edited by Bimal K. Bose // p.cm. Includes bibliographic references and index. - 659 p. ISBN 0-7803-1084-5
7. Michalski L., (1991) Temperature Measurement / L. Michalski, K. Eckersdorf and J. McGhee // Includes bibliographic references and index. - 496 p. ISBN 0-471-86779-9
8. Hall, Dennis T., (1999) Practical Marine Electrical Knowledge. Second edition. – London. – 225 p. ISBN 1-85609-182-1
9. Mateusz Blonski. (2010). Marine fuel heating system. Marine Systems Simulator (MSS).
10. Flexible dual fuel combustion by SAACKE Marine Systems for M/S Viking Grace. <http://www.saacke.com/ru/novosti-i-rekomendacii/novosti/flexible-dual-fuel-combustion-by-saacke-marine-systems-for-ms-viking-grace/>
11. Alva Laval: Documentation of FOPX Separation Systems and Modules. GMPSE Edition, book No. 1817254-02 V1
12. [http://faculty.ksu.edu.sa/Alhumaizi/Documents/GE501-Alhumaizi/CHAP02\\_ff.doc](http://faculty.ksu.edu.sa/Alhumaizi/Documents/GE501-Alhumaizi/CHAP02_ff.doc)
13. Czemplik, A., (2008): Modele dynamiki ukiadow fizycznych dla inżynierow. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
14. Hobler, T. (1979): Ruch ciepła i wymienniki. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
15. Sihromyatnikov V. F., (1989). Naladka avtomatiki sudovihkh ehnergeticheskikh ustanovok: Spravochnik. – L.: Sudostroenie. – 352 s. il. ISBN 5-7355-0084-8
16. Isaev E. O., (2013). Analiz sistem nechitkogo keryvannya sydnovumi electro-energetichnumu kompleksamu na prukladi sydnovux avtomatuchnux regylyatoriv temperatury. / E. O. Isaev, A. L. Simanenkova // Naykovuy visnuk Khersonskoi dergavnoi morskoi akademii : Naykovuy gyrnal : Vudavnuctvo HDMA №2 (9), - 300s., 35 - 41 ss.

**Симаненков А. Л., Рожков С. А., Тимофеев К. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЯЗКОСТИ ТЯЖЕЛЫХ ТОПЛИВ**

*Статья рассматривает особенности работы системы регулирования вязкости тяжелых топлив по динамической модели трубчатого парового теплообменника в подсистемах главного судового двигателя внутреннего сгорания.*

*Объектом исследования взят трубчатый паровой подогреватель фирмы Alfa-Laval. Задачей исследования является достижение стабильной температуры тяжелого топлива на выходе из теплообменника.*

*Исследуется математическая модель пароподогревателя, где определяются оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора подачи пара, по характеристикам замкнутой системы на границе устойчивости. При выводе передаточной функции осуществлен ряд допущений, о передаче тепла, параметров потока и термического сопротивления стенок труб парового подогревателя.*

*По результатам исследования выявлено, что для экспериментального определения коэффициента усиления и предельного периода колебаний достаточно провести несколько измерений, а по дискрименте угасания первой полученной кривой можно предположить близость коэффициента усиления до критического значения.*

**Ключевые слова:** топливоподготовка, моделирование систем автоматики, топливо, паровые теплообменники, контроль температуры.

**Simanenkova A. L., Rozhkov S. O., Tumofeev K. V. HEAVY FUELS VISCOSITY ADJUSTING SYSTEM MODELING**

*The article briefly considers the peculiarities of viscosity control systems on heavy fuel dynamic model of the tubular steam heat exchanger in the sub-systems of the main marine internal combustion engine.*

*In the analysis of the problem becomes apparent that the characteristics of the fuel delivered to ships and the characteristics specified in the certificate for it are different, thus automatic operation of the fuel preparation system becomes impossible. On this basis, a number of contemporary scholars are engaged in the studying of heat transfer processes in heavy fuel viscosity control systems. Their scientific works presented in [5, 7, 9].*

*In the main part of the paper an analysis of the dynamic properties of tubular steam heat exchangers is presented, as well as the derived transfer function of such heat exchanger.*

*For simulation of the fuel heating system in MatLab, the steam tube heat exchanger Alfa Laval manufacturer was taken as a basis.*



*Simulation results show that if in a closed system steady oscillations occur at the interface resistance, they will be the same frequency at the output of any unit of the system. For the experimental determination of the critical values of coefficients gain and the boundary of the oscillation period to conduct several measurements is sufficient.*

*During the experiment, in a mode of continuous wave was recorded:  $K_R \cdot kp = 12,5$  and  $T_{nn} = 4$  min. Thus obtained optimal controller settings was detected.*

**Keywords:** *fuel preparation, modeling automation systems, fuel, steam heat exchangers, temperature control.*

© Сіманенков А. Л., Рожков С. О., Тимофеев К. В.

Статтю прийнято  
до редакції 20.10.16