

УДК 004.942

С.В. ВОРОНЕНКО, О.В. СУББОТИН
Херсонська державна морська академія
Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО, Г.В. РУДАКОВА
Херсонський національний технічний університет

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУДОВОЮ КОМПЛЕКСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ ТУРБОКОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

Розглянуто вплив зовнішніх факторів на ефективність роботи системи керування судовою комплексною електроенергетичною турбокомпресорною установкою, в якій енергія відпрацьованих газів використовується безпосередньо для приводу газової турбіни, яка передає енергію на привід нагнітача або на привід генератора. Виконано аналіз ефективності турбокомпресорних систем в різних кліматичних умовах. Отримано модель комбінованої турбокомпресорної установки, що дозволяє проводити моделювання процесів у системі у будь-яких перехідних режимах та проводити аналіз ефективності систем керування, побудованих за різними принципами. На основі аналізу процесів, що відбуваються в турбокомпресорній системі в перехідних режимах роботи, можна оцінити ефективність певних регуляторів в мінливих кліматичних умовах. Для моделювання залежності зміни потужності морських дизельних установок від температури та вологості та залежності питомої витрати палива від температури зовнішнього повітря на вході низькооборотного дизеля та потужності двигуна були використані регресійні моделі. Проведено імітаційні експерименти за допомогою комп'ютерного моделювання дизельного двигуна з базовою версією звичайного турбокомпресора та із запропонованим гібридним з короткочасним накидом навантаженням 20% при різних значеннях вологості та температури навколишнього середовища. Як видно з результатів, підвищення температури і вологості погіршують ефективність дизельного двигуна і призводять до збільшення споживання палива, а використання додаткового наддування скорочує час перехідних режимів і, отже, зменшує втрати палива в таких випадках. Подальше підвищення ефективності роботи системи нагнітання можливе за рахунок зміни параметрів регулювання контуру регулювання додаткового нагнітання, тобто впровадження адаптивної системи керування комплексною електроенергетичною турбокомпресорною установкою.

Ключові слова: турбокомпресорна система; зовнішні фактори; імітаційне моделювання; система керування; судова енергетична установка.

С.В. ВОРОНЕНКО, А.В. СУББОТИН
Херсонская государственная морская академия
Ю.А. ЛЕБЕДЕНКО, А.В. РУДАКОВА
Херсонский национальный технический университет

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБОКОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Рассмотрено влияние внешних факторов на эффективность работы системы управления судовой комплексной электроэнергетической турбокомпресорной установкой, в которой энергия отработавших газов используется непосредственно для привода газовой турбины, передающей энергию на привод нагнетателя или на

привод генератора. Выполнен анализ эффективности турбокомпрессорных систем в различных климатических условиях. Получена модель комбинированной турбокомпрессорной установки. Эта модель позволяет проводить моделирование процессов в системе в любых переходных режимах и проводить анализ эффективности систем управления, построенных по разным принципам. На основе анализа процессов, происходящих в турбокомпрессорной системе в переходных режимах работы, можно оценить эффективность определенных регуляторов в меняющихся климатических условиях. Для моделирования зависимости изменения мощности морских дизельных установок от температуры и влажности и зависимости удельного расхода топлива от температуры наружного воздуха на входе низкооборотного дизеля и мощности двигателя были использованы регрессионные модели. Проведены имитационные эксперименты с помощью компьютерного моделирования дизельного двигателя с базовой версией обычного турбокомпрессора и с предложенным гибридным, с кратковременным набросом нагрузки 20% при различных значениях влажности и температуры окружающей среды. Как видно из результатов, повышенная температура и влажность ухудшают эффективность дизельного двигателя и приводят к увеличению потребления топлива, а использование дополнительного наддува сокращает время переходных режимов и, следовательно, уменьшает потери топлива в таких случаях. Дальнейшее повышение эффективности работы системы нагнетания возможно за счет изменения параметров регулирования контура регулирования дополнительного нагнетания, то есть внедрение адаптивной системы управления комплексной электроэнергетической турбокомпрессорной установкой.

Ключевые слова: турбокомпрессорная система; внешние факторы; имитационное моделирование; система управления; судовая энергетическая установка.

S.V. VORONENKO, O.V. SUBBOTIN
Kherson State Maritime Academy
YU.O. LEBEDENKO, H.V. RUDAKOVA
Kherson National Technical University

ANALYSIS OF THE CONTROL SYSTEM EFFICIENCY OF THE SHIP INTEGRATED ELECTRICITY INSTALLING TURBO WITH THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

The influence of external factors on the efficiency of the control system of a marine complex electric power turbocharger plant using exhaust gas energy directly to drive a gas turbine with the subsequent transfer of energy to the drive of the supercharger or to the drive of the generator is considered. The analysis of the efficiency of turbocharger systems in different climatic conditions is carried out. A model of a combined turbocharger unit has been obtained, which allows modeling processes in the system in any transient modes and analyzing the effectiveness of control systems built according to different principles. Based on the analysis of the processes occurring in the turbocharger system in transient operating modes, it is possible to evaluate the effectiveness of certain regulators in changing climatic conditions. Regression models were used to simulate the dependence of the change in the power of marine diesel installations on temperature and humidity and the dependence of the specific fuel consumption on the temperature of the outside air at the inlet of a low-speed diesel engine and engine power. Simulation experiments were carried out using computer modeling of a diesel engine with a basic version of a conventional turbocharger and with the proposed hybrid, with a short-term load surge of 20% at various values of humidity and

ambient temperature. As can be seen from the results, higher temperature and humidity deteriorate the efficiency of the diesel engine and lead to increased fuel consumption, and the use of additional boost reduces the transient times and, therefore, reduces fuel losses in such cases. A further increase in the efficiency of the pumping system is possible by changing the control parameters of the additional pumping control loop, that is, the introduction of an adaptive control system for an integrated electric power turbocharger unit.

Keywords: turbocharger system; additional supercharging circuit; simulation modeling; control system; marine power plant.

Постановка проблеми

В даний час для підвищення ефективності суднових енергетичних установок (СЕУ) широко застосовуються системи відбору тепла відпрацьованих газів [1]. Одним з перспективних напрямків утилізації тепла відпрацьованих газів є використання турбокомпресорних систем, у яких енергія відпрацьованих газів використовується безпосередньо для приводу газової турбіни, що передає енергію на привод компресора наддуву або на привод електрогенератора [2]. Однак, на роботу такого складного комплексу, як суднова комплексна електроенергетична турбокомпресорна установка (СКЕЕТКУ), суттєво впливають зовнішні фактори, що може спричинити проблеми з підтриманням високої економічності та ефективності комплексного використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) суднової енергетичної установки (СЕУ) в зв'язку з невідповідністю налаштування параметрів систем керування. Тому необхідно виконати аналіз ефективності роботи СКЕЕТКУ в різних кліматичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Отримана модель СКЕЕТКУ [3] дозволяє здійснювати моделювання процесів в системі при будь-яких перехідних режимах та проводити аналіз ефективності систем керування, побудованих за різними принципами. При побудови математичної моделі СКЕЕТКУ як об'єкту керування розглянуто взаємозв'язки між окремими складовими компонентами комплексу (рис. 1) [4].

До складу комплексу входять окремі підсистеми:

- головна (дизельна) енергетична установка (ГЕУ) з турбонаддувом, у склад якої входять головний двигун (ГД), турбокомпресор (ТК), впускний та випускний трубопроводи (ВпТП та ВиПТП);

- система автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧО) валу головного двигуна, яка призначена для стабілізації (підтримання) частоти обертання валу головного двигуна на певному (заданому) значенні;

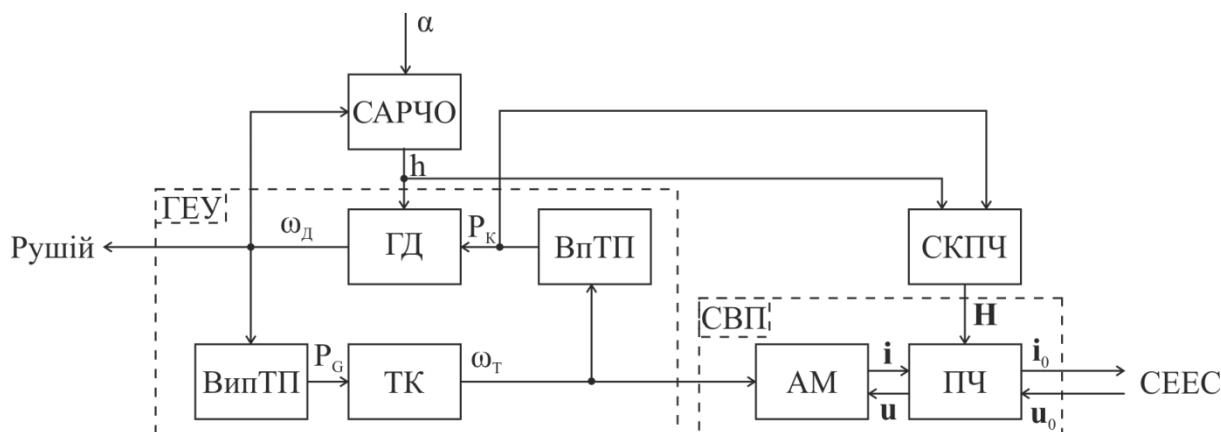


Рис. 1. Схема взаємозв'язків між складовими компонентами СКЕЕТКУ.

- система відбору потужності (СВП), в якій як генератор, на відміну від відомих розробок [5], використано асинхронну машину (АМ) з масивним ротором, яка (за потребою) може бути перемкнута у режим двигуна завдяки застосуванню належного перетворювача частоти (ПЧ) зі власною системою керування (СКПЧ).

Для дослідження ефективності застосування гібридної турбокомпресорної установки шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі імітаційного моделювання [6] складено блок-схему моделі СКЕЕТКУ рис. 2).

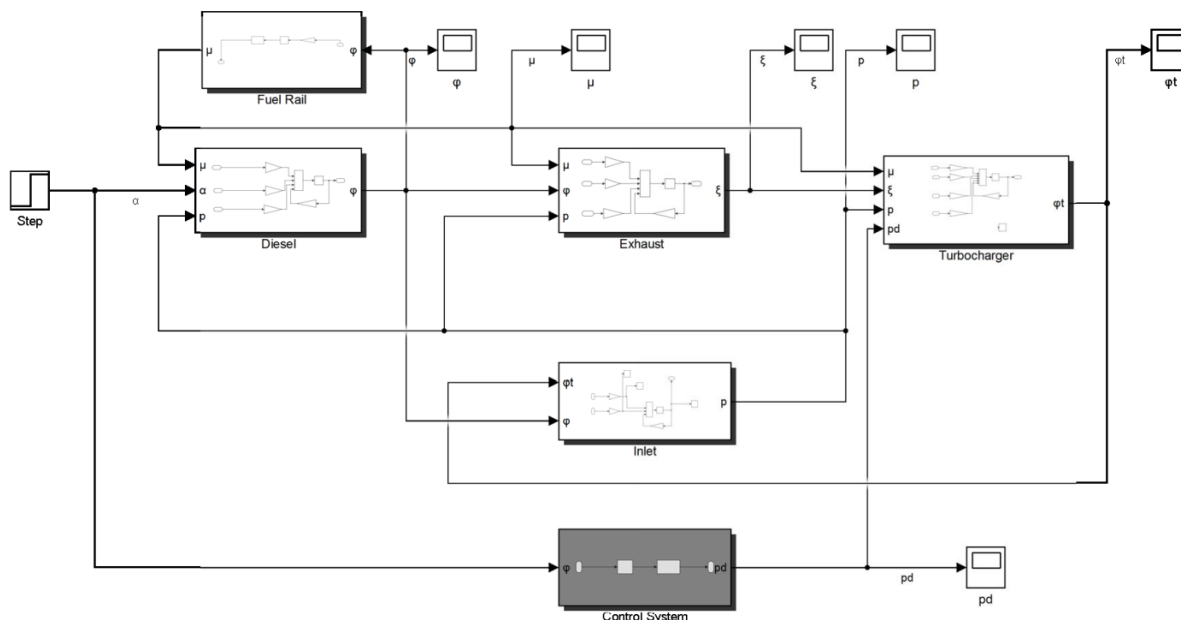


Рис. 2. Загальний вигляд моделі з гібридним турбокомпресором.

Блок-схеми окремих підсистем моделі показано на рис. 3.

Математична модель СКЕЕТКУ, яка будується з розглянутих моделей компонентів, надає можливість аналізувати процеси, що протікають в системі шляхом здійснення імітаційного моделювання роботи СКЕЕТКУ для реальної суднової установки, не тільки в різних режимах роботи, а й при зміні кліматичних умов.

Мета дослідження

Метою досліджень є аналіз процесів, що протікають в СКЕЕТКУ в перехідних режимах роботи, та оцінка ефективності застосування певних регуляторів при змінах кліматичних умов.

Викладення основного матеріалу дослідження

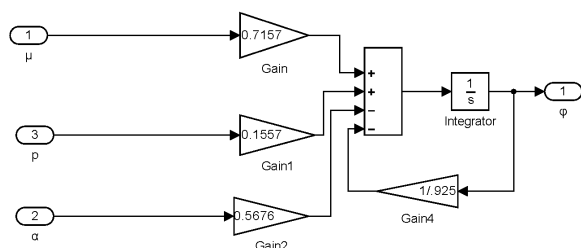
Протягом рейсу температури зовнішнього повітря $t_{ЗП}$ і забортної води, що охолоджує наддувне повітря після ТК, змінюються дуже істотно [7]. Згідно зі статистичними даними, найбільш ймовірний діапазон зміни параметрів навколишнього середовища становить:

- температура охолоджуючої води t_0 від 20 до 40 ° С;
- атмосферний тиск $p_0 = 660-775$ мм рт. ст. ;
- відносна вологість $\psi = 0,35-1$;
- температура зовнішнього повітря $t_{ЗП0} = 5-30$ ° С.

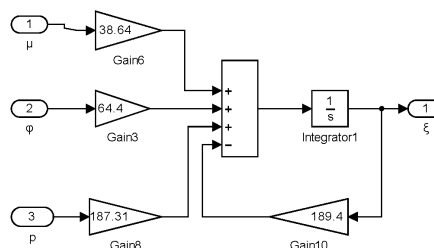
Згідно ГОСТ Р 525217-2005 (ISO 3046-1: 2002) [8] нормальними умовами є наступні:

- атмосферний тиск $p_{н.у} = 100$ кПа (760 мм рт. ст.);

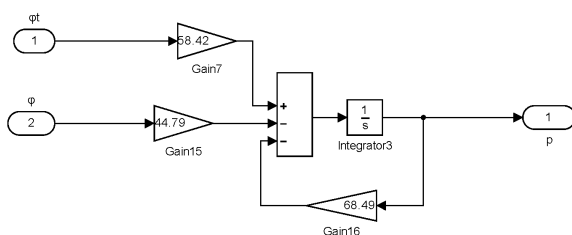
- температура навколишнього повітря $T_{н.у} = 298 \text{ K} (25^\circ \text{ C})$;
- температура охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувач $T_{с_{н.у}} = 298 \text{ K} (25^\circ \text{ C})$;
- відносна вологість $\psi_{н.у} = 0,3$.



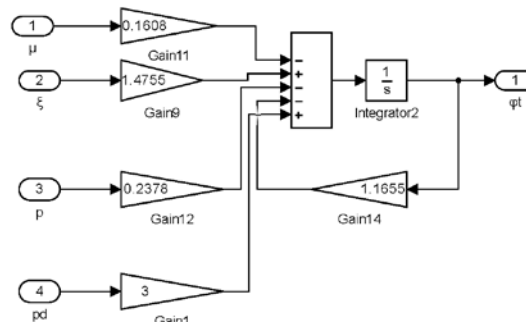
а) Модель дизеля



б) Модель випускного колектора



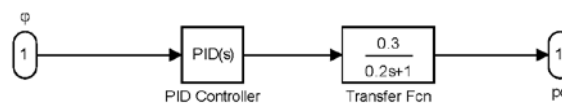
в) Модель впускного колектора



г) Модель гібридного турбокомпресора



д) Модель паливної рейки



е) Модель системи керування

Рис. 3. Моделі підсистем СКЕЕТКУ.

1. Урахування впливу кліматичних умов на параметри пропульсивного комплексу.

Номінальна потужність дизеля гарантується виробником при певних атмосферних умовах:

- температурі повітря $t_{п0} = 20^\circ \text{ C}$,
- атмосферному тиску $P_{a0} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ і
- відносній вологості повітря $\varphi_0 = 50 \%$.

Однак в умовах експлуатації температура в машинному відділенні змінюється від $+15^\circ \text{ C}$ до $+45^\circ \text{ C}$ при відносній вологості $\varphi = 70..100 \%$. Зміна атмосферного тиску істотного впливу не надає [7]. Залежності зміни потужності суднових дизельних установок від температури і вологості показано на рис. 4, а [7].

В [9] наведено аналітичну залежність (див. рис. 4, б) відносної потужності дизеля $k_N = N_e / N_{enom}$ від температури $t_{п}$, $^\circ \text{ C}$, і вологості φ , $\%$, навколишнього середовища виду

$$k_N = 1.084 - \frac{0.008 \cdot \varphi}{100} - 0.004 \cdot t_{п}, \quad (1)$$

де N_e – фактичне значення потужності двигуна; $N_{енот}$ – номінальна потужність двигуна, яка гарантується виробником при певних атмосферних умовах.

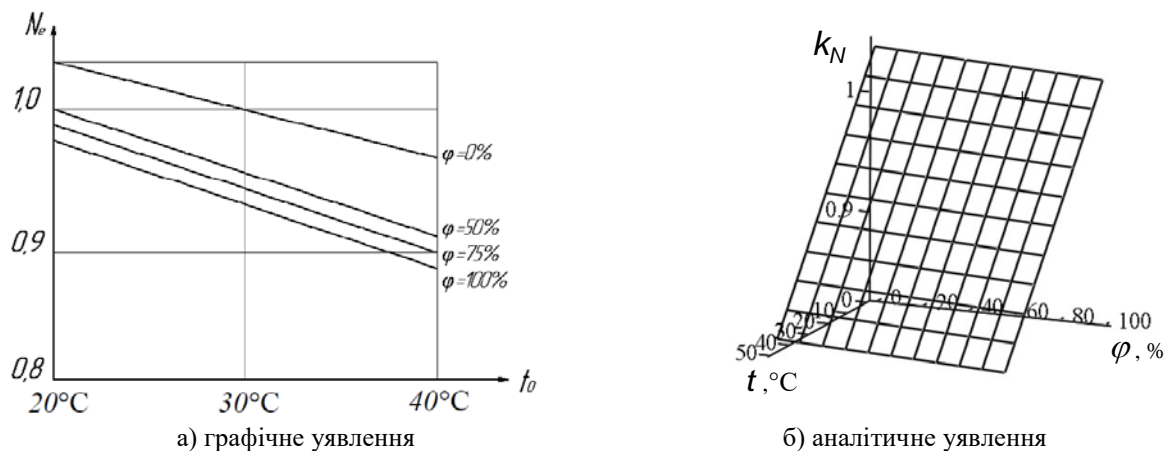


Рис. 4. Вплив параметрів навколишнього середовища на потужність суднової дизельної установки.

Задаючи певні значення температури та вологості з діапазону можливих змін параметрів навколишнього середовища в нормальних умовах експлуатації дизеля за допомогою рівняння (1) можна отримати поправочний коефіцієнт для урахування в процесі здійснення моделювання зміни потужності дизеля.

2. Залежність витрати палива від температури зовнішнього повітря.

Умови плавання не зберігаються незмінними протягом всього рейсу. Ця обставина може вплинути на реальні витрати палива. Наприклад [10], зміна барометричного тиску на ± 20 мм рт. ст. (0,026 МПа) призводить до зміни індикаторної потужності на $\pm 3-4\%$. Зміна температури зовнішнього повітря на ± 15 °C викликає зміну індикаторної потужності на $\pm 3-4\%$. Зміна відносної вологості повітря на $\pm 30\%$ при температурі повітря 25-40 ° C викликає зміну індикаторної потужності на $\pm 3-6\%$. З огляду на ці факти дизель в тропіках може втратити до 10-12% потужності.

В умовах експлуатації змінюються параметри атмосферного повітря: температура, вологість, атмосферний тиск. Вони мають сезонний характер і можуть змінюватися протягом доби [10]. З підвищенням температури зовнішнього повітря, відповідно і повітря в машинному відділенні (МВ) на вході наддувного турбокомпресора (ТК) суднового малообертового двигуна (МОД) його паливна ефективність погіршується Так, зі збільшенням на 10°C температури зовнішнього повітря на вході МОД питома витрата палива g_e зростає на 0,5 ... 0,7% [11]. Залежність питомої витрати умовного палива g_e від температури зовнішнього повітря t_{II} на вході МОД та потужності двигуна наведено на рис. 5, а.

Для урахування впливу температури зовнішнього повітря на витрати палива доцільно застосовувати регресійні моделі [12]. В результаті розрахунків отримано наступні вирази для кожного графіка на рис. 5, а, а саме:

- для $N_e = 0,75$

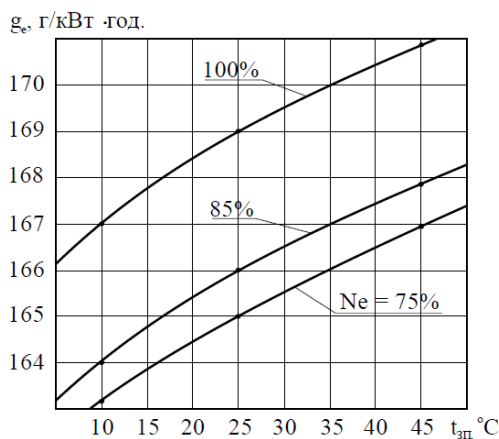
$$g_e = 161.8 + 0.140t_n - 0.000576t_n^2; \quad (2)$$

- для $N_e = 0,85$

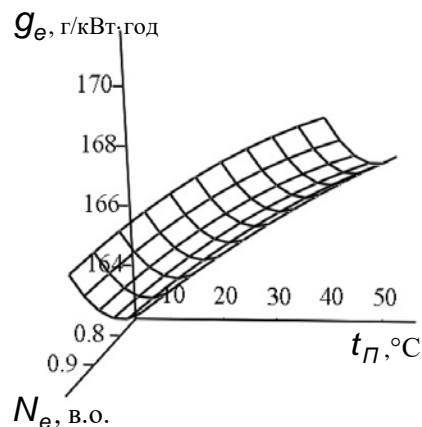
$$g_e = 162.5 + 0.163t_n - 0.000977t_n^2; \quad (3)$$

- для $N_e = 1,0$

$$g_e = 165.4 + 0.169t_n - 0.001053t_n^2. \quad (4)$$



а) графічне подання



б) аналітичне подання

Рис. 5. Залежність питомої витрати умовного палива МОД від температури зовнішнього повітря та потужності двигуна.

Якщо здійснити апроксимацію коефіцієнтів рівнянь (2)–(4), можна отримати наступне регресійне рівняння, яке дозволяє адекватно описати залежність питомої витрати умовного палива МОД від температури зовнішнього повітря та потужності, що розвиває дизель, у вигляді

$$g_e = b_0(N_e) + b_1(N_e)t_n + b_2(N_e)t_n^2, \quad (5)$$

де

$$b_0(N_e) = 188 - 71.9N_e + 49.3N_e^2;$$

$$b_1(N_e) = -0.517 + 1.446N_e - 0.76N_e^2;$$

$$b_2(N_e) = 0.011365 - 0.0264N_e + 0.01401N_e^2.$$

Поверхню отриманої залежності (5), яка апроксимує графіки, наведені на рис. 5,а у всьому робочому діапазоні зміни значень температури зовнішнього повітря та потужності двигуна, наведено на рис. 5,б.

Таку регресійну модель можна використати при проведенні імітаційного експерименту роботи СКЕЕТКУ при різних зовнішніх умовах для оцінювання обсягу витрат палива.

3. Імітаційні експерименти з комп'ютерною моделлю.

Вплив зовнішніх факторів на роботу дизеля досліджувався на прикладі двигуна типу 6 ЧН 15/18 [13]. Результати моделювання роботи дизеля із базовим варіантом звичайного турбокомпресора та із пропонуванім гібридним при короткочасному накиді навантаження на 20% наведені на рис. 6 та рис.7.

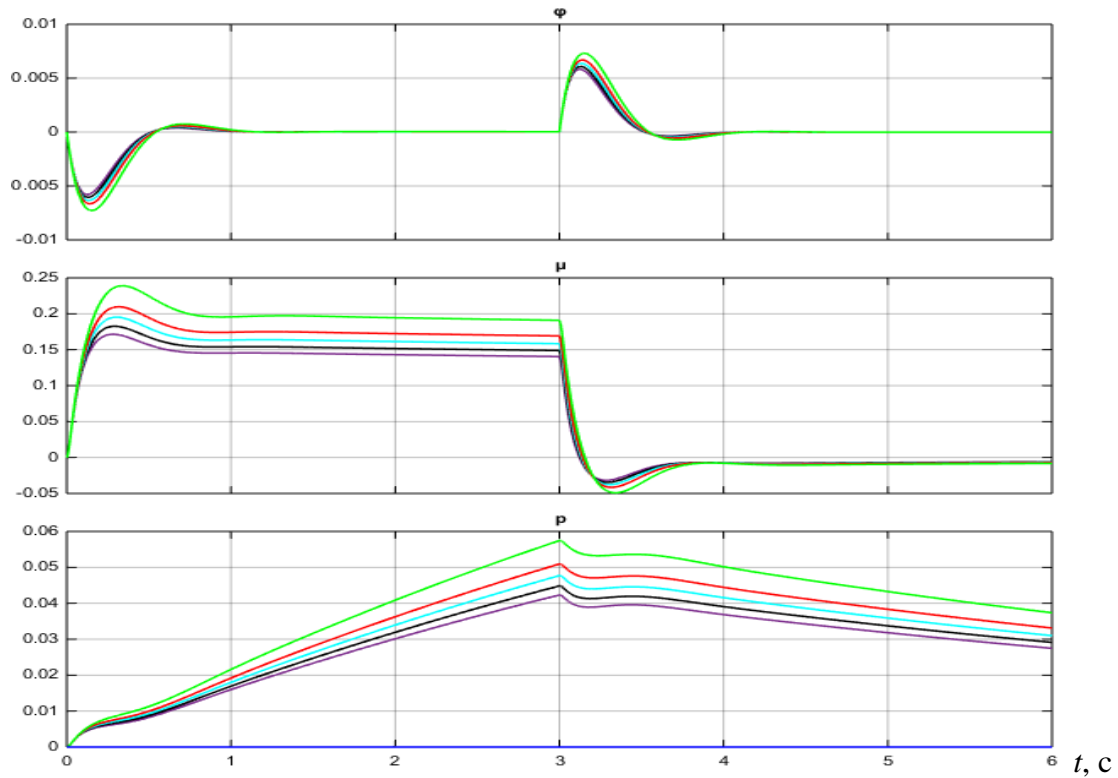


Рис. 6. Швидкість обертання валу φ , зміна положення паливної рейки μ та зміна тиску надвугного повітря p дизеля із звичайним ТК при вологості 50% та різній температурі:
 — 5°C, — 20°C, — 35°C, — 50°C, — 75°C.

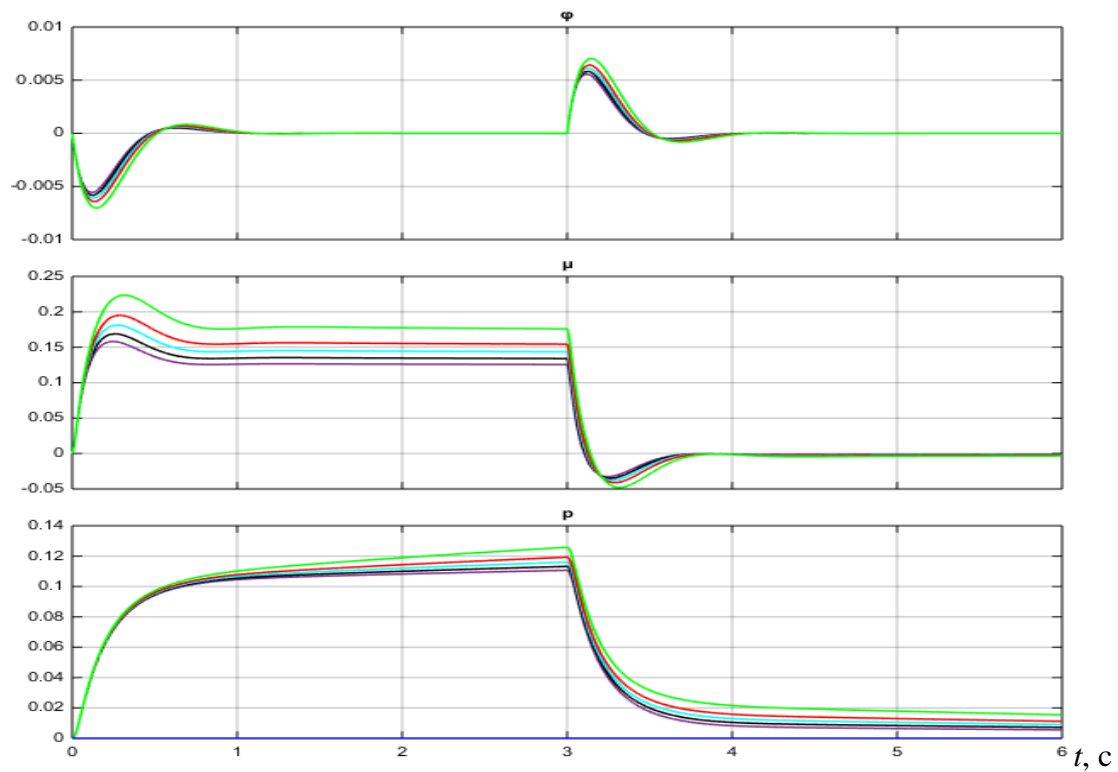


Рис. 7. Швидкість обертання валу φ , зміна положення паливної рейки μ та зміна тиску надвугного повітря p дизеля із гібридним ТК при вологості 50% та різній температурі:
 — 5°C, — 20°C, — 35°C, — 50°C, — 75°C.

Для моделювання експлуатації дизеля в різних кліматичних умовах в комп'ютерній моделі (рис. 3,а) враховано зміну відносної потужності в залежності від температури та вологості зовнішнього повітря, шляхом введення коефіцієнту відносної потужності дизеля k_N згідно з виразом (1).

В табл. 1 для різних значень температури та вологості, окрім приросту споживання палива при короткочасному накиді навантаження, представлено відносну потужність дизеля k_N згідно (1) та відносну питому витрату умовного палива $\overline{g_e}$, що визначається як відношення витрати палива при певних експлуатаційних умовах до витрати в нормальних умовах.

Таблиця 1

Показники ефективності при різних експлуатаційних умовах

Відносна вологість повітря $\varphi_0, \%$	Температура повітря $t_{п0}, ^\circ\text{C}$	Відносна потужність дизеля k_N	Відносна питома витрата умовного палива $\overline{g_e}$	Приріст відносної витрати палива при накиді 20% навантаження		
				Звичайний ТК	Гібридний ТК	Зміна
50	5	1,060	0,983	0,0697	0,0627	0,007
	20	1,000	1,000	0,0739	0,0669	0,007
	35	0,940	1,017	0,0786	0,0716	0,007
	50	0,880	1,031	0,0840	0,0769	0,007
	75	0,780	1,050	0,0947	0,0877	0,007
70	5	1,058	0,982	0,0698	0,0628	0,007
	20	0,998	1,000	0,0740	0,0670	0,007
	35	0,938	1,017	0,0787	0,0717	0,007
	50	0,878	1,031	0,0841	0,0771	0,007
	75	0,778	1,050	0,0949	0,0879	0,007
90	5	1,057	0,982	0,0699	0,0629	0,007
	20	0,997	1,000	0,0741	0,0671	0,007
	35	0,937	1,016	0,0789	0,0718	0,007
	50	0,877	1,031	0,0843	0,0772	0,007
	75	0,777	1,050	0,0951	0,0881	0,007

Висновки

Підвищення ефективності суднових енергосистем можливе за рахунок впровадження новітніх систем відбору тепла відпрацьованих газів за умовою застосування належних систем керування. Проведення імітаційного експерименту підтверджує ефективність запропонованих конструктивних рішень.

Отримана модель СКЕЕТКУ дозволяє здійснювати моделювання процесів в системі при будь-яких перехідних режимах і зовнішніх умовах та проводити аналіз ефективності систем керування, побудованих за різними принципами.

Як видно з отриманих результатів, підвищення температури та вологості погіршують ефективність роботи дизеля та призводять до збільшення витрати палива, причому застосування додаткового наддуву дозволяє зменшити час перехідних режимів та, як наслідок, зменшити втрати палива у таких випадках. Подальше підвищення ефективності роботи системи наддуву можливе за рахунок зміни

параметрів налаштування контуру регулювання додаткового наддуву, тобто впровадження адаптивної системи керування.

Така адаптивна СКЕЕТКУ має змінювати параметри налаштування регулятора додаткового наддуву в залежності від збурюючих впливів, спираючись на певний критерій оптимальності. Таким чином, наступним етапом дослідження є формулювання такого критерію, з подальшими постановкою та розв'язанням задачі оптимального керування.

Список використаної літератури

1. Седаков Л. П., Баракан Г. Х., Калинина Л. И. Резервы повышения экономичности современных судовых дизельных энергетических установок. *Судостроение*. 1987. № 11. С. 20–25.
2. Рябенкий М. В., Короленко О. В., Вороненко С. В., Короленко С. О. Головной двигатель та суднова генераторна система в когенераційній установці судна. Електротехнічні та комп'ютерні мережі. 2017. №26(102). С.9-16.
3. Вороненко С. В., Субботін О. В., Лебеденко Ю. О., Рудакова Г. В. Моделювання суднової комплексної електроенергетичної турбокомпресорної установки в перехідних режимах. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2019. Т. 2. № 2. С. 13–22. DOI: 10.32782/2618-0340/2019.2-2.1.
4. Вороненко С. В., Іщенко І. М., Рудакова Г. В., Лебеденко Ю. А. Математична модель суднової комплексної електроенергетичної турбокомпресорної установки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. № 2 (69). Частина 2. С. 31–38.
5. Shiraishi K., Ono Y., Sugishita K. Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2010. Vol. 47. № 3. P. 53–58.
6. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.
7. Суворов П. С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексі. Одеса: ОНМА, 2004. 304 с.
8. ISO 3046-1:2002. Reciprocating internal combustion engines. Performance. Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods. Additional requirements for engines for general use. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200043283>.
9. Худяков И. В., Рудакова А. В., Клевцов Н. К. Моделирование влияния внешних условий при анализе динамики судна в ходовых режимах. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. №3 (62). Т. 2. С. 229–233.
10. Соболенко А. Н., Симашов Р. Р., Глазюк Д. К., Маницын В. В. Определение расхода топлива и моторного масла судовыми дизелями с учетом изменения внешних условий эксплуатации. *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*. 2017. № 3. С. 62–73.
11. Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines / MAN Diesel & Turbo. – Copenhagen, Denmark:MAN Diesel. 2010. 17 p. URL: <http://www.mandieselturbo.com>.MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-V-TII engines / Copenhagen, Denmark: MAN.
12. Киричков В. Н. Автоматика и управление в технических системах. В 11-ти кн. Кн. 2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами. Под ред. А.А. Краснопрошиной. Київ: Вища шк. 1990. 263 с.
13. Марков В. А., Поздняков Е. Ф., Фурман В. В., Плахов С. В. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя.

Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 7. С. 35–46. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-7-35-46.

References

1. Sedakov, L. P., Barakan, G.H., & Kalinina, L.I. (1987). Rezervyi povyisheniya ekonomichnosti sovremennyih sudovyih dizelnyih energeticheskikh ustanovok. *Sudostroenie*. **11**, 20–25.
2. Riabenkyi, M. V., Korolenko, O. V., Voronenko, S. V., & Korolenko Ye. O. (2017). Holovnyi dvyhun ta sudnova heneratorna systema v koheneratsiinii ustanovtsi sudna. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni merezhi*. **26**, 9-16.
3. Voronenko, S. V., Subbotin, O. V., Lebedenko, Yu. O., & Rudakova, H. V. (2019). Modeliuvannya sudnovoi kompleksnoi elektroenerhetychnoi turbokompresornoii ustanovky v perekhidnykh rezhymakh. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*. **2**, 2, 13–22. DOI: 10.32782/2618-0340/2019.2-2.1.
4. Voronenko, S. V., Ishchenko, I. M., Rudakova, H. V., & Lebedenko, Yu. A. (2019). Matematychna model sudnovoi kompleksnoi elektroenerhetychnoi turbokompresornoii ustanovky. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. **69**, 2, 31–38.
5. Shiraishi, K., Ono, Y., & Sugishita, K. (2010). Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. **47**, 3, 53-58.
6. Dyakonov, V. P. (2005). MATLAB 6.5 SP1/7 Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii. Seriya «Biblioteka professionala». M.: SOLON-Press.
7. Suvorov, P. S. (2004). Dinamika dizelya v sudovom propulsivnom komplekse. Odessa: ONMA.
8. ISO 3046-1:2002. Reciprocating internal combustion engines. Performance. Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods. Additional requirements for engines for general use. Retrieved from: <http://docs.cntd.ru/document/1200043283>.
9. Hudyakov, I. V., Rudakova, A. V., & Klevtsov, N. K. (2017). Modelirovanie vliyaniya vneshnih usloviy pri analize dinamiki sudna v hodovyih rezhimakh. *Visnyk Hersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. **62**, 3(2), 229–233.
10. Sobolenko, A. N., Simashov, R. R., Glazyuk, D. K., & Manitsyin, V. V. (2017). Opredelenie rashoda topliva i motornogo masla sudovymi dizelyami s uchetom izmeneniya vneshnih usloviy ekspluatatsii. *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tehnika i tehnologiya*. **3**, 62–73.
11. Influence of Ambient Temperature Conditions. (2010). Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines / MAN Diesel & Turbo. – Copenhagen, Denmark:MAN Diesel. Retrieved from: <http://www.mandieselturbo.com>.MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines / Copenhagen, Denmark: MAN.
12. Kirichkov, V. N. (1990) Avtomatika i upravlenie v tehniceskikh sistemah. Identifikatsiya ob'ektov sistem upravleniya tehnologicheskimi protsessami. Kyiv: Vyscha shk.
13. Markov, V. A., Pozdnyakov, E. F., Furman, V. V., & Plahov, S .V. (2019). Modelirovanie sistemyi avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrascheniya dizelnogo dvigatelya. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Mashinostroenie*. **7**, 35–46. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-7-35-46.

Вороненко Сергій Вікторович – викладач кафедри «Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3880-9556.

Субботін Олександр Володимирович – асистент кафедри «Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії, e-mail: orion20121963@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1220-3695.

Лебеденко Юрій Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: lebedenko@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.

Рудакова Ганна Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: rudakovaanna25@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8053-4218.