

УДК 629.12.066(076)

А.Л. СИМАНЕНКОВ, С.О. РОЖКОВ  
Херсонська державна морська академія**МОДЕЛЮВАННЯ СУДНОВОГО ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗА ЙОГО ІНДИКАТОРНОЮ ДІАГРАМОЮ**

У статті розглянуті основні процеси, що протікають у судовому двотактному двигуні внутрішнього згоряння, за його індикаторною кривою. На основі аналізу індикаторної діаграми побудовано математичну модель двигуна, яка дозволяє враховувати вплив характеристик палива на роботу дизеля при управлінні по кожному паливному заряду циліндра. Результати моделювання дозволяють описати один з найскладніших режимів судового двигуна внутрішнього згоряння – запуск двигуна. Розроблено алгоритм та схему моделювання одноциліндрового двотактного двигуна внутрішнього згоряння. Для моделювання та оптимізації управління судовим дизелем необхідна розробка адаптивної моделі системи підготовки палива, як такої, що враховує характеристики та властивості палива, яке подається до двигуна.

Ключові слова: математична модель, судовий двигун внутрішнього згоряння, система автоматичного контролю, багатопараметричний регулятор.

А.Л. СИМАНЕНКОВ, С.О. РОЖКОВ  
Херсонская государственная морская академия**МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО ЕГО ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ**

В статье рассмотрены основные процессы, протекающие в судовом двухтактном двигателе внутреннего сгорания, по его индикаторной кривой. На основе анализа индикаторной диаграммы построена математическая модель двигателя, которая позволяет учитывать влияние характеристик топлива на работу дизеля при управлении по каждому топливному заряду цилиндра. Результаты моделирования позволяют описать один из самых сложных режимов судового двигателя внутреннего сгорания – запуск двигателя. Разработан алгоритм и схема моделирования одноцилиндрового двухтактного двигателя внутреннего сгорания. Для моделирования и оптимизации управления судовым дизелем предлагается дальнейшая разработка адаптивной модели системы подготовки топлива, которая учитывает характеристики и свойства топлива, подаваемого к двигателю.

Ключевые слова: математическая модель, судовой двигатель внутреннего сгорания, система автоматического контроля, многопараметрический регулятор.

А.Л. СИМАНЕНКОВ, С.О. РОЖКОВ  
Kherson state marine academy**SHIP TWO-STROKE INTERNAL COMBUSTION ENGINE MODELING ON ITS INDICATOR DIAGRAM BASIS**

Article considers constructing of two-stroke internal combustion engine mathematical model and also, the analysis of model's work with fuel preparation system accounting. For the construction of a mathematical model of MICE, a single-cylinder two-stroke low-speed engine model has been used. The shaft of the engine, connected directly with the crank mechanism, carries out rotational movements at a fixed phase distribution. In the process of compression in the cylinder increases the brake torque, whose magnitude is related to the angle of the shaft rotation. The second, working phase, is related to the identity of the moment created by the gas pressure in the cylinder with the direction of crank mechanism motion. Additional energy, which is fed by fuel at the time of combustion, accelerates the movement of the engine shaft. The injection and combustion phase coincides with the beginning of the working stage of the movement. By the end of the working phase, the purging of the cylinder and the reception of a new air charge is carried out. After that, the compression cycle begins again. A mathematical model of processes in a cylinder of a two-stroke engine is constructed, taking into account the analytical dependencies of these processes. The developed model allows to proceed to the simulation of a multi-cylinder MICE, a compatible model of single-cylinder diesel engines taking into account the phases of gas distribution and engines flywheel.

The simulation results allow one of the most complex moments engine start to be described. The start-up process for a single cylinder engine is more complex than for a multi-cylinder and the proposed model makes it easy to increase the number of cylinders.

*For a complete analysis of the processes occurring in the MICE, description of one of the processes using linear dynamic links is not enough. It is necessary to build a complete mathematical model using modern information technology techniques. The mathematical model of the MICE is individual and requires the consideration of the indicator curves of a particular engine. In this case it is necessary to consider the engine as a quasistationary object and periodically perform identification of the model parameters. The developed mathematical model allows simulate processes, including motion and processes within the limits of one rotation of the engine shaft. In spite of the model's non-linearity, its structure is simple and the mathematical model is sufficient for the management of the MICE. The developed model allows to take into account not only the features of a particular MICE, but also the influence of fuel characteristics, taking into account the control of each fuel cylinder charge and fuel properties. The basis for the model of the engine indicator curves for identification should be specified. It allows to realize a reliable engine motion forecast when changing the load and control. In order to simulate and optimize the MICE control, it is necessary to take into account the properties and characteristics of the fuel supplied to the engine, which requires the development of a mathematical model of the fuel preparation system.*

*Keywords: mathematical model, ship internal combustion engine, automatic control system, multiparametric controller.*

### **Постановка проблеми**

Математична модель об'єкта управління є основою створення оптимальної системи управління. При ідентичності реальних процесів об'єкта управління та математичного опису моделі досягається основне завдання побудови математичної моделі – її адекватність об'єкту управління. Для такої складної теплової машини, як судновий двотактний двигун внутрішнього згоряння (СДВЗ), математична модель повинна орієнтуватися на процеси, що проходять у циліндрі двигуна. Використання моделі динаміки двигуна, як лінійної ланки першого або другого порядку, дозволяє оцінити тільки залежність швидкості обертання вала двигуна від подачі палива. Відомі термодинамічні моделі недостатні для управління в перехідних режимах та діагностики технічного стану дизеля, а усталений режим роботи розглядається в окремій робочій точці [1, 3, 14].

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Аналіз сучасних тенденцій автоматизації дозволяє звернути увагу на практичні зміни типів систем автоматичного регулювання та управління [12]. На зміну аналоговим регуляторам в практику управління прийшли цифрові регулятори та управляючі локальні мережі. Дана зміна торкнулася не тільки самого судна, але і в значній мірі змінила характер роботи обслуговуючого персоналу. Основне місце зайняла діагностика стану систем регулювання та управління [4, 5, 9].

При цьому існує цілий ряд проблем, пов'язаних з управлінням режимами роботи судових енергетичних установок та маневрування судів. У цих режимах погіршується якість управління, з'являються коливання об'єкта управління та значні зниження потужності у часі, що викликає збільшення витрат палива і, як наслідок, зниження ефективності роботи всього силового устаткування [11].

### **Мета дослідження**

Метою статті є побудова математичної моделі суднового двотактного двигуна внутрішнього згоряння і аналіз її роботи з урахуванням системи підготовки палива.

### **Викладання основного матеріалу дослідження**

Для побудови математичної моделі СДВЗ розглянемо модель одноциліндрового двотактного низькооборотного двигуна [11, 16]. Вал двигуна, пов'язаний безпосередньо з кривошипно-шатунним механізмом, здійснює обертальні рухи при фіксованому розподілі фаз. В процесі стиску в циліндрі збільшується гальмівний момент, величина якого пов'язана з кутом повороту вала. Друга, робоча фаза, пов'язана з ідентичністю моменту, що створюється тиском газу в циліндрі з напрямком руху кривошипно-шатунного механізму. Додаткова енергія, яка вноситься паливом у момент горіння, прискорює рух вала двигуна. Фаза упорскування і горіння палива співпадає з початком робочого етапу руху. До моменту закінчення робочої фази проводиться продувка циліндра і прийом нового заряду повітря, після чого починається цикл стиску.

Індикаторна діаграма індивідуально відповідає кожному циліндру СДВЗ і змінюється з часом. Але основна її властивість – це збереження вигляду залежностей для всіх двохтактних дизелів, де змінюються лише параметри залежностей, які описують процеси у циклах. Отже, для побудови моделі можна використовувати дані, отримані для конкретного двигуна, а в процесі експлуатації двигуна уточнити параметри моделі, використовуючи методи параметричної ідентифікації динамічних систем.

Індикаторну діаграму двигуна 6L35MC наведено на рис. 1 [2].

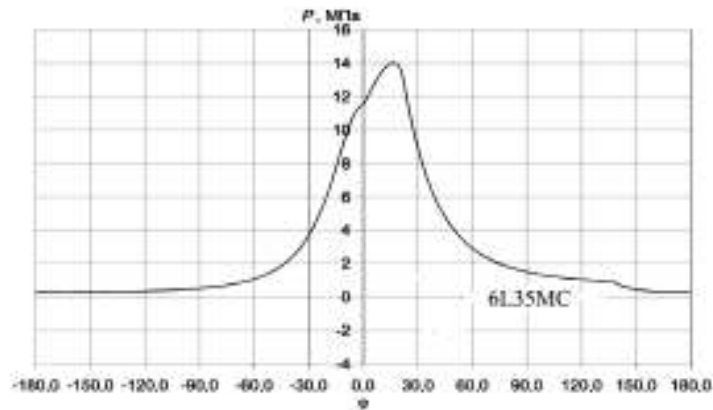


Рис. 1. Індикаторна діаграма ДВС типу 6L35MC

Для фази стиску (рис. 1) гілка індикаторної кривої дозволяє побудувати модель процесу зміни тиску в циліндрі залежно від кута повороту валу (рис. 2, а).

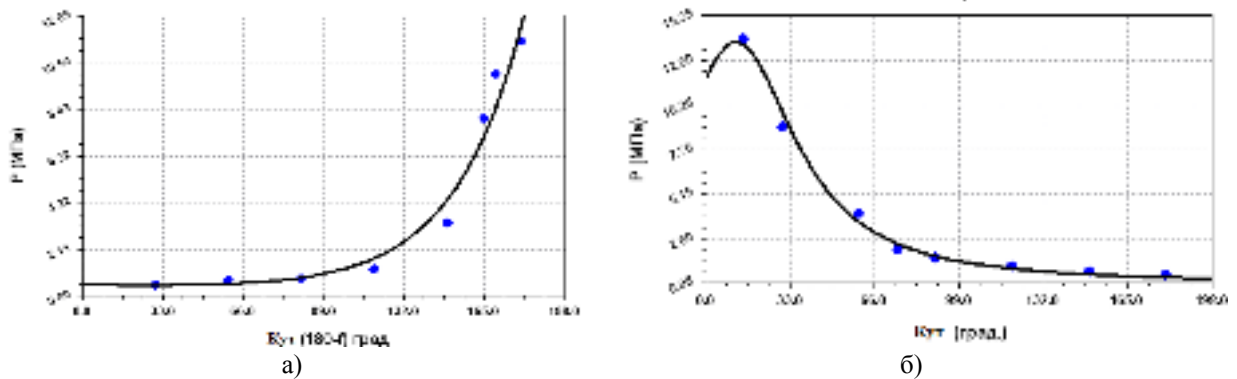


Рис. 2. Гілки фаз індикаторної діаграми: а) фаза стиску; б) робоча фаза

При побудові аналітичної залежності тиску в циліндрі від кута отримано наступне співвідношення:

$$P(\varphi) = 0,5 + 0,002\varphi + 11,4e^{0,04(\varphi-178,5)} \tag{1}$$

Гілку робочої фази індикаторної діаграми наведено на (рис. 2, б).

Після апроксимації отримано аналітичне вираження залежності тиску в циліндрі від кута повороту для робочої фази:

$$P(\varphi) = \frac{1}{9 \cdot 10^{-5} \varphi^2 + 0,002\varphi - 0,09} \tag{2}$$

Враховуючи залежності (1) та (2), будемо математичну модель процесів у циліндрі двотактного двигуна. Укрупнений алгоритм моделювання СДВЗ показано на рис. 3, де на першому кроці алгоритму моделювання визначається стан СДВЗ.

Якщо двигун не запущений, то формується момент на колінчатому валу, що приводить до руху поршневу групу. Після цього визначається положення колінчатого валу та фази. Під час фази стиснення визначається тиск у циліндрі та обчислюється момент на валу. На наступному етапі визначається момент корисного навантаження на валу та швидкість вала двигуна з використанням математичної моделі руху махових мас. Після закінчення цього циклу збільшується час і кут повороту вала. Якщо двигун набрав оберти, здійснюється зняття пускового моменту з вала та перехід до робочого режиму двигуна. Після закінчення циклу стиску, з моменту початку впровадження, програма моделювання переходить на другу гілку, що моделює робочу фазу.

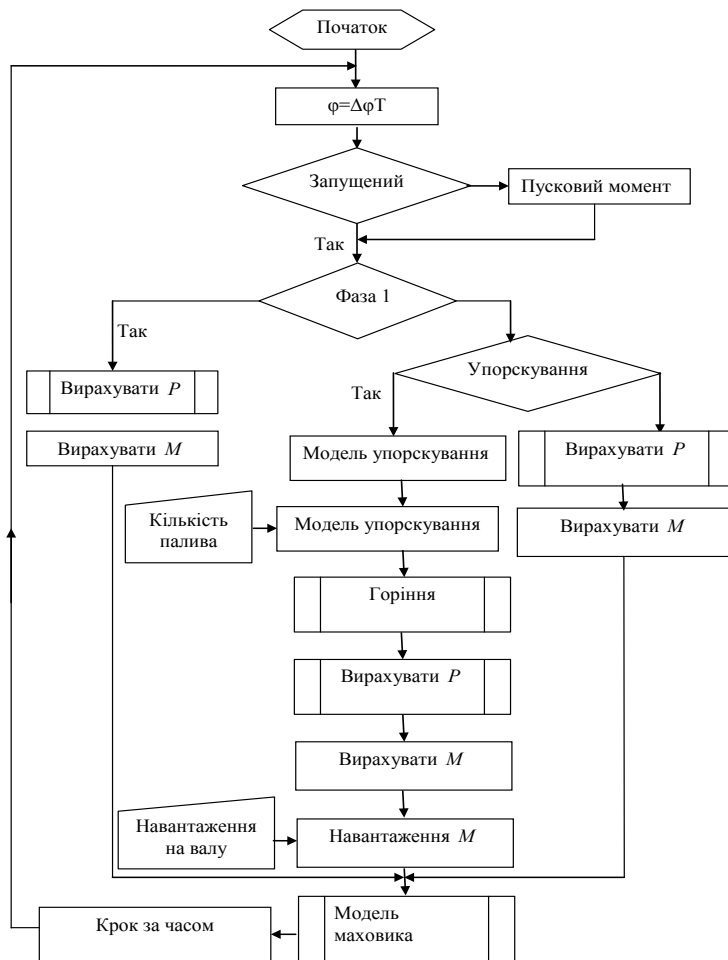


Рис. 3. Укрупнений алгоритм моделювання СДВЗ

Для опису процесу горіння використовується динамічна модель процесу горіння, що дозволяє враховувати вплив швидкості руху двигуна на процеси в циліндрі [7]. У програмі моделювання передбачено зміну кількості паливного заряду для управління швидкістю руху двигуна. Врахування динаміки рухомих мас двигуна дозволяє моделювати накопичення енергії та розгону двигуна до стану рівноваги отриманої та витраченої енергії.

Розроблена модель дозволяє перейти до моделювання багатociліндрового СДВЗ, сумісної моделі одноциліндрових дизелів з врахуванням фаз газорозподілу та махових мас двигунів.

Наведена модель складніша, ніж опис динаміки двигуна лінійним ланками другого порядку, але вона дозволяє реально оцінювати процеси в дизельному двигуні та здійснити оптимізацію пускового та номінального режимів. При цьому алгоритм не дає потрібного представлення про роботу моделі, тому в статті, крім програмної реалізації моделі СДВЗ, наведено спрощену Simulink-модель динаміки одноциліндрового двотактного двигуна (рис. 4) [7, 10, 15].

У моделі (рис. 4) враховані всі особливості вихідного алгоритму, що дозволяє оцінити режим роботи із зміною навантаження та режиму запуску, а також впливу управління кількістю палива на роботу двигуна.

Моделювання зміни фаз газорозподілу в даній моделі строго пов'язано з рухом колінчатого валу СДВЗ. Формування законів зміни тиску в циліндрах виконується за допомогою фіксованих функцій за формулами (1) та (2), які показані на (рис. 2).

Динаміка рухомих мас представляється лінійною динамічною моделлю другого порядку, а процес горіння описується лінійною динамічною моделлю першого порядку. Для оцінки швидкості руху валу двигуна використовується модель тахометра з середнім рівнем на моделі другого порядку. Отриманий опис процесів у СДВЗ значно ширше в порівнянні з традиційними моделями, побудованими з використанням динамічних ланок першого або другого порядку [6, 8].

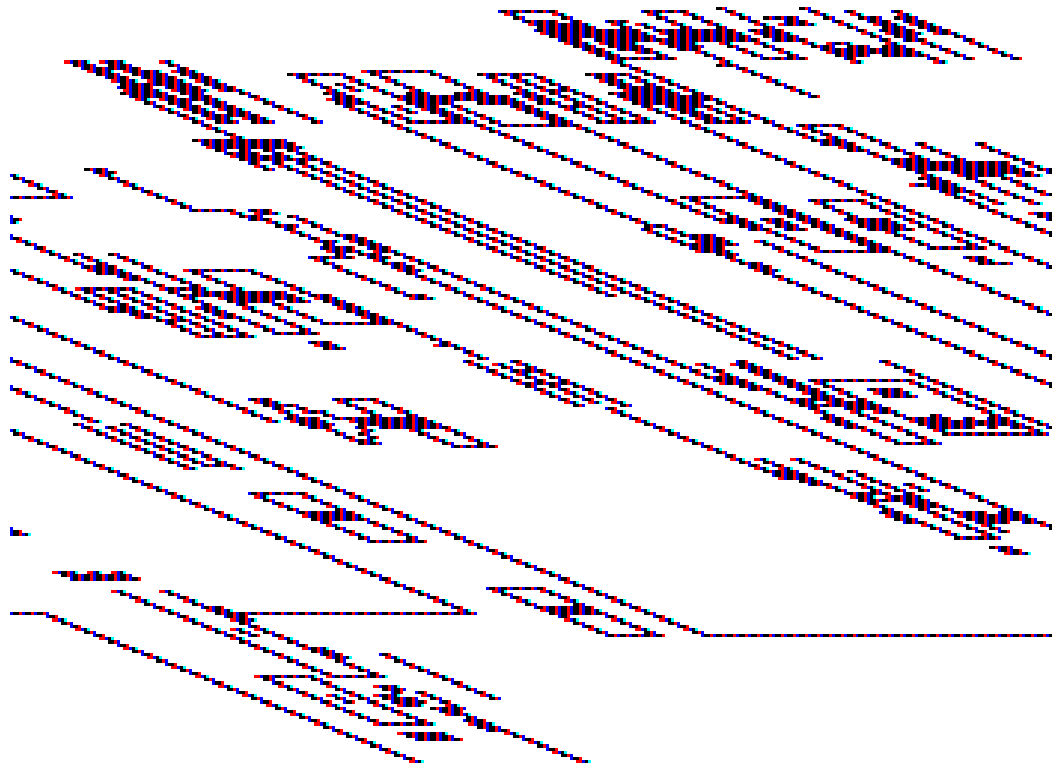


Рис. 4. Схема моделювання динаміки одноциліндрового двотактного СДВЗ

На (рис. 5, а) наведено графіки перехідних процесів у режимі запуску двигуна, де 1 - тиск у циліндрі робочої фази, 2 - тиск в циліндрі під час спалаху, 3 – навантаження на колінчатому валу, 4 - момент на валу.

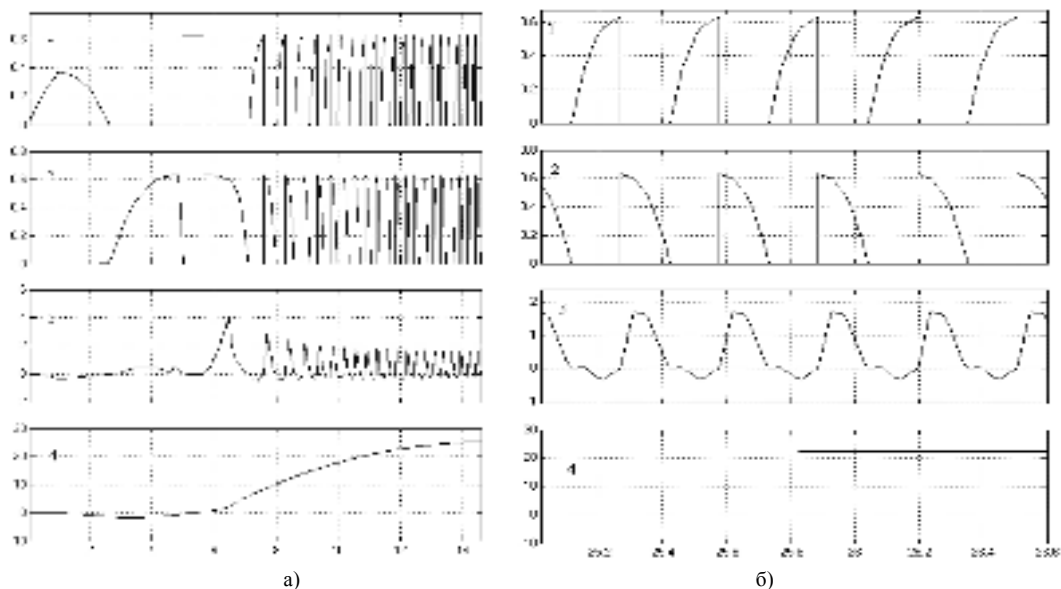


Рис. 5. Перехідні процеси моделі: а) під час режиму пуску; б) при постійній швидкості СДВЗ

Результати моделювання дозволяють описати один з найбільш складних моментів – запуск двигуна. Процеси в режимі запуску для одноциліндрового двигуна складніші, ніж для багатociліндрового, а запропонована модель дозволяє легко нарощувати кількість циліндрів.

У режимі постійного ходу перехідні процеси в двигуні простіше. На (рис. 5, б) наведені процеси для постійної швидкості СДВЗ.

Для кожного циліндра СДВЗ існує своя індикаторна діаграма. Тому для забезпечення управління та корекції моделі в реальному часі (за один період обороту двигуна) слід побудувати нову індикаторну діаграму циклу.

Перехідна характеристика по швидкості в режимі пуску отримана з використанням моделі тахометра (рис. 6). Фазове запізнювання на початку процесу визначається режимом запуску двигуна, а значне перерегулювання пов'язано з виходом двигуна на робочий режим.

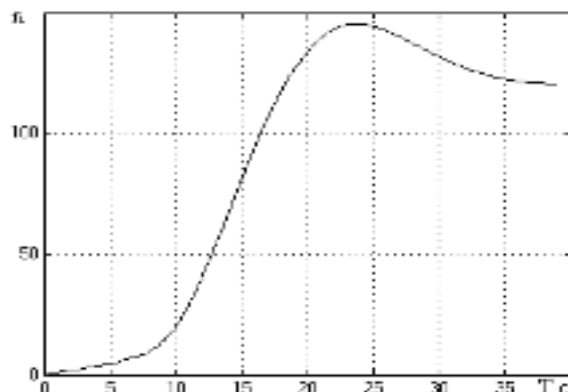


Рис. 6. Перехідний процес одноциліндрового СДВЗ, режим пуску

В моделі, яку наведено на рис. 6, передбачено моделювання властивостей палива, його стану та теплотворної здатності. Для опису процесу подачі та підготовки палива необхідна побудова окремої математичної моделі.

#### Висновки

Для повного аналізу процесів, що відбуваються в СДВЗ, опису одного з процесів з використанням лінійних динамічних ланок недостатньо [13, 17, 18]. Необхідно побудувати повну математичну модель з використанням сучасних методів інформаційних технологій.

Математична модель СДВЗ індивідуальна і вимагає обліку індикаторних характеристик конкретного двигуна. При цьому необхідно вважати двигун квазістаціонарним об'єктом і періодично виконувати ідентифікацію параметрів моделі.

Розроблена математична модель дозволяє моделювати процеси, включаючи рух і процеси в межах одного обертання вала двигуна. Не дивлячись на нелінійність моделі, її структура проста і математична модель достатня для управління СДВЗ.

Розроблена модель дозволяє враховувати не тільки особливості конкретного СДВЗ, але і вплив характеристик палива з врахуванням керування по кожному паливному заряду циліндра та властивостями палива.

Поставлені в основу моделі двигуна індикаторні характеристики при ідентифікації повинні бути уточнені. Це дозволяє реалізувати надійний прогноз руху двигуна при зміні навантаження та керування.

Для моделювання та оптимізації управління СДВЗ необхідно враховувати властивості та характеристики палива, яке подається в двигун, що вимагає розробки математичної моделі системи підготовки палива.

#### Список використаної літератури

1. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах. (Рынок микроэлектроники) [Электронный ресурс] / В.М. Мазуров // Режим доступа: [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03\\_05/stat\\_114.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_05/stat_114.htm).
2. Варбанец Р. А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 і PEGASO 9156/ Р. А. Варбанец // Авиационно-космическая техника и технология. — 2006. — № 8 (34). — С. 144-148.
3. Гацуц А. Г. Повышение эффективности работы судовых энергетических установок путем обеспечения оптимального температурного режима / А. Г. Гацуц, А. Р. Мыська, А. О. Дранкова // Электромеханические и энергосберегающие системы. — 2015. — № 3/201. — С. 71-74.
4. Ланчуковський В. И. Автоматизированные системы управления судовыми дизельными и газотурбинными установками: учебн. / В.И. Ланчуковський, А. Козьминых. — М.: Транспорт, 1983. — 320 с.
5. Пичюрин Н. Б. Изменение рабочих процессов дизелей для уменьшения эмиссии NO<sub>x</sub> / Н. Б. Пичюрин // ОНМА Судовые энергетические установки. — 2007. — № 19. — С. 38-47.
6. Репин А.И. Алгоритм оптимальной настройки реальных ПИД-регуляторов на заданный запас устойчивости / А.И. Репин, Н.И. Смирнов // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2010. — №4 (9). — С. 7-12.

7. Aranda, J., Armada, J. M., De la Cruz, J. M. (2004). Automation for the Maritime Industries. / J. Aranda, J. M. Armada, J. M. De la Cruz. Produccion Grafica Multimedia, PGM, Madrid, Spain, 284 p.
8. Attaway S. (2017). MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. Fourth Edition. Butterworth-Heinmann, Woburn, 598 p.
9. Dr. Laurie Goldsworthy (2002). Design of Ship Engines for Reduced Emissions of Oxides of Nitrogen. – Australian Maritime College.
10. Dukkupati, R. V. (2006). Analisis and Design of Control Systems Using MATLAB. New age international (P) Limited, New Delhi, 269 p.
11. RT-flex Operation&Practical Training course. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://dieselturbo.man.eu>.
12. Taylor D.A. (2003). Introduction to Marine Engineering. Elsevier Butterworth-Heinemann. – 372 p.
13. Guillermo J. Silva, Aniruddha Datta, S.P.Bhattacharyya (2002). Robust Control Design Using the PID Controller // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control Las Vegas, Nevada USA, December 2002. — P. 1313-1318.
14. Instrument Engineers' Handbook (2006). Editor in chief Bela G. Liptak, 4th Edition, Vol.2: Process Control and Optimization. — 2304 p.
15. Hansen J.F. (2000). Modelling and Control of Marine Power Systems. [Электронный ресурс] Report 2000:9-W. Department of Engineering Cybernetics Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. – 119 p. Режим доступа: <https://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/007/7545/masteroppgave.pdf>.
16. Karl J. Astrom, Tore Hagglund (2006). Advanced PID Control. ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society. — 460 p.
17. Nikolaos I. Xiros (2004). PID marine engine speed regulation under full load conditions for sensitivity  $H_\infty$ -norm specifications against propeller disturbance. [Электронный ресурс] //Journal of Marine Engineering & Technology No. A5, 2004. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1080/20464177.2004.11020179>.
18. Mohamed. M. Ismail, M. A. Moustafa Hassan (2015). Control of Shunt Active Power Filter based on Fractional Order PID controller. [Электронный ресурс] //17th International Middle East Power Systems Conference, Mansoura University, Egypt, December 15-17, 2015. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/287490893\\_Control\\_of\\_Shunt\\_Active\\_Power\\_Filter\\_based\\_on\\_Fractional\\_Order\\_PID\\_controller](https://www.researchgate.net/publication/287490893_Control_of_Shunt_Active_Power_Filter_based_on_Fractional_Order_PID_controller).