

С.В. БІГУН, А.Л. СІМАНЕНКОВ

Херсонська державна морська академія

Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ УПОРСКУВАННЯ ЦИЛІНДРОВОГО МАСТИЛА СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ІЗ НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Статтю присвячено дослідженню підходів до побудови високоефективних та високонадійних систем керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів у різних режимах функціонування. Метою дослідження є аналіз потенційних можливостей упровадження нечітких алгоритмів керування для побудови регулятора системи змащення, що забезпечував би ефективне керування процесом в умовах дії зовнішніх збурюючих факторів. Об'єктом досліджень є системи нечіткого керування процесами імпульсного лубрикаторного змащення суднових головних двигунів. Предметом досліджень є регулятор системи керування процесами імпульсного лубрикаторного змащення суднових головних двигунів на базі нечіткого виводу.

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано структуру системи імпульсного лубрикаторного змащення, визначено збурюючі фактори, зокрема вплив параметрів палива на процес змащення, та їхній вплив на функціонування системи. Виходячи з вимог до якості процесу змащення, що передбачає підвищення ресурсу головного двигуна, забезпечення безпечної експлуатації, підвищення надійності та забезпечення живучості у разі виникнення аварійних ситуацій, мінімізацію витрат праці на обслуговування за рахунок точного дозування циліндрового мастила, сформульовано задачу оптимального керування. Ураховуючи нестационарний характер параметрів моделі об'єкта керування, обґрунтовано доцільність застосування нечітких алгоритмів для визначення параметрів налаштування регулятора.

Розроблено структуру нечіткого регулятора, визначено вхідні та вихідні параметри, а також побудовано відповідні функції належності. Виходячи з аналізу процесу функціонування системи змащення та враховуючи критерій оптимальності, сформовано базу правил для визначення пропорційних та інтегральних складників регулятора, на основі чого побудовано математичну модель нечіткого регулятора, яка описує його роботу в умовах різних режимів функціонування. Дослідження, проведені з використанням імітаційної моделі, показали ефективність та доцільність застосування нечітких алгоритмів у регуляторах системи змащення.

Ключові слова: нечіткий регулятор, імітаційна модель, оптимальне керування, система лубрикаторного змащення, судновий головний двигун.

S.V. BIHUN, A.L. SIMANENKOV

Kherson State Maritime Academy

YU.O. LEBEDENKO

Kherson National Technical University

CONTROL SYSTEM OF THE CYLINDER OIL INJECTION PROCESS OF MARINE ENGINES WITH A FUZZY CONTROLLER

The article is devoted to the study of approaches to the construction of highly efficient and highly reliable control systems for the process of injection of cylinder lubricant of marine engines in various modes of operation. The purpose of this study is to analyze the potential possibilities of implementing fuzzy control algorithms for the construction of a lubrication system regulator that would ensure effective control of the process under the influence of external disturbing factors. The object of research is the system of fuzzy control of processes of impulse lubricator lubrication of ship's main engines. The subject of research is the regulator of the process control system of impulse lubricator lubrication of ship's main engines based on fuzzy output.

To achieve the goal, the work analyzed the structure of the pulse lubricator lubrication system, determined the disturbing factors, in particular the influence of fuel parameters on the lubrication process, and their influence on the functioning of the system. Based on the requirements for the quality of the lubrication process, which involves increasing the resource of the main engine, ensuring safe operation, increasing reliability and ensuring survivability in the event of emergency situations, minimizing labor costs for maintenance due to accurate dosing of cylinder lubricant, the task of optimal control is formulated. Taking into account the non-stationary nature of the model parameters of the control object, the feasibility of using fuzzy algorithms to determine the parameters of the controller setting is substantiated.

The structure of the fuzzy controller was developed, the input and output parameters were determined, and the corresponding membership functions were constructed. Based on the analysis of the operation process of the lubrication system and taking into account the criterion of optimality, a rule base was formed for determining the proportional and integral components of the regulator; on the basis of which a mathematical model of the fuzzy regulator was built, which describes its operation in the conditions of different modes of operation. Research conducted using a simulation model showed the effectiveness and feasibility of using fuzzy algorithms in lubrication system regulators.

Key words: fuzzy controller, simulation model, optimal control, lubricator lubrication system, ship's main engine.

Постановка проблеми

Для забезпечення надійної роботи дизельного двигуна важливими чинниками є правильний режим змащення, використання якісного мастила та очищення поверхонь під час експлуатації [1]. Системи змащення грають важливу роль у забезпеченні ефективності та тривалості роботи дизельних двигунів, і це підтверджується відповідними дослідженнями. Ці системи зменшують тертя, відводять тепло та очищають поверхні від зношених продуктів, що є критично важливим для безперебійної та надійної роботи двигунів [2]. Вона відповідає за доставку мастила до тертя поверхонь двигуна з метою зменшення сил тертя, відведення тепла, що виникає під час тертя, та очищення поверхонь від продуктів зносу, нагару та сторонніх частинок. Особлива увага приділяється змащенню циліндрів, оскільки неякісне мастило або надмірне його надходження можуть призвести до нагароутворення у циліндрі та пригорання поршневих кілець. Належне змащення дизельного двигуна забезпечує його безвідмовну та надійну роботу, знижує експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування і ремонт.

Поліпшення ефективності системи змащення головного двигуна та забезпечення його надійності й ефективного змащення в різних режимах експлуатації можливе завдяки використанню сучасних засобів мікропроцесорної техніки, які забезпечують оперативний зв'язок із системою дистанційного управління та загальносудновою обчислювальною мережею. Використання таких засобів дає змогу застосовувати вискоєфективні алгоритми, які ґрунтуються на передових методах інтелектуального керування. Це сприяє зменшенню впливу нестаціонарних процесів та збурюючих факторів на процес змащення, а також підвищує його надійність та безвідмовність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні системи змащення обладнані датчиками, електронними регуляторами та виконавчими пристроями, які можуть інтегруватися в обчислювальну мережу. Це дає змогу розпилювати мастило за допомогою спеціальних форсунок по всьому колу втулки циліндра, ефективно змащуючи поверхню втулки. Мастило під великим тиском нагнітається із системи гідроприводу за допомогою поршня до відповідних форсунок у циліндрових втулках, які розпилюють мастило на поверхні поршневих кілець та втулок. Під час руху поршня з нижньої мертвої точки до верхньої, форсунки випускають мастило на поверхню поршневих кілець та втулок, коли пакет поршневих кілець проходить повз них. Це забезпечує рівномірне розподілення мастила по поверхнях тертя, що поліпшує умови формування надійної плівки мастила, даючи змогу значно скоротити витрату циліндрового мастила за належного стану поверхонь тертя [3; 4].

Незважаючи на використання сучасних контрольно-вимірювальних засобів та складних алгоритмів керування, системи імпульсного лубрикаторного змащення все ще мають нерозв'язані проблеми з контролем показників відпрацьованого циліндрового мастила, тиском у лубрикаторах та в'язкістю мастила, а також із забезпеченням достатньої надійності для судових двигунів у аварійних режимах [5].

Для вирішення цих проблем можна розглянути впровадження інтелектуальних систем керування, які зможуть прогнозувати і модифікувати закони керування на основі даних про попередні цикли, навіть за обмеженої інформації про фактичний стан об'єкта.

Мета дослідження

Метою дослідження є вдосконалення системи змащення головного двигуна і підвищення його ефективності та надійності за рахунок розроблення та впровадження нечітких алгоритмів керування для розв'язання проблеми ефективного керування процесом в умовах зовнішніх збурюючих чинників, таких як вплив параметрів палива на процес змащення. Такий підхід може допомогти поліпшити якість та ефективність процесу змащення головного двигуна, а також знизити витрати на його обслуговування.

Об'єктом досліджень є системи нечіткого керування процесами імпульсного лубрикаторного змащення судових головних двигунів. Предметом досліджень є регулятор системи керування процесами імпульсного лубрикаторного змащення судових головних двигунів на базі нечіткого виводу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз структури системи імпульсного лубрикаторного змащення та визначення її збурюючих факторів, що є важливим кроком для розуміння цього процесу та виявлення можливостей для його оптимізації.

2. Постановка завдання оптимального керування, що враховує ключові аспекти якості процесу змащення для підвищення ресурсу головного двигуна, безпечної експлуатації, забезпечення надійності та здатності керування у разі аварійних ситуацій.

3. Розроблення нечіткого регулятора для визначення параметрів налаштування регулятора з урахуванням нестационарного характеру параметрів моделі об'єкта керування.

Виклад основного матеріалу дослідження

Система лубрикаторного змащення включає мастильну магістраль з основним мастильним насосом, мастильний резервуар, імпульсний дозуючий насос, акумулятор та керований клапан, що забезпечує подачу мастила до форсунок. Крім того, для керування процесом наявні контрольні-вимірювальні прилади та пристрої керування [6]. Оптимізація системи змащення є ключовим чинником для досягнення максимальної продуктивності та ефективності в різних умовах експлуатації.

Сучасний метод забезпечення безпечної, ефективної та екологічно відповідної експлуатації циліндро-поршневих груп дизелів із низькою обертовою частотою полягає у контролі показників використаного циліндрового мастила. Однак з урахуванням різноманітності циліндрових олив, умісту сірки у паливі та особливостей конструкції систем змащення важливо регулювати дозування з урахуванням характеристик палива, щоб уникнути неоднозначностей під час вибору оптимального рівня споживання циліндрового мастила.

Отже, система змащення головного двигуна є складним об'єктом, який потребує контролю за багатьма параметрами в реальному часі, такими як температура мастила, тиск у лубрикаторах та в'язкість мастила [7; 8]. Для досягнення ефективної роботи системи змащення необхідно розробити ефективні стратегії оптимізації керування форсунками упорскування мастила, ураховуючи різноманітні умови експлуатації.

Таким чином, задачу оптимального керування процесом змащення судового дизеля може бути сформульовано так [9]:

Знайти для об'єкта, описаного у просторі станів як

$$\begin{cases} \dot{x} = F_1(x, u) \\ y = F_2(x, u) \end{cases} \quad (1)$$

керування u , що доставляє мінімум функціоналу якості, який оцінює середньоквадратичне відхилення від заданого профілю змащення:

$$J = \int (y - y_0)^2 dt, \quad (2)$$

за врахування обмежень за змінними стану:

$$x < x_{max}, \quad (3)$$

де x – вектор стану, y – вектор входу, u – вектор керування, y – кількість поданого мастила, y_0 – задане значення. Оптимізація функціоналу мети (2) згідно з умовами (3) є завданням слідкування, яке вимагає знаходження керування, спрямованого на мінімізацію відхилень вихідної величини від заданої мети з урахуванням обмежень на змінні стану.

Використання передових технологій управління форсунками системи змащення, зокрема за допомогою нечітких алгоритмів, дає змогу поліпшити точність та ефективність процесу змащення головного двигуна. Це спрямовано на оптимізацію його функціонування та підвищення загальної продуктивності. Шляхом аналізу відхилення тиску впорскування нечіткий регулятор установлює оптимальні параметри налаштування ПІ-регулятора для системи керування подачею мастила у систему лубрикаторного змащення.

Механізм логічного виводу включає чотири етапи [10; 11]:

- фазифікацію (уведення нечіткості);
- нечіткий вивід;
- композицію;
- дефазифікацію (приведення до чіткості).

Основним компонентом для проведення операції нечіткого логічного виводу є база правил, що містить нечіткі умови у формі «Якщо – То» та функції належності для відповідних лінгвістичних термів. Для ефективної роботи системи рекомендується використовувати модель нечіткого виводу Мамдані [12], оскільки її структура легко інтерпретується в термінах, зрозумілих обслуговуючому персоналу.

Терм-множини вхідних нечітких лінгвістичних змінних для нечіткого регулятора включають:

- різницю між заданим тиском упорскування і фактичним значенням (в. о.):

$$\Delta P = \{\langle\text{LOW}\rangle, \langle\text{NORMAL}\rangle, \langle\text{HIGH}\rangle\};$$

- уміст продуктів зносу у відпрацьованому мастилі підпоршневих порожнин за різного напрацювання циліндрів (в. о.):

$$c^{Fe} = \{\langle\text{LOW}\rangle, \langle\text{MEDIUM}\rangle, \langle\text{HIGH}\rangle\}.$$

Функції належності для вхідних змінних наведено на рис. 1.

Терм-множини вихідних нечітких лінгвістичних змінних нечіткого регулятора:

- пропорційний складник ПІ-регулятора:

$$k_p = \{\langle\text{LOW}\rangle, \langle\text{MEDIUM}\rangle, \langle\text{HIGH}\rangle\};$$

- інтегральний складник:

$$k_I = \{\langle\text{LOW}\rangle, \langle\text{MEDIUM}\rangle, \langle\text{HIGH}\rangle\}.$$

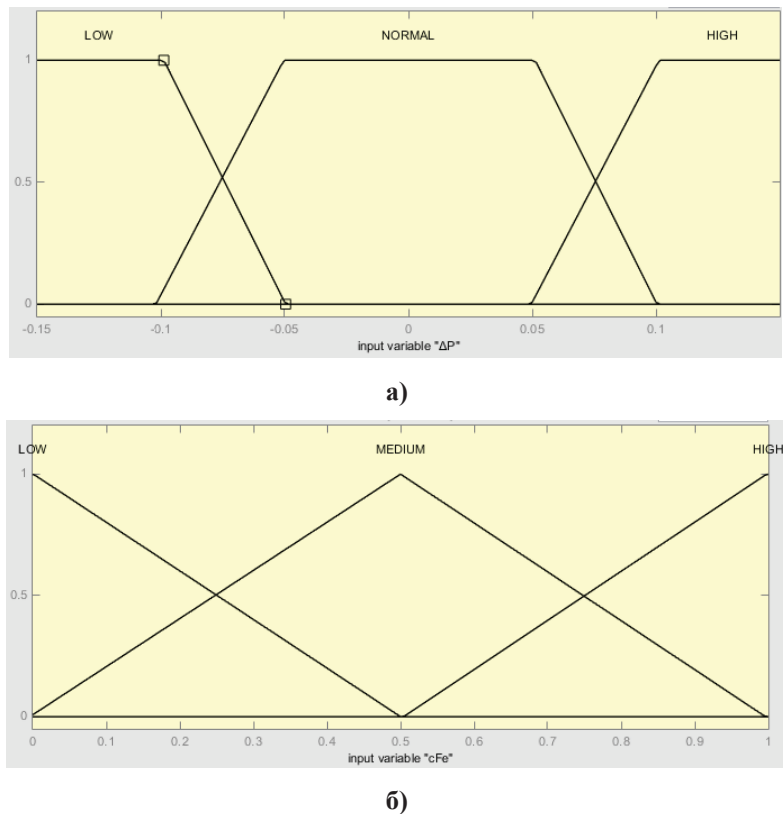


Рис. 1. Функції належності вхідних лінгвістичних змінних: різниця між заданим тиском впорскування і фактичним значенням (а), уміст продуктів зносу у відпрацьованому мастилі підпоршневих порожнин за різного напруження циліндрів (б)

Функції належності для вихідних змінних наведено на рис. 2.

Виходячи з аналізу принципу дії системи лубрикаторного змащення та особливостей її функціонування в різних режимах, сформуємо евристичні правила-продукції нечіткої моделі для визначення параметрів налаштувань ПІ-регулятора:

1. Якщо ($c^{Fe} = \text{LOW}$) та ($\Delta P = \text{LOW}$), то $k_p = \text{MEDIUM}$, $k_I = \text{HIGH}$.
2. Якщо ($c^{Fe} = \text{LOW}$) та ($\Delta P = \text{NORMAL}$), то $k_p = \text{LOW}$, $k_I = \text{LOW}$.
3. Якщо ($c^{Fe} = \text{LOW}$) та ($\Delta P = \text{HIGH}$), то $k_p = \text{MEDIUM}$, $k_I = \text{HIGH}$.
4. Якщо ($c^{Fe} = \text{MEDIUM}$) та ($\Delta P = \text{LOW}$), то $k_p = \text{HIGH}$, $k_I = \text{HIGH}$.
5. Якщо ($c^{Fe} = \text{MEDIUM}$) та ($\Delta P = \text{NORMAL}$), то $k_p = \text{MEDIUM}$, $k_I = \text{LOW}$.
6. Якщо ($c^{Fe} = \text{MEDIUM}$) та ($\Delta P = \text{HIGH}$), то $k_p = \text{HIGH}$, $k_I = \text{HIGH}$.
7. Якщо ($c^{Fe} = \text{HIGH}$) та ($\Delta P = \text{LOW}$), то $k_p = \text{HIGH}$, $k_I = \text{HIGH}$.
8. Якщо ($c^{Fe} = \text{HIGH}$) та ($\Delta P = \text{NORMAL}$), то $k_p = \text{HIGH}$, $k_I = \text{HIGH}$.

Використання адаптивного нечіткого регулятора системи змащення за запропонованою базою правил для налаштування оптимальних параметрів ПІ-регулятора для керування процесом упорскування циліндрового мастила може забезпечити стабільне функціонування системи змащення у різних експлуатаційних режимах.

Для комп'ютерного моделювання використання адаптивного нечіткого регулятора системи лубрикаторного змащення у редакторі нечітких систем FIS програмного комплексу MATLAB [13; 14] потребує поділу всіх лінгвістичних змінних на вхідні та вихідні, а також представлення моделі у вигляді дерева з двома батьківськими вузлами – «Вхід» та «Вихід». Нечіткі множини у модулях фазифікації визначаються за допомогою функцій належності типу трапеції (рис. 1, 2), що описуються за допомогою мови програмування, що наближена до природної мови.

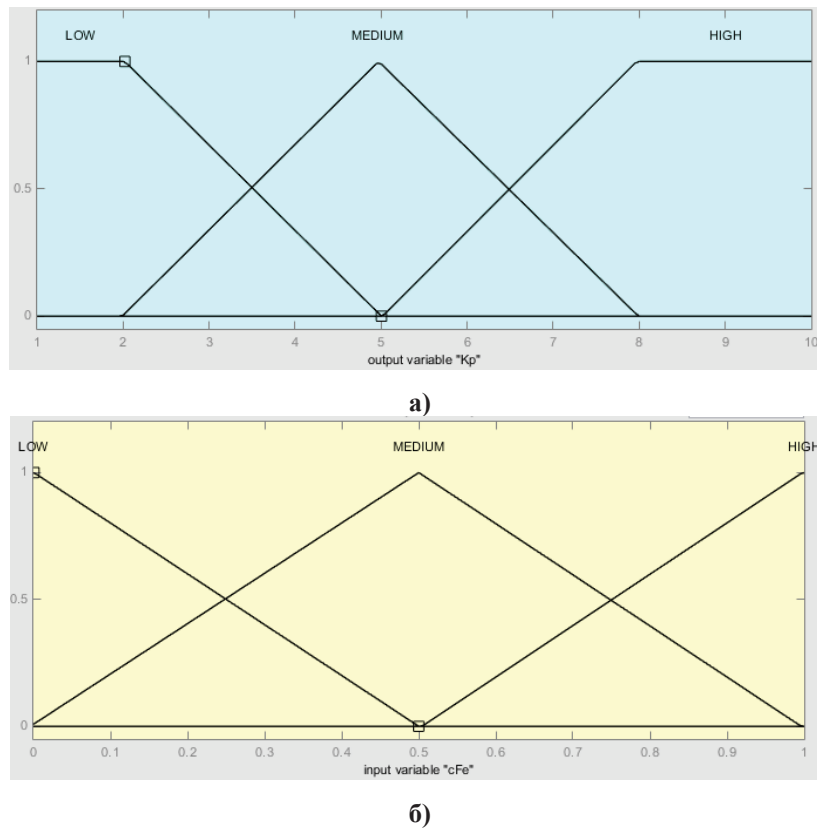


Рис. 2. Функції належності вихідних лінгвістичних змінних: пропорційний складник ПІ-регулятора (а), інтегральна складник (б)

Загальний вигляд запропонованої моделі нечіткого виводу наведено в редакторі FIS програмного пакету Matlab на рис. 3.

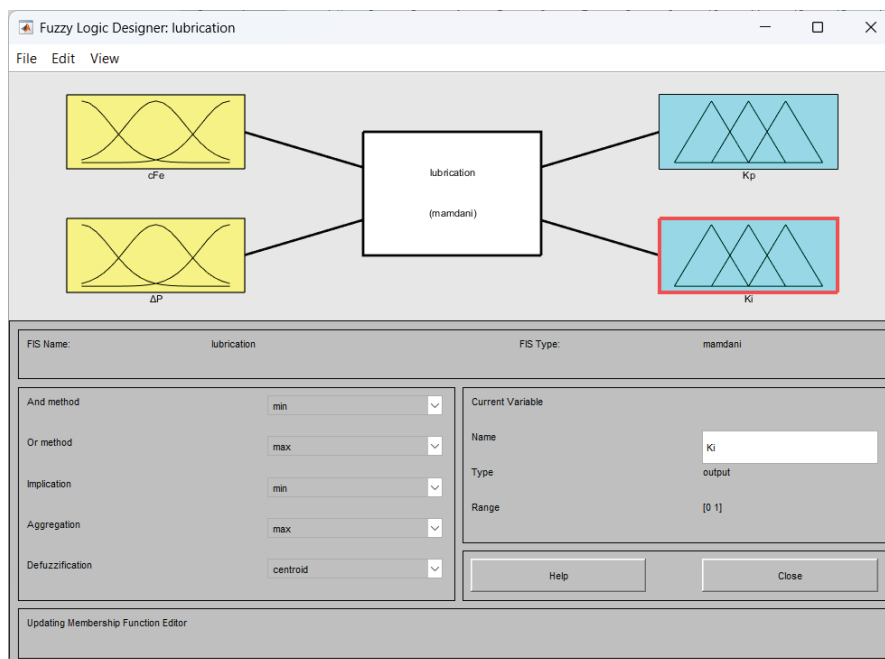


Рис. 3. Модель нечіткого виводу в редакторі FIS

Правила нечіткого виводу для розроблюваної системи представляються за допомогою редактора правил. Фрагмент бази правил у редакторі нечітких систем FIS програмного комплексу MATLAB наведено на рис. 4.

Отримані значення ступенів істинності кожного правила дають можливість провести активацію, під час якої результуюча функція для кожної вихідної змінної приймає мінімальне значення з відповідного ступеня істинності правила та вихідної функції належності зазначеної вихідної змінної. Після акумуляції отримується загальна функція належності для вихідних змінних k_p та k_I за всіма термами.

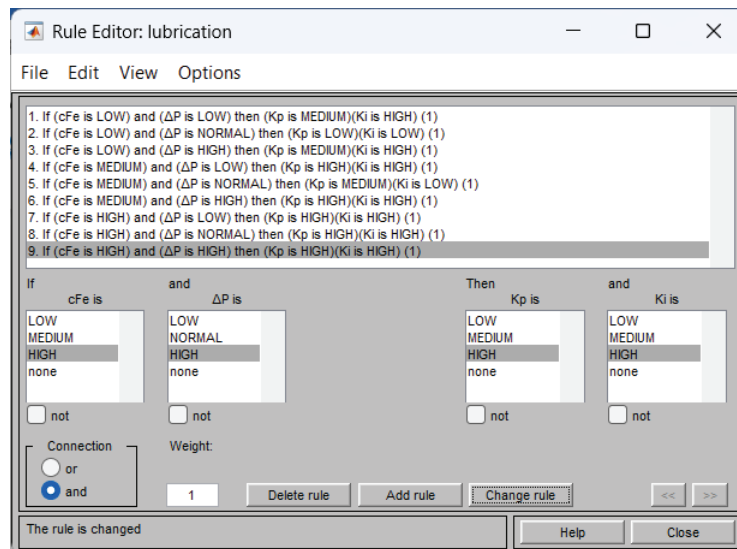


Рис. 4. Фрагмент бази правил у редакторі FIS

На рис. 5 наведено поверхні рішення для вихідних змінних k_p та k_I , які формуються за розробленою базою правил.

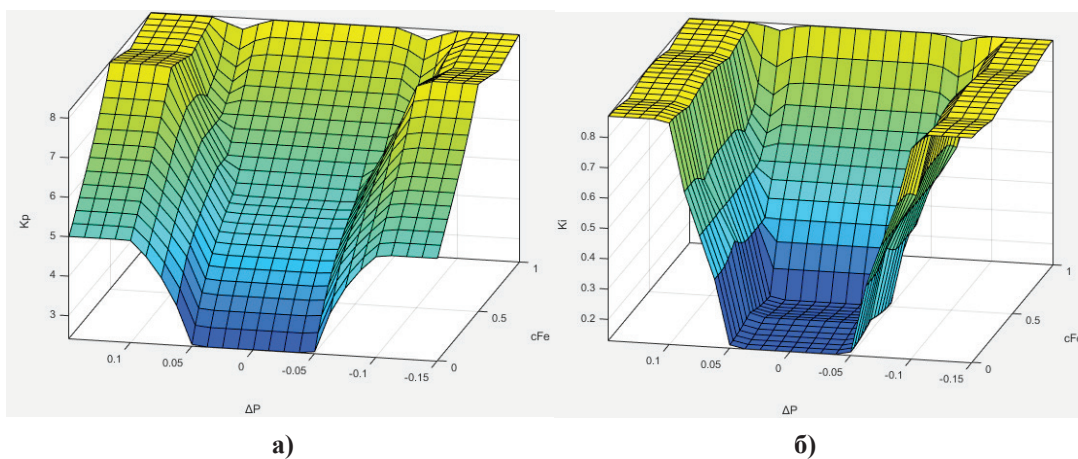


Рис. 5. Поверхні рішення для вихідних змінних k_p (а) та k_I (б)

Для числових розрахунків на етапі дефазифікації ми будемо користуватися методом центру ваги. Згідно із цим методом, чіткі значення параметрів налаштувань регулятора впорскування мастила визначаються як абсциси центру ваги пласкої фігури, яка обмежена графіком кривої функції належності відповідного параметра (вихідної змінної). Приклад розрахунку наведено на рис. 6.

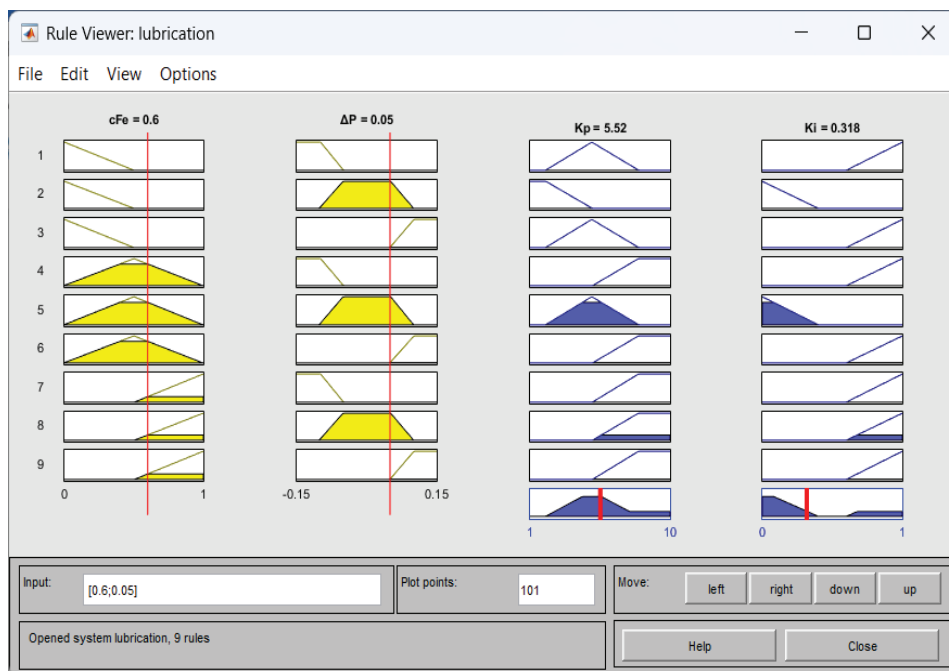


Рис. 6. Приклад знаходження чітких значень з отриманих нечітких змінних

Було проведено оцінку ефективності запропонованих рішень шляхом використання комп'ютерного моделювання в програмному пакеті Matlab Simulink. Однією з особливостей цієї комп'ютерної моделі системи оптимального керування процесом впорскування є наявність контуру адаптації, який автоматично підбирає параметри налаштування ПІ-регулятора з урахуванням аналізу динаміки роботи дизеля.

Для дослідження запропонованого методу керування можна скористатись імітаційною моделлю [15]. На рис. 7 представлено комп'ютерну модель ПІ-регулятора з контуром адаптації параметрів. Сигнали, що вказують на зміну тиску впорскування та концентрацію домішок у відпрацьованому мастилі, подаються на вхід адаптивного регулятора. Оскільки потрібний тиск упорскування прямо пропорційний розбіжності тиску, розраховується значення бажаної швидкості мастильного насоса.

Контур адаптації параметрів ПІ-регулятора, який використовує нечіткий контролер логіки, аналізує отримані значення розбіжності і реалізує алгоритм нечіткого виводу, встановлюючи оптимальні параметри налаштування ПІ-регулятора для поточного режиму та динамічних показників системи впорскування.

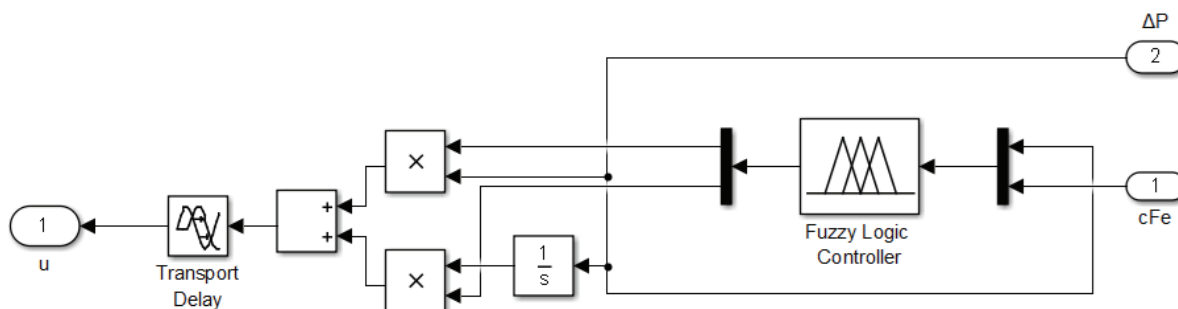


Рис. 7. Модель системи керування впорскуванням мастила з контуром адаптації параметрів ПІ-регулятора

Результати моделювання тиску мастила в системі впорскування у двох варіантах (з ПІ-регулятором та з нечітким контуром адаптації) наведено на рис. 8.

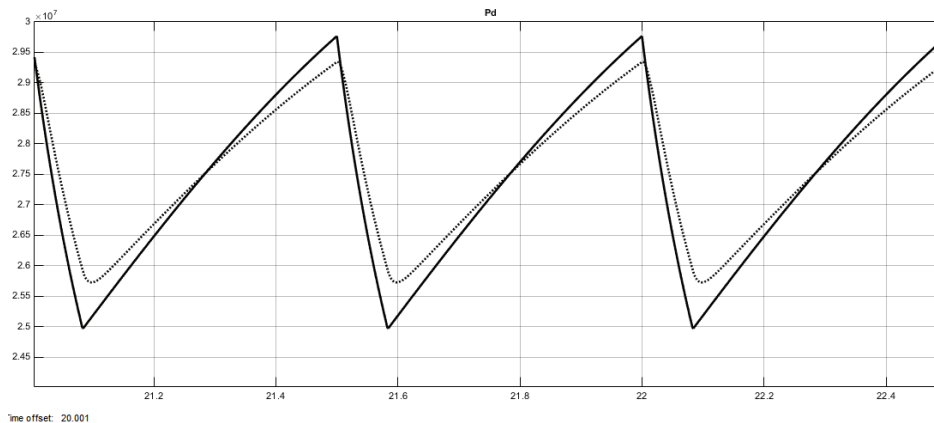


Рис. 8. Результати моделювання тиску мастила в системі впорскування:
 — із ПІ-регулятором; •••• із нечітким контуром адаптації

Результати моделювання свідчать про ефективність запропонованих рішень. Порівняно із системою керування, що використовує ПІ-регулятор, нечіткий регулятор проявляє значно менше відхилень від заданого значення тиску. Це пояснюється тим, що відповідно до розробленої моделі нечіткого виводу, контур адаптації в оптимальному регуляторі налаштовує параметри так, щоб забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу з мінімальним перерегулюванням та скороченням часу регулювання. Таким чином, за великих відхилень тиску регулятор прискорює перехідний процес, а за малих, навпаки, – забезпечує плавне налаштування тиску впорскування до бажаного значення.

Висновки

Для забезпечення оптимальної роботи системи змащення головного двигуна та забезпечення його надійності й ефективності в різних умовах експлуатації необхідно активно впроваджувати передові засоби мікропроцесорної техніки, що забезпечують оперативний зв'язок із системою дистанційного управління та загальносудновою обчислювальною мережею. Розроблення високоефективних алгоритмів для таких систем вимагає застосування новітніх підходів до керування, зокрема впровадження інтелектуальних систем.

Виходячи з вимог до якості процесу змащення та нестационарного характеру параметрів моделі об'єкта керування, обґрунтовано доцільність використання нечітких алгоритмів для визначення параметрів налаштування регулятора системи змащення. Розроблено структуру нечіткого регулятора, визначено вхідні та вихідні параметри, а також побудовано відповідні функції належності. Аналіз процесу функціонування системи змащення та врахування критерію оптимальності дали змогу сформулювати базу правил для визначення пропорційних та інтегральних складників регулятора. Ці дані лягли в основу математичної моделі нечіткого регулятора, яка відображає його роботу в умовах різних режимів функціонування. Проведені дослідження з використанням отриманої імітаційної моделі продемонстрували ефективність та доцільність застосування нечітких алгоритмів у регуляторах системи змащення.

Список використаної літератури

1. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SOx Emissions. *Journal of Marine Science and*

- Application*. 2020. Т. 19. № 3. Р. 473–484. URL: <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00156-0> (дата звернення: 10.05.2024).
2. Woodyard D. Introduction: A Century of Diesel Progress. Pounder’s Marine Diesel Engines and Gas Turbines. 2009. С. ix–xxvii. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8984-7.00034-5> (дата звернення: 10.05.2024).
 3. Perseas pappas. Alpha lubricator system 707X-40C alpha lubricator system operation manual MC engines. Academia.edu – Share research. URL: https://www.academia.edu/29710496/Alpha_Lubricator_System_707X_40C_Alpha_Lubricator_System_Operation_Manual_MC_Engines (дата звернення: 10.05.2024).
 4. RTA and RT-flex low-speed engines. Wartsila.com. URL: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/rta-and-rt-flex-low-speed-engines> (дата звернення: 10.05.2024).
 5. Богач В.М., Довиденко Ю.М., Слободянюк І.М. Особливості лубрикаторних систем дизельних двигунів MAN-B&W. *Суднові енергетичні установки*. 2020. Вип. 40. С. 144–151.
 6. Сіманенков А.Л., Бігун С.В., Лебеденко Ю.О. Підходи до побудови систем керування процесами упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 16–18 березня 2023 р. Одеса, 2023. С. 369–371.
 7. Sun Z., Shen Z., Li X. Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. March 2018. 49(3). Р. 600–605. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012.
 8. Надежкин А.В., Даничкин В.Н., Безвербный А.В. Подходы и критерии для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации судовых крейцкопфных дизелей по параметрам отработанного цилиндрического масла. *Судостроение*. 2011. № 2. С. 30–33.
 9. Бігун С.В., Сіманенков А.Л., Лебеденко Ю.О. Задача оптимального керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 16-18 березня 2023 р. Одеса, 2023. С. 93–94.
 10. Wang H.O., Tanaka K. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2004. 320 p.
 11. Altrock C.V. Fuzzy logic and neuroFuzzy applications in business and finance. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall PTR, 1997. 375 p.
 12. Лебеденко Ю.О., Колебанов О.К., Даник В.В. Адаптивна система керування комбінованим пропульсивним комплексом із нечітким регулятором. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. №. 2(77). С. 30–37. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2021.2.3.
 13. Кирик В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах : підручник. Київ : Політехніка, 2019. 224 с.
 14. Томашевський В.М. Моделювання систем : підручник. Київ : ВНУ, 2005. 352 с.
 15. Бігун С.В., Сіманенков А.Л., Лебеденко Ю.О. Імітаційна модель системи керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2023. Т. 5. № 2. С. 9–18. URL: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-2-1>.

References

1. Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2020). Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SOx Emissions. *Journal of Marine Science and Application*, 19(3), 473–484. <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00156-0> [in English].

2. Woodyard, D. (2009). Introduction: A Century of Diesel Progress. U Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines (s. ix—xxvii). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8984-7.00034-5> [in English].
3. Perseas pappas (n.d.). Alpha lubricator system 707X-40C alpha lubricator system operation manual MC engines. Academia.edu - Share research. https://www.academia.edu/29710496/Alpha_Lubricator_System_707X_40C_Alpha_Lubricator_System_Operation_Manual_MC_Engines [in English].
4. RTA and RT-flex low-speed engines. (n. d.). Wartsila.com. <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/rta-and-rt-flex-low-speed-engines> [in English].
5. Bogach, V.M., Dovidenko, J.M., & Slobodianiuk, I.M. (2020). Osoblyvosti lubrykatornykh system dyzelnykh dvyhuniv MAN-B&W [Features of systems greasing of diesel engines MANB&W]. *Sudnovi enerhetychni ustanovky [Ship power plant]*, 1, 144–151. <https://doi.org/10.31653/smf340.2020> [in Ukrainian].
6. Simanenkov, A.L., Bihun, S.V., & Lebedenko, Yu.O. (2023). Pidkhody do pobudovy system keruvannya protsesamy uporskuvannya tsylindrovoho mastyla sudnovykh dvyhuniv [Approaches to building management systems cylinder injection processes marine engine lubricants]. *Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia: materialy 14-toi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii [Modern energy installations in transport, technologies and equipment for their maintenance: proceedings of the 14rd International Scientific and Practical Conference]*, p. 369–371 [in Ukrainian].
7. Sun, Z., Shen, Z., & Li X. (2018). Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. *Journal of Central South University (Science and Technology)* 49(3). 600–605. <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012> [in English].
8. Nadezhkin, A.V. Danichkin V.N., & Bezverbnyi, A.V. (2011). Podkhody i kryterii dlia obespecheniia bezopasnoi i effektivnoi ekspluatatsii sudovykh kreitskopfnykh dyzelei po parametram otrabotannoho tsylyndrovoho masla [Approaches and criteria for ensuring safe and efficient operation of marine crosshead diesel engines based on the parameters of used cylinder oil]. *Sudostroenye*, No 2. p. 30–33.
9. Bihun, S.V., Simanenkov, A.L., & Lebedenko, Yu.O. Zadacha optymalnoho keruvannya protsesom uporskuvannya tsylindrovoho mastyla sudnovykh dvyhuniv [The task of optimal control of the process of injection of cylinder lubricant of marine engines.]. *Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia: materialy 15-toi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii [Modern energy installations in transport, technologies and equipment for their maintenance: proceedings of the 15rd International Scientific and Practical Conference]*, p. 93–94 [in Ukrainian].
10. Wang, H.O., & Tanaka, K. (2004). *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. Wiley & Sons, Incorporated, John [in English].
11. Altrock, C.V. (1997). *Fuzzy logic and neuroFuzzy applications in business and finance*. Prentice Hall PTR [in English].
12. Lebedenko, Yu.O., Kolebanov, O.K., & Danyk, V.V. (2021). Adaptivna systema keruvannya kombinovanykh propul'syvnym kompleksom z nechitkym rehuliatorom [Adaptive control system of the combined propulsive complex with a fuzzy regulator]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 2, p. 30–37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.2.3> [in Ukrainian].
13. Kyryk, V.V. (2019). Matematychnyi aparat shtuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh [Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems]. Kyiv: Politekhnik [in Ukrainian].
14. Tomashevskiy, V.M. (2005). Modeliuvannia system [Modeling of systems]. BHV [in Ukrainian].

15. Bihun S.V., Simanenkov A.L., & Lebedenko Yu.O. (2023) Imitatsiina model systemy keruvannia protsesom uporskuvannia tsylindrovoho mastyla sudnovykh dvyhuniv [Simulation model of the control system of the cylinder oil injection process of marine engines]. *Applied Questions of Mathematical Modeling*. Vol. 5, no. 2. (p. 9–18). <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-2-1> [in Ukrainian].

Бігун Сергій Володимирович – аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації Херсонської державної морської академії. E-mail: bigunsergej4@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6385-3296.

Сіманенков Андрій Леонідович – к.т.н., старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації Херсонської державної морської академії. E-mail: simanenkov.andrii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0797-5276.

Лебеденко Юрій Олексійович – к.т.н., доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну. E-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.

Bihun Serhii Volodymyrovych – Postgraduate Student at the Department of Operation of Ship Electrical Equipment and Automation Devices of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: bigunsergej4@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6385-3296.

Simanenkov Andrii Leonidovych – PhD in Engineering, Assistant Professor at the Department of Operation of Ship Electrical Equipment and Automation Devices of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: simanenkov.andrii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0797-5276.

Lebedenko Yurii Oleksiiiovych – PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Information and Computer Technologies of the Kyiv National University of Technologies and Design. E-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.