

С.В. БІГУН, А.Л. СІМАНЕНКОВ

Херсонська державна морська академія

Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ УПОРСКУВАННЯ ЦИЛІНДРОВОГО МАСТИЛА СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

*Стаття присвячена розробці імітаційної моделі системи керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів для проведення досліджень процесів в системі змащення в різних режимах функціонування, що надасть можливість розробляти високоефективні та високонадійні алгоритми керування процесом змащення.*

*Метою даного дослідження є аналіз структури моделі системи імпульсного лубрикаторного змащення суднового головного двигуна та побудова імітаційної моделі системи керування процесом змащення для аналізу ефективності, живучості та надійності, розробки оптимальних та адаптивних законів керування. Об'єктом досліджень є системи керування процесами імпульсного лубрикаторного змащення суднових головних двигунів. Предметом досліджень є імітаційна модель системи керування процесами імпульсного лубрикаторного змащення суднових головних двигунів.*

*Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано структуру системи імпульсного лубрикаторного змащення та визначено функції і параметри всіх елементів системи. Зазначено, що незважаючи на використання новітніх контрольно-вимірювальних засобів та складних алгоритмів керування, системи імпульсного лубрикаторного змащення все ще мають нерозв'язані проблеми, зокрема з впливом параметрів палива на процес змащення та забезпечення живучості у разі виникнення аварійних ситуацій.*

*Побудовано математичну модель складових системи змащення, яка описує їх роботу в умовах різних режимів функціонування. За допомогою програмного забезпечення реалізовано імітаційну модель у вигляді симулятора, який дозволяє проводити експерименти, що моделюють різні умови роботи системи змащення та вплив різних параметрів системи, таких як тиск мастила, температура, в'язкість мастила, на ефективність змащення.*

*Розроблена імітаційна модель системи змащення головного двигуна дозволяє проводити дослідження процесів в системі змащення за різних умов, що дозволяє виводити висновки про ефективність та надійність системи змащення, знаходити оптимальні закони керування та покращувати процес змащення.*

*Ключові слова: імітаційна модель, система лубрикаторного змащення, судновий головний двигун, система керування, ефективність.*

S.V. BIHUN, A.L. SIMANENKOV

Kherson State Maritime Academy

Yu.O. LEBEDENKO

Kherson National Technical University

## SIMULATION MODEL OF THE CONTROL SYSTEM OF THE CYLINDER OIL INJECTION PROCESS OF MARINE ENGINES

*The article is devoted to the development of a simulation model of the control system for the injection of cylinder lubricant of marine engines for conducting research on the processes in the lubrication system in different modes of operation, which will provide an opportunity to develop highly efficient and highly reliable algorithms for controlling the lubrication process.*

*The purpose of this study is to analyze the model structure of the impulse lubricator lubrication system of the ship's main engine and build a simulation model of the lubrication process control system for the analysis of efficiency, survivability and reliability, development of optimal and adaptive control laws. The object of research is the process control system of impulse lubricator lubrication of ship's main engines. The subject of research is a simulation model of the process control system of impulse lubricator lubrication of ship's main engines.*

*To achieve the goal, the work analyzed the structure of the pulse lubricator lubrication system and determined the functions and parameters of all system elements. It is noted that despite the use of the latest control and measurement tools and complex control algorithms, impulse lubricator lubrication systems still have unsolved problems, in particular with the influence of fuel parameters on the lubrication process and ensuring survivability in the event of emergency situations.*

*A mathematical model of the components of the lubrication system was built, which describes their operation under different modes of operation. With the help of the software, a simulation model was implemented in the form of a simulator, which allows conducting experiments simulating different operating conditions of the lubrication system and the influence of various system parameters, such as lubricant pressure, temperature, lubricant viscosity, on lubrication efficiency.*

*The developed simulation model of the lubrication system of the main engine allows to study the processes in the lubrication system under different conditions, which makes it possible to draw conclusions about the efficiency and reliability of the lubrication system, find optimal control laws and improve the lubrication process.*

*Key words: simulation model, lubricator lubrication system, ship's main engine, control system, efficiency.*

### Постановка проблеми

Для забезпечення надійної роботи дизельного двигуна важливим фактором є правильний режим змащення, використання якісного мастила та очищення поверхонь під час експлуатації [1]. Система змащення 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 в циліндрі та пригорання поршневих кілець. Належне змащення дизельного двигуна забезпечує його безвідмовну та надійну роботу, знижує експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування та ремонт.

Для визначення ефективності систем змащення потрібно враховувати різноманітні фактори, зокрема, структуру системи керування та ефективність алгоритмів, які вона використовує. Одним із швидких та зручних методів аналізу процесів у системах змащення є використання математичних моделей. Враховуючи складність системи, неможливість створення аналітичних моделей через велику кількість факторів, що впливають на процес змащення, для отримання стійкої статистики доцільно застосовувати імітаційне моделювання. Щоб створити імітаційну модель системи змащення головного двигуна, необхідно провести детальний аналіз її структури та дослідити ефективність використовуваних алгоритмів керування. Тільки тоді можна буде виявити шляхи для підвищення ефективності системи змащення.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Раніше для змащення циліндрових втулок використовували механічні лубрикатори, але сьогодні вони майже повністю замінені сучасними електронними системами з керуванням.

Такі системи складаються з різноманітних компонентів, таких як запасні та додаткові масляні цистерни, маслоохолоджувачі, маслопідігрівачі, масляні насоси, арматура, трубопроводи та контрольно-вимірювальна та керуюча апаратура. На відміну від механічних лубрикаторів, вони містять датчики, електронні регулятори з можливістю інтеграції до обчислювальної мережі та виконавчі елементи. Все це дозволяє за допомогою спеціальних форсунок розпорошувати мастило по всьому колу втулки циліндра, ефективно змащуючи таким чином поверхню втулки та забезпечуючи зменшення витрат на 40-50%.

В системі «Альфа-лубрикатор» фірма MAN Diesel [2] мастило під великим тиском (близько 200 бар) нагнітається із системи гідроприводу за допомогою поршня до відповідних форсунок у циліндрових втулках, які розпилюють мастило на поверхні поршневих кілець та втулок. У момент руху поршня від нижньої мертвої точки до верхньої, форсунки випускають мастило на поверхню поршневих кілець та втулок, коли пакет поршневих кілець проходить повз них. Таким чином, мастило рівномірно розподіляється по поверхнях тертя, що значно покращує умови формування надійної плівки мастила на цих поверхнях, дозволяючи суттєво скоротити витрату циліндрового мастила при хорошому стані поверхонь тертя. Управління альфа-лубрикатором електричне, система управління регулює дозування мастила в залежності від вмісту сірки у паливі [3].

Фірма WARTSILA NSD розробила і впровадила на дизелях серії RTA систему імпульсної лубрикаторної системи змащення циліндрів «Petrofit Pulse Lubricating System»(PPLS) (рис. 1) [4].

Основними елементами такої системи є:

- імпульсний мастильний модуль, що складається з дозуючого насоса з часом подачі, який керується електронним блоком керування;
- форсунки (до восьми в одному ряду), розташовані по діаметру циліндрової втулки;
- вимірювальна система;
- система фільтрації;
- допоміжний привід подання циліндрового мастила;
- система керування;
- датчики кута повороту колінчастого валу.

Система управління складається з ряду дозуючих насосів (імпульсних мастильних модулів). Зв'язок між ними забезпечується через шину CAN із забезпеченою надмірністю.

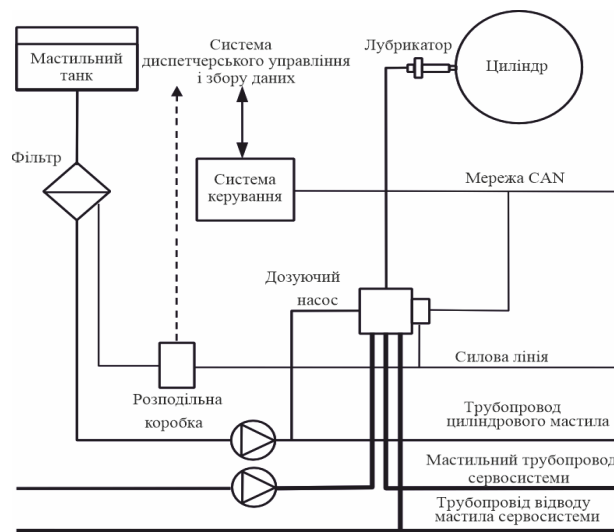


Рис. 1. Принципова схема системи лубрикаторного змащення з електронним керуванням

Імпульсний мастильний модуль для кожного циліндра складається з дозуючого насоса, 4-ходового соленоїдного клапана, датчика тиску, електронного блоку керування та гідроакумулятора діафрагмового типу, зібраних в один вузол (рис. 2).

Датчик тиску контролює тиск дозування, а електромагнітний клапан запускає змащувальний насос. Система керування двигуном контролює все це та здійснює керування подачею мастила за допомогою виконавчих механізмів лубрикаторів з магістралі змащення, в якій необхідно підтримувати необхідний тиск.

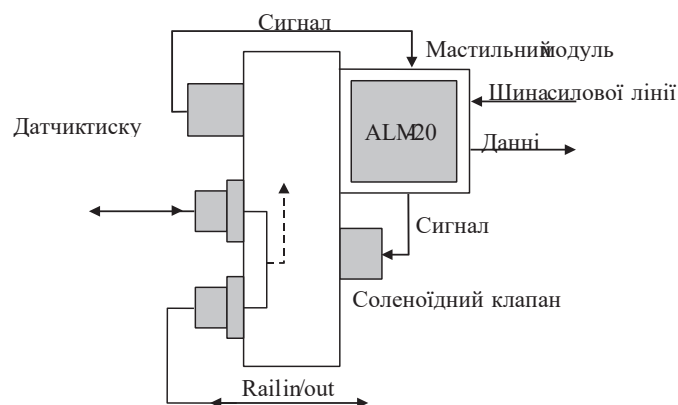


Рис. 2. Принципова схема мастильного модуля

Залежно від навантаження на циліндр система управління двигуна посилає відповідний сигнал на контролюючу електроніку мастильного модуля, інформуючи її про кількість мастила, необхідного на даний час. Таким чином, мастильний модуль подає дуже точну кількість циліндрового мастила з високою швидкістю до лубрикаторів в повній синхронізації з системою управління двигуна.

Таким чином, система змащення головного двигуна є складним об'єктом, що потребує контролю великою кількістю величин в реальному часі, зокрема: температури мастила, тиску у лубрикаторах, в'язкості мастила [5].

Незважаючи на використання новітніх контрольно-вимірювальних засобів та складних алгоритмів керування, системи імпульсного лубрикаторного змащення все ще мають нерозв'язані проблеми.

Перш за все, необхідно розуміти, що різні види циліндрових мастил та палив з різним вмістом сірки, а також особливості конструкції систем змащення, потребують керування дозуванням з урахуванням характеристик палива, щоб уникнути невизначеності в ефективному використанні циліндрового мастила. На сьогоднішній день, контроль показників відпрацьованого циліндрового мастила є найбільш ефективним способом забезпечення безпечної, ефективної та екологічної експлуатації циліндро-поршньових груп малооборотних дизелів [6].

По-друге, наявні імпульсні системи змащення не забезпечують достатньої надійності для судових двигунів в аварійних режимах та не забезпечують довговічність механізму в цілому. Наприклад, при відмові певного вузла, такого як індуктивний датчик зворотного зв'язку, або програмного збою, двигун може стати непридатним до експлуатації. Щоб виправити ці недоліки, можна розглянути впровадження прогнозуючих систем керування. Такі системи, використовуючи дані про попередні цикли, можуть прогнозувати і розробляти закони управління для наступних циклів, навіть при обмеженій інформації про фактичний стан об'єкта.

Підвищення ефективності та надійності процесу змащення за рахунок удосконалення алгоритмів керування потребує дослідження поведінки системи змащення в різних режимах функціонування, зокрема в аварійних, що зручно здійснювати за допомогою імітаційних моделей.

### **Мета дослідження**

Метою даного дослідження є аналіз структури моделі системи імпульсного лубрикаторного змащення судового головного двигуна та побудова імітаційної моделі системи керування процесом змащення для вивчення різних аспектів роботи систем, зокрема, для аналізу ефективності, живучості та надійності, розробки оптимальних та адаптивних законів керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні кроки [7]:

1. На основі аналізу структури системи імпульсного змащення визначити функції та параметри всіх елементів системи.
2. Побудувати математичну модель складових системи змащення, яка описує їх роботу в умовах різних режимів функціонування.
3. За допомогою програмного забезпечення реалізувати цю модель у вигляді симулятора, який би дозволив проводити експерименти, що моделюють різні умови роботи системи змащення та вплив різних параметрів системи, таких як тиск мастила, температура, в'язкість мастила, на ефективність змащення.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Як вже було розглянуто вище, система лубрикаторного змащення складається з наступних основних компонентів: мастильної магістралі з основним мастильним насосом, що забезпечує подачу мастила до імпульсного мастильного модуля; мастильного резервуара; імпульсного дозуючого насоса, акумулятора та керованого клапана, пов'язаного з форсунками. Для забезпечення керування процесом присутні також контрольно-вимірювальні прилади та пристрої

керування. Всі ці складові мають бути представлені в імітаційній моделі. Ця модель має давати можливість не тільки просто змінювати конфігурацію системи та алгоритми керування, а також досліджувати процес при різних параметрах складових частин та характеристик мастила.

Враховуючи це, доцільним для побудови такої моделі є застосування бібліотеки SimHydraulics програмного пакету Matlab. SimHydraulics є потужним інструментом для імітаційного моделювання гідравлічних систем та розробки систем керування, він надає гнучкість і зручність в роботі зі складними гідравлічними системами, дозволяючи імітувати роботу різних компонентів та їх взаємодію [8, 9].

Сильною стороною SimHydraulics при моделюванні системи лубрикаторного змащення є можливість параметризації моделі, що дозволяє встановлювати різні значення параметрів та тестувати систему на ефективність, живучість та надійність.

Другою перевагою SimHydraulics є можливість інтеграції з електричними, механічними та пневматичними імітаційними моделями, а також з моделями регуляторів, що дозволить створити більш повну та точну модель систем керування процесом змащення головного двигуна.

На рис. 3 показано спрощену імітаційну модель системи лубрикаторного змащення головного двигуна.

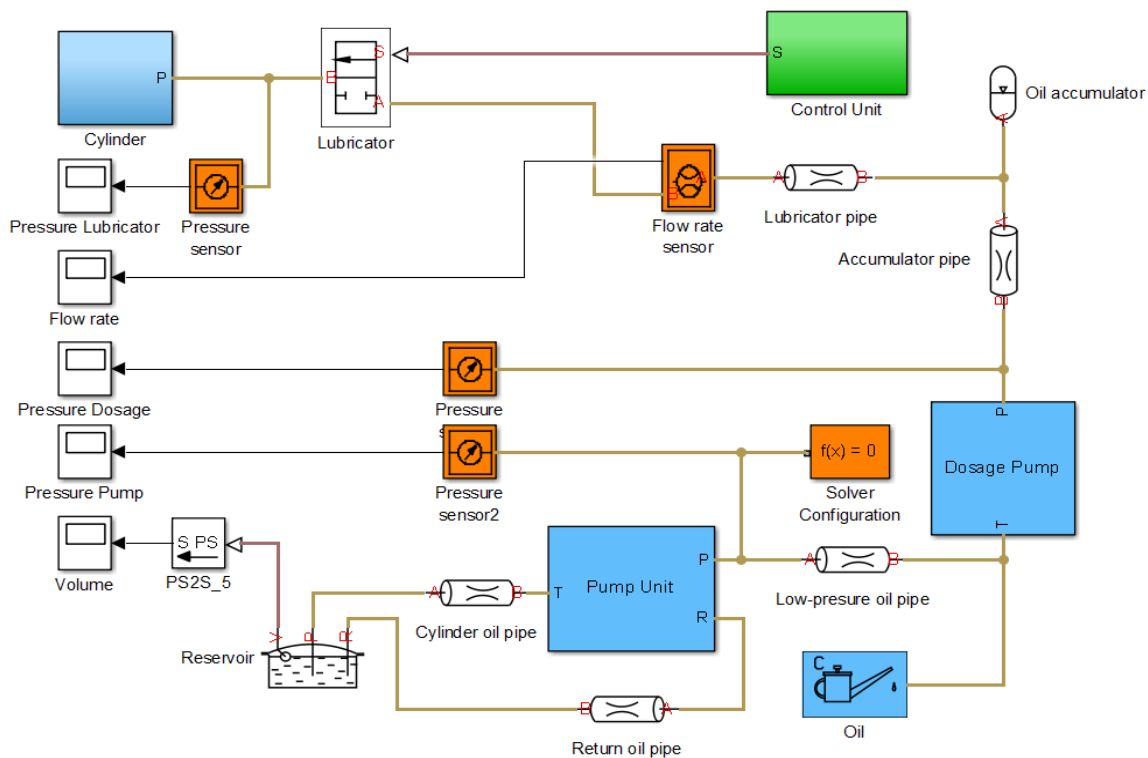


Рис. 3. Імітаційна модель системи лубрикаторного змащення суднового головного двигуна

Система складається з наступних основних складових частин:

- мастильного танку (Reservoir);
- насосного блоку Pump Unit;
- імпульсного дозуючого насоса Dosage Pump;
- акумулятора мастила Oil Accumulator;
- лубрикатора Lubricator, що подає мастило в циліндр двигуна (Cylinder);
- датчиків тиску Oil Pressure Sensor та витрати мастила Flow Rate Sensor;
- системи керування Control Unit.

Насосний блок подає мастило з мастильного танку до мастильної магістралі. При перевищенні тиску в системі надлишок мастила повертається до танка через зворотний трубопровід Return Oil Pipe. Далі імпульсний насос подає під високим тиском мастило до акумулятора та лубрикатора.

Блок керування генерує команди для дозуючого насоса та лубрикатора на впорскування мастила. У реальній системі ці команди генеруються на основі аналізу інформації з датчиків положення поршня, а також датчиків витрати та тиску, встановленими в мастильних магістралях.

Для визначення властивостей мастила, такі як номінальна в'язкість  $\nu_{nom}$ , щільність  $\rho_{nom}$  та інше застосовано блок Oil (Custom Hydraulic Fluid). При підключенні блоку до гідравлічної лінії властивості гідравлічної рідини автоматично передаються всім гідравлічним блокам у контурі.

На рис. 4 наведено структуру підмоделей основного насосного блоку (рис. 4, а) і дозуючого насоса (рис. 4, б). Порти P і T є входами та виходами гідравлічної системи і пов'язані з вхідним та вихідним трубопроводами відповідно. Порт S є механічним портом, який пов'язаний з приводним валом насоса і слугує для передачі обертового моменту насоса від зовнішнього джерела енергії. Позитивний напрямок визначається від порту T до порту P, тобто насос перекачує рідину від порту T до порту P, коли приводний вал S обертається в позитивному напрямку.

Параметризація моделі полягає у визначенні параметрів на основі технічної документації на насосний блок і може виконуватись шляхом апроксимації полінома для певної кутової швидкості залежно від доступних даних [10].

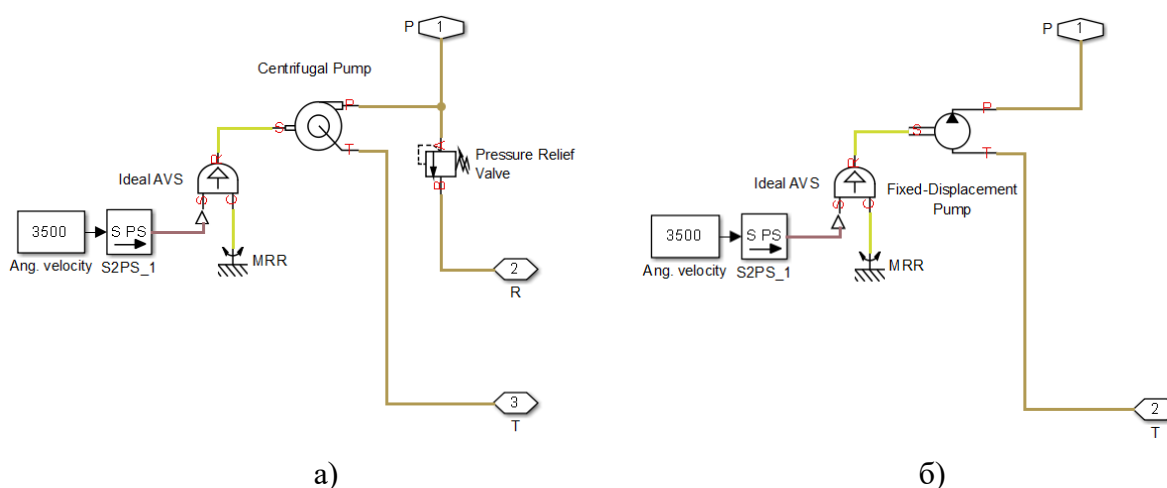


Рис. 4. Структура підмоделей основного насосного блоку (а) і дозуючого насоса (б)

Цей процес допомагає врахувати різні фактори, такі як робочий тиск, витрату рідини та інші параметри, які впливають на роботу насоса. Характеристики насоса при інших кутових швидкостях визначаються за законами спорідненості. Апроксимуючий поліном виводиться з рівняння імпульсного моменту Ейлера [1, 2], яке для заданого насоса, кутової швидкості та рідини можна представити у вигляді:

$$p_{ref} = k \cdot p_E - p_{HL} - p_D \quad (1)$$

де  $p_{ref}$  – перепад тиску на насосі для еталонного режиму, що характеризується еталонною кутовою швидкістю та густиною мастила;  $k$  – поправочний коефіцієнт для врахування коливань розмірів, невідповідності лопатей, об'ємів лопатей, внутрішнього тертя рідини тощо;  $p_E$  тиск Ейлера;  $p_{HL}$  – втрата тиску через гідравлічні втрати в каналах насоса;  $p_D$  – втрата тиску, спричинена відхиленням подачі насоса від його номінального значення.

Аналогічним чином побудовано і модель дозуючого насоса, з тією лише різницею, що в ній застосовано насос фіксованого об'єму та відсутній зворотний клапан (тому що передбачається

імпульсний режим роботи насоса). Насос із постійним робочим об'ємом представлено такими рівняннями, що пов'язують продуктивність насоса  $q$  та крутний момент на приводному валу насоса  $T$  з вищенаведеними параметрами:

$$\begin{cases} q = D \cdot \omega - k_l \cdot p, \\ k_l = \frac{k_{HP}}{v \cdot \rho}, \\ k_{HP} = \frac{D \cdot \omega_{nom} \cdot (1 - \eta_v) \cdot v_{nom} \cdot \rho_{nom}}{P_{nom}}, \\ T = \frac{D \cdot p}{\eta_{mech}}, \\ p = p_p - p_T. \end{cases} \quad (2)$$

Ключовими параметрами, необхідними для цього блоку, є об'єм насоса  $D$ , об'ємний  $\eta_v$  і загальний  $\eta_{mech}$  ККД, номінальний тиск  $p_{nom}$  і кутова швидкість  $\omega_{nom}$ .

Для імітації мастильного акумулятора використано блок Gas-Charged Accumulator, який представляє акумулятор як модель на основі таблиці даних і використовує параметри, доступні в паспортах виробника [11]. Мастильний акумулятор має об'єм  $V$  і складається з двох камер – газової та рідинної об'ємом  $V_F$ , які з'єднані системою гідравліки. Ці камери розділяється еластичною діафрагмою. Якщо тиск на вході до мастильного акумулятора  $p$  знижується нижче тиску попереднього навантаження  $p_{pr}$ , то газова камера ізолюється від системи за допомогою впускного клапана, тоді як тиск в газовій камері залишається незмінним на рівні попереднього навантаження, а тиск на вході залежить від тиску в системі, до якої підключений акумулятор. Коли тиск на вході досягає значення попереднього навантаження або вище, камери знову взаємодіють між собою. Акумулятор описується такими рівняннями:

$$\begin{cases} q_F = \frac{dV_F}{dt}, \\ p_F = p_G + p_{HS} \\ p_G = (p_{init} + p_A) \cdot \left( \frac{V_0 - V_{init}}{V_0 - V_F} \right)^k - p_A, \end{cases} \quad (3)$$

де  $p_{HS}$  – обмеження тиску,  $V_{init}$  та  $p_{init}$  - початкові об'єм та тиск відповідно,  $k$  - питома теплоємність.

Позитивний напрям блоку визначається як напрямок від входу рідини в гідроакумулятор, тобто якщо рідина направлена до гідроакумулятора, то швидкість потоку визначається як позитивна. Слід враховувати, що даний блок використовує деякі припущення та обмеження, зокрема: модель газової камери є ідеальною, процес вважається політропним, і не враховуються навантаження, такі як інерція та тертя, і стисливість рідини.

Через відсутність необхідності моделювання процесів в сервосистемі, лубрикатор змодельовано спрощено, на основі двоходового клапана, який є запірним клапаном з двома гідравлічними з'єднаннями - вхідним портом (А) і вихідним портом (В), а також одним фізичним з'єднанням сигнального порту (S), яке відповідає за контроль положення золотника.

Опір ділянок маслопроводів моделюється наближено, за допомогою блоків Hydraulic Resistive Tube, з урахуванням їх резистивних властивостей з урахуванням довжини  $L$ , коефіцієнта форми  $K_s$ , площі поперечного перерізу труби  $A$  та гідравлічного діаметра  $D_H$  при стаціонарних умовах імпульсу рідини. Слід зауважити, що тут не враховується стисливість та інерція рідини. Для врахування місцевих опорів, таких як вигини, фітинги, втрати на вході та виході тощо, усі опори перетворено на їх еквівалентні довжини  $L_{eq}$ , а потім загальна довжина

всіх опорів додана до геометричної довжини труби  $L$ . Втрати тиску  $p$  через тертя в цій моделі обчислюються за допомогою рівняння Дарсі [12], у якому втрати залежать від коефіцієнта тертя, який пропорційний квадрату швидкості потоку  $q$  рідини з щільністю  $\rho$  та залежить від режиму потоку. Якщо потік ламінарний, рівняння має вигляд:

$$p = \frac{K_s}{R_e} \cdot \frac{L + L_{eq}}{D_H} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot A^2} \cdot q^2 \cdot \text{sign}(q), \quad (4)$$

де  $R_e$  – число Рейнольдса.

Для прикладу, на рис. 5 наведено результати моделювання тисків на виході дозуючого насоса  $P_d$ , лубрикатора  $P_l$  та витрати мастила  $f$ .

Таким чином, розроблена імітаційна модель дозволяє спостерігати тиск і швидкість потоку в різних точках системи при різних режимах функціонування.

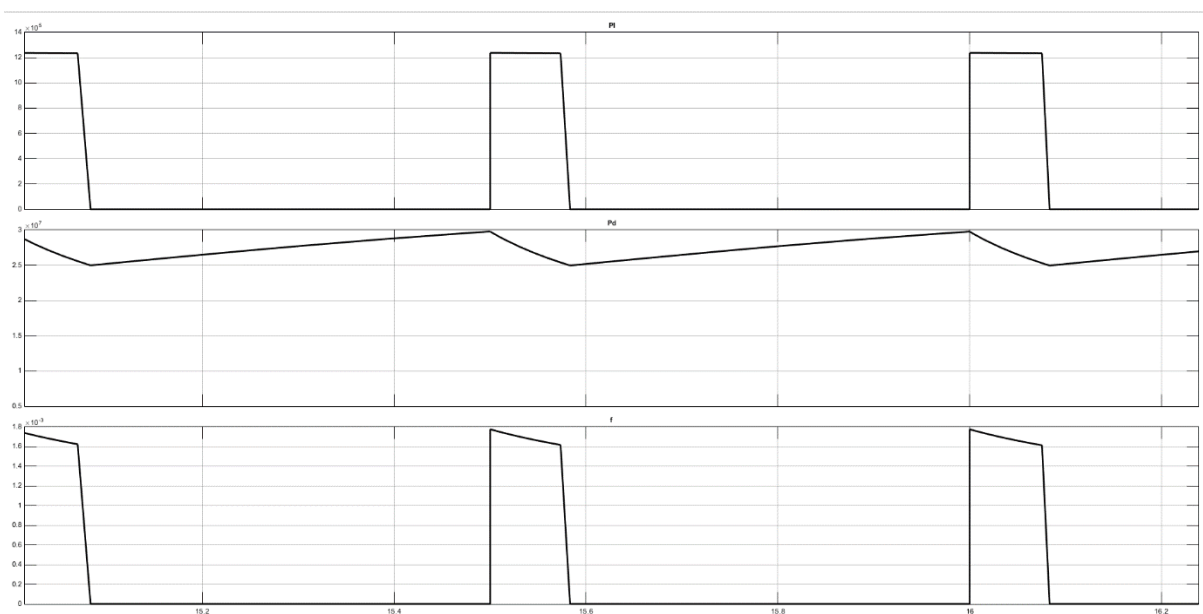


Рис. 5. Результати моделювання процесу впорскування мастила

### Висновки

Для покращення ефективності системи змащення головного двигуна та забезпечення його надійності та ефективного змащення в різних режимах експлуатації, необхідно впроваджувати сучасні засоби мікропроцесорної техніки з можливістю оперативного зв'язку з системою дистанційного управління та загальносудновою обчислювальною мережею. Розробка високоефективних алгоритмів для таких систем потребує проведення багатократних експериментів для збирання необхідної статистики, що можна спростити та прискорити за рахунок використання імітаційних моделей.

Розроблена імітаційна модель системи змащення головного двигуна дозволяє проводити дослідження процесів в системі змащення за різних умов, аналізувати отримані дані та порівнювати їх з реальними значеннями на системі змащення. Це дозволяє виводити висновки про ефективність та надійність системи змащення, знаходити оптимальні закони керування та покращувати процес змащення.

### Список використаної літератури

1. Doug Woodyard. Introduction: A Century of Diesel Progress. In: Doug Woodyard (ed.) Pounder's Marine. Diesel Engines and Gas Turbines. 9th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009; pp.ix-xxvii.



2. Alpha Lubricator System 707X-40C Alpha Lubricator System Operation Manual MC Engines [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.academia.edu/29710496/Alpha\\_Lubricator\\_System\\_707X\\_40C\\_Alpha\\_Lubricator\\_System\\_Operation\\_Manual\\_MC\\_Engines](https://www.academia.edu/29710496/Alpha_Lubricator_System_707X_40C_Alpha_Lubricator_System_Operation_Manual_MC_Engines)
3. Богач В.М., Довиденко Ю.М., Слободянюк І.М. Особливості лубрикаторних систем дизельних двигунів MAN-B&W. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 40.-Одеса: НУ «ОМА», 2020. С. 144 -151.
4. RTA and RT-flex low-speed engines [Електронний ресурс], – Режим доступу: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/rta-and-rt-flex-low-speed-engines>
5. Sun Z., Shen Z., Li X. Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. March 2018. 49(3). pp. 600-605. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012.
6. Tadros M., Ventura M. & Guedes Soares C. Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SOx Emissions. *J. Marine. Sci. Appl.* 19, 473–484 (2020). DOI: 10.1007/s11804-020-00156-0
7. Томашевський В. М. Т-56. Моделювання систем. К: Видавнича група ВНУ, 2005. 352 с.: іл. ISBN 966-552-120-9.
8. Garcia-Moral I., Fernandez de Canete J., Galindo C. (2011). System Engineering and Automation: An Interactive Educational Approach. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2011, 255 p. ISBN: 9783642202308
9. Руппель А. А. Моделирование гидравлических систем в MATLAB: учебное пособие. Россия: СибАДИ. 2009. 171 с.
10. Hicks T.G., Edwards T.W. Pump Application Engineering, McGraw-Hill, NY, 1971.
11. White F.M. Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, 1991, 614 p.
12. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Д. : Донбас, 2004. Т. 1 : А. К. 640 с. ISBN 966-7804-14-3.

### References

1. Doug Woodyard. Introduction: A Century of Diesel Progress. In: Doug Woodyard (ed.) Ponders Marine. Diesel Engines and Gas Turbines. 9th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009; pp.ix-xxvii.
2. Alpha Lubricator System 707X-40C Alpha Lubricator System Operation Manual MC Engines [Elektronnyi resurs], Rezhym dostupu: [https://www.academia.edu/29710496/Alpha\\_Lubricator\\_System\\_707X\\_40C\\_Alpha\\_Lubricator\\_System\\_Operation\\_Manual\\_MC\\_Engines](https://www.academia.edu/29710496/Alpha_Lubricator_System_707X_40C_Alpha_Lubricator_System_Operation_Manual_MC_Engines).
3. Bohach, V.M., Dovydenko, Yu. M., & Slobodianiuk, I.M. (2020). Osoblyvosti lubrykatornykh system dyzelnykh dvyhuniv MAN-B&W. *Sudnovi enerhetychni ustanovky: naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. 40.-Odesa: NU «ОМА», 144 -151.
4. RTA and RT-flex low-speed engines [Elektronnyi resurs], – Rezhym dostupu: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/rta-and-rt-flex-low-speed-engines>.
5. Sun, Z., Shen, Z., & Li, X. (2018). Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology)*. 49(3), 600-605. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012.

6. Tadros, M., Ventura, M. & Guedes Soares, C. (2020). Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SO<sub>x</sub> Emissions. *J. Marine. Sci. Appl.* **19**, 473–484. DOI: 10.1007/s11804-020-00156-0
7. Tomashevskiy, V. M. T-56. (2005). Modeliuvannia system. K: Vydavnycha hrupa VNU. ISBN 966-552-120-9.
8. Garcia-Moral, I., Fernandez de Canete, J., & Galindo, C. (2011). System Engineering and Automation: An Interactive Educational Approach. Germany: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642202308
9. Ruppel, A. A. (2009). Modelyrovanye hydryavlycheskykh system v MATLAB: uchebnoe posobyе. Roscyia: SybADY.
10. Hicks, T.G., & Edwards, T.W. (1971). Pump Application Engineering, McGraw-Hill, NY.
11. White, F.M. (1991). Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill.
12. Mala hirnycha entsyklopediia : u 3 t. / za red. V. S. Biletskoho. D. : Donbas, 2004. T. 1 : A. K. ISBN 966-7804-14-3.

Сергій Бігун – аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації, Херсонська державна морська академія, e-mail: bigunsergej4@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6385-3296

Андрій Сіманенков – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації, Херсонська державна морська академія, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0797-5276

Юрій Лебеденко – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, e-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240