УДК 621.431.74
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/10

Слободянюк М.В.
Інститут Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Нікольський В.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

Нікольський М.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

ОЦІНКА МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Гідродинамічні процеси в системах впорскування палива дизельних двигунів є актуальним предметом дослідження, оскільки вони значною мірою визначають всі експлуатаційні параметри дизелів.

В Національному університеті Одеська морська академія виконано експериментальне дослідження процесу паливоподачі дизельної паливної апаратури на несталих та часткових режимах. Досліди проводилися на безмоторному стенді, який було обладнано програмно-апаратним комплексом реєстрації паливоподачі та програмно-апаратним електромеханічним комплексом управління положенням рейки паливного насоса високого тиску, що дало можливість отримати експериментальні параметри гідродинамічних процесів у паливній апаратурі суднового середньообертового дизеля в динамічному режимі.

Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску під час роботи на навантажувальній характеристиці. Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів паливоподачі з режимними та регулювальними факторами, а також статистичні характеристики отриманих регресійних моделей.

У роботі представлені результати моделювання характеристик системи паливоподачі суднового середньообертового дизеля у формі статистичних залежностей основних показників впорскування від регулювальних та експлуатаційних параметрів. Сформовані регресійні моделі відображають взаємозв'язок параметрів процесу впорскування для навантажувальної характеристики суднового середньообертового дизеля.

Проведене дослідження вказує на статистичну значимість представлених моделей (кута впорскування, тиску палива в штуцері паливного насоса, тиску в паливному каналі форсунки від частоти обертання розподільного валу та положення рейки паливного насоса високого тиску) та їх придатність для оцінки навантажувальної характеристики суднового середньообертового дизеля.

Ключові слова: *середньообертовий дизель, паливна апаратура, змінні режими, навантажувальна характеристика, гідродинамічні процеси, динамічні випробування, статистичні моделі.*

Вступ. Дослідження процесів впорскування палива виконуються різними методами. Поряд із традиційними формами подання результатів експериментальних даних, які виконані у графічному вигляді та у формі аналітичних моделей, є ефективною статистична обробка даних у вигляді регресійних залежностей. Такий підхід використаний у даній роботі під час аналізу результатів вимірювання параметрів паливоподачі суднового середньообертового дизеля, які були отримані під час динамічних безмоторних стендових випробувань. Умови експерименту відповідали навантажувальній характеристиці. Обробку даних з розрахунком статистик регресійних рівнянь здійснено за допомогою пакета STATISTICA.

Постановка проблеми. Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску під час роботи на навантажувальній характеристиці.

Предметом дослідження є взаємозв'язок параметрів паливоподачі з режимними та регулювальними факторами, а також статистичні параметри отриманих регресійних моделей.

Дослідження проведено на безмоторному стенді в умовах динамічних випробувань, з використанням створеного вимірювального та електромеханічного комплексу, з комп'ютерним

керуванням режимів експерименту та записом параметрів паливоподачі.

Обробку експериментальних даних та підготовку масивів інформації для пакету статистичного аналізу проведено засобами вимірювального комплексу.

За даними статистичного аналізу визначено кращу форму регресійних моделей.

Метою дослідження є одержання математичної моделі процесів у паливній системі високого тиску для навантажувальної характеристики суднового середньообертового дизеля.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

– підготувати вихідний матеріал для статистичної обробки за допомогою використаних експериментальних даних, які отримані авторами в роботі [1];

– сформувати регресійні рівняння залежності кута впорскування, тиску палива в насосі високого тиску (ПНВТ), тиску в паливному каналі форсунки від положення рейки та швидкості обертання розподільного валу з оцінкою статистичних характеристик отриманих моделей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах [2–5] досліджено динамічні характеристики транспортного дизеля, що працює в умовах змінних навантажень. Суднові дизелі у багатьох випадках також експлуатуються при частій зміні навантаження – пуски, зупинки, реверс, вплив поривів вітру, ударні дії хвиль. При цьому мінімальний час прийому навантаження є важливим фактором керованості судна. Проведений аналіз впливу характеру зміни початкового тиску в системі паливоподачі на тривалість перехідного процесу довів, що параметри перехідного процесу в паливній апаратурі дизеля можуть позитивно або негативно впливати на динамічні якості дизеля.

У роботах [6-8] проведено оцінку економічності дизеля на несталих режимах роботи. За результатами обробки експлуатаційних та експериментальних даних перевищення витрати палива на перехідному режимі при навантажені, у порівнянні зі сталим режимом, складає 43 %, а в режимі холостого ходу – 25 %.

Наведені дані свідчать про важливість процесів паливоподачі під час формування динамічних характеристик дизелів. Це підтверджує доцільність досліджень, результати яких представлені авторами у статті, включаючи встановлення статистичних закономірностей для параметрів впорскування палива.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні показники паливоподачі, які використані для статистичної обробки, отримані в результаті динамічних випробувань за характеристикою навантаження системи впорскування дизеля 6ЧН25/34 на безмоторному стенді [9]. Загальний вигляд стенду із встановленою паливною апаратурою та датчиками для реєстрації параметрів впорскування представлені на рис. 1.

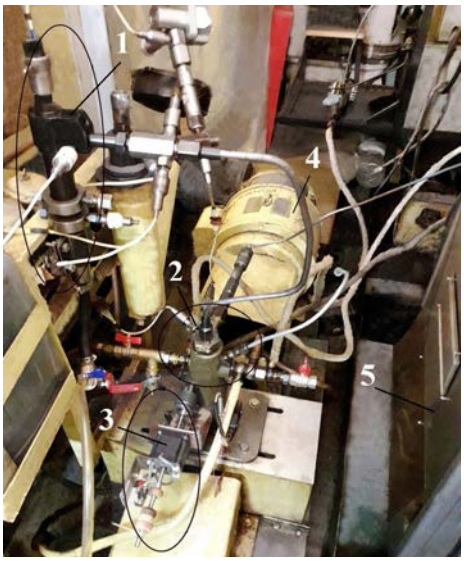

Рис. 1. Безмоторний стенд для дослідження паливної апаратури: 1 – форсунка; 2 – паливний насос високого тиску (ПНВТ); 3 – пристрій, що керує переміщенням рейки ПНВТ; 4 – електродвигун; 5 – станція управлення електродвигуном

Безмоторний стенд обладнано комп'ютерно-інтегрованою системою у складі:

– програмно-апаратного комп'ютерного комплексу реєстрації паливоподачі;

– програмно-апаратного електромеханічного комплексу управління положенням рейки ПНВТ.

Під час експериментального дослідження вимірювальною системою реєструвалися:

– тиск палива в штуцері паливного насоса $p_н$;

– тиск палива на вході у форсунку $p_{ф.вх}$;

– тиск у паливному каналі форсунки $p_{ф.к}$;

– хід голки розпилювача (форсунки) z;

– визначалася частота обертання розподільного валу $n_р$;

– фіксувався кут повороту розподільного валу φ;

– вимірювався час t;

– переміщення рейки ПНВТ $m_р$.

Навантажувальна характеристика отримана шляхом ступінчатого переміщення рейки ПНВТ при постійній напрузі електродвигуна на безмоторному стенді відповідно до заданої циклограми.

Методика дослідження включає статистичний аналіз параметрів навантажувальної характеристики.

Статистичний аналіз гідродинамічних показників впорскування палива, які були отримані під час динамічних випробувань за навантажувальною характеристикою, виконано за експериментальними даними, які наведені в [1].

Графічне зображення ходу експерименту відображено на графіках рис. 2. Використана шкала часу вказує на момент запису показників та одночасно вказується номер циклу комп'ютерної осцилограми.

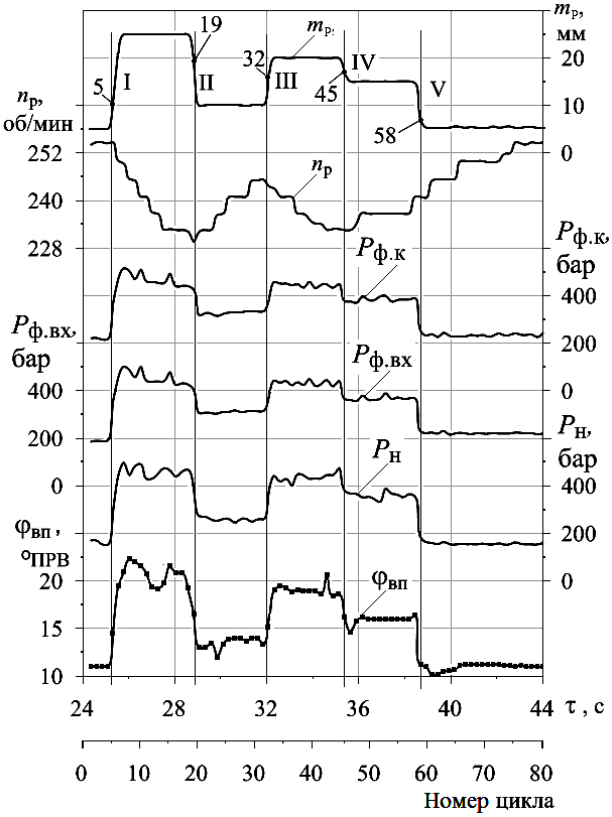

Рис. 2. Параметри подачі палива на режимах навантажувальної характеристики під час динамічних випробувань: I – mp =5–25 мм; II – 25–10 мм; III – 10–20 мм; IV – 20–15 мм; V – 15–05 мм; 5, 19, 32, 45, 58 – нумерація циклів під час переміщення рейки ПНВТ

Параметри експериментального дослідження отримані, як зазначено вище, в умовах динамічних випробувань при постійній напрузі електродвигуна безмоторного стенда.

У результаті коливання навантаження, яке викликане переміщенням рейки ПНВТ, спостерігалася деяка зміна частоти обертання розподільного валу.

Межі зміни частоти обертання $n_р$ склали 233÷255 об/хв, що відповідає 9 % або ±4,5 % від середнього значення.

Для вирішення питання про статистичну значущість зміни обертів $n_р$ в отриманому діапазоні проведено аналіз спільного впливу положення рейки $m_р$ та $n_р$ на величину кута впорскування $\varphi_{вп}$. Їх взаємозв'язок описаний двофакторним регресійним лінійним рівнянням

$$\varphi_{вп} = 7{,}4168 + 0{,}49322m_р + 0{,}0050825n_р.$$

Статистичні параметри моделі представлені у табл. 1 та 2. Для оцінки значущості частоти обертання розглянемо два показники: рівень значимості – p і критерій Стьюдента t.

Позначення, що використовуються в таблицях (програмне забезпечення STATISTICA, версія 5):

– Ефект – члени рівняння регресії та помилка (залишків);

– Параметр – коефіцієнти при факторах;

– *SS* (Sums of Squares) – сума квадратів відхилень значень від середнього для моделі чи ефекту;

– *SS* моделі – сума квадратів відхилень передбачуваних значень від середнього;

– *SS* залишок – сума квадратів відхилень залишків від середнього за залишками;

– *MS* (Mean of Squares) – дисперсія, сума квадратів відхилень, що припадає на одну ступінь свободи;

– Множин. *R* – коефіцієнт множинної кореляції;

– Множин. *R*2 – коефіцієнт детермінації;

– Скоригов. *R*2 – скоригований *R*2 на число членів у регресійному рівнянні;

– Ст. Пом. – стандартна помилка, міра розсіювання значень, що спостерігається щодо лінії регресії, а також оцінки якості параметрів;

– t – критерій Стьюдента, що використовується для оцінки статистичної значущості параметрів рівняння;

– F – критерій Фішера, який використовується для перевірки значущості регресійної моделі та значущості ефектів;

– p – рівень значимості є ймовірністю помилки, тому що зв'язок між змінними є лише випадковою особливістю даної вибірки;

– *cc* – число ступенів свободи для відповідного ефекту.

Оцінка значимості складових моделей проводиться шляхом порівняння, розрахованого t – критерію Стьюдента з табличним значенням. Аналізу підлягають коефіцієнт регресії та вільний член. При цьому розраховується помилка відповідного параметра, а потім визначається величина t, як відношення значення параметра до помилки. Для лінійного однофакторного рівняння – це $t_a = a/m_a$, $t_b = b/m_b$, де t_a, t_b – розрахункові статистики для вільного члена та коефіцієнта регресії, b – коефіцієнт регресії, a – вільний член. Перевищення фактичного (розрахункового) значення над

Таблиця 1

Одновимірні критерії значущості для $\varphi_{вп}$					
Ефект	*SS*	Ступені свободи	*MS*	*F*	*p*
Вільний член	1,6728	1	1,6728	9,561	0,003074
$m_р$	438,8614	1	438,8614	2508,426	0,0
$n_р$	0,0494	1	0,0494	0,2823	0,597274
Помилка	9,9724	57	0,1750	–	–

Таблиця 2

Оцінки параметрів				
Ефект	$\varphi_{вп}$ Парам.	$\varphi_{вп}$ Ст.Пом.	$\varphi_{вп}$ *t*	$\varphi_{вп}$ *p*
Вільний член	7,4168	2,39861	3,0921	0,0307
$m_р$	0,4932	0,00985	50,0842	0,0
$n_р$	0,0051	0,00957	0,5313	0,5313

Таблиця 3

Одновимірні критерії значущості для $p_н$					
Ефект	*SS*	Ступені свободи	*MS*	*F*	*p*
Вільний член	425,0	1	425,0	4,097	0,047655
$m_р$	104825,3	1	104825,3	1010,448	0,0
$m_р^2$	23519,2	1	23519,2	226,710	0,0
Помилка	5913,3	57	103,7	–	–

Таблиця 4

Оцінки параметрів					
Ефект	$p_н$ Парам.	$p_н$ Ст.Пом.	$p_н$ *t*	$p_н$ *p*	$p_н$ Ст.Пом.2
Вільний член	12,454	6,15327	2,0241	0,047655	–
$m_р$	30,272	0,95234	31,7875	0,0	0,057681
$m_р^2$	-0,474	0,03148	-15,0569	0,0	0,057681

Таблиця 5

SS моделі та *SS* залишків для $p_н$										
Залежна змінна	Множин. *R*	Множин. *R*2	Скоригов. *R*2	*SS* моделі	*cc* моделі	*MS* моделі	*SS* залишку	*MS* залишку	*F*	*p*
$p_н$, бар	0,9964	0,9928	0,9925	810051	2	405025	5913,2	103,7	3904,2	0,0

табличним свідчить про значущість параметра моделі, що розглядається.

Критерій Фішера (*F* – статистика) є ставленням дисперсії моделі до дисперсії помилки та характеризує наскільки модель добре пояснює загальну дисперсію даних. Оцінка значимості моделі також здійснюється порівнянням фактичного (розрахункового) і табличного значення *F*.

Оцінюючи значущість зміни $n_р$ у рівнянні $\varphi_{вп}$ за величиною $p = 0{,}597$, відзначимо його невідповідність до заданого рівня $p = 0{,}05$. Такий самий висновок можна зробити з порівняння величини $t = \sqrt{F} = \sqrt{0{,}2823} = 0{,}531$ та відповідного табличного $t_{табл} = 12{,}7$ (табл. 2).

Таким чином, вплив коливання частоти обертання на кут впорскування незначний і подальший аналіз слід проводити для одного фактора навантажувальної характеристики – положення рейки ПНВТ $m_р$.

Аналогічні результати отримані і для інших параметрів паливоподачі:

– кута впорскування $\varphi_{вп}$ ($m_р$);

– тиску палива в штуцері паливного насоса $p_н$ ($m_р$);

– тиску в паливному каналі форсунки $p_{ф.к}$ ($m_р$).

Попередня візуальна оцінка значень, що спостерігаються, $p_н$ залежно від $m_р$ виявила явну нелінійність. Це стало підставою для застосування до опису статистичних зв'язків однофакторної моделі другого порядку у формі регресійного рівняння $p_н = f(m_р, m_р^2)$.

Для шуканого взаємозв'язку отримана наступна однофакторна модель другого порядку:

$$p_н = 12{,}454 + 30{,}272m_р - 0{,}47403m_р^2.$$

Статистичні параметри даного регресійного рівняння наведені у таблицях 3 (Одновимірні критерії значущості для $p_н$), 4 (Оцінка параметрів), 5 (*SS* моделі та *SS* залишків), що характеризує модель загалом.

Критичне табличне значення критерію Фішера $F_{табл}$ для інтервалу ступенів свободи 50-60 знаходиться в діапазоні 3,15-3,18. Оскільки фактичний $F_{факт}$ моделі (табл. 5) значно більше $F_{крит}$ ($F_{факт} >> F_{табл}$), регресійні рівняння вважатимуться значними.

Оцінка точності моделі здійснюється за величиною коефіцієнта детермінації *R*2 (скоригованого). Величина *R*2 = 0,99 означає, що 99 % загальної дисперсії експериментальних значень пояснюється регресійною залежністю, і 1 % посідає невраховані чинники, зокрема на варіації числа обертів.

Значимість параметрів оцінюється за допомогою критерію Стьюдента (*t* – статистики), який наведено у табл. 4. Критичне значення *t* знаходиться для даного числа спостережень, числа незалежних змінних та рівня значущості $t_{табл}$ (n-m-1, p), де $n_р$ = 60 – кількість спостережень (обсяг вибірки), $m_р$ = 2 – кількість пояснюючих змінних, p = 0,05. Знайдене критичне значення знаходиться у діапазоні 2,00 < $t_{крит}$ < 2,02. Оскільки будь-який з *t* – критеріїв у таблиці оцінки параметрів перевищує $t_{крит}$, це означає, що статистична значимість коефіцієнтів підтверджується.

Нижче наведено два графіки, що ілюструють якість аналізованої моделі (рис. 3, 4).

Графік на рис. 3 вказує, що передбачені значення, і ті, що спостерігаються, досить тісно групуються навколо лінії рівних значень, що підтверджує хорошу апроксимацію досвідчених даних.

Залежність передбачуваних значень тиску палива у штуцері паливного насоса $p_н$ від переміщення рейки ПНВТ $m_р$ наведено на рис. 4 спільно з експериментальними даними.

Рис. 3. Положення значень, що спостерігаються на лінії рівних величин $p_н$ для навантажувальної характеристики: □ – значення, що спостерігаються

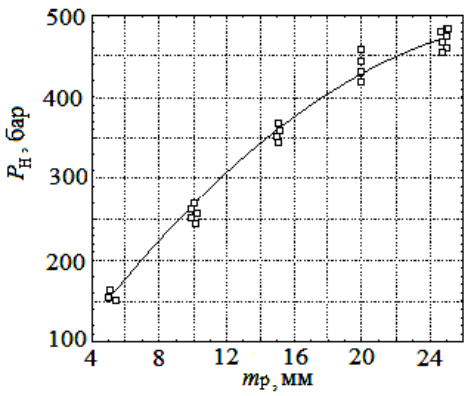

Рис. 4. Графік передбачених значень $p_н$ залежно від положення рейки ПНВТ і величини $p_н$, що спостерігаються: □ – значення, що спостерігаються

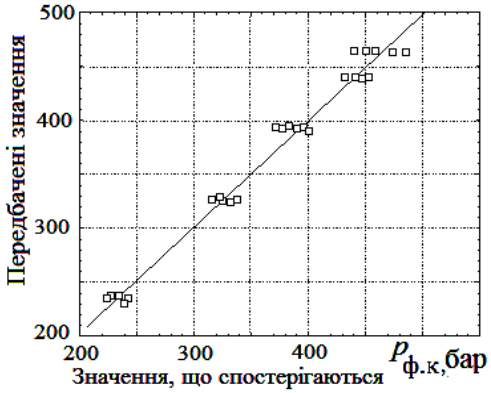

Рис. 5. Положення значень, що спостерігаються на лінії рівних величин $p_{ф.к}$ для навантажувальної характеристики: □ – значення, що спостерігаються

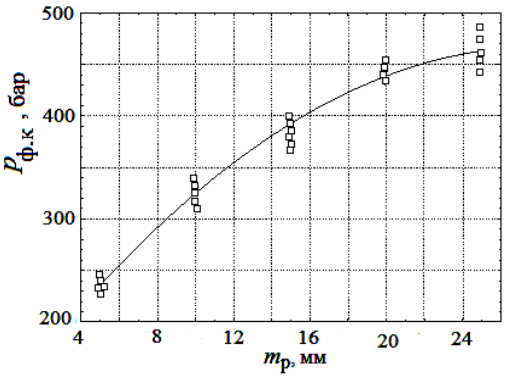

Рис. 6. Графік передбачених значень $p_{ф.к}$ в залежності від положення рейки ПНВТ і величини $p_{ф.к}$, що спостерігаються: □ – значення, що спостерігаються

Таблиця 6

Одновимірні критерії значущості для $p_{ф.к}$					
Ефект	*SS*	Ступені свободи	*MS*	*F*	*p*
Вільний член	42602,34	1	42602,34	389,59	0,0
m	67845,51	1	67845,51	620,43	0,0
m^2	19588,27	1	19588,27	179,13	0,0
Помилка	6233,05	57	109,35	–	–

Таблиця 7

Оцінки параметрів				
Ефект	$p_{ф.к}$ Парам.	$p_{ф.к}$ Ст.Пом.	$p_{ф.к}$ *t*	$p_{ф.к}$ *p*
Вільний член	124,69	6,3175	19,738	0,0
$m_р$	24,35	0,9778	24,909	0,0
$m_р^2$	-0,43	0,0323	-13,384	0,0

Таблиця 8

SS моделі та *SS* залишків для $p_{ф.к}$										
Залежна змінна	Множин *R*	Множин *R*2	Скоригов *R*2	*SS* моделі	*cc* моделі	*MS* моделі	*SS* залишок	*MS* залишок	*F*	*p*
$p_{ф.к}$	0,9926	0,9853	0,98475	416876	2	208438	6233	109,4	1906	0,0

Рис. 7. Положення значень $\varphi_{вп}$, що спостерігаються, на лінії рівних величин $\varphi_{вп}$ для навантажувальної характеристики: □ – значення, що спостерігаються

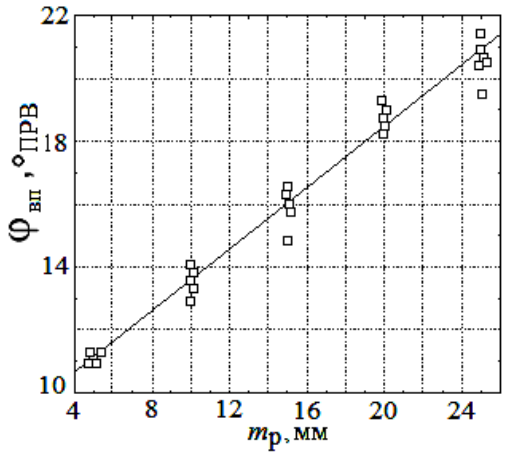

Рис. 8. Графік передбачених значень $\varphi_{вп}$ в залежності від положення рейки ПНВТ і величин $\varphi_{вп}$, що спостерігаються: □ – значення, що спостерігаються

Наступним завданням в обробці дослідних даних була побудова та аналіз моделі $p_{ф.к} = f(m_р, m_р^2)$. Для цієї залежності отримано однофакторне регресійне рівняння другого порядку

$$p_{ф.к} = 124{,}69 + 24{,}354m_р - 0{,}4326m_р^2.$$

Чисельні значення основних статистик рівняння наведено у таблицях 6, 7, 8.

Графічне уявлення отриманих характеристик дано на рисунках 5, 6.

Усі статистики, що характеризує значимість рівняння та його коефіцієнтів, задовольняють критичним значенням *F* – критерію та *t* – статистики. Отже, модель тиску палива у форсунці та її параметри значущі.

Для опису статистичного зв'язку кута впорскування $\varphi_{вп}$ та положення рейки ПНВТ виявилося достатньо однофакторної лінійної моделі виду

$$\varphi_{вп} = 8{,}6895 + 0{,}48992m_р.$$

Графіки рівняння наведено на рисунках 7 та 8. В обох випадках візуальна оцінка свідчить про хорошу збіжність значень $\varphi_{вп}$, які спостерігаються та передбачаються.

Значення рівняння обґрунтовується високим значенням критерію Фішера, що становить $F = 411588$, а для його параметрів величинами *t* – критерію Стьюдента 70,25 і 64,48. Дуже високі показники мають прогностичні якості моделі.

Дійсно, коефіцієнти кореляції та детермінації близькі до значень 0,99.

Висновки. Запропоновано статистичні моделі параметрів паливоподачі суднового середньообертового дизеля за даними динамічних безмоторних випробувань на режимах навантажувальних характеристик.

Моделі, які побудовані з використанням сучасного інструментарію статистичної обробки дослідних даних (програмний пакет STATISTICA), забезпечують широкі можливості варіювання способів та режимів аналізу експериментального матеріалу. Як базовий статистичний метод використано регресійний аналіз.

Для навантажувальної характеристики, як моделі тиску палива, використані однофакторні регресійні рівняння другого порядку, а для кута впорскування – першого порядку.

Результати моделювання у поєднанні з додатковим аналізом та порівнянням F – критеріїв та t – критеріїв отриманих параметрів з табличними значеннями дозволяють зробити висновок про статистичну значущість усіх моделей та придатність їх для подальшого використання в оцінці гідродинамічних процесів у системі впорскування палива у судновому дизелі.

Список літератури:

1. Половинка Е.М., Слободянюк М.В. Навантажувальна характеристика системи впорскування палива суднового середньообертового дизеля в умовах динамічних випробувань. *Technology audit and production reserves*. – 2018. № 6/1(44). С. 41–49.

2. Патрахальцев Н.Н. Пономарьов М.Н., Савастенко А.А. Вплив перехідних процесів у паливній апаратурі дизеля на його динамічні якості. *Вісник РУДН*. 2003. № 1. С. 15–18.

3. Іванченко А.А., Щенников І.А. Проблеми та досвід математичного моделювання екологічних та експлуатаційних показників суднового високооборотного дизеля М 482. *Вісник Державного університету морського та річкового флоту ім. адмірала С.О. Макарова*. 2016. № 3 (37). С. 166–173.

4. Блинов А.П., Блинов П.Н., Бернс П.А. Розробка математичної моделі спільної роботи паливної апаратури високого тиску та регулятора частоти обертання колінчастого валу дизеля. *Вісник Машинобудування*. 2017. № 3(31). С. 12–22.

5. Троїцкий А.В. Комп'ютерне моделювання паливоподачі у судновому середньообертовому чотирьохактному дизелі. *Морська техніка та технологія*. 2009. № 2. С. 188–191.

6. Овчаренко С.М., Корнеев П.С., Четвергов В.А., Вплив перехідних процесів на витрату палива дизелем в експлуатації. *Вісник вузів*. 2012. № 1(9). С. 27–32.

7. Блинов П.Н., Блинов А.П. Застосування математичної моделі процесу паливоподачі паливною апаратурою тепловозних дизелів для багатоваріантних розрахунків. *Вісник вузів*. 2014. № 3(19). С. 2–7.

8. Коссов Є.Є., Сухопаров С.І. Оптимізація режимів роботи тепловозних дизель-генераторів. Інтекст. 1999. – 184 с.

9. Сайт Державного підприємства Український інститут інтелектуальної власності (УКРПАТЕНТ), назва корисної моделі: Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів, номер – u 201805581 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858.

Slobodianiuk M.V., Nikolskyi V.V., Nikolskyi M.V. ASSESSMENT OF THE MODEL OF HYDRODYNAMIC PROCESSES OF FUEL INJECTION OF MEDIUM SPEED MARINE DIESEL

Hydrodynamic processes in fuel injection systems of diesel engines are an actual subject of research, as they largely determine all operational parameters of diesel engines.

At the National University of Odesa Maritime Academy, an experimental study of the process of fuel supply of diesel fuel equipment at unsteady and partial regimes was carried out. Experiments were carried out on a motorless stand, which was equipped with a software-hardware complex for registering fuel supply and a software-hardware electromechanical complex for controlling the position of the high-pressure fuel pump rail, which made it possible to obtain experimental parameters of hydrodynamic processes in the fuel equipment of a ship's medium-speed diesel engine in dynamic mode.

The object of the study is hydrodynamic processes in the high-pressure fuel system when operating on the load characteristic. The subject of the study is the relationship between fuel supply parameters and regulatory and regulatory factors, as well as statistical characteristics of the obtained regression models.

The paper presents the results of modeling the characteristics of the ship's medium-speed diesel fuel supply system in the form of statistical dependencies of the main injection indicators on the control and operational parameters. The formed regression models reflect the interrelationship of the parameters of the injection process for the loading characteristics of the ship's medium-speed diesel engine.

The conducted study indicates the statistical significance of the presented models (injection angle, fuel pressure in the fuel pump fitting, pressure in the fuel channel of the nozzle depending on the frequency of rotation of the camshaft and the position of the rail of the high-pressure fuel pump) and their suitability for assessing the loading characteristics of a marine medium-speed diesel engine.

Key words: *medium-speed diesel, fuel equipment, variable modes, load characteristics, hydrodynamic processes, dynamic tests, statistical models.*