

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

Половинка Э. М., д.т.н., профессор кафедры судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: Polovinkaem18@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6855-1269;

Слободянюк Н. В., преподаватель кафедры корабельных электроэнергетических систем Института военно-морских сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: Nikgavr1234@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2248-0255

Гидродинамические процессы в системе впрыскивания топлива в дизельных двигателях вызывает научных интерес исследования, что обусловлено формированием экономических параметров работы дизелей в целом.

На кафедре судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия» выполнено экспериментальное исследование процесса топливоподачи дизельной топливной аппаратуры на неустановившихся и частичных режимах. Экспериментальное исследование проводилось на безмоторном стенде, оборудованном программно-аппаратным комплексом «тензостанция» и программно-аппаратным электромеханическим комплексом управления положением рейки топливного насоса высокого давления, что дало возможность получить экспериментальные значения гидродинамических процессов в топливной аппаратуре судового среднеоборотного дизеля в динамическом режиме.

Объектом исследования являются гидродинамические процессы в топливной системе высокого давления при работе на скоростной и нагрузочной характеристике. Предметом исследования является взаимосвязь параметров топливоподачи с режимными и регулировочными факторами, а также анализ статистических параметров полученных регрессионных моделей

В работе представлены результаты моделирования характеристик системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля, в форме статистических зависимостей основных показателей впрыскивания от регулировочных и эксплуатационных параметров, так как данная форма является оптимальной для составления аналитических моделей с оформлением результатов в форме регрессионных зависимостей.

Сформированные регрессионные модели отображают взаимосвязь параметров процесса впрыскивания для скоростной и нагрузочной характеристики судового среднеоборотного дизеля.

Проведенное исследование показало статистическую значимость представленных моделей (угла впрыскивания, давления топлива в штуцере топливного насоса, давления в топливном канале форсунки от частоты вращения распределительного вала) и их пригодность в оценке скоростной и нагрузочной характеристик судового среднеоборотного дизеля.

Ключевые слова: *среднеоборотный дизель, топливная аппаратура, переменные режимы, нагрузочная характеристика, скоростная характеристика, динамические испытания, статистические модели.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.092-107

Введение. Исследования в области усовершенствования систем впрыскивания топлива выполняются различными методами. Наряду с традиционным методом представления характеристик систем топливоподачи дизелей, в графическом виде и в форме аналитических моделей эффективным является статистическая обработка экспериментальных данных с оформлением результатов в форме регрессионных зависимостей. Такой подход использован в данной работе при анализе результатов измерения параметров топливоподачи судового среднеоборотного дизеля, полученных в ходе безмоторных динамических стендовых испытаний. Условия эксперимента соответствовали скоростной и нагрузочной характеристикам. Обработка данных с расчетом статистик регрессионных уравнений осуществлена с помощью пакета STATISTICA.

Объект исследования и его технологический аудит. *Объектом исследования являются гидродинамические процессы в топливной системе высокого давления при работе на скоростной и нагрузочной характеристике.*

Предметом исследования является взаимосвязь параметров топливоподачи с режимными и регулировочными факторами, а также анализ статистических параметров полученных регрессионных моделей.

Исследование проведено на безмоторном стенде в условиях динамических испытаний, с использованием, созданного для данной работы измерительного и электромеханического комплекса, с компьютерным управлением режимов эксперимента и записью параметров топливоподачи.

Обработка экспериментальных данных и подготовка массивов информации для пакета статистического анализа проведена средствами блока измерительного комплекса.

По данным статистического анализа определена предпочтительная форма регрессионных моделей.

Цель и задачи исследования. *Целью исследования* является получение математической модели процессов в топливной системе высокого давления для скоростной и нагрузочной характеристик судового среднеоборотного дизеля.

Для выполнения цели необходимо выполнить следующие задачи:

– определить исходный материал для исследования качества. Принять за основу экспериментальные данные, полученные в работах [1, 2];

– сформировать регрессионные уравнения зависимости угла впрыскивания, давления топливного насоса высокого давления (ТНВД), давление в топливном канале форсунки от положения рейки и скорости вращения распределительного вала с оценкой статистических характеристик полученных моделей.

Исследование существующих решений проблемы. В работах [3, 4, 5, 6] исследованы динамические характеристики транспортного дизеля, работающего в условиях переменных нагрузок. Судовые дизели во многих случаях также эксплуатируются при частом изменении нагрузки – пуски, остановки, реверс, воздействие порывов ветра, ударные воздействия волн. При этом минимальное время приема нагрузки является немаловажным фактором управляемости судном. Проведен анализ влияния характера изменения начального давления в системе топливоподачи на длительность переходного процесса. Показано, что параметры переходного процесса в топливной аппаратуре дизеля могут положительно или отрицательно сказываться на динамических качествах дизеля.

В [7, 8, 9] проведена оценка экономичности дизеля на неустановившихся режимах работы. По результатам обработки данных эксперимента превышение расхода топлива при переходном процессе под нагрузкой относительно установившегося режима получено равным – 43 %, а в режиме холостого хода – 25 %.

Приведенные данные свидетельствуют о важности процессов топливоподачи при формировании динамических характеристик дизелей. Это подтверждает целесообразность исследований, результаты которых представлены авторами в публикуемой статье, включая установление статистических закономерностей для параметров впрыскивания топлива.

Методы исследования. Экспериментальные показатели топливоподачи, использованные для статистической обработки, получены в результате динамических испытаний по скоростной и нагрузочной характеристиках системы впрыскивания дизеля 6ЧН25/34 на безмоторном стенде [10]. Общий вид стенда с установленной топливной аппаратурой и датчиками для регистрации параметров впрыскивания представлены на фотографии рис. 1.



Рисунок 1 – Безмоторний стенд для дослідження топливної апаратури:

1 – форсунка; 2 – топливний насос високого тиску; 3 – пристрій, що керує переміщенням рейки ТНВД; 4 – електродвигач; 5 – станція управління електродвигачем.

Безмоторний стенд обладнаний комп'ютерною вимірною та керуючою системою в складі:

- програмно-апаратного комплексу «тензостанція»;
- програмно-апаратного електромеханічного комплексу управління положенням рейки ТНВД.

В ході експериментального дослідження вимірною системою реєструвалися:

- тиск палива в штуцері топливного насоса p_n ;
- тиск палива на вході в форсунку $p_{ф.вх}$;
- тиск в топливній каналі форсунки $p_{ф.к}$;
- ход игли розпилювача (форсунки) z ;
- визначалася частота обертання розподільного вала n_p ;
- фіксувався кут повороту розподільного вала φ ;
- вимірювався час t ;
- переміщення рейки ТНВД m_p .

Навантажувальна характеристика отримана шляхом ступінчастого переміщення рейки ТНВД відповідно до заданої циклограми при постійній напрузі електродвигача стенда. Швидкісна характеристика реалізована при розгоні та вибігу стенда.

Методика дослідження включає статистичний аналіз параметрів навантажувальної та швидкісної характеристик.

Статистичний аналіз гідродинамічних показувальних параметрів впорскування палива, отриманих при динамічних випробуваннях за навантажувальною характеристикою, виконаний за експериментальними даними, представленими в [1].

Графічне представлення ходу експерименту зображено на графіках рис. 2. Використовується часовий масштаб, відповідний моменту запису розглянутих показувальних параметрів. Одночасно вказується номер циклу на комп'ютерній осцилограмі.

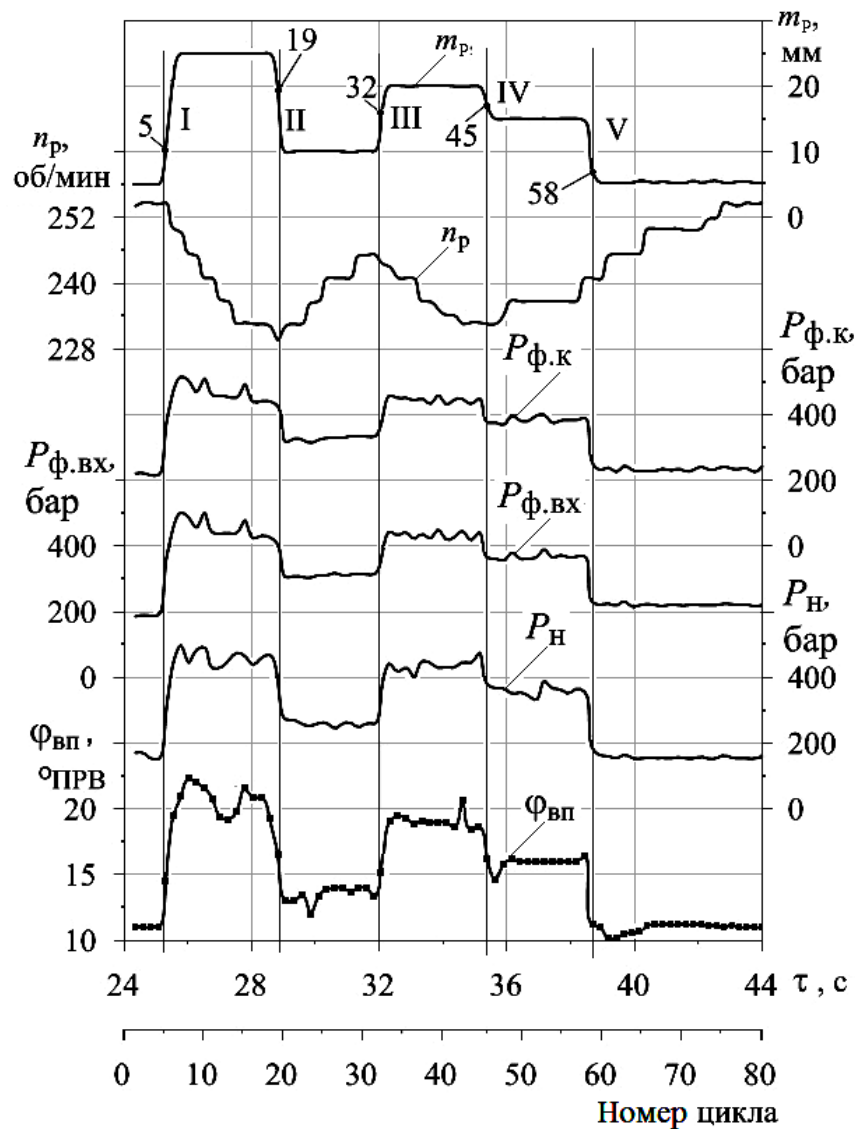


Рисунок 2 – Параметры топливоподачи на режимах нагрузочной характеристики при динамических испытаниях:

I – $m_p = 5\text{--}25$ мм; II – $25\text{--}10$ мм; III – $10\text{--}20$ мм; IV – $20\text{--}15$ мм; V – $15\text{--}05$ мм; 5, 19, 32, 45, 58 – номера циклов при перемещении рейки

Параметры экспериментального исследования получены в условиях динамических испытаний при постоянном напряжении электродвигателя безмоторного стенда. В результате при колебаниях нагрузки, вызванных перемещением рейки ТНВД, наблюдалось некоторое изменение частоты вращения распределительного вала. Границы изменения частоты вращения n_p составили $233\text{--}255$ об/мин, что соответствует 9 % или $\pm 4.5\%$ от среднего значения.

Для решения вопроса о статистической значимости изменения n_p в полученном диапазоне проведен анализ совместного влияния положения рейки m_p и n_p на величину угла впрыскивания $\varphi_{вп}$. Используя пакет STATISTICA, получено двухфакторное регрессионное линейное уравнение:

$$\varphi$$

Статистические параметры модели представлены в табл. 2, 3. Для оценки значимости частоты вращения рассмотрим два показателя: уровень значимости p и

Таблиця 2 – Статистические параметры модели

<i>Одномерные критерии значимости для $\varphi_{вп}$</i>					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св.член	1,6728	1	1,6728	9,561	0,003074
m_p	438,8614	1	438,8614	2508,426	0,0
n_p	0,0494	1	0,0494	0,2823	0,597274
Ошиб.	9,9724	57	0,1750	-	-

Таблиця 3 – Статистические параметры модели

<i>Оценки параметров</i>						
Эффект	$\varphi_{вп}$ Парам.	$\varphi_{вп}$ Ст.Ош.	$\varphi_{вп}$ t	$\varphi_{вп}$ p	$\varphi_{вп}$ Бета (?)	$\varphi_{вп}$ Ст. Ош.2
Св.член	7,4168	2,39861	3,0921	0,0307	-	-
m_p	0,4932	0,00985	50,0842	0,0	0,9997	0,01996
n_p	0,0051	0,00957	0,5313	0,5313	0,0106	0,01996

Используемые сокращения в таблицах (для русскоязычной версии STATISTICA):

- эффект – члены уравнения регрессии и ошибка (остатки);
- параметр – коэффициенты при факторах;
- SS (Sums of Squares) – сумма квадратов отклонений значений от среднего для модели или эффекта;
- SS модели – сумма квадратов отклонений предсказанных значений от среднего;
- SS остаток – сумма квадратов отклонений остатков от среднего по остаткам;
- MS (Mean of Squares) – дисперсия, сумма квадратов отклонений, приходящаяся на одну степень свободы;
- множество R – коэффициент множественной корреляции;
- множество R2 – коэффициент детерминации;
- скоррект. R2 – скорректированный R2 на число членов в регрессионном уравнении;
- ст. Ош. – стандартная ошибка, мера рассеяния наблюдаемых значений относительно линии регрессии, а также оценки качества параметров;
- t – критерий Стьюдента, используется для оценки статистической значимости параметров уравнения;
- F – критерий Фишера используется для проверки значимости регрессионной модели и значимости эффектов;
- p – уровень значимости представляет собой вероятность ошибки, что связь между переменными является лишь случайной особенностью данной выборки;
- сс – число степеней свободы для соответствующего эффекта.

Оценка значимости изменения n_p , $p = 0,597$ не отвечает заданному уровню значимости $p = 0,05$. Такой же вывод следует из сравнения величины $t = \sqrt{F} = \sqrt{0,2823} = 0,531$ и соответствующего табличного $t_{табл} = 12,7$ (табл. 3).

Таким образом, влияние колебания частоты вращения на угол впрыскивания незначимо и дальнейший анализ следует проводить для одного фактора нагрузочной x

а Аналогичные результаты получены и для других параметров топливоподачи $p_{ф.к}$ и p_n – давления в топливном канале форсунки и давления топлива в штуцере топливного насоса.

к В результате, ставилась задача получить статистические параметры взаимосвязи следующих характеристик впрыскивания топлива при работе системы топливоподачи по нагрузочной характеристике в условиях динамических испытаний:

- р** – угла впрыскивания $\varphi_{вп}$ (m_p);
- и** – давления топлива в штуцере топливного насоса $p_n(m_p)$;
- с** – давления в топливном канале форсунки $p_{ф.к}(m_p)$.

Предварительная визуальная оценка наблюдаемых значений p_n в зависимости от m_p выявила явную нелинейность. Это послужило основанием для применения к описанию статистических связей однофакторной модели второго порядка в форме регрессионного уравнения $p_n = f(m_p, m_p^2)$.

Используя пакет STATISTICA, получена однофакторная модель второго порядка:

$$p_n = 12,454 + 30,272m_p - 0,47403m_p^2.$$

Статистические параметры данного регрессионного уравнения приведены в таблицах:

- одномерные критерии значимости табл. 4;
- оценки параметров табл.5;
- 'SS модели и SS остатков', характеризующую модель в целом табл. 6.

Таблица 4 – Критерии значимости

Одномерные критерии значимости для p_n					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св.член	425,0	1	425,0	4,097	0,047655
m_p	104825,3	1	104825,3	1010,448	0,0
m_p^2	23519,2	1	23519,2	226,710	0,0
Ошиб.	5913,3	57	103,7	-	-

Таблица 5 – Оценка параметров

Эффект	p_n Парам.	p_n Ст.Ош.	p_n t	p_n p	p_n Ст.Ош.2
Св.член	12,454	6,15327	2,0241	0,047655	-
m_p	30,272	0,95234	31,7875	0,0	0,057681
m_p^2	-0,474	0,03148	-15,0569	0,0	0,057681

Таблица 6 – характеризующую модель

SS модели и SS остатков для p_n											
Зависим. Перемен.	Мно-жеств. R	Мно-жеств. R2	Скоррек. R2	SS модели	сс модели	MS модели	SS остатка	сс остатка	MS остатка	F	p
p_n , бар	0,9964	0,9928	0,9925	810051	2	405025	5913,25	57	103,741	3904,2	0,0

Полученные модели соответствуют критериям Фишера $F_{табл} > F_{факт}$. Критическое значение критерия Фишера, определенное по таблице для интервала степеней свободы 50–60, находится в диапазоне 3,15–3,18. Поскольку критерий Фишера модели значительно больше $F_{крит}$ уравнение можно считать значимым, табл. 6.

Оценка точности модели осуществляется по величине коэффициента детерминации $R2$ (скорректированного). Величина $R2 = 0,99$ (табл. 6) означает, что 99 % общей дисперсии экспериментальных значений объясняется регрессионной зависимостью и порядка 1 %, что приходится на неучтенные факторы, в том числе и на вариации числа оборотов.

Значимость параметров оценивается с помощью критерия Стьюдента (t – статистики). Этот параметр приведен в табл. 5. Критическое значение t находится для данного числа наблюдений, числа независимых переменных и уровня значимости $t_{табл} (n-m-1, p)$, где $n_p = 60$ число наблюдений (объем выборки), $m_p = 2$ число объясняющих переменных, $p = 0,05$. Найденное критическое значение находится в диапазоне $2,00 < t_{крит} < 2,02$. Поскольку любой из t – критериев в таблице оценки параметров превышает $t_{крит}$, то это означает, что статистическая значимость коэффициентов подтверждается.

Ниже приведены два графика, иллюстрирующие качество анализируемой модели (рис. 3, 4).

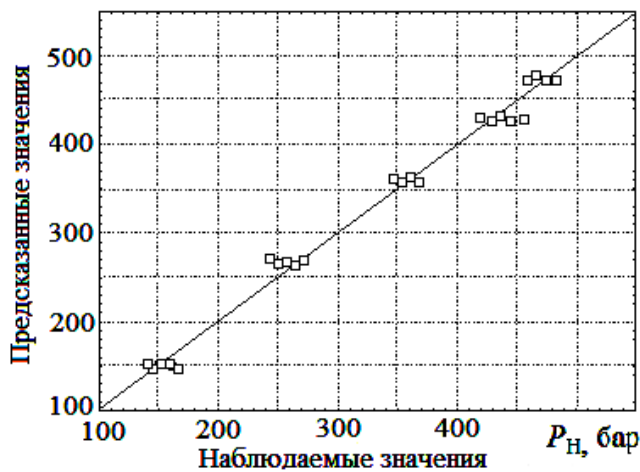


Рисунок 3 – Положение наблюдаемых значений относительно линии равных величин p_n для нагрузочной характеристики:
□ – наблюдаемые значения

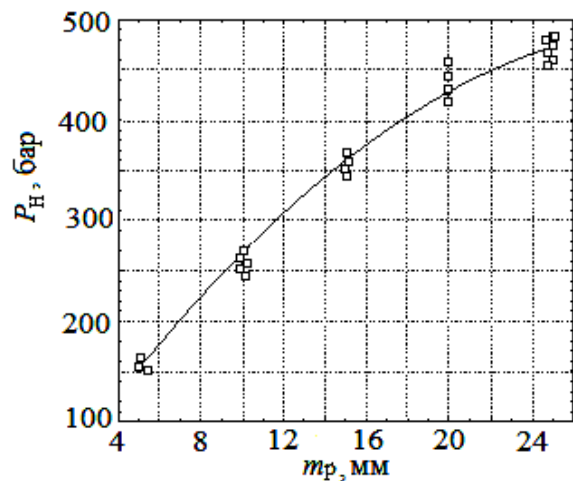


Рисунок 4 – График предсказанных значений p_n в зависимости от положения рейки ТНВД и наблюдаемые величины p_n :
□ – наблюдаемые значения

График рис. 3 показывает, что предсказанные значения и наблюдаемые достаточно тесно группируются вокруг линии равных значений, что подтверждает хорошую аппроксимацию опытных данных.

Зависимость предсказанных значений давления топлива в штуцере топливного насоса p_n от выхода рейки ТНВД m_p рис. 4, совместно с экспериментальными данными (квадратные точки на графиках) обозначены конкретные значения наблюдений.

Следующей задачей в обработке опытных данных было построение и анализ модели $p_{ф.к} = f(m_p, m_p^2)$.

Однофакторное регрессионное уравнение второго порядка, созданное пакетом STATISTICA, имеет вид:

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

Численные значения основных статистик уравнения, приведенные в объединённой табл. 7, 8, 9, созданные пакетом STATISTICA в процессе анализа:

Таблица 7– Численные значения основных статистик уравнения

Одномерные критерии значимости для $p_{ф.к}$					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св.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
Ошиб.	6233,05	57	109,35	-	-

Таблица 8 – Численные значения основных статистик уравнения

Оценки параметров						
Эффект	$p_{ф.к}$ Парам.	$p_{ф.к}$ Ст.Ош.	$p_{ф.к}$ t	$p_{ф.к}$ p	$p_{ф.к}$ Бета (?)	$p_{ф.к}$ Ст.Ош.2
Св.член	124,69	6,3175	19,738	0,0	-	-
m_p	24,35	0,9778	24,909	0,0	2,04846	0,082239
m_p^2	-0,43	0,0323	-13,384	0,0	-1,10069	0,082239

Таблиця 9 – Численные значения основных статистик уравнения

SS модели и SS остатков для $p_{ф.к}$											
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS модель	сс модель	MS модель	SS остаток	сс остаток	MS остаток	F	p
$p_{ф.к}$	0,9926	0,9853	0,98475	416876,2	2	208438,1	6233,1	57	109,4	1906,1	0,0

Графическое представление полученных характеристик дано на рис. 5, 6.

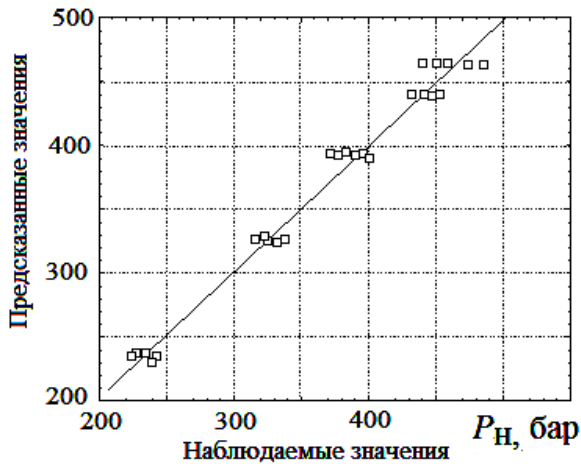


Рисунок 5 – Положение наблюдаемых значений относительно линии равных величин $p_{ф.к}$ для нагрузочной характеристики:
□ – наблюдаемые значения $p_{ф.к}$

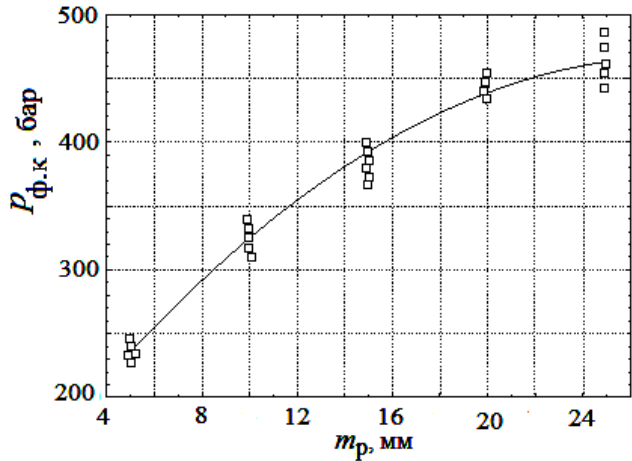


Рисунок 6 – График предсказанных значений $p_{ф.к}$ в зависимости от положения рейки ТНВД и наблюдаемые величины $p_{ф.к}$:
□ – наблюдаемые значения $p_{ф.к}$

Все статистики, характеризующие значимость уравнения и его коэффициентов, удовлетворяют критическим значениям F – критерия и t – статистики. Следовательно, модель давления топлива в форсунке и её параметры значимы.

Для описания статистической связи угла впрыскивания $\phi_{вп}$ и положения рейки ТНВД оказалось достаточно однофакторной линейной модели вида:

$$\phi$$

Графическое представление полученного регрессионного уравнения приведено на рис. 7, 8. В обоих вариантах визуальная оценка свидетельствует о хорошей сходимости наблюдаемых и предсказанных значений $\phi_{вп}$.



Рисунок 7 – Положение наблюдаемых значений $\phi_{вп}$ относительно линии равных величин $\phi_{вп}$ для нагрузочной характеристики:
□ – наблюдаемые значения $\phi_{вп}$

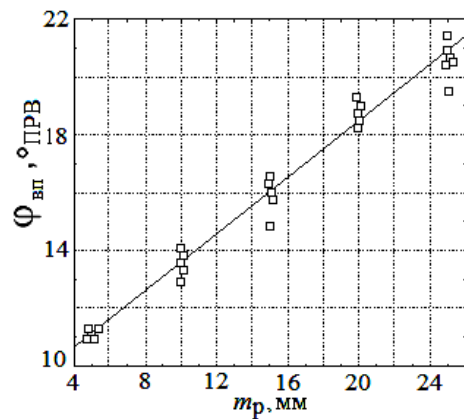


Рисунок 8 – График предсказанных значений $\phi_{вп}$ в зависимости от положения рейки ТНВД и наблюдаемые величины $\phi_{вп}$:
□ – наблюдаемые значения $\phi_{вп}$

Значимость уравнения обосновывается высоким значением критерия Фишера, составляющего $F = 411588$, а для его параметров величинами t – критерия Стьюдента 70,25 и 64,48. Ещё более высокие показатели имеют прогностические качества модели. Действительно, коэффициенты корреляции и детерминации близки к значениям 0,99.

Зависимость основных параметров процесса впрыскивания топлива от частоты вращения распределительного вала (по скоростной характеристике) исследована по экспериментальным данным [2], полученным при динамических испытаниях.

Графическое представление хода эксперимента отображено на графиках рис. 9.

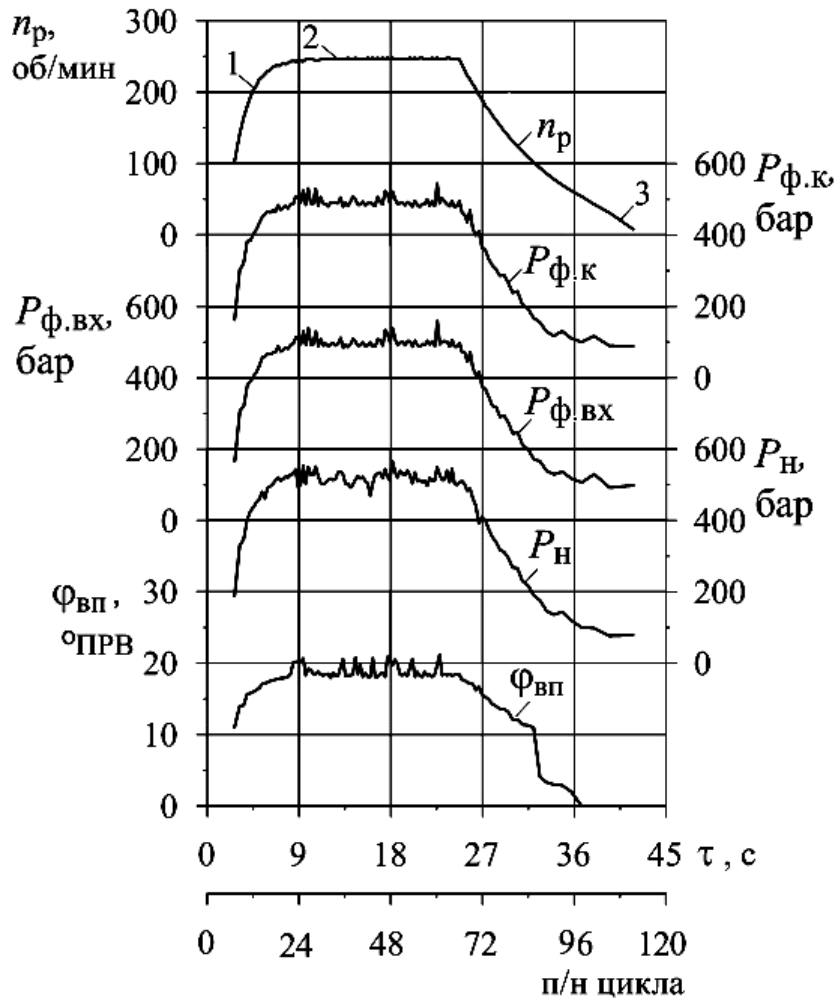


Рисунок 9 – Параметры топливоподачи на режимах скоростной характеристики при динамических испытаниях:

1 – участок разгона; 2 – участок установившегося режима; 3 – участок выбега

Графики на рис. 9 построены в зависимости от времени и соответствующих номеров циклов. На кривой n_p можно выделить три участка: разгона ТНВД 1, установившегося режима 2 и выбега 3. Последний участок соответствует свободному вращению распределительного вала после выключения двигателя стенда. Положение рейки ТНВД оставалось неизменным $m_p=15$ мм.

Ставилась задача создать и проанализировать следующие три модели:

– зависимость угла впрыска от скорости вращения распределительного вала $\varphi_{вп}=f(n_p)$;

– зависимость давления в штуцере топливного насоса от скорости вращения распределительного вала $p_n=f(n_p)$;

– зависимость давления в топливном канале форсунки от скорости вращения распределительного вала $p_{ф.к}=f(n_p)$.

Для анализа были выделены два участка: режимы разгона и выбега, объединённые в одной табл. 10.

Таблица 10 – Объединённые данные режимов разгона и выбега

№	n_p , об/мин	$p_{ф.к.}$, бар	$p_{н.}$, бар	$\Phi_{вп.}$, град	№	n_p , об/мин	$p_{ф.к.}$, бар	$p_{н.}$, бар	$\Phi_{вп.}$, град	№	n_p , об/мин	$p_{ф.к.}$, бар	$p_{н.}$, бар	$\Phi_{вп.}$, град
1	102	163	188	10,8	15	180	383	403	15,7	28	225	458	462	17,2
2	102	168	191	11	16	181	359	401	15,3	29	229	466	491	17,3
3	109	194	218	11,3	17	190	365	411	15,6	30	231	463	496	17,6
4	117	204	230	11,4	18	193	385	426	15,8	31	231	457	502	17,5
5	124	243	267	12,1	19	196	411	391	16,7	32	235	470	502	17,6
6	131	238	268	12,1	20	204	403	437	16	33	237	464	512	17,7
7	139	267	296	13,2	21	205	399	442	16,2	34	237	485	521	17,8
8	140	302	329	13,2	22	209	417	452	16,3	35	237	471	511	17,9
9	146	289	312	13,6	23	211	416	462	17,1	36	239	481	523	17,7
10	154	285	318	13,6	24	218	434	461	16,5	37	239	464	511	18
11	161	305	340	14	25	218	469	489	17,2	38	241	476	515	18,1
12	164	321	347	14,1	26	221	450	480	17,1	39	241	475	521	17,9
13	168	315	354	14,3	27	223	436	483	17,3	40	243	487	529	18,5
14	176	333	376	14,9										

Начало и конец выборки данных на минимальных оборотах ограничен величиной около 100 об/мин из-за неоднозначности определения угла впрыскивания при меньших оборотах с дробным впрыскиванием.

Процесс построения модели произведен по методике, состоящей из следующих этапов:

- предварительная спецификация модели;
- построение модели с использованием программы STATISTICA;
- анализ и оценка полученной модели;
- оценка составляющих модели.

Спецификация модели угла впрыскивания построена для двух участков разгона и выбега и отражена на корреляционной диаграмме рис. 10.

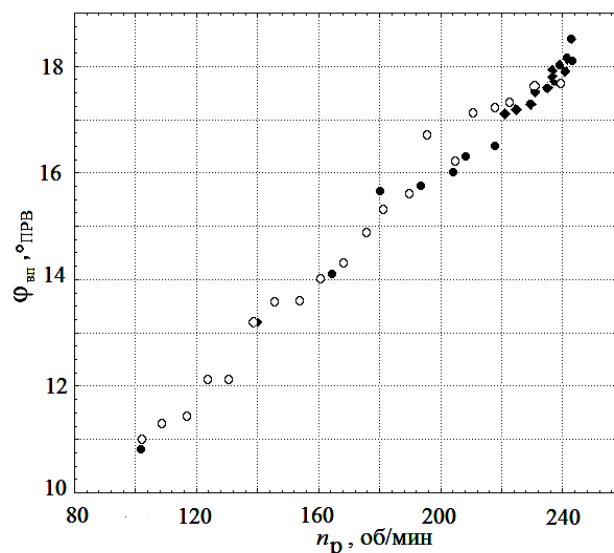


Рисунок 10 – Диаграмма зависимости $\Phi_{вп}$ от n_p для участков разгона и выбега:

○ – значения разгона; ● – значения выбега

Несмотря на то, что на временной диаграмме (зависимости изменения угла впрыскивания во времени) видна определенная нелинейность, зависимость угла впрыскивания от скорости проявляет явно линейный характер и также видно, что значения

углов впрыскивания обоих участков ложатся на одну линию, что хорошо прослеживается на рис. 10. Таким образом, можно предположить, что модель для анализа определяется как одно единое уравнение простой однофакторной регрессии.

Построение модели производилось с учетом использования пакета STATISTICA. Модель представлена следующим уравнением простой регрессии первого порядка:

$$\varphi_{вп} = 5,84418 + 0,050926m_p$$

Характеристика модели $\varphi_{вп}$ уравнения регрессии оценивается путем использования критерия Фишера F. Предварительно выполнен дисперсионный анализ для модели в целом, определён критерий Фишера, который затем сравнили его с табличным значением. Для наглядности результаты сведены в табл. 11 дисперсионного анализа (с данными из таблицы 'SS модели и SS остатков').

Таблица 11 – Дисперсионный анализ

<i>Источники вариации</i>	<i>Число степеней свободы сс</i>	<i>Сумма квадратов отклонений SS</i>	<i>Дисперсия на степень свободы MS</i>	<i>F отношение фактическое</i>	<i>F отношение табличное при p = 0,05</i>
Общая	40	206,16	-	-	-
Объясненная	1	203,14	203,14	2558,4	4,08
Остаточная (ошибки)	38	3,0172	0,0794	1	-

Критерий Коэффициент Фишера (F – фактическое), определяемый в данном случае как отношение 'объясненной' дисперсии (203,14) к дисперсии ошибки (0,0794) и характеризующий насколько модель хорошо объясняет общую дисперсию данных, значительно превышает табличное значение. Это означает, что модель статистически значима.

Прогностические свойства модели характеризуется величиной скорректированного R2. Его значение превышает 0,98, что является хорошим показателем и свидетельством того, что полученная модель 'объясняет' более 98 % дисперсии зависимой переменной.

Оценка значимости составляющих модели $\varphi_{вп}$ производится путем сравнения рассчитанного t – критерия с табличным. Оцениванию подлежат коэффициент регрессии и свободный член. Оценивание осуществлено стандартным методом, т.е. рассчитывается, ошибка соответствующего параметра и затем было, определено значение t – критерия как отношение значения параметра к его ошибке: $t_a = a/m_a$, $t_b = b/m_b$. Здесь t_a , t_b расчетные значения t – статистик для свободного члена и коэффициента регрессии, b – коэффициент регрессии, a – свободный член.

Значение t – критерия табличное для числа степеней свободы 38 и уровня значимости 0,05 одинаково для всех параметров и равно $t_{табл} = 2,0244$.

Результаты оценок сведены в табл. 12.

Таблица 12 – Результаты оценок

<i>Параметр</i>	<i>Ошибка</i>	<i>t – критерий рассч.</i>	<i>t – критерий табл.</i>
коэф. регрессии	0,0010	50,581	2,0244
своб. член	0,1975	29,580	
R (коэф. корреляции)	0,0197	4,93	

Все рассчитанные (фактические) выше t – критерии t_a , t_b значительно больше критического табличного значения. Это означает, что все параметры уравнения регрессии являются статистически значимыми.

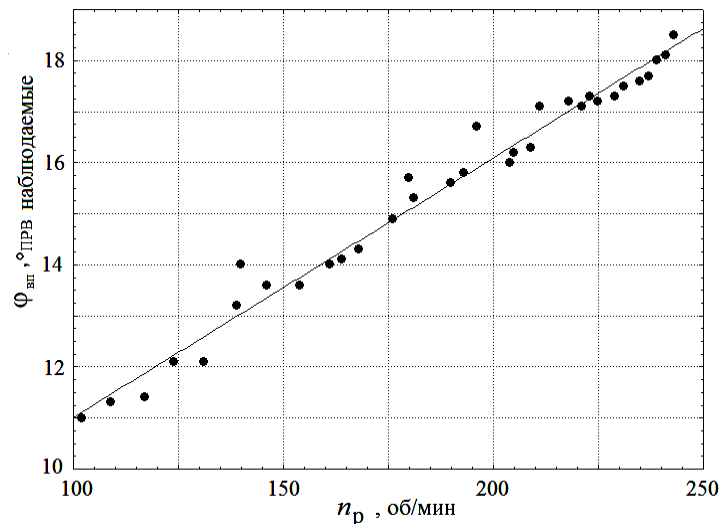


Рисунок 11 – Общий график линии регрессии и наблюдаемых значений зависимости $\varphi_{вн}$ от n_p .

На рис. 11 показаны совместные графики уравнения регрессии с наблюдаемыми данными участков разгона и выбега.

Анализ и моделирование зависимости давления топлива в штуцере топливного насоса $p_n = f(n_p)$ и давления в топливном канале форсунки $p_{ф.к} = f(n_p)$ был произведен по тому же алгоритму, что и моделирование зависимости угла впрыска.

В результате работы пакета STATISTICA были созданы уравнения математических моделей.

Уравнение регрессии для зависимости давления топлива в штуцере топливного насоса от частоты вращения распредвала получено в виде

$$p_n = - 25,853 + 2,2756n_p.$$

Аналогично для давления топлива в канале форсунки от числа оборотов:

$$p_{ф.к} = - 40,332 + 2,1818n_p.$$

Характеристика модели по оценке значимости уравнения модели производится по критерию Фишера, т.е. сравнением фактического значения с табличным для заданного уровня значимости. Для удобства сравнения рассчитанные значения F обеих моделей помещены в табл. 13.

Таблица 13 – значения F обеих моделей

Модель	F фактический	F табл. при $p=0,05$
p_n	2927,1	4,08
$p_{ф.к}$	2100,8	

Коэффициент Фишера (F – фактическое) для моделей значительно превышает табличное значение. Это означает, что модели статистически значимы. Точностная характеристика модели (или адекватность) характеризуется значением скорректированного R^2 . Для обеих моделей он равен примерно 0,98, – это хорошее значение, говорящее о том, что полученные уравнения моделей 'объясняют' примерно 98% дисперсии зависимой переменной.

Значимость каждого параметра уравнения регрессии в отдельности осуществляется на основе t – статистик. Оцениванию подлежат коэффициент регрессии и свободный член.

Значение t – критерия табличное для числа степеней свободы 38 и уровня значимости 0,05 одинаково для всех параметров и равно $t_{табл} = 2,0244$.

Результаты оценок по каждой модели для сравнения сведены в единую табл. 14.

Таблиця 14 – Результати оценок

Параметр	Ошибка	t-критерий расщ.	t-критерий табл.
коэф. регрессии p_n	0,0420	54,103	2,0244
своб. член p_n	8,2537	- 3,1323	
коэф. регрессии $p_{ф.к}$	0,0476	45,834	
своб. член $p_{ф.к}$	9,3409	- 4,3178	

Все рассчитанные (фактические) t – критерии больше критического табличного значения, что означает, что все параметры уравнения регрессии являются статистически значимыми.

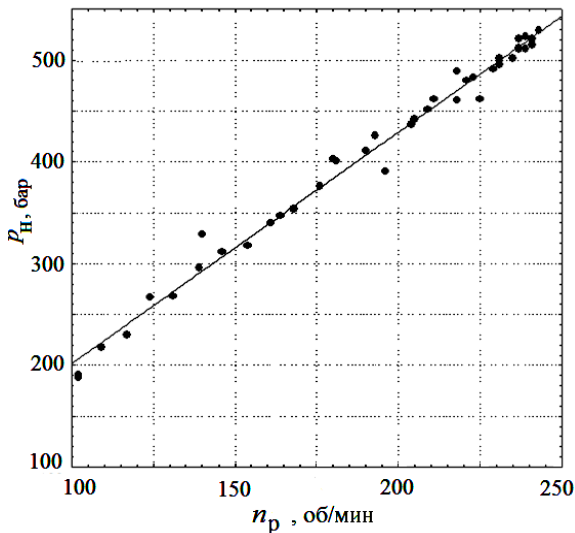


Рисунок 12 – Общий график линии регрессии и наблюдаемых значений p_n от n_p .

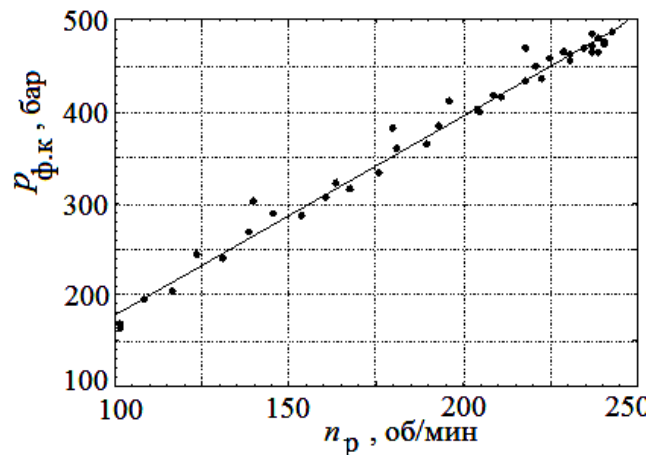


Рисунок 13 – Общий график линии регрессии и наблюдаемых значений $p_{ф.к}$ от n_p .

На рис. 12, 13 для наглядности показаны совместные графики уравнения регрессии, с наблюдаемыми данными участков разгона и выбега давления в насосе и форсунке соответственно.

Выводы. Предложены статистические модели параметров топливоподачи судового среднеоборотного дизеля по данным динамических безмоторных испытаний на режимах нагрузочной и скоростной характеристик.

Модели построены с использованием программного пакета СТАТИСТИКА, обеспечивающего широкие возможности варьирования способов и режимов обработки экспериментального материала. В качестве базового статистического метода использован регрессионный анализ.

Для нагрузочной характеристики в качестве моделей давления топлива использованы однофакторные регрессионные уравнения второго порядка, а для угла впрыскивания – первого порядка.

Изменение параметров по скоростной характеристике описано регрессионными уравнениями первого прядка.

Результаты моделирования в сочетании с дополнительным анализом и сравнением F – критериев и t – критериев полученных параметров с табличными значениями позволяют сделать вывод о статистической значимости всех трех моделей $\varphi_{вп}=f(n_p)$, $p_n=f(n_p)$, $p_{ф.к}=f(n_p)$ и пригодности их для дальнейшего использования в оценке гидродинамических процессов в системе впрыскивания топлива в судовом дизеле.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Нагрузочная характеристика системы впрыскивания топлива судового среднеоборотного дизеля в условиях динамических испытаний. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 6/1 (44). С. 41–49.
2. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Скоростные характеристики системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля на переменных режимах. *Молодой вчений*. 2016. № 3 (43). С. 735–740.
3. Патрахальцев Н. Н., Пономарёв М. Н., Савастенко А. А. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре дизеля на его динамические качества. *Вестник РУДН. Инженерные исследования*. 2003. №1. С. 15–18.
4. Патрахальцев Н. Н. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре на динамические свойства дизеля. *Известия ВУЗов*. Москва : Машиностроение, 1987. № 4. С. 65–80.
5. Леонов О. Б., Патрахальцев Н. Н. Построение характеристики переходного процесса с учётом особенности топливоподачи при неустановившемся режиме дизеля. *Известия ВУЗов*. Москва : Машиностроение, 1971. № 7. С. 35–39.
6. Газале А., Камышников О. В., Патрахальцев Н. Н. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре дизеля ЯМЭ-238 на эффективность операции разгона. *Известия ВУЗов*. Москва : Машиностроение, 1985. № 10. С. 85–89.
7. Овчаренко С. М., Корнеев П. С., Четвергов В. А. Влияние переходных процессов на расход топлива дизелем в эксплуатации. *Известия Транссиба*. 2012. № 1 (9). С. 27–32.
8. Хомич А. З., Тупицын О. И., Симсон А. Э. Экономия топлива и теплотехническая модернизация локомотивов. Москва : Транспорт, 1975. 264 с.
9. Коссов Е. Е., Сухопаров С. И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. Москва : Интекст. 1999. 184 с.
10. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів, патент u201805581. *Сайт Державного підприємства Український інститут інтелектуальної власності (УКРПАТЕНТ)*. URL : <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>.

REFERENCES

1. Polovinka, E. M. (2018). The load characteristic of the fuel injection system of a marine medium-speed diesel engine under dynamic testing, *Technology audit and production reserves*, 6/1 (44), 41–49.
2. Polovinka, E. M. (2016). High-speed characteristics of the fuel supply system of a marine medium-speed diesel engine in variable modes, *Molodiy vcheniy*, 3 (43), 735–740.
3. Patrahaltsev, N.N. (2003). The effect of transients in the fuel equipment of a diesel engine on its dynamic qualities, *Bulletin of RUDN University, ser. Engineering research*, 1, 15–18.
4. Patrahaltsev, H.N. (1987). The effect of transients in fuel equipment on the dynamic properties of a diesel engine, *News of Universities. – Engineering*, 4, 65–70.
5. Leonov, O.B. (1971). The construction of the characteristics of the transient process, taking into account the peculiarities of fuel supply in an unsteady diesel mode, *Proceedings of universities. – Engineering*, 7, 35–39.
6. Gazale, A. (1985). Influence of transients in the fuel equipment of the YaME-238 diesel engine on the efficiency of the acceleration operation, *Proceedings of universities. Engineering*, 10, 85–89.

7. Ovcharenko S. M. (2012). The effect of transients on diesel fuel consumption in operation, *News of the Trans-Siberian Railway, 1* (9), 27–32.

8. Khomich A. Z., Tupitsyn O. I., Simson A. E. (1975). *Fuel economy and heat engineering modernization of locomotives*. Moskva : Transport.

9. Kossov E. E., Sukhoparov E. E. (1999). Optimization of operating modes of diesel generators. Moskva : Intext.

10. The site of the State Power Company Ukrainian Institute of Intellectual Power (UKRPATENT), the name of the model: *Stand for additional and regular heating equipment, number u201805581*. Retrived from <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>.

Половинка Е. М., Слободянюк М. В. СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Гідродинамічні процеси в системі впорскування палива в дизельних двигунах викликає наукових інтерес дослідження, що зумовлено формуванням економічних параметрів роботи дизелів в цілому.

На кафедрі суднових енергетичних установок Національного університету “Одеська морська академія” виконано експериментальне дослідження процесу подачі палива дизельної паливної апаратури на несталі і часткових режимах. Експериментальне дослідження проводилося на безмоторному стенді, обладнаному програмно-апаратним комплексом “тензостанція” і програмно-апаратним електромеханічним комплексом управління становищем рейки паливного насоса високого тиску, що дало можливість отримати експериментальні значення гідродинамічних процесів в паливній апаратурі суднового середньообертowego дизеля в динамічному режимі.

Об’єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску при роботі по швидкісній і навантажувальній характеристикам. Предметом дослідження є взаємозв’язок параметрів подачі палива з режимними і регульовальними факторами, а також аналіз статистичних параметрів отриманих регресійних моделей.

В роботі представлені результати моделювання характеристик системи подачі палива суднового середньообертowego дизеля в формі статистичних залежностей основних показників впорскування від регульовальних і експлуатаційних параметрів, так як дана форма є оптимальною для складання аналітичних моделей з оформленням результатів у формі регресійних залежностей.

Сформовані регресивні моделі відображають взаємозв’язок параметрів процесу впорскування для швидкісної і навантажувальній характеристиці суднового середньообертowego дизеля.

Проведене дослідження показало статистичну значущість представлених моделей (кута вприскування, тиску палива в штуцері паливного насоса, тиску в паливному каналі форсунки від частоти обертання розподільного валу) та їх придатність в оцінці швидкісній і навантажувальній характеристики суднового середньообертowego дизеля.

Ключові слова: *середньообертовой дизель, паливна апаратура, змінні режими, навантажувальна характеристика, швидкісна характеристика, динамічні випробування, статистичні моделі.*

Polovinka E., Slobodianiuk N. STATISTICAL MODELING OF CHARACTERISTICS OF THE FUEL INJECTION SYSTEM OF SHIP MIDDLE-TURNING DIESEL

The hydrodynamic processes in the fuel injection system in diesel engines arouse scientific interest in research, which is due to the formation of economic parameters of diesel engines as a whole.

At the Department of Ship Power Plants of the National University of Odessa Maritime Academy, an experimental study of the process of fuel supply of diesel fuel equipment in transient and partial modes. The experimental study was carried out on a non-motorized test bench equipped with a “strain gauge” hardware-software complex and an electromechanical hardware-software complex for controlling the position of the rail of a high-pressure fuel pump, which made it possible to obtain experimental values of hydrodynamic processes in the fuel equipment of a marine medium-speed diesel engine in dynamic mode.

The object of the study is the hydrodynamic processes in a high-pressure fuel system when operating according to speed and load characteristics. The subject of the study is the relationship of fuel supply parameters with operating and regulatory factors, as well as the analysis of statistical parameters of the obtained regression models

The paper presents the results of modeling the characteristics of the fuel supply system of a marine medium-speed diesel engine in the form of statistical dependences of the main injection indicators on the adjustment

and operational parameters, since this form is optimal for compiling analytical models with the presentation of the results in the form of regression dependencies.

The generated regression models reflect the relationship between the parameters of the injection process for the speed and load characteristics of a medium-speed marine diesel engine.

The study showed the statistical significance of the presented models (injection angle, fuel pressure in the fuel pump fitting, pressure in the fuel channel of the nozzle versus the camshaft speed) and their suitability in assessing the speed and load characteristics of a medium-speed marine diesel engine.

Keywords: *medium-speed diesel engine, fuel equipment, variable modes, load characteristic, speed characteristic, dynamic tests, statistical models.*

© Половинка Е. М., Слободянюк М. В.

Статтю прийнято
до редакції 21.04.20