

Капустин В.В., Очеретяный В.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

Предложена автоматизированная обучающая система, содержащая математическую модель и методику изменения параметров рабочего процесса судового дизеля по результатам сравнительной оценки работы последнего на различных режимах нагружения. Полученные соотношения позволяют исследователю путем аппроксимации ввести корректировку параметров работы дизеля на различных режимах.

Ключевые слова: математическая модель, судовый дизель, компьютерный тренажер, режимы нагружения, рабочий процесс, жесткость работы, экологичность.

Введение. Для контроля знаний и повышения степени оперативного мышления исследователя при решении задач, связанных с быстротекущими процессами, например, при эксплуатации судовых дизелей разработана автоматизированная обучающая система (АОС) для тестирования обучающихся, в дальнейшем именуемая “Компьютерный тренажер” (КТ) [1, 2].

Основными задачами тренажера (рис. 1) является:

- проверка знаний и оценка процессов, происходящих в дизелях и влиянии изменяемых параметров на характеристики рабочего процесса (управляющее воздействие);
- применение вычислительной техники при решении задач, связанных с эксплуатацией судового дизеля;
- применение методов численного анализа для получения оценочных характеристик работы теплового двигателя
- отработка умений и навыков оперативной оценки изменения параметров рабочего процесса дизеля на переходных режимах (информационное воздействие)
- использование полученной информации для обработки ее с помощью вычислительной техники;
- анализа диагностических параметров и прогнозирование изменения качества рабочего процесса судового дизеля [3, 4].

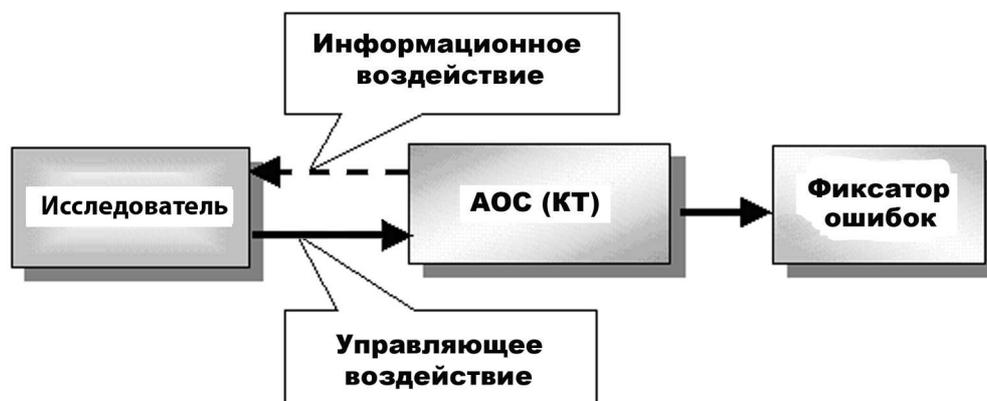


Рис.1. Структурная схема разработанной АОС (КТ)

На фоне стандартного АОС, реалізуючого комбіновані циклічні нелинійні алгоритми з обратною зв'язкою, базою розробаного КТ являється математичне описання фізических процесів, протекаючих при роботі дизеля. Комп'ютерний тренажер реалізован в системі Excel+VBA [5, 6, 7]. Visual Basic for Application (VBA) являється стандартним макро-язиком написання сценарієв для приложєній Microsoft. Являясь базою нескільких потужних об'єктів аналізу даних (робочі листи, діаграми, сводні таблиці, сценарії, а також численних математических стандартних і створюємих функцій і алгоритмів, EXCEL дозволяє VBA працювати з цими об'єктами, розробляти і модифікувати автоматизовані процедури, необхідні при розробці описуємого тренажера. VBA являється інтерпретуємым язиком, побудованим на Component Object Model (COM) і дозволяє використовувати всі доступні в операційній системі COM об'єкти і компоненти ActiveX.

Описання математическої моделі, заложенної в тренажері. Робочий процес дизеля представляє собою сукупність складних фізико-хіміческих і газодинаміческих процесів, в результаті котрих теплова енергія газів згорєлого в циліндрі палива преобразується в механіческу енергію. Робочий процес устанавлює взаємозв'язок між основними техніко-експлуатаційними характеристиками двигателя: конструктивними параметрами, потужністю, коефіцієнтом полезного дієвства і режимними показателями.

При реалізації задачі заложена математическа модель, устанавлює зв'язок між окремими фазами тепломасопередачі [8]. Численне моделювання робочого процесу дизеля представляє собою воспроизведеніє текучих параметрів, кількєства і складу робочого тіла в циліндрі путем неперервного ітераційного рішення на ЕВМ при заданих початкових умових для системи рівнянь, описуємих робочий процес [9].

Алгоритм розрахуку передбачує отримання параметрів як номінального, так і заданих частинних режимів роботи дизеля.

В якості базової моделі математического описання роботи ДВС прийнята наступна система рівнянь [10]

$$\begin{aligned} (c'_v \cdot G' + c''_v \cdot G'') \cdot \dot{T} + u' \cdot \dot{G}' + u'' \cdot \dot{G}'' = Q_H \cdot q \cdot \dot{x} + \dot{Q}_\omega + \\ + i_n \cdot \dot{G}_n - \pi \cdot 180^{-1} \cdot D^2 \cdot S \cdot h \cdot p - i_m \cdot \dot{G}_m \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{G}' = r'_n \cdot \dot{G}_n - r'_m \cdot \dot{G}_m - L_0 \cdot \dot{x} \cdot q; \quad (2)$$

$$\dot{G}'' = r''_n \cdot \dot{G}_n - r''_m \cdot \dot{G}_m - (L_0 + 1) \cdot \dot{x} \cdot q; \quad (3)$$

$$p = k_1 \cdot T \cdot \varepsilon_x^{-1} \cdot (G' + G''); \quad (4)$$

В рівняннях означено: p , T , u , i – тисення (МПа), температура (К), удєльна внутрєнна енергія (кДж/кг), удєльна ентальпія (кДж/кг) суміші в циліндрі. Значком (') – означєні параметри чистого повітря, значком (") – параметри чистих продуктів згорання, значком (·) – похідна параметра по куту повороту колєнчатого вала (φ , °пкв); c'_v , G' , r' і c''_v , G'' , r'' – удєльна теплоємність (кДж/(кг·°C)), маса (кг), масова доля чистого повітря і чистих продуктів згорання в суміші відповідно. Параметрам газу перед органами впуску присвоєн індекс n , перед органами випуску – індекс m ; D , S – діаметр циліндра і ход поршня (м); $h = ds/d\varphi$ – відносна швидкість поршня; ε_x – текуща стєпень стисення, L_0 – теоретическе кількєство повітря для згорання; $k_1 = 10^{-4} \cdot R \cdot V_c$, де R – газова постійна, кг·м/(кг·°C); q – циклова подача палива, кг/цикл; $dx/d\varphi$ – відносна швидкість згорання палива. Ліва частина рівняння (1) відображає обобщєну швидкість змінення внутрєнної енергії робочого тіла в циліндрі за рахунок змінення температури суміші, кількєства чистого

воздуха и чистых продуктов сгорания. В правой части представлена обобщенная скорость передачи теплоты за счет сгорания топлива, теплообмена, работы перемещения поршня, приращения энтальпии и убыли ее при газообмене. Уравнение (1) выражает собой закон сохранения энергии. Уравнения (2) и (3) представляют скорость изменения количества чистого воздуха и чистых продуктов сгорания в цилиндре за счет газообмена и сгорания топлива на основании уравнений массового баланса. Уравнение (4) отражает состояние рабочего тела в цилиндре в произвольный момент времени. Система уравнений (1), (2), (3), (4) описывает рабочий процесс реального истечения газов и продувки цилиндра.

Система уравнений (1), (2), (3), (4) не устанавливает явную зависимость между давлением, температурой газов и углом поворота коленчатого вала дизеля, однако позволяет определить изменение этих параметров при повороте кривошипа не более, чем на 2° пкв.

Описание индикаторного процесса как единой совокупности взаимосвязанных процессов, протекающих в цилиндре дизеля, позволяет провести его численное моделирование на ЭВМ. Получение параметров рабочего процесса на базе реализуемого ЭВМ алгоритма открывает возможность более глубокого представления о процессах, протекающих в цилиндрах дизеля, а благодаря измеряемости структурных элементов модели позволяет с достаточной точностью определить взаимодействие различных факторов.

Алгоритм расчета (Рис.2) предусматривает последовательный расчет рабочего процесса дизеля. После ввода исходных данных осуществляется контроль правильности их ввода (блок 3), затем рассчитываются (блок 4): объем камеры сжатия и объем, описываемый за полный ход (перемещение) поршня в цилиндре (V_c, V_s); средняя скорость поршня (V_m); количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива (Q_m). Далее определяются параметры рабочего тела к началу сжатия (блок 5): объем V_D ; температура (T_D); давление (p_D); масса газов (G_D); коэффициент избытка воздуха (α); доля потеряннного хода поршня (ψ_D) на закрытие окон, после чего начинается сжатие. Моделирование индикаторного процесса в цилиндре начинается от угла φ_D , соответствующего началу сжатия при закрытых окнах (клапанах). При этом после каждого шага определяются значения теплоемкостей c'_v, c''_v ; объема V , коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_T , текущую поверхность теплообмена цилиндра F , количество теплоты, которой обменивается газовая смесь со стенками рабочего цилиндра dQ_w , долю выгоревшего топлива x , изменение доли выгоревшего топлива $dx/d\varphi$, удельных энергий u', u'' , температуры T (блок 6). При достижении угла опережения впрыска топлива θ определяются значения давление в момент подачи топлива p_{en} , температура газов в момент подачи топлива T_{en} , показательная характеристика сгорания m , продолжительность тепловыделения φ_z (блок 8). После открытия выпускных органов газораспределения расчет индикаторного процесса заканчивается определением основных показателей: цилиндрического индикаторного давления p_i , среднего за один цикл индикаторного давления p_m , удельного индикаторного расхода топлива b_i , индикаторного КПД η_i (блок 11). В случае отклонения расчетных значений давлений (p_m, p_z) от контрольных ($\Delta p_m, \Delta p_z$) на величины, большие чем константы сходимости $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, происходит автоматическая корректировка значения условного угла выпуска и угла опережения выпуска до выполнения условий $|\Delta p_m| \leq \varepsilon_1$ и $|\Delta p_z| \leq \varepsilon_2$ (блоки 12 и 13).

Расчет будет повторен необходимое число раз до удовлетворения условиям сходимости. Величина констант $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ задается с отклонением (1...3)%.

Для численного интегрирования системы дифференциальных уравнений в программе использован метод Рунге-Кутты четвертого порядка, позволяющий по заданной начальной

точке (φ_d, T_d) интегральной кривой и производной искомой функции в начальной точке определить значение температуры в следующей точке (блоки 6 – 13).

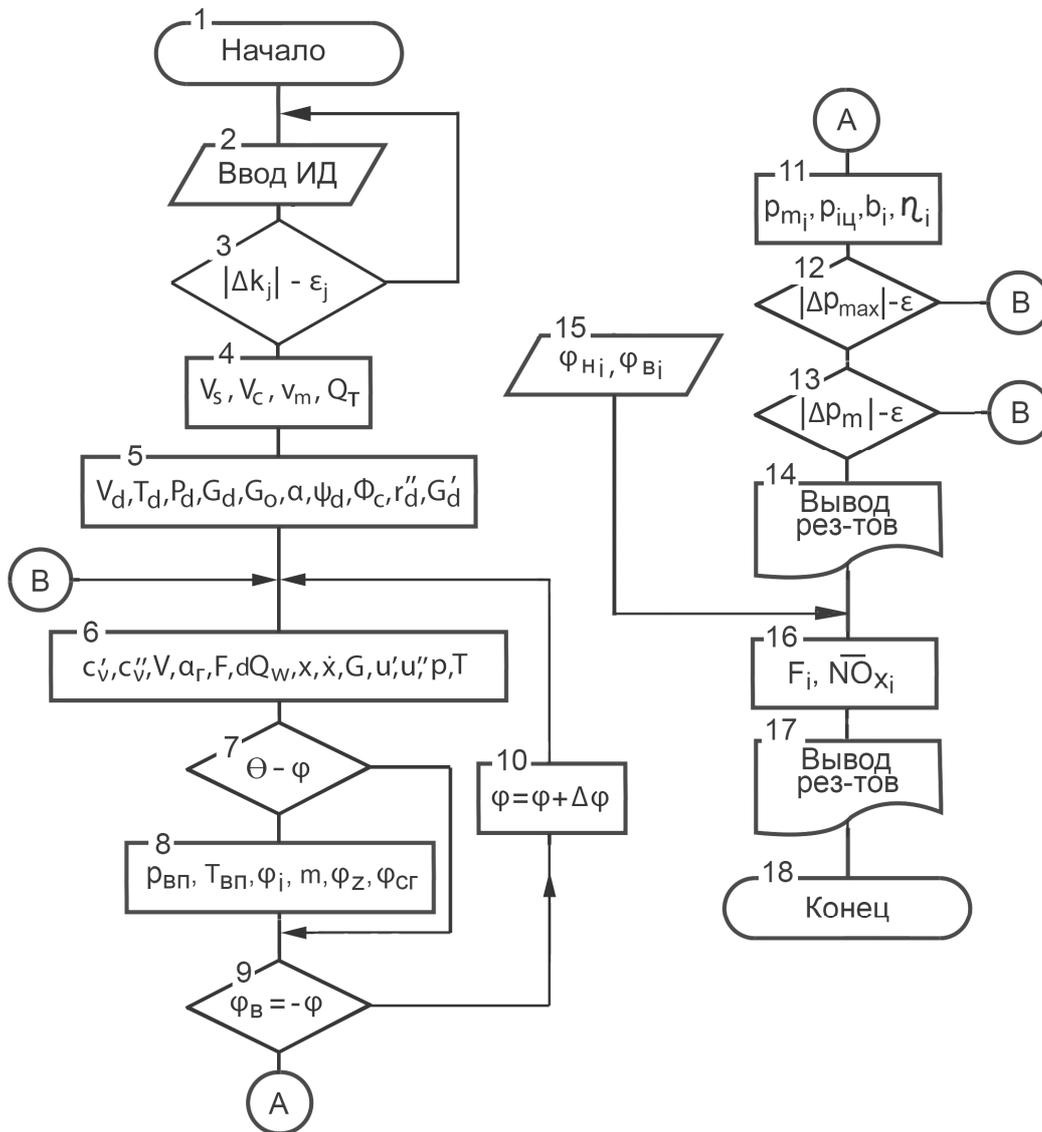


Рис.2. Схема алгоритма расчета рабочего процесса судового дизеля

В результате решения системы дифференциальных уравнений первого порядка по углу п.к.в. находится интеграл функции $T = f(\varphi)$, а с учетом уравнения состояния и изменение давления $p = p(\varphi)$, имеем индикаторную диаграмму, развернутую по углу поворота коленчатого вала.

Основным информационным показателем, служащим для оценки совершенства рабочего процесса, протекающего в цилиндре дизеля, является индикаторная диаграмма. По индикаторной диаграмме можно получить среднее индикаторное давление P_i , давление сжатия P_c , максимальное давление сгорания P_z , скорость нарастания давления $\omega = \Delta p / \Delta \varphi$, характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля, продолжительность тепловыделения, температуру газов в цилиндре и другие параметры.

В ходе реализации модели, заложенной в рассматриваемом программном продукте могут быть получены результаты расчета как в табличном виде, так и в графическом. Анализ результатов моделирования, как правило, начинают с определения основных периодов протекания рабочего процесса, выделяя при этом: конец газообмена, сжатие, впрыск топлива и его сгорание.

Руководствуясь полученными характеристиками давления и температуры, устанавливаются условные границы основных фаз сгорания и оценивают качество процесса сгорания, в частности, от начала видимого сгорания до момента достижения максимального давления цикла. Соотношение $\Delta p / \Delta \varphi$ – характеризует жесткость рабочего процесса, для оценки которого используется средняя ω_{cp} и максимальная ω_{max} скорости нарастания давления и степень повышения давления λ_p .

$$\omega_{cp} = (\Delta p / \Delta \varphi)_{cp} = (p_z - p_c) / (\varphi_z - \varphi_c) = tg \alpha_c, \quad (5)$$

где Δp - приращение давления в цилиндре за угол $\Delta \varphi$, соответствующий продолжительности процесса сгорания, МПа; p_c - давление сжатия в момент воспламенения топлива, МПа; $tg \alpha$ - тангенс угла наклона прямой, проходящей через точки p_z и p_c .

Максимальная скорость нарастания давления при сгорании определяется как первая производная изменения давления по углу поворота вала на наиболее крутом участке повышения давления в цилиндре в процессе сгорания, что косвенно определяет надежность работы дизеля. В ходе выполнения задачи вводятся исходные данные; производится тепловой расчет дизеля при стандартных (нормальных) условиях и далее выполняются расчеты дизеля для долевых режимов.

Рассматриваемая модель позволяет также оценить экологичность путем сравнения изменений объемов образования NO_x в цилиндре.

Качественную оценку объема вредных выбросов дают области диаграммы, расположенные выше температуры 1500 К (Рис.3), отражающей зависимость температуры цикла от угла поворота коленчатого вала.

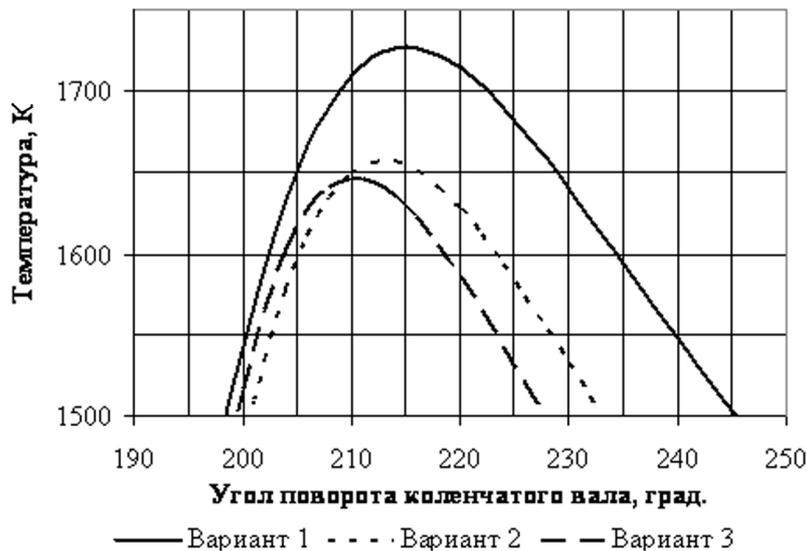


Рис.3. Изменение температуры газа в цилиндре дизеля (область более 155 К)

Количественную оценку можно получить путем сравнения площадей вышеуказанной диаграммы для различных режимов работы дизеля.

Для анализа объемов вредных выбросов оценивается изменение количества NO_x в сравнении с объемом вредных выбросов на номинальном режиме работы, принимаемым за 100%. Это соответствует площади $S_{(ном)}$ диаграммы $f = T(\varphi)$, находящейся в области высоких температур (более 1500 К). Определять объемы выбросов NO_x предлагается по формуле

$$NO_{X(i)} = (S_i / S_{НОМ}) \cdot 100\% , \quad (6)$$

где NO , NO_2 , NO_3 – окислы азота; соответственно $S_{НОМ}$ и S_i – номинальный и долевые режимы как отношение выделенных площадей диаграммы $T_i = f(\varphi)$.

Дальнейшие развитие тренажера видится в добавлении в основную модель анализа теплонапряженности основных элементов цилиндропоршневой группы дизеля.

Выводы: представленная модель расчета параметров рабочего процесса судового дизеля позволяет выполнить сравнительный анализ надежности его работы на различных режимах нагружения, а предложенный метод позволяет выбрать наиболее предпочтительный режим вхождения судна в особый район, контролируемый по выбросам окислов азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников А.В, Цытович П.Л, Принципы построения обучающих систем и их классификация [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (123 kb). – Уфа.: Южно-уральский государственный университет, 2006.–Режим доступа:http://scholar.urfu.ac.ru/ped_journal/numero4/pedag/tsit3.html Monday, 25 Juli 2011 21:22:07.
2. Управление рабочим процессом судового дизеля. Метод. указания к проведению тренажерного занятия / СевНТУ, сост. В.В. Капустин, В.А.Очеретяный. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007.– 22с.
3. Кудинов Д.Н. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ // Современные проблемы науки и образования. – 2008. – № 6 – С. 46-50 [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (168542 bytes). – Режим доступа: www.science-education.ru/30-1136 Monday, 28 July 2011 14:07:02.
4. Лукашин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3-х кн. Кн.3 Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС // В.Н. Лукашин, М.Г. Шатров, Т.Ю. Кричевская. – М.: Высш.шк., 2007. – 414 с.
5. Уокенбах Д. Профессиональное программирование на VBA в Excel 2002/ Д.Уокенбах. – М.:Вильямс, 2003.-784 с.
6. В.Дж.Орвис. Visual Basic for Applications на примерах. М.: БИНОМ.– 1995, 512 с.
7. Заварыкин В.М. Численные методы / В.М. Заварыкин, В.Г.Житомирский, М.П. Лапчик. – М.: Просвещение, 1990. – 176 с.
8. Дизели. Справочник / В.В.Ваншейдт [и др.]. – М.: Машиностроение, 1977. – 480с.
9. Лаханин В.В. Моделирование процессов в судовых поршневых двигателях и машинах/ В.В. Лаханин, О.Н.Лебедев, В.С.Семенов.-Л.: Судостроение, 1967.- 272с.
10. Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания / под ред. А.С.Орлин. – М.: ГНТИ, 1955. – 124с

Капустин V.V., Ocheretyaniy V.A.

MODELLING OF PARAMETERS OF WORKING PROCESS OF A SHIP INTERNAL COMBUSTION ENGINE

We propose an automated learning system that contains a mathematical model and methodology for changing the parameters of the workflow based on marine diesel comparative assessment of the latter on the different modes of loading. The relations obtained allow the researcher to enter a correction by fitting the parameters of the diesel at different views.

Keywords: *an automated learning system, mathematical model, an internal combustion engine, modes of loading, working process, rigidity of work, ecological compatibility.*

Капустин В.В., Очеретяний В.А.

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЮ

Запропоновано автоматизована навчальна система, яка містить математичну модель і методіку зміни параметрів робочого процесу судового дизеля за результатами порівняльної оцінювання роботи останнього на різних режимах навантаження. Отримані співвідношення дозволяють досліднику шляхом апроксимації ввести коригування параметрів роботи дизеля на різних режимах.

Ключові слова: *математична модель, судовий дизель, комп'ютерний тренажер, режими навантаження, робочий процес, жорсткість роботи, екологічність*