

УДК 531:621.01
МРНТИ 55.03.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С УЧЕТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЗВЕНЬЕВ

Тулешов А.К.¹, Джомартов А.А.¹, Тулешов Е.А.¹

¹Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, РК

БУЫНДАРДЫҢ СЕРПІМДІ ҚАСИЕТТЕРІН ЕСКЕРЕ ІШТЕН ЖАНАТЫН ҚОЗҒАЛҚЫШТЫҢ ҚОҒАЛЫСЫН МОДЕЛДЕУ

А.Қ. Тулешов¹, А.А. Джомартов¹, Е.А. Тулешов¹

¹Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты,
қ. Алматы, ҚР

MODELING THE DYNAMICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES ACCOUNT FOR ELASTIC PROPERTIES LINKS

A.K. Tuleshov¹, A.A. Jomartov¹, E.A. Tuleshov¹

¹Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after W.A. Dzholdasbekova,
Almaty, KR

Аннотация

В современных машинных агрегатах, в том числе в кузнечно–штамповочных машинах, довольно часто используются двигатели внутреннего сгорания, применяемые для привода самоходных или стационарных установок и асинхронные электродвигатели. Поскольку одной из важнейших особенностей пресс – автоматов является зависимость режимов движения его отдельных составных элементов от всех параметров этих элементов, то учет характеристик двигателя становится совершенно необходимым при решении задач динамики. В настоящее время исследование и оптимизация работы различных механических систем и технологических процессов на основе их математических моделей считают общепризнанным методом. В работе рассматривается динамика двигателя внутреннего сгорания с учетом упругих свойств звеньев кривошипно – ползунного механизма и процессов сгорания горючего в цилиндре. Получены математические уравнения движения ДВС и составлены численные программы анализа процессов, происходящих в камере сгорания. Моделирование динамики ДВС обеспечены диалоговым окном, с помощью которого можно менять входные параметры и управлять процессом.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, камера сгорания, автоматизированная система, компьютерная модель, динамическая модель.

Аңдатпа

Асинхронды электрлі қозғалтқыштарда және стационарлы қондырғыларда өздігінен жүретін жетектерге арналған іштен жанатын қозғалтқыш, заманауи көліктік агрегаттарда, соның ішінде ұсталы – қалыпты көліктерде өте жиі қолданылады. Автоматты баспақтардың негізгі ерекшелігі, қозғалыс тәртібі, оның кейбір құрамдық элементтердің барлық параметрлері сол элементтерге байланыстылығында. Қазіргі уақытта әртүрлі механикалық жүйелерді зерттеулер мен оңтайландырулар және математикалық моделдеу негізіндегі технологиялық үрдістер жалпыланған түрде қабылданған әдістер деп саналады. Жұмыста цилиндрде жанармайдың жану үрдісі және қосынды – сырғақты механизмдердің буындарының серпімді қасиеттерін ескере іштен жанатын қозғалтқыштың қозғалысы зерттеледі. ІЖҚ қозғалысының математикалық теңдеуі жасалды және жану камерасында болған үрдістің сандық бағдарламасы талданды. ІЖҚ қозғалысын моделдеуде кіру параметрлерін өзгерте алатын және үрдісті басқара алатын диалогты тереземен қамтамасыз етілді.

Түйінді сөздер: іштен жанатын қозғалтқыш, жану камерасы, автоматтандырылған жүйе, компьютерлі моделдеу, динамикалық модель.

Annotation

In modern machine aggregates, including forging and stamping machines, internal combustion engines are often used, used to drive self-propelled or stationary installations and asynchronous electric motors. Since one of the most important features of press machines is the dependence of the modes of motion of its individual

constituent elements on all parameters of these elements, it becomes absolutely necessary to take into account the characteristics of the engine when solving dynamic problems. Currently, research and optimization of various mechanical systems and technological processes based on their mathematical models is considered a generally accepted method. The paper discusses the dynamics of the internal combustion engine, taking into account the elastic properties of the links of the crank – slider mechanism and the processes of combustion of fuel in the cylinder. Mathematical equations of the ICE motion are obtained and numerical programs for analyzing the processes occurring in the combustion chamber are made. Modeling the dynamics of the internal combustion engine is provided with a dialog box with which you can change the input parameters and control the process.

Key words: internal combustion engine, combustion chamber, automated system, computer model, dynamic model

Введение

В современных машинных агрегатах более 80 % составляет двигатели внутреннего сгорания (ДВС), применяемые для привода самоходных или стационарных установок. Одной из задач, для которой актуальна разработка рациональной математической модели, являются процессы взаимодействия тепловыделения с движением поршня в камере сгорания ДВС и влияния характера тепловыделения на мощность двигателя. Цель данной работы – построение компьютерной модели работы четырехтактного одноцилиндрового двигателя внутреннего сгорания и разработка соответствующего приложения, позволяющей моделировать процессы, происходящие в этой системе. В этой модели учитываются упругие свойства всех звеньев кривошипно–ползунного механизма двигателя.

Схема кривошипно–ползунного механизма двигателя внутреннего сгорания (ДВС), диаграмма работы двигателя и его динамическая модель приведены на рисунке 1, а на верхнем правом углу. Упругими элементами модели ДВС являются коленчатый вал, работающий на кручение и шатун, испытывающий деформации растяжения/сжатия.

Математическая модель и методы решения

Приведенные параметры c_n и c'_n при условии, что шатун и вал двигателя являются упругими, определяются из формул, полученных из равенства потенциальных энергий звена приведения и исходного механизма [1– 4]

$$c_n = \frac{c_3 c_2 \chi^2}{c_3 + c_2 \chi^2}; \quad c'_n = \frac{dc_n}{d\alpha}; \quad \chi = r \sin[\alpha + \arcsin(\delta \sin \alpha)], \quad (1)$$

где c_2 – коэффициент жесткости шатуна, c_3 – коэффициент жесткости коленчатого вала.

Уравнение для дополнительной неизвестной величины – термодинамического давления – выводится из уравнения сохранения энергии и имеет вид [2]

$$\frac{dP_t}{dt} = -\frac{\kappa P_t}{V} \int_S \bar{v} \cdot d\bar{S} + \frac{\kappa - 1}{V} \left[\int_S \lambda \nabla T \cdot d\bar{S} + Q \int_V \dot{w} dV \right]. \quad (2)$$

здесь $V = S_p L$ – объем камеры сгорания; S – ее поверхность; v – скорость газа; $Q = -\sum v_i h_i^0$ – теплотворная способность горючего; $\dot{w}$ – массовая скорость горения в единице объема за единицу времени, λ – коэффициент теплопроводности; κ – средний показатель адиабаты.

Уравнение (2) является достаточно общим – не зависит от формы области и пригодно для расчетов как ламинарного, так и турбулентного течений с соответствующими коэффициентами переносов и законов горения [2].

Несложные вычисления показывают, что на такте впуска этот член вследствие динамической не сжимаемости газа равен нулю, а на такте сжатия – dV/dt . После

открытия выпускного клапана происходит изэнтропическое истечение газа из камеры сгорания и первый интеграл уравнения (2) имеет вид

$$\int_S \bar{v} \cdot d\bar{S} = v_e S_e + v_p S_p, \text{ где } v_e S_e = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \sqrt{\kappa} S_e \sqrt{\frac{P_t}{\rho}}; \quad \rho = \rho_e \left(\frac{P_t}{P_e} \right)^{1/\kappa}$$

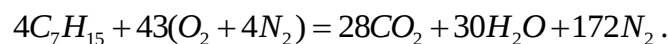
где v_e – скорость истечения газа из КС; S_e – площадь выпускного окна.

Закон горения, второй интеграл в квадратной скобке уравнения (2), принят в виде полуэмпирической зависимости [3]

$$\int_V \dot{\omega} dV = M_f \frac{d\eta}{dt} = \frac{M_f \pi \omega}{2(\alpha_1 - \alpha_0)} \sin \left[\frac{\pi(\alpha - \alpha_0)}{\alpha_1 - \alpha_0} \right]; \quad \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1,$$

где η – доля выгораемого топлива; M_f – масса топлива, сгорающего на одном цикле; α_0, α_1 – начальный и конечный углы горения топлива.

Масса топлива M_f может быть определена из реакции окисления стехиометрической бензино–воздушной смеси.



Окончательно дифференциальные уравнения для давления P_t и плотности ρ в камере сгорания при $0 \leq \alpha \leq 4\pi$ могут быть записаны в следующем виде:

$$\dot{P}_t = \frac{dP_t}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } (\alpha < \alpha_+) \vee [(\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t < 2P_0)] \\ -\kappa P_t \left(\frac{c}{LS_p} \sqrt{\frac{P_t}{\rho}} + x' \dot{\alpha} / L \right), & \text{если } (\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t \geq 2P_0) \\ -\kappa x' P_t \dot{\alpha} / L, & \text{если } \alpha_+ \leq \alpha \leq \alpha_0, \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_- \\ -\kappa x' P_t \dot{\alpha} / L + \frac{\kappa-1}{LS_p} \frac{QM_f \dot{\alpha} \pi}{2(\alpha_1 - \alpha_0)} \sin \left[\frac{\pi(\alpha - \alpha_0)}{\alpha_1 - \alpha_0} \right], & \text{если } \alpha_0 < \alpha < \alpha_1 \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\dot{\rho} = \frac{d\rho}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } (\alpha < \alpha_+) \vee [(\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t < 2P_0)] \\ -\rho \left(\frac{c}{LS_p} \sqrt{\frac{P_t}{\rho}} + x' \dot{\alpha} / L \right), & \text{если } (\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t \geq 2P_0) \\ -\rho x' \dot{\alpha} / L, & \text{если } \alpha_+ \leq \alpha \leq \alpha_- \end{cases} \quad (4)$$

$$c = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} S_e \sqrt{\kappa}.$$

Примем за обобщенные координаты углы поворота маховика φ и кривошипа α . На основе уравнений Лагранжа второго рода дифференциальные уравнения движения механической части двигателя внутреннего сгорания с упругой связью запишем в виде системы

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + c_n(\varphi - \alpha) = -M_c \\ J_n\ddot{\alpha} + \frac{1}{2}J'_n\dot{\alpha}^2 - c_n(\varphi - \alpha) + \frac{1}{2}c'_n(\varphi - \alpha)^2 = [(P_t - P_k)S_p + m_1g]x' \end{cases} \quad (5)$$

В этих уравнениях J – момент инерции маховой массы; c_n, c'_n – приведенная жесткость вала и ее производная по углу поворота кривошипа α ; J_n, J'_n – приведенный момент инерции механизма к кривошипу и его производная; m_1 – масса поршня; M_c – момент сопротивления на валу двигателя; P_t – давление в камере сгорания (КС); P_k – давление в картере; S_p – площадь поршня; g – ускорение свободного падения.

Компьютерная модель и обсуждение результатов

Таким образом, динамика двигателя внутреннего сгорания описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений (5), (3) и (4) с начальными условиями при $t = 0, \alpha = 0, \omega = \omega_0, P_t = P_0$.

На рисунке 1 приведено диалоговое окно системы компьютерного моделирования по исследованию процесса работы ДВС. Слева, на рисунке 1,а изображены модель ДВС с циклограммой движения и панель для задания исходных данных, а справа, на рисунке 1,б, отображается процесс движения кривошипно-ползунного механизма в динамическом режиме. Имеется возможность включения/отключения флага для учета упругости звеньев в динамической модели.

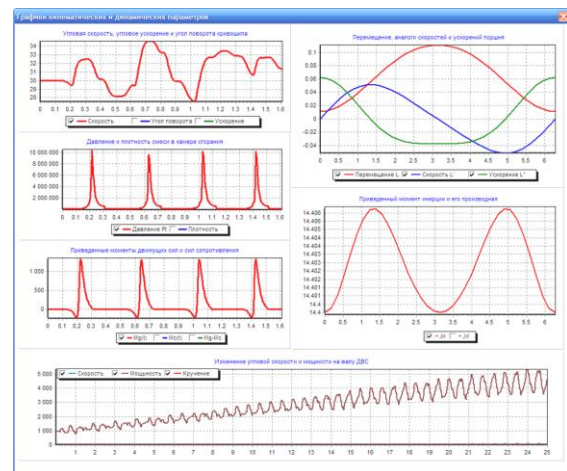
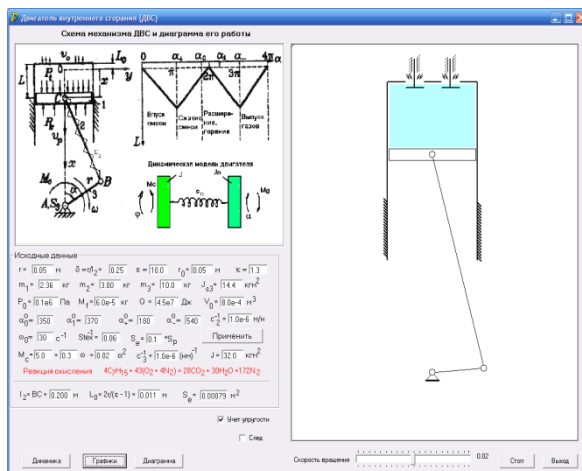


Рисунок 1 Диалоговые окна АС исследования ДВС с учетом упругих свойств звеньев

По нажатию кнопки «Динамика» происходит решение вышеуказанных дифференциальных уравнений и отображение полученных результатов в численной и графической формах. По нажатию кнопки «Графики» отображается диалоговое окно с графическим представлением характерных кинематических и динамических параметров (Рисунок 1, б). Численные результаты записываются в текстовый файл.

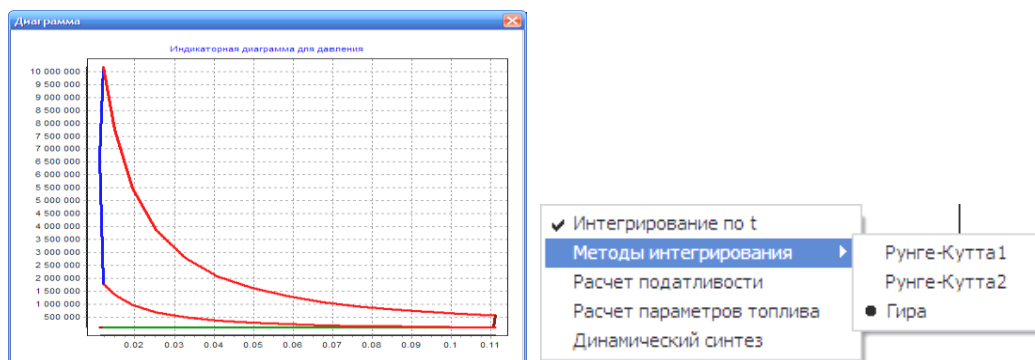


Рисунок 2 Индикаторная диаграмма и поп – меню для расчета параметров

На диалоговом окне можно получить рассчитанную индикаторную диаграмму для давления в КС (Рисунок 2), которая показывается на экране при нажатии кнопки «Диаграмма», а так же представлено всплывающее меню по настройке методов интегрирования и расчета некоторых важных параметров: податливостей упругих элементов [4], основных параметров сжигаемого топлива и некоторых других динамических параметров.

Система показывает фрагменты графического интерфейса, отображающие колебание упругого вала ДВС и характер изменения угловой скорости коленчатого вала без учета и с учетом упругих параметров исследуемой динамической модели, как это представлено на Рисунке 3. Далее в системе проводится оценка прочности упругого вала и шатуна. Проведенные численные расчеты и их сравнение с известными экспериментальными данными подтверждают достоверность предложенной динамической модели работы двигателя внутреннего сгорания.

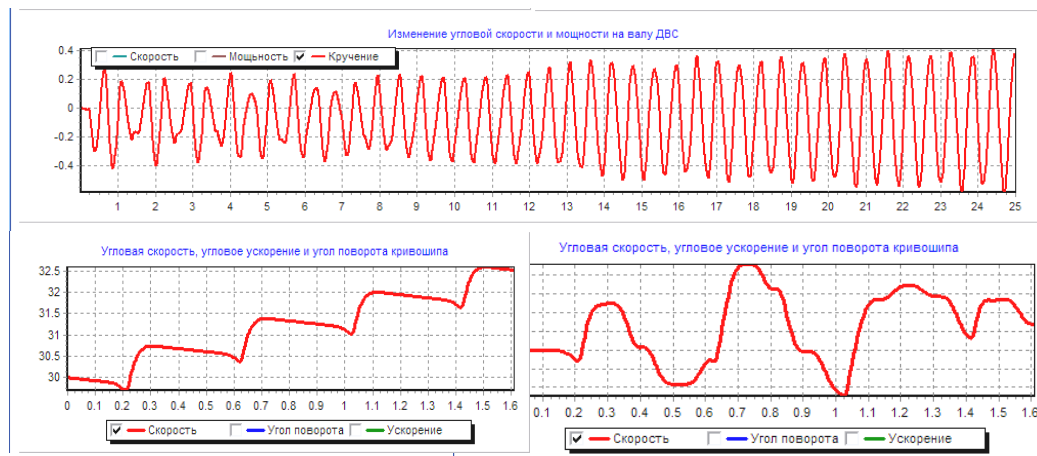


Рисунок 3 Колебание упругого вала и изменение угловой скорости за счет упругости

Как показали компьютерные исследования на такте расширения (горения) происходит резкое увеличение давления в КС и угловой скорости вала двигателя и что с уменьшением продолжительности горения происходит увеличение мощности двигателя. На выше названные параметры так же значительно сказывается и учет упругости коленчатого вала ДВС.

Литература:

1. Вейц В.Л., Кочура А.Е. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания – Машиностроение:Л., 1976.– 352 с.
2. Дракунов Ю.М., Калтаев А. Динамическая модель работы четырехтактного одноцилиндрового ДВС // Вестник КазНТУ . – 1996. №1. – С. 15–19.
3. Goniem A. F. Computational methods in turbulent reacting flow // Reacting flow: Combustion and chemical reactors. P.I. Lectures in applied mathematics. – 1984. – V.24. P. 32–35.
4. Тулешов А.К., Дракунов Ю.М. Моделирование динамики и оценка прочности двигателя внутреннего сгорания // Мат. Междунар. научно–технической конференции «Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов». – Хургада, Египет, 2009. – С. 56–62.