

УДК 621.431

А.В. Неменко, доцент, канд. техн. наук

М.М. Никитин, инженер

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 990053

E-mail: techcent@sevcable.net

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО ЕГО ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЕ

Предложена математическая модель прогнозирования рабочих параметров судового дизеля на основании выборки значений давления в его цилиндре с использованием уравнений рабочего процесса дизеля и аппарата скользящего среднего

Рабочий цикл судового дизеля представляет собой сложный многопараметрический процесс. Параметры меняются с течением времени вследствие внешних, часто неучтенных, факторов, что влияет на их соответствие эксплуатационным требованиям и на моторесурс. Нахождение значений отдельных параметров вне установленных пределов приводит к аварии (падение давления смазочного масла на входе в двигатель, превышение допустимой частоты вращения коленчатого вала), а недопустимые значения остальных параметров в лучшем случае вызывают внеплановое снижение моторесурса. Поэтому представляется актуальной задача прогнозирования значений параметров при использовании аппарата математической статистики.

В работе [1] рассмотрены вопросы диагностирования двигателей и показано влияние непосредственно измеряемых параметров на работоспособность двигателя.

В данной работе определяются следующие параметры: давление наполнения p_a и степень повышения давления λ . Давление наполнения зависит от состояния турбокомпрессора или механического нагнетателя и состояния системы подачи воздуха. Степень повышения давления зависит от цикловой подачи топлива и времени предварения впрыска его в цилиндр. Эти параметры являются показателями технического состояния отдельного цилиндра и всего двигателя, они влияют на цилиндровую мощность [2]. Их прогнозирование представляет практический интерес.

Для прогнозирования значений p_a и λ представим эти параметры в виде временных рядов

$$p_a = p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{ai}, \dots, ; \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, , \quad (2)$$

где значения определены для моментов времени $t_1, t_2, \dots, t_i$ с интервалом $(t_i - t_{i-1})$ на несколько порядков большим времени цикла, и применим алгоритм скользящего среднего.

Для составления временных рядов (1) и (2) необходимы значения λ и p_a . Эти параметры довольно сложно измерить непосредственно, поэтому предлагается их вычислять по косвенному параметру – индикаторной диаграмме двигателя. Индикаторная диаграмма характеризует давление в рабочем цилиндре, зависит от угла поворота кривошипа и фиксируется в дискретном или непрерывном виде самопишущим прибором.

Форма индикаторной диаграммы характеризуется коэффициентами разложения ее в тригонометрический ряд по углу поворота кривошипа, которые учитывают все измеренные за цикл значения давления.

Для установления искомых параметров составляется система из двух алгебраических уравнений, в левой части которых содержится аналитическое выражение тригонометрического коэффициента через λ и p_a , а в правой части содержится измеренное значение коэффициента. Систему можно составить, используя различные пары тригонометрических коэффициентов, в результате чего при фиксированной точности измерения давления точность решения будет различной. Для минимизации вычислительной погрешности решение ищем в аналитическом виде и представляем относительную вычислительную погрешность в функции от порядка тригонометрических коэффициентов, входящих в систему. Табулируя полученную функцию, находим порядок коэффициентов, при котором погрешность минимальна.

Запишем зависимость давления в цилиндре p от объема его рабочей полости V . При использовании теоретического четырехтактного цикла эту зависимость по тактам рабочего процесса можно представить [3] следующим образом:

$$\text{– наполнение, } V = V_c, \dots, V_a, \quad p = p_a, \quad (3)$$

где V_a – объем рабочей полости цилиндра в начале сжатия, м^3 ; V_c – объем рабочей полости цилиндра в конце сжатия, м^3 ; p_a – давление наполнения, Па;

$$\text{– сжатие, } V = V_a, \dots, V_c, \quad p = p_a \cdot \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^{n_1}, \quad (4)$$

где n_1 – средний показатель политропы сжатия;

– сгорание и предварительное (изобарное) расширение,

$$V = V_c, \dots, p \cdot V_c, \quad p = p_a \cdot \varepsilon^{n_1} \cdot \lambda = p_z, \quad (5)$$

где $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$ – степень сжатия цилиндра, $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$ – степень повышения давления,

– сгорание и последующее (политропное) расширение,

$$V = \rho \cdot V_c, \dots, V_a, \quad p = p_z \cdot \left(\frac{\rho \cdot V_c}{V} \right)^{n_2}, \quad (6)$$

где n_2 – средний показатель политропы расширения, $\rho = \frac{V_z}{V_c}$ – степень предварительного расширения;

$$\text{– выпуск, } V = V_a, \dots, V_c, \quad p = p_r, \quad (7)$$

где p_r – давление выпуска, Па.

Для определения значений давления наполнения и степени повышения давления надо решить систему из двух алгебраических уравнений, в которую входят значения давления действительного цикла. Если эти уравнения составлять непосредственно из формул (3)–(7), то решение будет зависеть от выбора точек давления действительного цикла, входящих в систему, так как в действительном цикле все параметры теоретического цикла переменны и не равны своим средним значениям, которые необходимо определить. Поэтому для определения параметров теоретического цикла составим уравнения, содержащие все измеренные за цикл значения давления действительного цикла. Это можно сделать, используя коэффициенты разложения давления теоретического и действительного циклов в тригонометрический ряд по углу поворота кривошипа. В общем виде система уравнений, содержащая эти коэффициенты:

$$\begin{cases} \left[\begin{matrix} a_{т,m}(p_a, \lambda) \\ b_{т,m}(p_a, \lambda) \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} a_{д,m} \\ b_{д,m} \end{matrix} \right] \\ \left[\begin{matrix} a_{т,n}(p_a, \lambda) \\ b_{т,n}(p_a, \lambda) \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} a_{д,n} \\ b_{д,n} \end{matrix} \right] \end{cases}, \quad (8)$$

где a_t, a_d – коэффициенты при членах, содержащих косинусы, а b_t, b_d – коэффициенты при членах, содержащих синусы, разложения в тригонометрический ряд показателей давления в цилиндре по углу поворота кривошипа в теоретическом и в действительном циклах, соответственно; m, n – порядок коэффициентов.

В каждом уравнении рассматриваем либо верхнюю, либо нижнюю строку.

Найдем такие тригонометрические коэффициенты системы (8), при которых относительная погрешность параметров, полученных в результате решения, была бы минимальной.

Абсолютная погрешность измерения давления действительного цикла принимается постоянной.

Тригонометрические коэффициенты как теоретического, так и действительного цикла определяем по формулам для периодической функции с периодом 4π [4]

$$a_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{4\pi} p(\varphi) \cdot d\varphi, \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} a_k \\ b_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{4\pi} p(\varphi) \cdot \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{Bmatrix} \cdot d\varphi. \quad (10)$$

Вычислим тригонометрические коэффициенты действительного цикла, входящие в правые части системы (8). Представим индикаторную диаграмму действительного цикла в виде выборки значений давления $p = p_1, p_2, \dots, p_n$, измеренного при значениях углах поворота кривошипа $\varphi = \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$. Тогда, после численного интегрирования формул (9)–(10), получаем следующие выражения

$$a_{д,0} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n p_i, \quad \begin{Bmatrix} a_{д,k} \\ b_{д,k} \end{Bmatrix} = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n p_i \cdot \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi_i}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi_i}{2} \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Вычислим тригонометрических коэффициентов теоретического цикла, входящих в левые части систем (8). Для этого в формулах (8)–(11) выразим объем V в зависимости от угла поворота кривошипа φ . В результате для смещенного кривошипно-ползунного механизма получим выражение

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(\frac{H \cdot \varepsilon}{\varepsilon - 1} - l_k \cdot \cos \varphi - l_{ш} \cdot \cos \beta + \sqrt{(l_{ш} - l_k)^2 - l_e^2} \right), \quad (12)$$

где H – ход поршня, м; D – диаметр цилиндра, м; l_e – эксцентриситет кривошипно-ползунного механизма, м; $l_{ш}$ – длина шатуна, м; l_k – длина кривошипа, м; β – угол поворота шатуна относительно линии движения поршня, рад. Ход поршня H и угол поворота шатуна β выражаются через другие геометрические параметры механизма следующим образом:

$$H = \sqrt{(l_k + l_{ш})^2 - l_e^2} - \sqrt{(l_k - l_{ш})^2 - l_e^2}, \quad \beta = \arcsin \frac{l_e + l_k \cdot \sin \varphi}{l_{ш}}. \quad (13)$$

Установим пределы интегрирования (9)–(10). Для их нахождения определим значения угла поворота кривошипа, разделяющие соседние такты. В смещенном кривошипно-ползунном механизме, при нахождении ползуна (поршня) в верхней мертвой точке шатун совпадает с кривошипом и составляет с линией движения поршня угол $\varphi_{\min}$, равный

$\varphi_{\min} = \arcsin \frac{l_e}{l_{iu} + l_{\kappa}}$, а при нахождении поршня в нижней мертвой точке шатун также совпадает с кривошипом и составляет с линией движения поршня угол $\varphi_{\max}$, равный $\varphi_{\max} = \arcsin \frac{l_e}{l_{iu} - l_{\kappa}}$.

В конце такта предварительного расширения кривошип составляет с линией движения поршня угол φ_z , который определяется приравниванием объема V в формуле (12) значению $(p \cdot V_c)$ в формуле (6) с последующим решением этого уравнения относительно угла поворота кривошипа:

$$\varphi_z = \arcsin \frac{l_e \cdot x_1 + \sqrt{l_e^2 \cdot x_1^2 + (x_2^2 + l_e^2) \cdot (x_2^2 - x_1^2)}}{x_2^2 + l_e^2}, \quad (14)$$

$$\text{где } x_1 = \frac{l_{iu}^2 - l_{\kappa}^2 - l_e^2 - x_2^2}{2 \cdot l_{\kappa}}, \quad x_2 = \frac{H \cdot (\varepsilon - \rho)}{\varepsilon - 1} + \sqrt{(l_{iu} - l_{\kappa})^2 - l_e^2}.$$

С учетом (3)–(7) и (12)–(14), запишем формулу для вычисления тригонометрических коэффициентов теоретического цикла

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{matrix} a_{\tau, k} \\ b_{\tau, k} \end{matrix} \right\} = & \frac{1}{2\pi} \left(p_a \int_{-\varphi_{\min}}^{\pi - \varphi_{\max}} \left\{ \begin{matrix} \cos \frac{k\varphi}{2} \\ \sin \frac{k\varphi}{2} \end{matrix} \right\} d\varphi + p_a \int_{\pi - \varphi_{\max}}^{2\pi - \varphi_{\min}} \left(\frac{V_a}{V(\varphi)} \right)^{n_1} \left\{ \begin{matrix} \cos \frac{k\varphi}{2} \\ \sin \frac{k\varphi}{2} \end{matrix} \right\} d\varphi + \\ & + p_a \varepsilon^{n_1} \lambda \int_{2\pi - \varphi_{\min}}^{2\pi + \varphi_z} \left\{ \begin{matrix} \cos \frac{k\varphi}{2} \\ \sin \frac{k\varphi}{2} \end{matrix} \right\} d\varphi + p_a \varepsilon^{n_1} \lambda \int_{2\pi + \varphi_z}^{3\pi - \varphi_{\max}} \left(\frac{V_z}{V(\varphi)} \right)^{n_2} \left\{ \begin{matrix} \cos \frac{k\varphi}{2} \\ \sin \frac{k\varphi}{2} \end{matrix} \right\} d\varphi + \\ & + p_r \int_{3\pi - \varphi_{\max}}^{4\pi - \varphi_{\min}} \left\{ \begin{matrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{matrix} \right\} d\varphi \end{aligned} \quad (15)$$

Формула (15) выполняется для коэффициентов порядка $k > 0$. При $k = 0$ коэффициент a_0 можно получить, если в верхней строке заменить постоянный множитель $(1/(2 \cdot \pi))$ на $(1/(4 \cdot \pi))$, а значение $b_0 = 0$ получается автоматически из нижней строки.

Для составления системы (8) обозначим интегралы, входящие в (15) следующим образом:

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} J_{1a,k} \\ J_{1b,k} \end{Bmatrix} &= \int_{-\varphi_{\min}}^{\pi-\varphi_{\max}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{Bmatrix} \cdot d\varphi, \quad \begin{Bmatrix} J_{2a,k} \\ J_{2b,k} \end{Bmatrix} = \int_{\pi-\varphi_{\max}}^{2\pi-\varphi_{\min}} \left(\frac{V_a}{V(\varphi)} \right)^{n_1} \cdot \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{Bmatrix} \cdot d\varphi, \\
\begin{Bmatrix} J_{3a,k} \\ J_{3b,k} \end{Bmatrix} &= \varepsilon^{n_1} \cdot \int_{2\pi-\varphi_{\min}}^{2\pi+\varphi_z} \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{Bmatrix} \cdot d\varphi, \\
\begin{Bmatrix} J_{4a,k} \\ J_{4b,k} \end{Bmatrix} &= \varepsilon^{n_1} \cdot \int_{2\pi+\varphi_z}^{3\pi-\varphi_{\max}} \left(\frac{V_z}{V(\varphi)} \right)^{n_2} \cdot \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{Bmatrix} \cdot d\varphi, \\
\begin{Bmatrix} J_{5a,k} \\ J_{5b,k} \end{Bmatrix} &= p_r \cdot \int_{3\pi-\varphi_{\max}}^{4\pi-\varphi_{\min}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \\ \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \end{Bmatrix} \cdot d\varphi.
\end{aligned}$$

Учитывая сделанные обозначения, систему уравнений (8) для определения λ и p_a запишем в следующем виде, допустимом при $m \neq 0$ и $n \neq 0$:

$$\begin{aligned}
&\left\{ p_a \cdot \left(\begin{Bmatrix} J_{1a,m} \\ J_{1b,m} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} J_{2a,m} \\ J_{2b,m} \end{Bmatrix} + \lambda \cdot \left(\begin{Bmatrix} J_{3a,m} \\ J_{3b,m} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} J_{4a,m} \\ J_{4b,m} \end{Bmatrix} \right) \right) + \begin{Bmatrix} J_{5a,m} \\ J_{5b,m} \end{Bmatrix} = 2\pi \begin{Bmatrix} a_{\text{д},m} \\ b_{\text{д},m} \end{Bmatrix} \right. \\
&\left. p_a \cdot \left(\begin{Bmatrix} J_{1a,n} \\ J_{1b,n} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} J_{2a,n} \\ J_{2b,n} \end{Bmatrix} + \lambda \cdot \left(\begin{Bmatrix} J_{3a,n} \\ J_{3b,n} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} J_{4a,n} \\ J_{4b,n} \end{Bmatrix} \right) \right) + \begin{Bmatrix} J_{5a,n} \\ J_{5b,n} \end{Bmatrix} = 2\pi \begin{Bmatrix} a_{\text{д},n} \\ b_{\text{д},n} \end{Bmatrix} \right\}. \quad (16)
\end{aligned}$$

Если индекс n у какого либо коэффициента $a_{\text{д},n}$ равен нулю, то перед коэффициентом следует ставить множитель (4π) вместо (2π) .

Система (16) имеет следующее решение:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{2\pi \cdot a_{\text{д},n} - J_{5a,n}}{2\pi \cdot b_{\text{д},n} - J_{5b,n}} \cdot \begin{pmatrix} J_{1a,m} + J_{2a,m} \\ J_{1b,m} + J_{2b,m} \end{pmatrix} - \frac{2\pi \cdot a_{\text{д},m} - J_{5a,m}}{2\pi \cdot b_{\text{д},m} - J_{5b,m}} \cdot \begin{pmatrix} J_{1a,n} + J_{2a,n} \\ J_{1b,n} + J_{2b,n} \end{pmatrix} \right)}{\left(\frac{2\pi \cdot a_{\text{д},m} - J_{5a,m}}{2\pi \cdot b_{\text{д},m} - J_{5b,m}} \cdot \begin{pmatrix} J_{3a,n} + J_{4a,n} \\ J_{3b,n} + J_{4b,n} \end{pmatrix} - \frac{2\pi \cdot a_{\text{д},n} - J_{5a,n}}{2\pi \cdot b_{\text{д},n} - J_{5b,n}} \cdot \begin{pmatrix} J_{3a,m} + J_{4a,m} \\ J_{3b,m} + J_{4b,m} \end{pmatrix} \right)}, \quad (17)$$

$$p_a = \frac{\left(\frac{2\pi \cdot a_{\text{д},m} - J_{5a,m}}{2\pi \cdot b_{\text{д},m} - J_{5b,m}} \cdot \begin{pmatrix} J_{3a,n} + J_{4a,n} \\ J_{3b,n} + J_{4b,n} \end{pmatrix} - \frac{2\pi \cdot a_{\text{д},n} - J_{5a,n}}{2\pi \cdot b_{\text{д},n} - J_{5b,n}} \cdot \begin{pmatrix} J_{3a,m} + J_{4a,m} \\ J_{3b,m} + J_{4b,m} \end{pmatrix} \right)}{\begin{pmatrix} J_{1a,m} + J_{2a,m} \\ J_{1b,m} + J_{2b,m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} J_{3a,n} + J_{4a,n} \\ J_{1b,m} + J_{2b,m} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} J_{1a,n} + J_{2a,n} \\ J_{1b,m} + J_{2b,m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} J_{3a,m} + J_{4a,m} \\ J_{1b,m} + J_{2b,m} \end{pmatrix}}. \quad (18)$$

Относительная погрешность вычисления параметра ϵ равна, как известно, отношению абсолютной погрешности вычисления параметра Δ к значению параметра, т.е.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\Delta_{\lambda}}{\lambda}, \quad \epsilon_{p_a} = \frac{\Delta_{p_a}}{p_a}. \quad (19)$$

Входящие в формулу (19) абсолютные погрешности вычисления параметров выражаем через абсолютные погрешности тригонометрических коэффициентов, входящих в (17) и (18):

$$\Delta_{\lambda} = \left\{ \left| \frac{\partial \lambda}{\partial a_{d,m}} \right| \cdot \Delta a_{d,m} \right\} + \left\{ \left| \frac{\partial \lambda}{\partial a_{d,n}} \right| \cdot \Delta a_{d,n} \right\} + \left\{ \left| \frac{\partial \lambda}{\partial b_{d,m}} \right| \cdot \Delta b_{d,m} \right\} + \left\{ \left| \frac{\partial \lambda}{\partial b_{d,n}} \right| \cdot \Delta b_{d,n} \right\}, \quad (20)$$

$$\Delta_{p_a} = \left\{ \left| \frac{\partial p_a}{\partial a_{d,m}} \right| \cdot \Delta a_{d,m} \right\} + \left\{ \left| \frac{\partial p_a}{\partial a_{d,n}} \right| \cdot \Delta a_{d,n} \right\} + \left\{ \left| \frac{\partial p_a}{\partial b_{d,m}} \right| \cdot \Delta b_{d,m} \right\} + \left\{ \left| \frac{\partial p_a}{\partial b_{d,n}} \right| \cdot \Delta b_{d,n} \right\}. \quad (21)$$

Далее определяем погрешности вычисления тригонометрических коэффициентов действительного цикла, по известной абсолютной погрешности измерения значений выборки давления в действительном цикле Δp_d . В (9)–(10) давление представляется в виде $(p_d + \Delta p_d)$. Учитываем, что при интегрировании погрешность суммируется. Полученные зависимости для абсолютных погрешностей тригонометрических коэффициентов имеют вид

$$\Delta a_{d,0} = \frac{\Delta p_d}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{4\pi} d\varphi, \quad \left\{ \begin{matrix} \Delta a_{d,k} \\ \Delta b_{d,k} \end{matrix} \right\} = \frac{\Delta p_d}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{4\pi} \left\{ \begin{matrix} \left| \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \right| \\ \left| \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \right| \end{matrix} \right\} \cdot d\varphi. \quad (22)$$

Интегралы, входящие в эти выражения, равны:

$$\int_0^{4\pi} \left| \cos \frac{k \cdot \varphi}{2} \right| \cdot d\varphi = \int_0^{4\pi} \left| \sin \frac{k \cdot \varphi}{2} \right| \cdot d\varphi = 8. \quad (23)$$

Учитывая (22)–(23), запишем выражения для погрешностей

$$\Delta a_{d,0} = \Delta p_d, \quad \Delta a_{d,k} = \Delta b_{d,k} = \frac{4}{\pi} \cdot \Delta p_d. \quad (24)$$

Для нахождения частных производных, входящих в (20)–(21), запишем решение (17)–(18) в виде

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} \cdot k + \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} \cdot p + q}{\left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} \cdot k' + \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} \cdot p' + q'}, \quad (25)$$

$$p_a = r \cdot \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} + s \cdot \left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} + t, \quad (26)$$

где $k, p, q, k', p', q', r, s, t$ – величины, зависящие от номера коэффициента.

Произведем дифференцирование уравнения (25)–(26) по входящим в них тригонометрическим коэффициентам, учтем формулы (20)–(21) и получим выражения для абсолютной погрешности вычисления давления наполнения и степени повышения давления в зависимости от абсолютной погрешности вычисления тригонометрических коэффициентов. Разделив их на правые части уравнений (25)–(26) и учитывая зависимости (23)–(24) абсолютной погрешности вычисления тригонометрических коэффициентов от абсолютной погрешности измерения давления. После проведения ряда преобразований, получим искомые формулы для относительной погрешности степени повышения давления и давления наполнения.

$$\varepsilon_{\lambda} = \left(\left| \frac{p}{\left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} k + \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} p + q} - \frac{p'}{\left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} k' + \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} p' + q'} \right| \cdot \left\{ \frac{1}{\frac{4}{\pi}} \right\} + \right. \\ \left. + \left| \frac{k}{\left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} k + \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} p + q} - \frac{k'}{\left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} k' + \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} p' + q'} \right| \cdot \left\{ \frac{\frac{4}{\pi}}{1} \right\} \right) \cdot \Delta p_{д}, \quad (27)$$

$$\varepsilon_{p_a} = \left(\left| \frac{r}{r \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} + s \left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} + t} \right| \cdot \left\{ \frac{1}{\frac{4}{\pi}} \right\} + \left| \frac{s}{r \left\{ \frac{a_{д,m}}{b_{д,m}} \right\} + s \left\{ \frac{a_{д,n}}{b_{д,n}} \right\} + t} \right| \cdot \left\{ \frac{\frac{4}{\pi}}{1} \right\} \right) \Delta p_{д}. \quad (28)$$

В фигурных скобках множитель (1) применим, если система уравнений для определения параметров составлена с использованием коэффициента ($a_{д,0}$), а в правой части одного из уравнений, множитель ($4/\pi$) применим во всех остальных случаях.

Уравнения (27) и (28) выражают относительную погрешность вычисления параметров через тригонометрические коэффициенты действитель-

ного цикла, которые заранее неизвестны. Тем не менее, если считать действительный цикл близким по форме к теоретическому, то для решения поставленной задачи о нахождении m и n и выборе коэффициентов синуса или косинуса для минимизации относительной погрешности вычислений, в формулах (27) и (28) можно заменить коэффициенты действительного цикла коэффициентами теоретического. Тогда каждую из формул (27) и (28) представим как три (в фигурных скобках отдельно рассматриваем варианты коэффициентов косинуса и косинуса, косинуса и синуса, синуса и синуса) двухпараметрических функции дискретных аргументов m и n . Эти функции табулируем в некотором диапазоне изменения аргументов, после чего находим значения m и n , дающие минимальное значение относительной погрешности. Сравнив все три функции, находим функцию, дающую наименьший минимум. Эти операции проводим отдельно для формул (27) и (28).

В качестве примера рассмотрим минимизацию относительной погрешности вычисления степени повышения давления и давления наполнения при следующих параметрах двигателя и его теоретического четырехтактного цикла: степень сжатия $\epsilon = 15$, степень повышения давления $\lambda = 1,4$, степень предварительного расширения $\rho = 1,5$, средний показатель политропы сжатия $n_1 = 1,38$, средний показатель политропы расширения $n_2 = 1,24$, давление наполнения $p_a = 150\,000$ Па, давление выпуска $p_r = 175\,000$ Па, длина кривошипа $l_k = 0,36$ м, длина шатуна $l_{ш} = 1,50$ м, эксцентриситет кривошипно-ползунного механизма $l_e = 0,00$ м.

Индикаторная диаграмма этого цикла показана на рисунке 1.

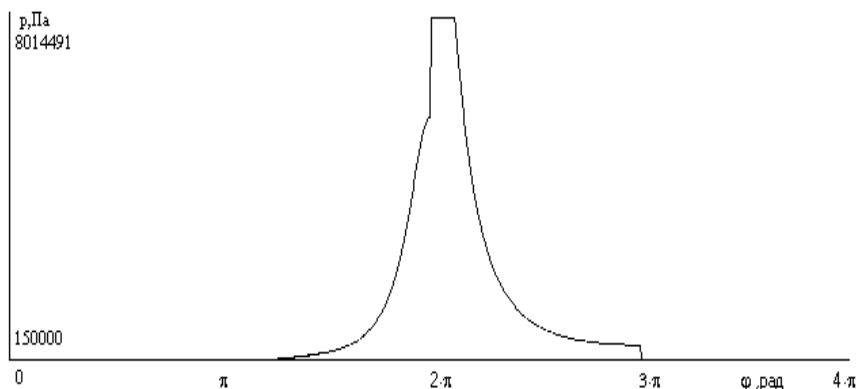


Рисунок 1 – Пример индикаторной диаграммы расчетного четырехтактного цикла

Тригонометрические коэффициенты первых ста порядков рассматриваемого цикла, полученные численным интегрированием формул (14)–(15) представлены в графическом виде на рисунке 2.

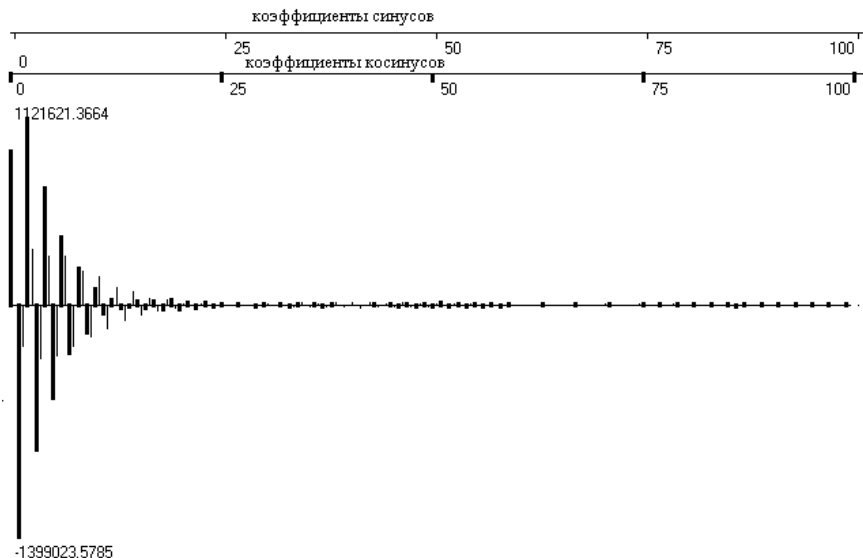


Рисунок 2 – Тригонометрические коэффициенты рассматриваемого цикла в зависимости от их порядкового номера

Проведем табулирование формул (27) и (28) при $m=0, \dots, 100$ и $n=0, \dots, 100$ и получим минимум относительной погрешности вычисления степени повышения давления ϵ_λ при использовании коэффициентов a_3 и b_3 .

Численное значение минимума составляет $2,33 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p$, где абсолютная погрешность измерения давления выражена в Паскалях. Если эквивалентную рассмотренной диаграмму действительного цикла с максимальным давлением 8 МПа измерять прибором класса точности 1 с верхним пределом измерения 10 МПа, то абсолютная погрешность измерения давления составит $0,01 \cdot 10 = 0,1$ МПа = 100 000 Па. Относительная погрешность вычисления степени повышения давления составит тогда $2,33 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 = 0,233 = 23,3$ %. В результате получим вычисленное значение $\lambda = 1,40 \pm 0,32$.

Минимум относительной погрешности вычисления давления наполнения ϵ_{pa} получим при использовании коэффициентов a_1 и b_3 .

Численное значение минимума составляет $3,86 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta p$. Если индикаторную диаграмму измерять рассмотренным прибором, то относительная погрешность вычисления давления наполнения составит $3,86 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 =$

$=0,386=38,6\%$. В результате получим вычисленное значение $p_a=0,15\pm0,058$ МПа.

Заметим, что если давление наполнения измерять непосредственно по точкам индикаторной диаграммы, то получим значение $p_a=0,15\pm0,1$ МПа с относительной погрешностью 67 %, т.е. почти в 2 раза менее точное.

Таким образом, для выполнения прогноза со скользящим средним давления наполнения p_a и степени повышения давления λ в рассматриваемом цикле значения этих параметров можно вычислять по индикаторной диаграмме с использованием следующих формул:

$$\lambda = \frac{(2 \cdot \pi \cdot b_{д,3} - J_{5b,3}) \cdot (J_{1a,3} + J_{2a,3}) - (2 \cdot \pi \cdot a_{д,3} - J_{5a,3}) \cdot (J_{1b,3} + J_{2b,3})}{(2 \cdot \pi \cdot a_{д,3} - J_{5a,3}) \cdot (J_{3b,3} + J_{4b,3}) - (2 \cdot \pi \cdot b_{д,3} - J_{5b,3}) \cdot (J_{3a,3} + J_{4a,3})}, \quad (29)$$

$$p_a = \frac{(2 \cdot \pi \cdot a_{д,1} - J_{5a,1}) \cdot (J_{3b,5} + J_{4b,5}) - (2 \cdot \pi \cdot b_{д,5} - J_{5b,5}) \cdot (J_{3a,1} + J_{4a,1})}{(J_{1a,1} + J_{2a,1}) \cdot (J_{3b,5} + J_{4b,5}) - (J_{1b,5} + J_{2b,5}) \cdot (J_{3a,1} + J_{4a,1})}, \quad (30)$$

где величины J являются постоянными для данного режима работы параметрами, а тригонометрические коэффициенты рассчитываются по формулам (11).

Установлено, что при определенных условиях наименьшая относительная погрешность вычисления давления наполнения и степени повышения давления будет, если для их расчета применять тригонометрические коэффициенты индикаторной диаграммы: для степени повышения давления – синуса и косинуса третьего порядка, для давления наполнения – синуса пятого порядка и косинуса первого порядка. При применении предложенного метода вычисления давления наполнения достигается большая точность, чем при его непосредственном измерении по точкам индикаторной диаграммы.

Библиографический список

1. Дальтман М.С. Оценка информативности и выбор параметров контроля в задачах диагностирования судовых дизелей / М.С. Дальтман, В.И. Лапшин, С.А. Супоня // Двигателестроение. — 1990. — № 8. — С. 28–31.
2. Дизели. Справочник. — М.;Л.: Машиностроение, 1974. — 495 с.
3. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / А.С. Орлин, М.Г. Круглов и др. — М.: Машиностроение, 1987. — 510 с.
4. Фильчаков П.Ф. Справочник по высшей математике / П.Ф. Фильчаков. — К.: Наук. думка, 1974. — 744 с.

Поступила в редакцию 06.12.2005 г.