пределения и открывающимися впускными и выпускными клапанами с целью снижения насосных потерь, что приведет к повышению экономичности на режимах незначительных нагрузок и режиме холостого хода.

Рекомендуется дальнейшее проведение исследований по предлагаемому способу с целью углубленного изучения процессов, протекающих в двигателе внутреннего сгорания при реализации ДИМ.

Литература

1. Пат. РФ № 2380562, МПК F02D 17/02. Способ дискретного изменения мощности ДВС / Грабовский А.А. – № 2008104241; заявл. 04.02.2008; опубл. 27.02.2010. Бюл. № 3.
2. Грабовский А.А. Дискретное изменение мощности двигателей внутреннего сгорания / А.А. Грабовский // Известия МГТУ «МАМИ». – 2009. – № 2 (8). – 317 с.
3. Пат. РФ № 2146010, МПК 7 F 02B 61/06, B 60K 5/06. Двигатель внутреннего сгорания / Грабовский А.А. – № 97119891; заявл. 03.12.1997; опубл. 27.02.2000. Бюл. № 6.
4. Пат. РФ № 2473818, МПК F02B 75/32. Способ дискретного изменения мощности ДВС /Грабовский А.А. Заявка № 2010146522 Приор. 15.11.10 г. Опубл. 27. 01. 13 г. Бюл. № 3.

Оценка эффективности функционирования ДВС по показателю качества функционирования системы

к.т.н. доц. Грабовский А.А.
Пензенский государственный университет
8 927 360 71 92 algra888@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика оценки качества функционирования двигателей внутреннего сгорания как составной части сложной антропотехнической системы. Рассчитан коэффициент запаса системы, определены численные значения уровня качества системы в целом и ее подсистем. Сделаны выводы о необходимости совершенствования двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, шасси, кузов, дорога, внешняя среда, коэффициент запаса, качество функционирования, техническая система, эффективная мощность, момент*

Одним из основных противоречий, имеющих глубокие философские корни, является противоречие между потребностью и возможностью. Появление качественной потребности, удовлетворять которую можно и необходимо посредством того или иного способа, порождает новый функциональный класс соответствующих систем, в том числе и технических. Однако число таких задач сравнительно невелико. Гораздо более частый случай – количественный рост общественных потребностей. При этом сначала возникает количественная диспропорция между потребностью и возможностью ее удовлетворения, которая поначалу устраняется за счет соответствующего количественного изменения параметров известной технической системы. Ярким тому примером является возникновение и становление транспортных средств (ТС), например автомобиля, а также дальнейшее их развитие.

Цель создания и применения автомобиля как технической системы определяется его главной полезной функцией, выделяющейся в его способности преодолевать значительные расстояния с определенной скоростью с целью перевозки пассажиров и грузов.

Автомобиль как техническую систему можно определить как искусственно созданное материальное единство взаимосвязанных элементов, имеющее целью своего функционирования выполнять определенные задачи по грузопассажирским перевозкам.

Элементы, образующие систему, – это относительно неделимые части целого в пределах сохранения определенного данного качества системы, что зависит в первую очередь от масштаба рассматриваемой системы.

Рассматривая автомобиль как техническую систему, характеризующуюся главной полезной функцией, можно выделить три основных подсистемы (рисунок 1), каждая из которых обладает множеством различных свойств, совокупность которых определяет уровень

качества всей системы. Однако главной положительной функцией автомобиля является не просто перемещение, которое он может выполнять при наличии этих трех элементов, а перемещение с определенной скоростью в определенных условиях при определенных ограничениях, принять решение по которым может только человек. Следовательно, автомобиль должен быть не просто технической системой, а антропотехнической, основным звеном которой является человек-оператор, и входить в состав определенной надсистемы.

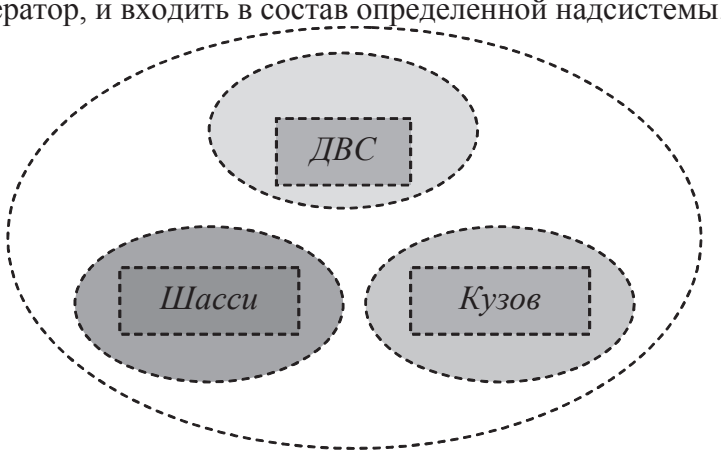


Рисунок 1. Автомобиль как техническая система

Качеству функционирования антропотехнической системы «Водитель – Транспортное средство – Дорога – Окружающая среда» в последние десятилетия стали уделять особое внимание (рисунок 2). Это сложное свойство системы характеризует степень соответствия между действительными и требуемыми значениями параметров функционирования. Оно наряду с техническими характеристиками определяется также уровнем специальной, физической и психологической подготовки водителя.

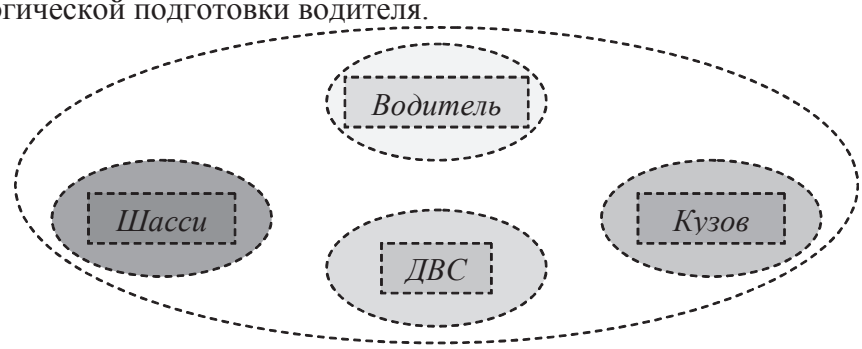


Рисунок 2. Автомобиль как антропотехническая система

Следует заметить, что работоспособность водителя может нарушиться вследствие развития недопустимой усталости, исключающей возможность выполнения им в системе требуемых действий. В этом случае могут произойти:

- операционные сбои, приводящие к задержке функционирования при работоспособном состоянии технической системы вследствие ошибок водителя;
- поломки и аварии, приводящие к нарушению работоспособности технических систем;
- катастрофы, приводящие к нарушению работоспособности водителя.

При этом существуют функциональные и временные ошибки, являющиеся случайными событиями, заключающимися в непрерывном или несвоевременном действии водителя.

С учетом показателей надежности качество функционирования и работоспособности автомобиля можно представить в виде сложной антропотехнической системы, определяющей надежность и качество функционирования автомобиля, а также эффективность автомобиля в целом (рисунок 3).

Возможность восстановления исправности технической системы, работоспособного состояния водителя можно реализовать посредством регламентных работ, автоматизацией сложных процессов, механизацией тяжелых рутинных работ, рациональным режимом труда и отдыха водителя (рисунок 4) [1].

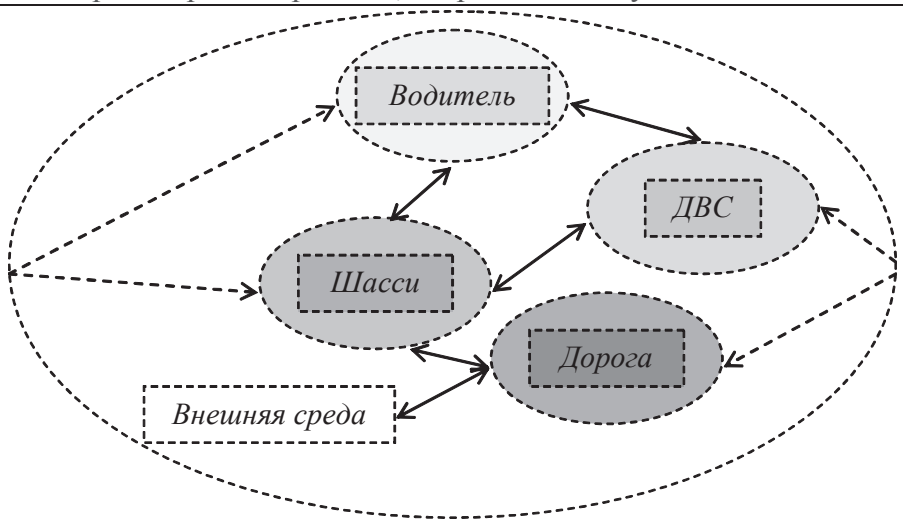
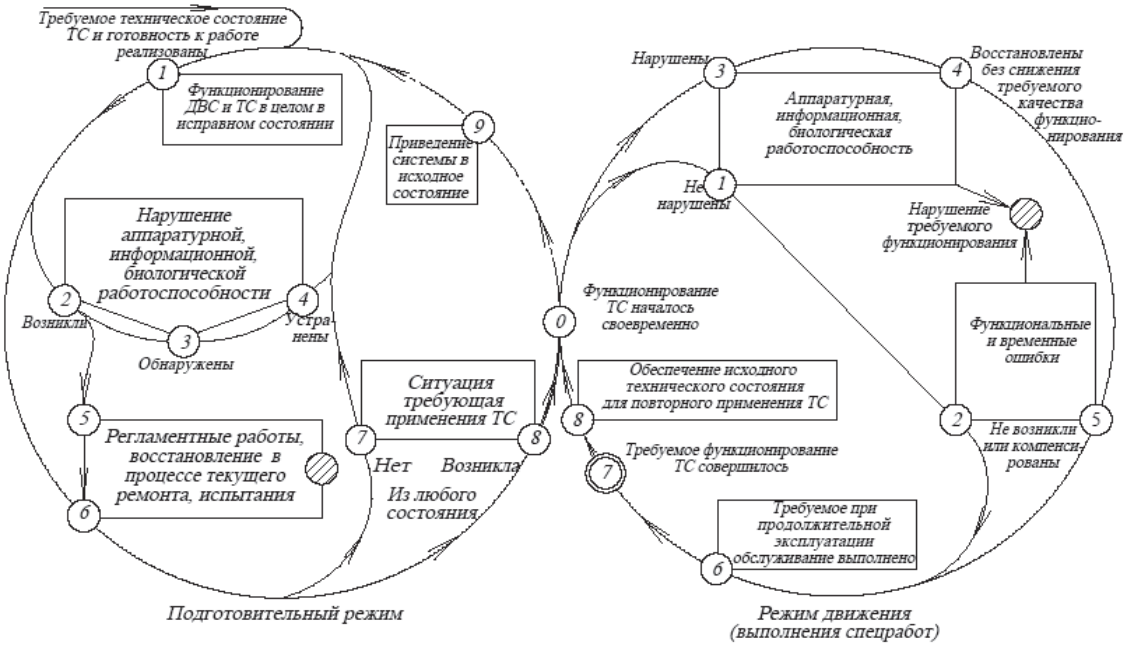


Рисунок 3. Схема системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс»

Эффективность функционирования ДВС при прочих равных условиях определяется его характеристиками и во многом зависит от качества функционирования сложной антропотехнической системы «Водитель – ДВС – Шасси – Дорога – Внешняя среда» («В–ДВС–Ш–Д–Вс»). В системе «В–ДВС–Ш–Д–Вс» можно выделить две подсистемы «Водитель – ДВС – Шасси – Дорога» («В – ДВС – Ш – Д») и «Водитель – Шасси – Дорога – Внешняя среда» (В – Ш – Д – Вс»).

Особенностью этих подсистем является наличие общих структурных элементов – «Водителя», «Шасси» и «Дороги». В общем процессе первая подсистема обусловливает значение выходных параметров функционирования в виде потенциально возможных, а вторая – выходные параметры функционирования в зависимости от состояния дороги и внешней среды в целом.



Примечание: Заштрихованные кружки обозначают события, препятствующие дальнейшему предписанному функционированию системы.

Рисунок 4. Схема взаимосвязи процессов и динамики событий, возникающих при функционировании антропотехнической системы

Это приводит к отклонению расчетных параметров функционирования системы в целом. Отсутствие количественного критерия оценки качества функционирования системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс» не позволяет в случае неудовлетворительного функционирования однозначно сказать, какая из подсистем является менее качественной и оказывает большее

влияние на снижение эффективности функционирования технической системы (ТС). В данной ситуации, как правило, бракуются обе подсистемы. Это не позволяет целенаправленно работать над устранением технических недостатков подсистем и принимать обоснованные инженерные решения по повышению их качества и эффективности системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс».

Анализируя подсистему «В – ДВС – Ш – Д», следует сказать, что значительная изменчивость по величине выходных характеристик ДВС, имеющего два механизма и четыре, пять систем; шасси, содержащего трансмиссию, ходовую часть и механизмы управления, обусловливает в разной степени разброс величин параметров, а именно: частоту вращения коленчатого вала (КВ), крутящий момент и т. д. При этом мало кто учитывает состояние водителя, в значительной степени определяющего значение входных величин параметров функционирования. Нерациональные значения выходных характеристик элементов в определенной степени снижают эффективность функционирования ТС в целом. При этом целесообразно определить долю влияния каждого из элементов. Следовательно, определение качества функционирования подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» можно сформулировать следующим образом.

Под качеством функционирования подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» понимается её свойство иметь в течение определенного времени математическое ожидание угловой скорости вращения ведущих колес и крутящего момента на этих же колесах не ниже требуемых при требуемом среднеквадратичном отклонении этих скоростей и моментов в условиях воздействия всей совокупности факторов.

Основными причинами, вызывающими изменения выходных параметров ДВС, являются неуравновешенность сил КШМ, отклонения в параметрах функционирования КШМ, ГРМ, систем питания (СП) и зажигания (СЗ), системы смазывания (СС) и охлаждения (СО), температуры и влажности окружающей среды. Кроме того, имеются и другие причины, влияющие на отклонения значений параметров. Это энергетические характеристики топлива, его химический состав, разброс параметров процесса горения от цилиндра к цилиндру и т. д. Следовательно, на ошибку функционирования системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс», кроме перечисленных ранее факторов, оказывают влияния и водитель, и дорога, и окружающая среда (рисунок 5).

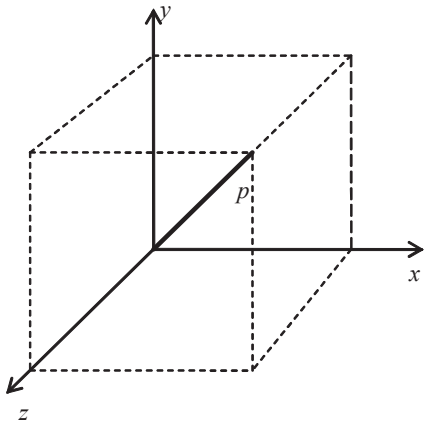


Рисунок 5. Определение ошибки функционирования системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс»

Следовательно, под качеством функционирования системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс» можно понимать свойство системы иметь в процессе функционирования математическое ожидание отклонения выходных параметров ДВС не более допустимых значений при требуемых характеристиках функционирования систем и механизмов и условиях воздействия на систему всех факторов.

В общем случае все расчеты численного значения качества функционирования системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс» могут быть сведены к оценке неравенства:

$$Y_1 \geq Y_2 . \qquad (1)$$

При этом для подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» значения математического ожидания

(МОЖ) частоты вращения, мощности, крутящего момента, обеспечивающих требуемые значения параметров функционирования системы, будут определяться:

$$m_{q_{тр}} = к_з m_{q_{доп}} . \quad (2)$$

Величина $m_{q_{тр}}$ рассчитывается заранее, исходя из входных параметров технической системы, коэффициента запаса $к_з$, допустимых значений МОЖ отклонения выходных параметров $m_{q_{доп}}$ при требуемых среднеквадратических отклонениях (СКО) $G_{тр}$ исходя из оптимального для данной ситуации соотношений между мощностью ДВС и нагрузками, прикладываемыми к колесам шасси.

Для подсистемы «В – Ш – Д – Вс» соответственно:

$$m_{\Delta_{тр}} = к_з m_{\Delta доп} \text{ и } G_{\Delta_{тр}} . \quad (3)$$

В выражении (3) Y_2 представляет собой внешний фактор условий работы системы, определяемый фактическими параметрами и характеризующий действительные значения МОЖ параметров как для подсистемы «В – Ш – Д – Вс», так и для системы в целом.

Неравенство (1) удобно представить в виде:

$$Y = Y_1 - Y_2 \geq 0 \ , \quad (4)$$

где Y – совокупный фактор, являющийся функцией случайных аргументов, определяющих числовые значения как внутреннего, так и внешнего факторов.

Обозначим вероятность невыхода системы за предельно допустимое состояние в реальных условиях эксплуатации в течение заданного времени (8 часов, рабочий день) через P_i. Зависимость (4) для получения количественного показателя качества функционирования системы (подсистемы) можно представить в виде:

$$P_i = \left[(Y_1 - Y_2) \geq 0\right] = P\left[Y \geq 0\right], \quad (5)$$

где: $P_i = P\left[Y \geq 0\right]$ - вероятность события, заключающегося в ненаступлении предельного состояния для системы (подсистемы), численно равна уровню качества функционирования;

i = 1, общ, 2 - соответственно для подсистемы «В – ДВС – Ш – Д», системы в общем и подсистемы «В – Ш – Д – Вс».

Определить уровень (величину) качества функционирования легко из соотношения:

$$P_i = 1 - F_{(Y)} \quad (6)$$

если известна интегральная функция распределения $F_{(Y)}$ совокупного случайного фактора Y [2].

Закон распределения случайной величины Y достаточно сложный, если учесть множество случайных факторов, определяющих его как в первом, так и во втором случаях. В таких случаях можно использовать разложение в виде ряда Грамма–Шарлье, что дает возможность достаточно хорошо отобразить любой, отличный от нормального закон распределения, получаемый для случайной величины. При этом приемлемое для практических расчетов значение имеет место при введении первых трех членов указанного разложения [3, 4].

Воспользовавшись разложением в виде ряда Грамма–Шарлье, при $Y = 0$, и ограничившись первыми тремя членами ряда, получим выражение:

$$F_{(Y=0)} = \frac{1}{2}\left[1 + \Phi_Z(-\frac{m_Y}{\sigma_Y})\right] - \frac{1}{3!}\frac{\mu_{3Y}}{\sigma_Y^3}\varphi_0''(-\frac{m_Y}{\sigma_Y}) + \frac{1}{4!}(\frac{\mu_{4Y}}{\sigma_Y^4} - 3)\varphi_0'''(-\frac{m_Y}{\sigma_Y}) , \quad (7)$$

где: $\Phi_z(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^Z e^{-\frac{1}{2}z^2} \cdot dz$ – интеграл вероятностей (функция Лапласа), определяемый для каждого значения $z = \frac{m_Y}{\sigma_Y}$;

$\varphi_0''(z)$, $\varphi_0'''(z)$ – соответственно вторая и третья производные от плотности нормального

распределения $\varphi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}Z^2}$;

m_Y, σ_Y, μ_{3Y}, μ_{4Y} – соответственно МОЖ, СКО, третий и четвертый центральные моменты случайной величины Y;

$V_Y = \frac{\sigma_Y}{m_Y}$ – коэффициент вариации.

Подставив (7) в (6), получим:

$$P_i = \frac{1}{2}\left[1 + \Phi_Z\left(-\frac{m_Y}{\sigma_Y}\right)\right] - \frac{1}{6}\frac{\mu_{3Y}}{\sigma_Y^3}\varphi_0''\left(-\frac{m_Y}{\sigma_Y}\right) + \frac{1}{24}\left(\frac{\mu_{4Y}}{\sigma_Y^4} - 3\right)\varphi_0'''\left(-\frac{m_Y}{\sigma_Y}\right). \quad (8)$$

При расчетах уровня качества подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» величина фактора Y_1 является постоянной двуполярной величиной $\pm\, m_{q\text{тр}}$ или $\pm\, m_{\Delta\text{тр}}$, а величина фактора Y_2 – случайной в определенный момент времени со знаком «+» или «–». Поэтому при определении величины z следует брать величины $|m_{q\ i}|$ или $|m_{\Delta\ i}|$ по модулю, а при определении величин μ_{2Y}, μ_{3Y}, μ_{4Y} – использовать значения с реальным знаком. При этом символ i в данном случае указывает параметры для различных подсистем.

Тогда для подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» получим:

$$\begin{cases} m_Y = Y_1 - Y_2 = \left|m_{q_{mp}}\right| - \left|m_{q_i}\right| \\ \mu_{2Y} = D_Y = \sigma_Y^2 = D_{Y2}^2 = D_{qi} = \sigma_{qi} \\ \mu_{3Y} = -\mu_{3Y2} = -\frac{1}{\Pi}\left[\sum_{i=1}^{n}(q_i - m_{qi})^3\right] \\ \mu_{4Y} = -\mu_{4Y2} = -\frac{1}{\Pi}\left[\sum_{i=1}^{n}(q_i - m_{qi})^4\right] \\ V_Y = \frac{\sigma_Y}{m_Y} = \frac{\sigma_q}{\left|m_{q_{mp}}\right| - \left|m_{q_i}\right|} \\ Z = \frac{\left|m_{q_{mp}}\right| - \left|m_{q_i}\right|}{\sigma_{q_i}} \\ m_{q_i} = \frac{1}{\Pi}\sum_{i=1}^{\Pi} q_i \\ \sigma_{q_i} = \sqrt{\frac{1}{\Pi - 1}\sum_{i=1}^{\Pi}\left(q_i - m_{q_i}\right)^2} \end{cases}, \quad (9)$$

С учетом зависимостей (9) выражение (8) примет вид:

$$P_i = \frac{1}{2}\left[1 + \Phi_Z\left(\frac{\left|m_{q_{mp}}\right| - \left|m_{q_i}\right|}{\sigma_{q_i}}\right)\right] - \frac{1}{6}\left(\frac{\mu_{3qi}}{\sigma_{qi}^3}\right)\varphi_0''\left(\frac{\left|m_{q_{mp}}\right| - \left|m_{q_i}\right|}{\sigma_{q_i}}\right) + \frac{1}{24}\left(\frac{\mu_{4Y}}{\sigma_{qi}^4} - 3\right)\varphi_0'''\left(\frac{\left|m_{qi_{mp}}\right| - \left|m_{qi}\right|}{\sigma_{qi}}\right), \quad (10)$$

где: $\frac{\mu_{3qi}}{\sigma_{qi}^3}$ и $\frac{\mu_{4qi}}{\sigma_{qi}^4} - 3$ – соответственно ассиметрия и эксцесс случайной величины q_i.

Коэффициент запаса $K_з$ для системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс» определяется равенством

$$K_з = \frac{m_{Y_1}}{m_{Y_2}} = \frac{\left|m_{q_{mp}}\right|}{\left|m_{q_i}\right|} \quad (11)$$

Так как $m_{Y_1} = \left|m_{q_{mp}}\right| - \left|m_{q_i}\right|$; $m_{Y_2} = \left|m_{q_i}\right|$ или соответственно $m_{Y_1} = \left|m_{\Delta_{mp}}\right| - \left|m_{\Delta_i}\right|$; $m_{Y_2} = \left|m_{\Delta_i}\right|$, то

справедливо равенство $\frac{\left|m_{q_{mp}}\right|-\left|m_{q_i}\right|}{\left|m_{q_i}\right|}=\frac{\left|m_{q_{mp}}\right|}{\left|m_{q_i}\right|}-1=K_з-1$.

Откуда

$$K_з=\frac{\left|m_{q_{mp}}\right|-\left|m_{q_i}\right|}{\left|m_{q_i}\right|}+1 \quad . \tag{12}$$

Расчеты показали, что повышать величину $K_з$ более 2,2 нецелесообразно, так как качество функционирования подсистем или системы в целом при этом изменяется крайне незначительно (рисунок 6). Поэтому $K_з$ = 2,2 следует считать достаточным для технических систем.

Величину Z можно выразить через $K_з$ как $Z=\frac{K_з}{V_{q_i}}$, где $V_{q_i}=\frac{\sigma_{q_i}}{\left|m_{q_i}\right|}$ – коэффициент вариации случайной величины для каждого значения q_i.

Выражение (10) для определения численного значения качества функционирования системы с использованием величины q_i примет вид:

$$P_i=\frac{1}{2}\left[1+\Phi_Z\left(\frac{K_з-1}{V_Y}\right)\right]-\frac{1}{6}\left(\frac{\mu_{3qi}}{\sigma_{qi}^3}\right)\varphi_0''\left(\frac{K_з-1}{V_Y}\right)+\frac{1}{24}\left(\frac{\mu_{4Y}}{\sigma_{qi}^4}-3\right)\varphi_0'''\left(\frac{K_з-1}{V_Y}\right). \tag{13}$$

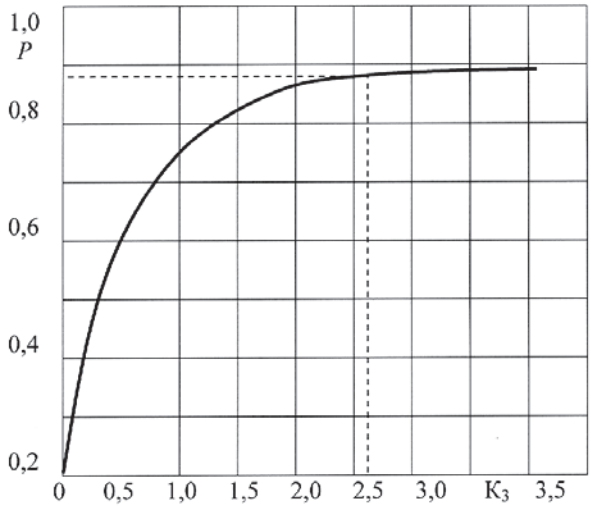


Рисунок 6. Зависимость уровня качества функционирования системы от коэффициента запаса

При определении численного значения коэффициента функционирования подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» или системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс» необходимо, используя зависимости (8, 10, 13), определить качество функционирования в зависимости от того или иного параметра.Достоверность расчетов по определению значения коэффициента качества функционирования системы «В – ДВС – Ш – Д – Вс» или подсистемы «В – ДВС – Ш – Д» $m_{q_{mp}}$ или соответственно $m_{\Delta_{mp}}$ для подсистемы «В – Ш – Д – Вс» обеспечивается правильным подбором исходных величин.

В качестве исходной величины при расчетах предельно допустимых значений $m_{q_{mp}}$ или $m_{\Delta_{mp}}$ берутся оптимальные (рациональные) значения отклонений эффективной мощности N_e и эффективного крутящего момента M_e применительно к данной дорожной ситуации.

Выводы

Уровень эффективности существующих ДВС в значительной мере определяется надёжностью и качеством функционирования сложной антропотехнической системы, состоящей из некоторых подсистем, параметры функционирования каждой из которых определя-

ются объективными и субъективными факторами, имеющими различную природу и вероятность возникновения.

Анализ расчетных данных показал, что уровень качества функционирования системы «Водитель – ДВС – шасси – дорога – внешняя среда» («В–ДВС–Ш–Д–Вс») является недостаточно высоким и находится в пределах 0,29…0,80, при этом показатель для подсистем «Водитель – ДВС – Шасси – Дорога» («В – ДВС – Ш – Д») и «Водитель – Шасси – Дорога – Внешняя среда» (В – Ш – Д – Вс») колеблется в пределах 0,28…0,90 и 0,50…0,91 соответственно, что доказывает необходимость совершенствования подсистемы «В – ДВС – Ш – Д».

Литература

1. Фокин Ю.Г. Оператор – технические средства: обеспечение надежности / Ю.Г. Фокин // – М.: Воениздат, 1985. – 192 с.
2. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я.Б. Шор // – М.: Советское радио, 1962. – 552 с.
3. Грабовский А.А. Определение надёжности функционирования ПУ РСЗО при залповой стрельбе (Статья) / Грабовский А.А., Богомолов А.И., Тищенко Д.Е., Смирнов В.В., Пархоменко А.О. // Оборонная техника № 1, – М.: МО, 1991.
4. Грабовский А.А. Определение надёжности функционирования системы грунт – ПУ – НУРС - внешняя среда при залповой стрельбе. (Статья) / Грабовский А.А., Богомолов А.И., Тищенко Д.Е., Смирнов В.В., Пархоменко А.О. // Оборонная техника № 2, – М.: МО, 1991.

Формирование регуляторных характеристик дизеля отключением рабочих циклов

д.т.н. проф. Гришин Д.К., д.т.н. проф. Патрахальцев Н.Н., к.т.н. проф. Эммиль М.В.
РУДН, Университет машиностроения
(495) 223-05-23 доб. 1054

Аннотация. Рассматривается способ формирования регуляторных характеристик дизеля путём отключения рабочих циклов. Приводятся соответствующие соотношения теории ДВС и график зависимости числа работающих цилиндров от общего числа цилиндров двигателя.

Ключевые слова: дизель, регуляторная характеристика, регулирование дизеля, отключение цилиндров, изменение рабочего объёма.

Отключение части цилиндров автомобильных и тракторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) как метод регулирования мощности на режимах частичных нагрузок (ЧН) и холостого хода (ХХ) находит применение на некоторых двигателях. В качестве примеров можно привести отключение группы цилиндров у шестицилиндровых бензиновых ДВС, оснащённых системой распределённого впрыскивания топлива. Отключение двух цилиндров тракторного дизеля Д-160 при переходе на режим минимальной частоты вращения ХХ. Известны продолжающиеся исследования в этой области [1]. Однако примеры промышленного применения методов регулирования частоты вращения таким способом и, соответственно, формирования регуляторных характеристик авторам неизвестны. Учитывая, что на дорогах РФ эксплуатируется очень большое количество грузовых автомобилей и тракторов с традиционными, уже устаревшими топливными системами дизелей, применение метода отключения части цилиндров или циклов представляется актуальным. Особенно это касается дизель-генераторных установок, поскольку в этом случае формируется только регуляторная характеристика номинального режима. В многоцилиндровом дизеле при таком способе регулирования обеспечивается "скользящее" отключение рабочих циклов по цилиндрам при сбросе нагрузки, а в одноцилиндровом дизель - генераторе программа регулирования вообще упрощается.

В современных автомобильных двигателях с электронным управлением, как дизелях, так и бензиновых, программа регулирования заложена в микропроцессоре электронного бло-