

УПРАВЛЯЕМОСТЬ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СГОРАНИЕМ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЯХ

Доктора техн. наук, профессора КУХАРЕНОК Г. М., ЛАЗАРЕВ Е. А.

*Белорусский национальный технический университет,
Южно-Уральский государственный университет*

Совершенствование рабочего цикла дизеля, важнейшей целью которого является увеличение удельной мощности форсированием по среднему эффективному давлению и частоте вращения коленчатого вала, сдерживается повышенными:

- тепловой и механической нагруженностью деталей;
- выбросами вредных веществ отработавшими газами;
- виброакустической активностью;
- трудностями обеспечения в этих условиях высокой топливной экономичности.

Эти ограничивающие факторы тесно связаны с особенностями выгорания топлива в дизелях [1], которые определяются эффективностью смесеобразования, закономерностями топливоподачи, состоянием воздушного заряда и свойствами топлива.

Решение проблем совершенствования рабочего цикла в значительной степени зависит от возможностей управления выгоранием топлива в цилиндре дизеля (управления процессом сгорания) и совершенствования методов и систем управления [2]. Под термином «управление процессом сгорания» следует понимать совокупность воздействий на образование, распределение, испарение, характер и продолжительность воспламенения и выгорания топлива в топливовоздушной смеси, а также на использование выделяющейся при этом теплоты, выбранных на основе анализа комплекса функциональных, конструктивных, технологических и регулировочных решений, направленных на поддержание или повышение эффективности,

экономичности и эргономичности рабочего цикла в соответствии с техническим заданием на создание дизеля.

Рассматривая процесс сгорания топлива как систему управления, в нем можно выделить составляющие – управляющие элементы, определяющие физическую сущность управляющих воздействий:

- состояние воздушного заряда;
- состояние топлива;
- состав и состояние топливовоздушной смеси;
- способы образования смеси;
- условия образования топливовоздушной смеси;
- способы воспламенения смеси;
- условия воспламенения топливовоздушной смеси.

Параметры, рассматриваемые как величины, характеризующие свойства управляющих элементов, называются управляющими параметрами, к которым относятся: давление и температура воздушного заряда на впуске, вихревое отношение, коэффициент избытка воздуха, момент, давление и продолжительность впрыскивания топлива, температура охлаждающей среды и поверхности камеры сгорания, а также конструктивные соотношения и элементы камеры сгорания, число сопловых отверстий распылителя и т. п.

Оставшуюся часть системы необходимо рассматривать как объект управления. Это:

- своевременность сгорания топлива;
- характерность, определяемая интенсивностью выгорания топлива;

- монотонность выгорания топлива;
- продолжительность сгорания;
- адиабатность процесса сгорания, определяемая уровнем тепловых потерь.

Возможности управления процессом сгорания тем шире, а управление может осуществляться тем эффективнее, чем шире диапазон значений, которые могут принимать управляющие параметры. В реальных рабочих циклах дизелей диапазон изменения каждого управляющего параметра ограничен конкретными функциональными, конструктивными и технологическими решениями. Управление процессом сгорания осуществляется изменением нескольких управляющих параметров, каждый из которых ограничен предельным значением. При этом в пространстве управляющих параметров выделяют область их возможного изменения.

Управление процессом сгорания предполагает конкретные цели. Определяющая (глобальная) цель – достижение оптимальных значений основных параметров процесса сгорания: своевременности, характерности, монотонности и продолжительности, а также минимизации тепловых потерь – адиабатности. При сложном характере выгорания топлива могут быть промежуточные (локальные) цели управления – достижение оптимального значения отдельного параметра процесса сгорания, например монотонности, определяемой степенью единообразия характера выгорания топлива в течение всего процесса.

В зависимости от вида, последовательности и интенсивности управляющих воздействий различают методы управления процессом сгорания. Их изучение, развитие и создание являются актуальными проблемами современного дизелестроения.

Для сравнения различных видов управляющих воздействий на характеристики топливовоздушной смеси в цилиндре дизеля и выделения лучших из них необходимо располагать мерой (пригодной для этой цели величиной), устанавливающей эффективность управления или управляемость, критерием управляемости. Под термином «управляемость процесса сгорания» следует понимать способность закона выгорания топлива в топливовоздушной смеси и использования выделяющейся при этом теп-

лоты с сохранением заданной структуры реагировать на изменение управляющих воздействий. Тогда понятие «критерий управляемости процессом сгорания топлива» имеет смысл степени соответствия реального закона выгорания топлива в топливовоздушной смеси и использования выделяющейся при этом теплоты заданному при конкретном оцениваемом управляющем воздействии.

Каждому виду управляющего воздействия соответствует определенное значение критерия управляемости, и задача оптимального управления состоит в том, чтобы найти и реализовать такой вид управляющего воздействия, при котором критерий управляемости принимает наилучшее значение.

Впервые вопросы управления, в частности рабочим циклом дизеля, рассмотрены А. Д. Чаромским, который критерий управляемости рабочего цикла представил [3]

$$R_{\varphi} = 1 - (\varphi_{\tau} / \varphi_d), \quad (1)$$

где φ_{τ} – период задержки воспламенения, град. п. к. в.; φ_d – продолжительность впрыскивания топлива, град. п. к. в.

Рабочий цикл считается с малой степенью управляемости, если ($R_{\varphi} < 0,2$), т. е. период задержки воспламенения составлял более 80 % продолжительности впрыскивания топлива. За период задержки воспламенения в этом случае в цилиндр успевала поступить значительная часть цикловой подачи топлива. Рабочий цикл такого дизеля характеризовался жесткой работой и повышенной виброакустической активностью.

Повышения управляемости рабочего цикла, анализируя критерий А. Д. Чаромского, можно достичь либо уменьшением периода задержки воспламенения, либо увеличением продолжительности впрыскивания топлива. Оценка управляемости рабочего цикла по предложенным критериям имеет тот существенный недостаток, что, относясь к циклу в целом, не позволяет отразить степень достижения основных целей управления. Действительно, повышение управляемости рабочего цикла, например, увеличением продолжительности впрыскивания топлива вряд ли можно признать целесообразным, так как при этом, как известно, ухудша-

ются мощностные и экономические показатели, а также повышается дымность отработавших газов вследствие затягивания во времени и увеличения неполноты сгорания топлива. Критерий управляемости рабочего цикла, являя собой одну из первых попыток оценки этой важнейшей характеристики рабочего цикла как системы управления высшего иерархического уровня, дает самые общие представления о влиянии процессов топливоподачи и воспламенения на способность рабочего цикла реагировать на их изменения.

Учитывая многоцелевой характер совершенствования рабочего цикла дизелей, естественно предположить необходимость многокритериальной оценки управляемости основного процесса рабочего цикла – процесса сгорания топлива. Различные параметры, используемые при оценке и анализе процесса сгорания, отражают отдельные качества рабочего цикла и могут участвовать в определении степени достижения конкретных целей управления.

Многоцелевой характер совершенствования рабочего цикла и, следовательно, процесса сгорания требует нового подхода к методологии его управления. В основе этого подхода лежит положение о дифференциации как параметров процесса сгорания в соответствии с различиями его механизма в определенные периоды рабочего цикла, так и управляющих воздействий в целях реализации многоцелевого характера управления. Дифференцированный подход к управлению процессом сгорания топлива в дизелях является базой соответствующих критериев управляемости.

Повышение удельной мощности, топливной экономичности, надежности и срока службы, совершенствование эксплуатационных свойств и удовлетворение эргономических требований, предъявляемых к дизелям, выдвигают в ряд актуальных проблему повышения управляемости процесса сгорания топлива. Управляемость процесса сгорания в рабочем цикле является обобщающим критерием его совершенства, вскрывает резервы модернизации и характеризует перспективность конкретных направлений развития дизеля.

Процесс сгорания топлива в дизелях характеризуется комплексом параметров, однозначно оценивающих его с различных позиций. Не-

достаточная полнота наших представлений о физических и химических механизмах, сложность и быстротечность процесса сгорания затрудняют его комплексное управление, а многообразие методов управления, разработанных теорией и практикой отечественного и зарубежного дизелестроения, нуждается в соответствующей оценке эффективности с позиций дифференцированного подхода.

В этой связи управление процессом сгорания топлива целесообразно рассматривать как дифференцированное воздействие на совокупность взаимосвязанных характеристик, последовательно отражающих изменение топливо-воздушной смеси и ее элементов. Дифференцированный подход к совершенствованию процесса сгорания лежит в основе систематизации методов управления, на основе которой осуществлена их классификация и разработаны критерии оценки эффективности. Оценка эффективности методов управления включает весь комплекс параметров процесса сгорания. Этот комплекс определен физической природой и разнообразием механизмов процесса сгорания и учтен при его математическом моделировании.

Математическое моделирование непрерывно совершенствуется включением новых переменных и связей, отражая современные представления о физико-химической природе и механизме процесса сгорания. Важной особенностью математических моделей является их преемственность, позволяющая использовать опыт совершенствования процесса сгорания. Математическая модель процесса сгорания в виде характеристики выгорания топлива $x = f(\varphi)$, отражающая его современные концепции и используемая при оценке эффективности дифференцированного подхода к управлению в совершенствовании рабочего цикла дизеля на основе вычислительного эксперимента, представляется

$$x = 1 - \exp [c(\varphi/\varphi_n)^{m_n - m_0}(\varphi/\varphi_z)^{m_0 + 1}]$$

$$\text{при } \varphi > \varphi_n; \quad m_n = m_0, \quad (2)$$

где x – доля топлива, выгоревшая к углу поворота коленчатого вала φ ; φ_n , φ_z – продолжительность соответственно начального периода

и всего процесса сгорания, град. п. к. в.; m_n , m_o – показатели характера сгорания соответственно начального и основного периодов процесса сгорания.

Математическое моделирование дает возможность оценить эффективность дифференцированного подхода к управлению на основе расчетно-аналитического (численного) исследования и вскрыть особенности воздействия параметров процесса сгорания топлива на индикаторные показатели рабочего цикла.

Результаты численного исследования рабочего цикла тем достовернее, чем полнее учитывается связь параметров процесса сгорания друг с другом. Целесообразность учета таких связей устанавливается на основе детального анализа математической модели. Особое значение в этом случае имеют зависимости продолжительности процесса сгорания от интенсивности выгорания и уровня тепловых потерь от продолжительности процесса сгорания. Указанные зависимости могут быть получены либо аналитическим путем [2], либо в результате анализа опытных данных, например предложенная в [4]:

$$\varphi_z = \varphi_{z \text{ opt}} + b[(K_o - K)/K^3](n_{\text{ном}}/n)^{0,92}, \quad (3)$$

где φ_z , $\varphi_{z \text{ opt}}$ – продолжительность процесса сгорания и ее оптимальное значение, град. п. к. в.; K , K_o – коэффициенты эффективности использования воздушного заряда и смесеобразования; b – коэффициент, определяемый условиями смесеобразования; n , $n_{\text{ном}}$ – частота вращения коленчатого вала дизеля и ее номинальное значение, мин⁻¹.

Их использование при численном моделировании рабочего цикла существенно расширяет возможности расчетно-аналитического исследования. Результаты такого исследования являются базой принципов управления процессом сгорания топлива в дизелях.

Сравнение параметров математической модели процесса сгорания лежит в основе формализации критериев эффективности методов управления. В качестве таких критериев использованы разновидности оценки управляемости процесса сгорания, характеризующие степень соответствия реального процесса сгорания его желаемому виду. При дифференцирован-

ном подходе к управлению разновидности оценки управляемости имеют самостоятельное значение как в отдельности, так и в комплексе, являясь носителями определенных целей управления [2].

Критериальная оценка управляемости систематизированных и классифицированных методов управления – основа научно обоснованного выбора метода управления при целенаправленном совершенствовании процесса сгорания и рабочего цикла дизеля. Для этого формализуются прежде всего частные критерии управляемости: продолжительности k_φ , адиабатности k_ξ , своевременности k_θ , характерности k_m , монотонности $k_{\Delta m}$:

$$k_\varphi = |\varphi_z - \varphi_{z \text{ opt}}|/\varphi_{z \text{ opt}}; \quad (4)$$

$$k_\xi = |\xi_{\text{opt}} - \xi|/\xi_{\text{opt}}; \quad (5)$$

$$k_\theta = |\theta_{\text{opt}} - \theta|/\theta_{\text{opt}}; \quad (6)$$

$$k_m = |m_{\text{opt}} - m|/m_{\text{opt}}; \quad (7)$$

$$k_{\Delta m} = \arctg\{|m_o - m_n|/[(m_o + 1)(m_n + 1) + 1]\}, \quad (8)$$

а затем комплексный критерий управляемости K с учетом оцениваемого свойства [2]

$$K = \sum_{i=1}^5 w_i k_i = w_\varphi k_\varphi + w_\xi k_\xi + w_\theta k_\theta + w_m k_m + w_{\Delta m} k_{\Delta m}, \quad (9)$$

где w_i – i -й приоритетный коэффициент; k_i – i -й критерий управляемости.

Эффективность методов управления процессом сгорания характеризуется количественной и качественной оценкой управляемости. Объединение единым характером управляющих воздействий методов управления в классификационные группы производится для установления иерархии последних по уровню управления и степени управляемости. Иерархия классификационных групп методов управления сужает диапазон поиска эффективного метода управления.

Совершенствование рабочего цикла и эксплуатационных свойств при увеличении удельных параметров дизелей повышением управляемости процесса сгорания на основе научно

обоснованного выбора методов управления предполагает использование системы управления сгоранием топлива, позволяющей реализовать методы управления в соответствии с их эффективностью.

В основе методологии и алгоритма функционирования систем управления процессом сгорания топлива лежит использование:

- математической модели процесса сгорания, учитывающей различие механизмов выгорания топлива в периодах и закономерные связи между его параметрами при дифференцированном подходе к управлению;
- результатов численного моделирования рабочего цикла дизеля при реализации принципов совершенствования процесса сгорания;
- систематизации, классификации методов управления и критериальной оценки их эффективности в дизелях;
- результатов экспериментальной оценки эффективности классифицированных методов управления и сравнительного анализа для обоснования их выбора;
- результатов определения эффективности совершенствования процесса сгорания в повышении топливной экономичности и снижении механической нагруженности дизеля;
- оценки возможности снижения тепловой нагруженности дизеля совершенствованием процесса сгорания и радикальных направлений расширения пределов форсирования;
- результатов определения эффективности совершенствования процесса сгорания в снижении выбросов вредных веществ отработавшими газами, уровня шумности, вибрации и обеспечении многотопливных качеств дизеля.

Функционирование систем управления сгоранием топлива в дизелях базируется на использовании:

- технических средств с компонентами электронного регулирования для реализации управляющих воздействий и методов управления;
- управляющего микропроцессорного вычислительного комплекса с программным обеспечением соответствующего алгоритма.

На ранних стадиях развития систем управления процессом сгорания топлива в дизелях вследствие сложности автоматизации управ-

ляющие воздействия осуществлялись часто не связанными друг с другом изменениями:

- температуры охлаждающей среды и деталей, образующих камеру сгорания;
- степени сжатия свежего заряда в цилиндре;
- момента опережения, способа впрыскивания и температуры топлива;
- давления и температуры воздуха перед впускными органами при наддуве;
- противодействия на выпуске и степени рециркуляции отработавших газов;
- степени обогащения кислородом воздуха на впуске;
- моментов открытия и закрытия клапанов механизма газораспределения;
- способа образования топливовоздушной смеси и т. п.

В последнее десятилетие широкое развитие получили новые компоненты электронного регулирования и микропроцессорной техники. В этой связи появилась возможность эффективной реализации разновидностей систем управления процессом сгорания, в частности аккумуляторных систем впрыскивания топлива [5].

В традиционных системах впрыскивания с использованием как распределительных, так и рядных насосов высокого давления до сих пор впрыскивание топлива осуществляется обычным способом, без разделения на предварительное, основное и последующее. При дальнейшем развитии распределительных насосов использование электромагнитного клапана делает возможным осуществление предварительного впрыскивания. В традиционных системах создание давления и изменение количества впрыскиваемого топлива осуществляются посредством кулачкового привода и подающего плунжера. Это обуславливает следующие особенности такого способа впрыскивания:

- давление впрыскивания повышается с ростом частоты вращения коленчатого вала и количества впрыскиваемого топлива;
- давление впрыскивания растет вначале и падает до давления закрытия иглы распылителя в конце впрыскивания.

Следствием этого являются следующие факторы:

- малое количество топлива впрыскивается при малом давлении;

- максимальное давление почти в два раза больше среднего давления впрыскивания;

- дифференциальная характеристика впрыскивания приближается к форме треугольника.

Максимальное давление впрыскивания является критерием нагруженности элементов конструкции топливного насоса, его привода, а также служит косвенной характеристикой качества смесеобразования в камере сгорания.

К идеальному способу впрыскивания топлива по сравнению с традиционным способом дополнительно предъявляются следующие требования:

- давление впрыскивания и количество впрыскиваемого топлива для каждого режима работы дизеля должны иметь возможность устанавливаться независимо друг от друга (дополнительная степень свободы при образовании смеси);

- количество поступающего в цилиндр топлива в начале впрыскивания должно быть как можно малым (в течение периода задержки воспламенения между началом впрыскивания и началом сгорания).

В аккумулирующей системе COMMON RAIL эти требования реализуются использованием, наряду с основным, предварительного впрыскивания топлива, т. е. разделенного впрыскивания топлива. В качестве топливного насоса высокого давления для создания давления, например, в системах легковых автомобилей служит радиально-плунжерный насос. Частота вращения насоса высокого давления жестко связана передаточным отношением с частотой вращения коленчатого вала дизеля. Давление топлива создается независимо от параметров впрыскивания. На основании этого можно существенно понизить почти равнозначные требования к насосу высокого давления и пиковому моменту привода, имеющиеся в традиционных системах впрыскивания.

Форсунки, которые соединены с аккумулятором очень короткими трубопроводами, состоят в основном из распылителя и магнитного клапана. Управляющее устройство включает магнитный клапан в момент начала впрыскивания. При прекращении подачи электрического сигнала в магнитный клапан впрыскивание заканчивается. Количество впрыскиваемого топ-

лива при заданном давлении пропорционально времени включения магнитного клапана и не зависит от частоты вращения коленчатого вала дизеля и топливного насоса (впрыскивание, управляемое по времени).

Выполнение требования кратковременности открытия магнитного клапана достигается благодаря осуществлению функции управления магнитным клапаном в управляющем устройстве с высокими напряжениями и токами.

Момент впрыскивания управляется системой «угол – время» электронного регулирования дизеля. В этом случае на коленчатом и кулачковом валах установлены два датчика частоты вращения, а для каждого цилиндра – так называемые фазовые метки.

Предварительное впрыскивание может быть осуществлено за 90 град. п. к. в. до верхней мертвой точки (ВМТ). При начале предварительного впрыскивания ранее чем 40 град. п. к. в. до ВМТ топливо может попадать на поверхность днища поршня и стенки цилиндра и приводить к разжижению смазочного масла. При предварительном впрыскивании в цилиндр подается небольшое количество дизельного топлива (1...4 мм³), которое, насыщая парами пространство камеры сгорания, может повысить эффективность сгорания и обеспечить достижение следующих эффектов:

- давление сжатия инициирует предпламенные реакции, так называемое «холодное» сгорание;

- сокращается период задержки воспламенения топлива при основном впрыскивании;

- уменьшаются скорость нарастания давления и максимальное давление сгорания (обеспечивается так называемое мягкое сгорание).

Эти эффекты уменьшают шум сгорания, расход топлива и выбросы вредных веществ отработавшими газами.

В зависимости от начала основного впрыскивания и соотношения между предварительным и основным впрыскиваниями удельный расход топлива может уменьшаться или увеличиваться. При основном впрыскивании энергия сгоревшего топлива преобразуется в полезную работу дизеля. Она определяет формирование вращающего момента дизеля. При аккумулирующей системе впрыскивания COMMON

RAIL уровень давления впрыскивания остается почти неизменным в течение всего процесса впрыскивания.

Последующее впрыскивание может быть использовано как средство дозирования (при подмешивании) топлива с определенными вариантами NO_x -катализаторов. Оно следует за основным впрыскиванием во время тактов расширения или выпуска за 200 град. п. к. в. после ВМТ. В отработавшие газы поступает точно дозированное количество топлива. В отличие от предварительного и основного впрыскиваний топливо не воспламеняется, а лишь испаряется благодаря остаткам теплоты в отработавших газах. Эта топливогазовая смесь направляется через выпускной клапан в такте выпуска в выпускную систему. При рециркуляции основная часть топлива снова возвращается в цилиндр для сгорания, действуя при этом как очень раннее предварительное впрыскивание. Топливо служит в собственно NO_x -катализаторе как средство снижения оксидов азота в отработавших газах.

При целевом создании систем управления процессом сгорания, например аккумулирующей системы впрыскивания COMMON RAIL, особенно ее управляющего блока, для реализации так называемых «жестких» связей между функциями и управляющими параметрами, результаты многочисленных испытаний конкретного дизеля в различных эксплуатационных условиях обобщены и заложены в алгоритм функционирования. Это сделано в целях некоторого упрощения системы управления за счет ограничения в использовании сложных датчиков состояния, сенсорных, преобразующих и усилительных устройств.

В то же время многообразие технологических отклонений в производстве, режимов работы дизеля, эксплуатационных условий, включая отклонения показателей качества моторных топлив, масел и охлаждающих жидкостей, а также индивидуальных особенностей моториста, так называемый «человеческий фактор», накладывают свои коррективы на указанные связи и снижают эффективность систем управления.

В целях повышения эффективности и дальнейшего совершенствования систем управления сгоранием топлива в дизелях целесообразно использовать в качестве основного информационного источника о качестве процесса сгорания результаты анализа интегральных и дифференциальных характеристик выгорания топлива по специальному алгоритму. При этом необходимо регистрировать индикаторную диаграмму давления газов в цилиндре дизеля для термодинамического анализа с целью получения характеристик выгорания топлива на каждом конкретном режиме работы.

Полученные в результате анализа характеристик выгорания топлива основные параметры процесса сгорания (своевременность, продолжительность, монотонность, характерность и адиабатность) на конкретном режиме необходимо сопоставить с рекомендуемыми (оптимальными) значениями. Степень различия реальных и рекомендуемых значений параметров процесса сгорания является условием выработки управляющего сигнала различной интенсивности и, как следствие, основанием для использования метода управления соответствующего уровня эффективности.

Указанное требует дополнения существующей элементной базы систем управления соответствующими компонентами электронного регулирования, включая структуру вычислительного комплекса и программное обеспечение управляющего блока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vibe I. I. Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1970. – 286 s.
2. Лазарев Е. А. Систематизация и оценка эффективности управления процессом сгорания топлива в дизелях // Двигателестроение. – 1985. – № 6. – С. 7–9.
3. Чаромский А. Д. Испытание, исследование и расчет авиационного дизеля. – М.: ОНТИ, 1934.
4. Кухаренок Г. М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей: Методы и средства совершенствования. – Мн.: БГПА, 1999. – 180 с.
5. Изенбург Р., Мюнценмей М., Кулл Х. Дизельная аккумулирующая система впрыскивания COMMON RAIL / Пер. с нем. Е. А. Лазарева; Под ред. В. Е. Лазарева. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 75 с.