

УДК 621.43:001.3,621.43:001.573

А. О. БОРИСОВ

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ИНВАРИАНТНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ РЕЖИМА РАБОТЫ

Обсуждаются проблемы сохранения достигнутых сегодня предельных значений эффективных и токсичных показателей двигателя по внешней скоростной характеристике и на неустановившихся режимах работы. Обоснованы и подтверждены необходимые условия, обеспечивающие инвариантность данных показателей двигателя к изменению режима работы. *Предельные показатели двигателя; регулирование двигателя; инвариантность показателей*

Четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с количественным регулированием мощности является источником энергии для широкого круга потребителей. Поэтому из всего многообразия требований к двигателю в первую очередь следует выделить обеспечение соответствия полей характеристик двигателя и потребителя, что определяет принципиальную возможность практического использования двигателя. Таким образом, проблема, которую приходится решать в первую очередь при проектировании или модернизации двигателя, заключается в обеспечении того или иного закона выработки механической энергии. Для двигателя, использующего в качестве окислителя кислород атмосферы, потенциальная конфигурация поля режимов работы будет определяться расходом воздуха.

Известны характерные недостатки поршневого двигателя традиционной конструкции, проявляющиеся при анализе поля режимов работы:

- существенная зависимость величины среднего эффективного давления от частоты циклов двигателя;

- значительное ухудшение показателей токсичности двигателя на переходных режимах работы двигателя относительно достигнутых на установившихся режимах.

В связи с этим совершенство ДВС как многорежимного генератора механической энергии логично оценивать, во-первых, степенью соответствия его эффективных показателей предельному уровню, достигнутому на современном уровне развития науки и техники, и, во-вторых, степенью инвариантности его показателей к изменению режима работы. Рассмотрим возможности совершенство-

вания двигателя в рассмотренном выше плане за счет регулирования расхода воздуха.

Из теории рабочих процессов ДВС известно, что величина среднего эффективного давления P_e может быть представлена как

$$P_e = K \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \rho \eta_m,$$

где K — постоянный коэффициент, зависящий от рода топлива, применяемого в двигателе; η_i — индикаторный коэффициент полезного действия (КПД); α — коэффициент избытка воздуха; η_v — коэффициент наполнения; ρ — плотность окружающего воздуха (для двигателей без агрегатов наддува); η_m — механический коэффициент полезного действия.

Рассмотрим изменение среднего эффективного давления и токсичности отработавших газов при изменении режима работы двигателя в той степени, в которой на них оказывает влияние расход воздуха.

Очевидно, что в процессе формирования величины среднего эффективного давления цикла первостепенную роль играет расход воздуха через двигатель, определяемый произведением $\eta_v \rho$. Следовательно, при постоянных параметрах окружающей среды формирование потенциального вида внешней и переходных характеристик двигателя определяется зависимостью коэффициента наполнения от частоты вращения и времени. Изменение коэффициента наполнения по внешней скоростной характеристике современного двигателя достигает 200% и более.

Анализ изменения величины отношения η_i/α в поле режимов работы двигателя (включая переходные режимы) целесообразно выполнить, исходя из следующих соображе-

ний. В терминах теории автоматического регулирования смена режима работы двигателя (включая изменение параметров окружающей среды) является возмущением для подсистем регулирования его эффективных и экологических показателей.

При этом степень отклонения показателей цикла от достигнутого предельного уровня определяется соотношением противоположно действующих эффектов: отклонением регулируемой величины под действием возмущения и восстановлением ее значения за счет приложения к объекту регулирующих воздействий: в первую очередь цикловой подачей топлива и степенью синхронизации индикаторного процесса с угловым положением вала двигателя. Несмотря на развитые аппаратную часть и программное обеспечение бортовых систем регулирования, в переходных процессах двигателя наблюдаются значительные (более чем на порядок относительно допускаемых) отклонения состава смеси.

Таким образом, при заданной конфигурации камеры сгорания, величина среднего эффективного давления двигателя и показатели его токсичности определяются, прежде всего, величиной циклового расхода воздуха и точностью его определения.

Для двигателей с газоздушным трактом (ГВТ), выполненным по оптимальной схеме [1], методом численного эксперимента получена предельная величина коэффициента наполнения, равная $\eta_v = 1,33 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$. Необходимым условием достижения этого значения является выполнение определенных соотношений между геометрическими параметрами ГВТ, частотой циклов двигателя и скоростью звука в окружающей среде.

Предельно низкий уровень выбросов токсичных компонентов сегодня достигнут в двигателе, оборудованном каталитическим нейтрализатором отработавших газов. Этот уровень достигается при следующих условиях:

- при разогревом до рабочей температуры нейтрализатора;
- при стабилизации стехиометрического состава смеси, поступающей в двигатель, с погрешностью не более 2%.

Рассмотрим классический подход к созданию инвариантной к внешним воздействиям САР и оценим принципиальные возможности реализации этого подхода применительно к специфическому объекту – ДВС.

Основным методом, используемым при построении инвариантных систем, является

применение комбинированного регулирования.

Под комбинированным управлением или регулированием понимается такой метод построения замкнутых автоматических систем, когда, наряду с регулированием по отклонению (по ошибке), используется регулирование по тому из внешних воздействий, относительно которого система должна быть инвариантной. Рассмотрим схему комбинированной САР, например, состава смеси двигателя (рис. 1). Возмущающим внешним воздействием для этой системы является изменение расхода воздуха. Обозначим через $W_f(p)$ передаточную функцию системы по расходу воздуха в разомкнутой системе. Передаточная функция по возмущению в этой системе имеет вид

$$\Phi_f(p) = \frac{W_f(p) - \varphi(p)W(p)}{1 + W(p)}$$

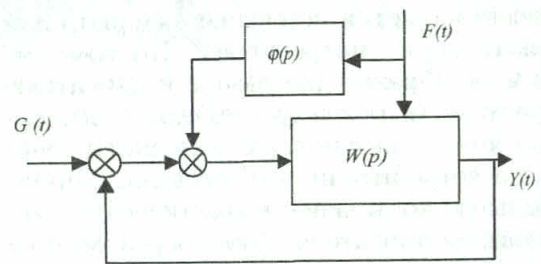


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического регулирования состава смеси двигателя: $W(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы; $\varphi(p)$ – передаточная функция канала регулирования по расходу воздуха (по возмущению); $G(t)$ – задающее воздействие (опорное напряжение); $Y(t)$ – действительное значение состава смеси (напряжение с датчика содержания кислорода)

Условие полной инвариантности записывается следующим образом:

$$\Phi_f(p) = 0,$$

откуда

$$\varphi(p) = \frac{W_f(p)}{W(p)}$$

Разложив последнее выражение в ряд по возрастающим степеням оператора, получим необходимый вид функции, определяющей вводимый сигнал от возмущающего воздействия:

$$\varphi(p) = k_F (a_0 + \tau_1 p + \tau_2^2 p^2 + \tau_3^3 p^3 + \dots),$$

где a_0 – безразмерное число (1 или 0), а k_F – коэффициент, размерность которого определяется размерностью передаточной функции $W_f(p)$.

Таким образом, необходимыми (но недостаточными) условиями обеспечения инвариантности заданного показателя двигателя к некоторому внешнему возмущению являются возможность определения последнего и наличие органов регулирования двигателя, реализующих предельный уровень показателя при измененном значении возмущения. Дополнительным условием, обеспечивающим полную инвариантность (и достижение достаточности условий), является необходимость введения производных от внешнего воздействия.

Аналогичным образом можно рассмотреть САР расхода воздуха через двигатель, обеспечивающую инвариантность к частоте циклов.

Рассмотрим принципиальную возможность выполнения указанных условий в САР коэффициента наполнения ДВС. Величина коэффициента наполнения при заданной частоте циклов зависит от вполне определенной комбинации конструктивных параметров. Найденное в численных экспериментах предельное значение коэффициента наполнения зависит только от степени сжатия. Все это позволяет выдвинуть гипотезу о том, что при реализации определенной программы регулирующих воздействий (основных конструктивных параметров газоздушного тракта двигателя) возможно сохранение предельной величины коэффициента наполнения независимо от частоты циклов двигателя и параметров окружающей среды. Измерение частоты циклов работы двигателя и температуры окружающей среды и определение их производных принципиальных трудностей не вызывает. В данном случае основной теоретической проблемой является определение программы регулирующих воздействий.

Далее рассмотрим принципиальную возможность выполнения указанных условий в САР состава смеси ДВС. Достаточная для эффективной работы нейтрализатора статическая точность замкнутой системы регулирования состава смеси до сих пор поддерживает иллюзию возможности создания инвариантной к изменению режимов работы системы, содержащей комбинацию рассмотренного канала регулирования с обратной связью с каналами регулирования подачи топлива по возмущениям (углу открытия дросселя, давлению на впуске, частоте вращения и соответствующим производным). Поэтому, в соответствии с вышесказанным, повышение точности регулирования состава смеси обеспечивается, прежде всего, увеличением количества датчиков и введением в канал управления производных, что в определенной сте-

пени улучшает показатели качества управления на переходных режимах. Тем не менее, как показывают результаты специальных исследований [2], погрешность определения циклового расхода воздуха при изменении режима работы двигателя может достигать 50% и более. Основная причина погрешности заключена в современном алгоритме определения циклового расхода воздуха: регистрацией параметров потока в одном из сечений системы с распределенными параметрами и преобразованием этой информации без учета начальных условий. Из этого следует, в частности, что необходимая для эффективной работы нейтрализатора точность определения циклового расхода воздуха на неустановившихся режимах работы двигателя принципиально не может быть достигнута повышением точности измерений параметров потока.

Таким образом, основной проблемой построения комбинированной системы регулирования состава смеси двигателя, инвариантной к изменению расхода воздуха, является определение циклового расхода воздуха через рабочие камеры двигателя с требуемой точностью.

В теоретическом плане постановка задачи регулирования расхода воздуха (сохранения предельной величины коэффициента наполнения) достаточно проста, если в качестве рабочей гипотезы принять следующее утверждение: предельное значение коэффициента наполнения будет восстановлено при изменении скоростного режима работы ДВС, если при этом будет воспроизведено подобие газодинамических явлений в газоздушном тракте двигателя.

Определение программы регулирующих воздействий, компенсирующих изменение частоты циклов, производилось по методике [1], которая в качестве аргументов предполагает для этой цели использование следующих обобщенных переменных и критериальных зависимостей:

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} F \left(\frac{1}{M_{к_вп}} \right);$$

при определенной взаимосвязи следующих параметров:

$$\begin{aligned} M_{вп} &= F(M_{к_вп}); & Sh_{вп} &= F(M_{к_вп}); \\ M_{к_вып} &= F\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \eta_v\right); & M_{вып} &= F\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \eta_v\right); \\ Sh_{вып} &= F\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \eta_v\right), \end{aligned}$$

где η_v — коэффициент наполнения; ε — степень сжатия; $M_{к\text{-вп}}$, $M_{к\text{-вып}}$, $M_{вп}$, $M_{вып}$ — отношение скорости газа в сечении клапана и в сечении трубы для впускной и выпускной систем соответственно к скорости звука в окружающей среде; $Sh_{вп}$, $Sh_{вып}$ — отношение частоты собственных колебаний столба газа во впускной (выпускной) трубе к частоте циклов работы двигателя.

Рассмотрим возможность сохранения численных значений критериев при работе двигателя по внешней скоростной характеристике, что будет гарантировать сохранение подобия явлений в газоздушном тракте и, предположительно, сохранение предельной величины коэффициента наполнения.

Уменьшение частоты циклов требует соответствующего увеличения длины трубопроводов (при постоянной скорости звука в окружающей среде). Для дальнейшего анализа рассмотрим более подробно второй критерий подобия. Сомножитель $\varepsilon/(\varepsilon - 1)$ при современных достаточно высоких значениях степени сжатия близок к единице и не может служить для целей компенсации. Относительная угловая длительность открытого состояния клапана должна оставаться неизменной по условиям кинематического подобия. Формально можно компенсировать уменьшение частоты циклов за счет соответствующего уменьшения сечения трубопровода. Однако при значительном отклонении частоты циклов от исходного значения (например, в 10^3 раз) диаметр трубопровода должен быть уменьшен более чем в 30 раз, что, естественно, нарушает геометрическое подобие. Следует признать, что для компенсации данного возмущения, помимо прочего, необходимо пропорциональное изменение рабочего объема двигателя.

Физический смысл этого требования заключается в следующем. При существенном уменьшении частоты циклов требуется однозначное увеличение длины трубопровода для сохранения величины критерия Sh . При этом, естественно, пропорционально длине трубопровода увеличивается объем воздуха или отработавших газов в нем. Для сохранения прежней интенсивности волн в трубопроводе (и скорости течения газа) следует сохранить прежнее соотношение его объема и рабочего объема цилиндра двигателя.

Представляется, что в рассматриваемой задаче мгновенные распределения давления и скорости газа по длине трубопровода не должны изменяться при изменении частоты

циклов. Поэтому введем в рассмотрение несколько модифицированный критерий, который также характеризует отношение средней скорости течения газа во впускном трубопроводе к скорости звука в окружающей среде, но в большей степени соответствует постановке задачи:

$$M_{вп} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{V_h}{V_{вп} \cdot a_0} \cdot \frac{1}{\phi},$$

где $V_{вп}$ — объем впускного трубопровода.

Предполагаемая программа регулирующих воздействий для данного случая представлена на рис. 2.

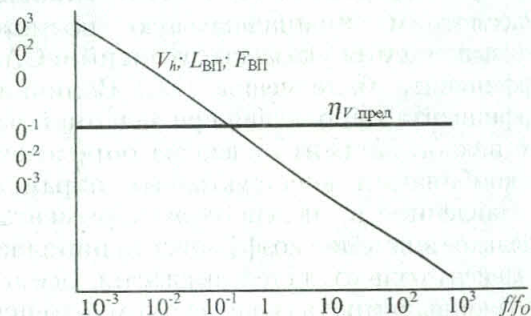


Рис. 2. Программа регулирующих воздействий для компенсации изменения частоты циклов двигателя: $L_{вп}$ — длина впускной трубы; $F_{вп}$ — сечение впускной трубы; f/f_0 — относительное отклонение частоты циклов

Представляет значительный интерес анализ данной задачи при различного рода ограничениях, прежде всего — при постоянном рабочем объеме двигателя. При данном условии по-прежнему компенсация изменения частоты циклов для критерия Sh осуществляется соответствующим изменением длины трубопровода. Компенсация изменения объема трубопровода может осуществляться только лишь за счет изменения его сечения с ограничениями, указанными выше. На рис. 3 представлены предполагаемые качественные зависимости коэффициента наполнения и регулирующих факторов от частоты циклов для рассматриваемого случая.

В характерном для современных автомобильных двигателей диапазоне частот вращения посредством имитационного моделирования выявлены возможности сохранения по внешней скоростной характеристике предельной величины коэффициента наполнения за счет изменения длины и площади сечений впускного клапана и впускной трубы газоздушного тракта. Сохранялись неизменными величина рабочего объема двигателя, степень сжатия, параметры выпускной системы и окружающей среды. Последнее предпо-

лагает исключение из рассмотрения приводных нагнетателей и турбокомпрессоров.

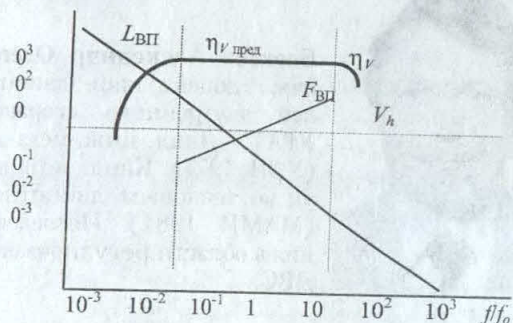


Рис. 3. Программа регулирующих воздействий при сохранении постоянной величины рабочего объема двигателя: $L_{вп}$ — длина впускной трубы; $F_{вп}$ — сечение впускной трубы; f/f_0 — относительное отклонение частоты циклов

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 4, подтверждают наличие существенного потенциального резерва расширения поля эффективной работы двигателя за счет регулирования расхода воздуха.

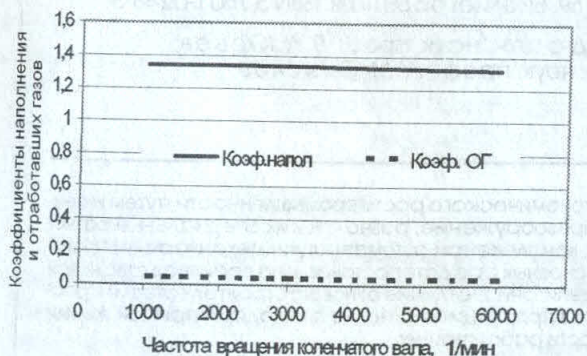


Рис. 4. Статические характеристики двигателя как объекта регулирования

В связи с принципиальной невозможностью аппаратными средствами определения и, тем более, прогнозирования циклового расхода воздуха, для регулирования состава смеси предлагается САР с моделью [3].

Как известно, в системах автоматического регулирования с моделью последняя представляет собой отдельное звено, объект регулирования или часть системы с требуемыми характеристиками. Характеристики объекта в данном случае таковы, что детальную картину газообмена можно получить только в процессе численного эксперимента с использованием имитационных моделей высокого уровня. Как показывает практика, современные модели допускают расчетное определение интегральных показателей двигателя с

погрешностью 4...5%, в том числе и циклового расхода воздуха. Тем не менее использование имитационных моделей ДВС в реальном времени сегодня неосуществимо по техническим причинам. В связи с этим была разработана методика, позволяющая согласовать возможности детального численного эксперимента, выполняемого в модельном времени, с особенностями определения циклового расхода воздуха через двигатель в реальном времени для режимов ездового цикла [2]. Для подтверждения достоверности модели коэффициентов наполнения, полученной посредством разработанной методики, на полномасштабном двигателе, являющемся оригиналом численной модели, были проведены соответствующие эксперименты. Рассогласование газодинамической картины явлений, полученных численным и физическим экспериментом, как по амплитуде, так и по фазе не превышает 3%.

Для практического определения циклового расхода воздуха в САР с моделью требуется выполнение аппаратной частью системы дополнительной функции: регистрации положения вала, соответствующего изменению положения дросселя. Реализация этого условия принципиальных проблем не вызывает.

Таким образом, разработанная методика позволяет определить характерные особенности изменения коэффициентов наполнения двигателя в зависимости от параметров, которые регистрируются в реальном масштабе времени с точностью, которая обеспечивается датчиками, применяемыми в современных системах впрыска топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, дальнейшее повышение качества управления автомобильным двигателем требует переменной геометрии газоздушного тракта и построения систем регулирования с моделью.

Для расширения частотного диапазона работы двигателя с предельным коэффициентом наполнения удастся определить программу регулирующих воздействий и реализовать ее в диапазоне частот циклов 15...100 Гц;

Повышение точности регулирования состава смеси двигателя возможно САР с моделью коэффициентов наполнения, применение которой снижает погрешности определения циклового расхода воздуха на неустановившихся режимах работы в 3...4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудой Б. П., Березин С. Р. Расчет на ЭВМ показателей газообмена: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1970. С. 14–35.
2. Пенкин Д. В. Формирование моделей для управления двигателем по цикловому расходу воздуха: Дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2000.
3. Борисов А. О. Управление автомобильным двигателем по модели // Улучшение мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Матер. VI Междунар. науч.-практ. сем. Владимир, 1997. С. 10.



ОБ АВТОРЕ

Борисов Александр Олегович, доцент каф. двигателей внутреннего сгорания УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (МАМИ, 1981). Исследования в области регулирования ДВС.

Информация



С.Г.Селиванов, М.В.Иванова
Теоретические основы реконструкции
машиностроительного производства

Уфа: Гилем, 2001

310 с. Табл. 10. Ил. 69. Библиогр.: 50 назв. ISBN 5-7501-0248-3

Рецензенты: Д-р техн. наук, проф. В.Л.Юрьев;
Д-р техн. наук, проф. А.М.Смыслов

Актуальность научного издания определяется задачами экономического роста промышленности путем интенсификации производства. Реконструкция и техническое перевооружение, равно как и их специальные разновидности в виде реструктуризации, конверсии, реновации, комплексной автоматизации (механизации) производства рассматриваются в настоящее время в качестве основных средств постановки на производство новой продукции. Все названные выше процессы имеют единые цели, они, в отличие от нового строительства или расширения предприятий, позволяют увеличить объемы выпуска продукции на тех же площадях и при той же или даже меньшей численности работающих.

Главной целевой установкой монографии является теоретическое обобщение методов технической реконструкции на основе исследования законов и закономерностей развития производственных систем в машиностроении, приборостроении, аппаратостроении и металлообработке.

В издании подробно рассмотрены:

- проблемы организации реконструкции на основе использования системного подхода, законов и закономерностей организации и реорганизации;
- методы технической подготовки реконструкции, которые применяют при хозяйственном и подрядном способах выполнения работ, при разработке целевых программ реконструкции объектов;
- вопросы системного анализа объектов реконструкции, которые необходимо решить для правильного определения основных направлений проектных работ по интенсификации производства;
- методики проектирования технологических процессов реконструируемого производства, обеспечивающие интенсификацию производства;
- способы выполнения планировок оборудования и содержание нейросетевой САПР реконструкции и технического перевооружения, используемой в этих целях;
- математические модели инвестиционного проектирования реконструкционных процессов и обоснования эффективности капиталовложений.

Книга может быть полезна как научным работникам и разработчикам проектов реконструкции и технического перевооружения, так и студентам вузов при решении научно-технических и технико-экономических проблем развития производства.