

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПО ЦИЛИНДРАМ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА В БЕНЗИНОВОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ ХОЛОДНОМ ПУСКЕ

Введение

Ужесточение требований по экологической безопасности и потребительским качествам автомобильного транспорта вынуждает производителей внедрять высокотехнологичные решения, одним из которых является применение электронных систем управления двигателем (ЭСУД). Такие системы позволяют оперативно управлять работой двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на основе показаний датчиков, характеризующих текущее состояние ДВС. В последние пять-десять лет ЭСУД нашли широкое применение и получили интенсивное развитие, что позволило значительно улучшить показатели ДВС. Применение современных алгоритмов управления и улучшенных систем нейтрализации отработавших газов (СНОГ) позволили добиться практически «чистого» выхлопа при работе прогретого двигателя. Основные проблемы при оптимизации управления ДВС относятся к неустановившимся режимам, в частности к режимам холодного пуска и прогрева. При выполнении испытаний по стандартному европейскому ездовому циклу при $t=20\div30^{\circ}\text{C}$ 80÷85% эмиссии токсичных веществ, выброшенных в атмосферу с отработавшими газами, приходится на первые 60÷90 секунд работы двигателя после пуска, т.е. на период прогрева каталитического нейтрализатора.

Ситуация при холодном пуске с отрицательными температурами дополнительно осложняется из-за образования большого количества топливной пленки на стенках впускного тракта, что в свою очередь приводит к переменным задержкам подачи топлива в цилиндры и как следствие к значительным затрудне-

ниям в оперативном управлении топливоподачей, особенно в фазе разгона. Для компенсации больших отклонений по составу смеси в цилиндрах и обеспечения устойчивой работы двигателя при пуске разработчики вынуждены прибегать к излишней подаче топлива, что неблагоприятно отражается на работе систем нейтрализации отработавших газов, а также снижает надежность холодного пуска в эксплуатации.

Обеспечить оптимальное оперативное управление подачей топлива при холодном пуске и облегчить решение вышеперечисленных проблем возможно за счет внедрения в алгоритм управления модели образования топливной пленки, подобно неустановившимся режимам работы прогретого двигателя [1, 2]. Возможность такого решения доказана, в частности, в работе специалистов ф. Honda [3]. Однако приведенные результаты и известные другие публикации касались работы двигателя при положительных температурах. Вместе с тем имеются особенности смесеобразования при низких температурах, в частности, связанные с частичной потерей топлива и динамикой топливной пленки, которые значительно осложняют процесс управления [4, 5].

1. Цель исследования

Целью данного исследования являлось разработка компьютерной модели индивидуального по цилиндрам управления подачей топлива при холодном пуске бензинового двигателя на базе известной X-т модели процесса транспортировки топлива во впускной системе и оценка работоспособности модели управления в расчетных экспериментах.

2. Формулирование проблемы

Холодный пуск ДВС представляет собой резко неустановившийся процесс по всем основным рабочим параметрам ДВС, влияющим на процесс смесеобразования – наполнению цилиндров (η), частоте вращения коленчатого вала (n), температуре (t).

Высокое наполнение цилиндров на стартерном режиме и плохое смесеобразование из-за низкой температуры и малой скорости перетекания смеси вынуждает применять повышенную подачу топлива для обеспечения паро-воздушной смеси в цилиндрах двигателя в пределах воспламеняемости. При этом большая часть поданного топлива не участвует в сгорании и может накапливаться во впускной системе в виде настенной топливной пленки, которая расходуется при последующих рабочих циклах. Другая часть топлива при очень высоких подачах просто теряется, попадая через неплотности цилиндропоршневой группы в картер двигателя и разжижая масло. При малой частоте вращения вала ДВС (стартерный режим) происходит также частичная потеря наполнения после закрытия впускного клапана вследствие утечек заряда через неплотности цилиндропоршневой группы, однако не учет этих потерь не приводит к значительным ошибкам в дозировании топлива и ими можно пренебречь. При получении первых вспышек в цилиндрах ДВС происходит быстрое увеличение частоты вращения вала двигателя, что приводит к резкому уменьшению наполнения цилиндров, что в свою очередь требует соответствующего изменения подачи топлива в цилиндры с целью удержания внутрицилиндрового состава смеси в заданных пределах. После получения первых вспышек процесс осложняется появлением переменного количества остаточных газов в цилиндрах. В процессе разгона ДВС также резко изменяются характеристики пленкообразования, влияющие на динамику передачи топлива от форсунок в цилиндры, что следует учитывать при оперативном расчете не-

обходимой подачи топлива форсунками.

Таким образом, для реализации управления топливоподачей на режиме пуска по величине наполнения цилиндра воздухом (аналогично основным режимам работы ДВС) необходимо:

а) располагать оперативной информацией по текущему цикловому наполнению отдельного цилиндра;

б) располагать оперативной априорной информацией, получаемой при предварительных экспериментах по специальной методике [6], о характеристиках топливной пленки, для учета динамической задержки в передаче топлива от форсунки в цилиндр.

В данной работе при расчетном моделировании в качестве данных по цикловому наполнению использовались показания штатного массового расходомера воздуха, полученные при реальном пуске (см. Рис.1). Таким образом, считая измерения по текущему циклу известными до совершения цикла, т.е. предполагая задачу, изложенную в п. а) решенной. Основной же задачей в данной работе являлась, как уже упоминалось ранее, отработка модели управления топливоподачей.

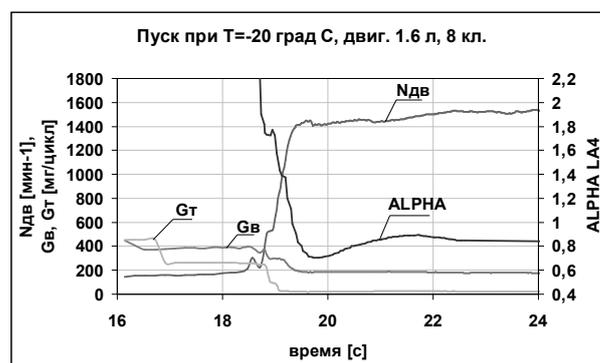


Рис.1

3. Описание модели

3.1. Модель смесеобразования

В данном исследовании была применена известная феноменологическая X-т модель процесса транспортировки топлива во впускной системе бен-

зинового двигателя [1-3], используемая как основа стратегии управления топливоподачей на неустановившихся режимах работы двигателя, включая режим холодного пуска. В основе модели лежит представление впускной системы двигателя в виде инерционного звена первого порядка по отношению к транспортировке топлива.

Основные уравнения следующие:

$$G_{cyl} = G_{inj} - dm/dt \quad (1)$$

$$dm/dt = X \times G_{inj} - m/\tau \quad (2)$$

где G_{cyl} - расход топлива, поступающего в цилиндры двигателя [г/с];

G_{inj} - расход топлива через форсунки [г/с];

m - масса топливной пленки на стенках впускного тракта [г];

X - доля топлива, оседающего на стенках в виде топливной пленки (безразмерный параметр м.м.);

τ - постоянная времени топливной пленки (параметр м.м.) [с];

t - время [с].

Более подробно описание модели и расчетно-экспериментальных методов ее идентификации приведены в [6]. Значения параметров модели X и τ были определены экспериментально и частично заимствованы из публикаций работ с аналогичными двигателями [2, 3].

Параметры модели X и τ зависят также от испаряемости применяемого топлива. В данном исследовании применялся бензин АИ-95 с показателями испаряемости на границе «зимний-летний» по ГОСТ- Р 31105-97.

Однако для режима холодного пуска, как уже указывалось ранее, необходимо учитывать временную частичную потерю топлива, по наиболее вероятной причине вследствие его утечки через неплот-

ности цилиндрично-поршневой группы в картер двигателя.

Имеются многочисленные опубликованные данные, подтверждающие данный феномен. В работе [7] предлагается эмпирическая модель, позволяющая учесть подобные потери топлива, при этом основное уравнение (2) изменяется членом, характеризующим потери топлива G_{loss} :

$$dm/dt = X \times G_{inj} - m/\tau - G_{loss} \quad (3)$$

где G_{loss} - расход теряемого топлива, который зависит от подачи топлива [г/с]:

$$G_{loss} = L \cdot X \cdot G_{inj} - G_0 \quad \text{при } L \cdot X \cdot G_{inj} > G_0 \quad (4)$$

$$\text{и } G_{loss} = 0 \quad \text{при } L \cdot X \cdot G_{inj} \leq G_0 \quad (5)$$

здесь L [-] и G_0 [г/с] - калибруемые параметры мат. модели потерь топлива.

Уравнения (1-5) представляют форму записи математической модели, пригодной для применения в непрерывных системах. Такая форма оказывается пригодной и полезной для расчета динамических процессов передачи топлива во впускной системе двигателя при достаточно высокой частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Однако при низкой частоте и быстром изменении топливоподачи, что характерно для режима пуска, такое упрощение может приводить к большим погрешностям. Более правильным является представление двигателя дискретной системой с 4-мя (по числу цилиндров) инерционными элементами, работающими параллельно с фазовым сдвигом и с индивидуальным периодом.

Дискретная форма записи основных уравнений прогноза для отдельного цилиндра следующая:

$$M_{cyl}(k) = M_{inj}(k) - [m(k) - m(k-1)] \quad (6)$$

$$m(k) - m(k-1) = X(k) \times M_{inj}(k) - m(k-1) \frac{T(k)}{\tau(k)} - M_{loss}(k) \quad (7)$$

где $M_{cyl}(k)$ - масса топлива, поступившая в цилиндр в k -ом цикле;

$M_{inj}(k)$ – масса топлива, поданного форсункой в k -ом цикле;

$M_{loss}(k)$ – масса топлива, теряемого в k -ом цикле;

$m(k), m(k-1)$ – масса топлива в настенной пленке в k -ом, $(k-1)$ цикле;

$X(k)$ – доля топлива, оседающего на стенках в виде топливной пленки (текущий параметр м.м. в k -ом цикле);

$\tau(k)$ – постоянная времени топливной пленки (текущий параметр м.м. в k -ом цикле);

$T(k)$ – длительность k -го цикла.

Длительность цикла $T(k)$ при индивидуальном поцилиндровом расчете принимается равной длительности одного такта рабочего цикла в фазе сжатия для конкретного цилиндра.

Такая дискретная модель поцилиндрового смесеобразования на основе уравнений (6, 7) была реализована в программной среде MATLAB-Simulink.

На Рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования холодного пуска двигателя, запись реальных параметров которого представлены на Рис. 1. На графике **ALPHA** (нижнее семейство кривых) характеризует подачу топлива форсунками. Верхнее семейство кривых – прогноз состава смеси внутри цилиндров согласно модели. Соответственно на графике **GTC** большая подача относится к форсункам, малая – прогноз топлива в цилиндрах согласно модели. График **m(k)** характеризует текущее состояние по накопленной топливной пленке. При данном расчетном эксперименте были использованы калибровки по топливоподаче, определенные по технологии с использованием компьютерного моделирования [4]. Калибруемые параметры модели, характеризующие потери топлива – L и G_0 подбирались в серии расчетных экспериментов до достижения удовлетворительного схождения прогнозируемого состава смеси в цилиндрах двигателя и измеренного

состава анализатором LA-4 ф. ETAS GmbH (90% сигнала за 2 мс) в процессе реального пуска (Рис. 1).

3.2. Компьютерная модель управления топливоподачей

При инверсии уравнений (1, 3) и после некоторых алгебраических преобразований получаем систему уравнений для использования при управлении топливоподачей по той же модели смесеобразования. Дискретная форма записи основных уравнений управления для отдельного цилиндра следующая:

$$M_{inj}(k) = M_{cyl}(k) + [m(k) - m(k-1)] \quad (8)$$

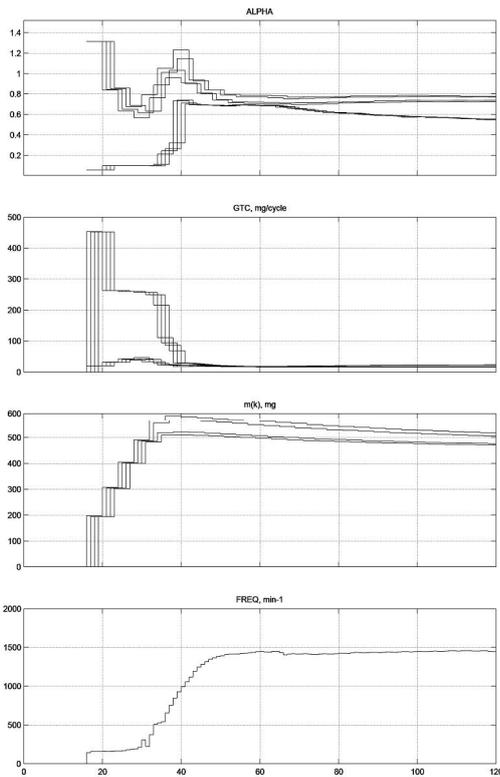
$$m(k) - m(k-1) = \frac{X(k)}{1-X(k)} M_{cyl}(k) - m(k-1) \frac{T(k)}{\tau(k)[1-X(k)]} - M_{loss}(k) \quad (9)$$

$M_{loss}(k)$ рассчитывается в соответствии с уравнениями (4, 5) с использованием текущего расчетного значения $M_{inj}(k)$.

4. Результаты экспериментальных исследований.

Как уже упоминалось ранее, модель смесеобразования, описанная в 3.1. была применена при калибровке 2-х проектов и показала свою эффективность – количество реальных пусков, необходимых для проведения цикла калибровочных работ, было сокращено в несколько раз.

При калибровочных работах была проведена частичная модернизация действующего алгоритма управления топливоподачей с целью приближения к необходимому закону, определенному при компьютерном моделировании прогнозного состава смеси в цилиндрах двигателя. Однако применявшийся алгоритм имел ряд ограничений – в частности, не учитывалось различное состояние цилиндров по количеству накапливаемой топливной пленки и цикловому наполнению цилиндров, как на стартерном режиме, так и в процессе разгона.



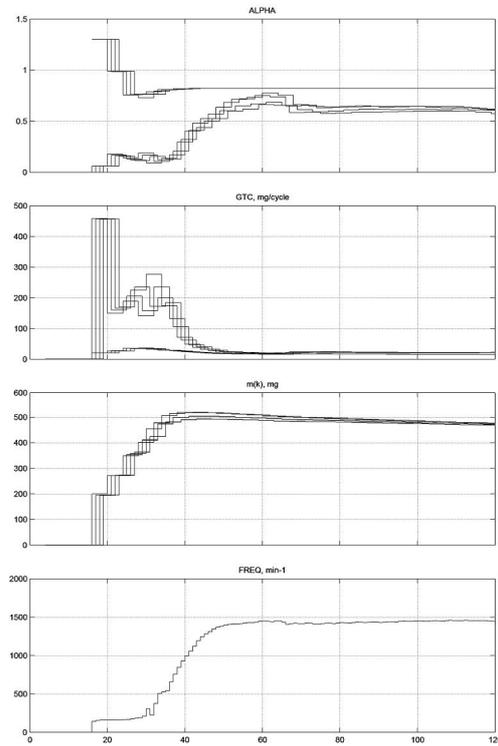
Time offset: 0

Рис. 2 Моделирование поцилиндрового прогноза состава смеси при пуске двигателя $V_h=1.6$ л, 8 кл. при температуре $t=-20^{\circ}\text{C}$

Расчетный эксперимент с использованием прогнозной модели показывает (Рис. 2), что увеличенная начальная топливоподача обеспечивает быстрое формирование топливной пленки по цилиндрам двигателя, соответствующей по массе стартерному режиму, что в свою очередь обеспечивает быстрое поступление в цилиндры двигателя смеси с необходимым для воспламенения составом.

Однако после получения первых вспышек в цилиндрах двигателя и в процессе разгона топливоподача не вполне соответствует быстро изменяющимся параметрам двигателя по наполнению и частоте вращения, что приводит к скачкообразным изменениям прогнозируемого состава смеси в цилиндрах. В данном случае состав смеси не выходит за пределы воспламеняемости и двигатель почти без

сбоев набирает обороты. Однако при этом отклонения по составу смеси в отдельных цилиндрах достигает $\Delta\lambda=0.2\div 0.3$, что при неблагоприятных условиях может приводить к сбоям рабочего процесса в отдельных цилиндрах.



Time offset: 0

Рис. 3 Моделирование поцилиндрового управления топливоподачей при пуске двигателя $V_h=1.6$ л, 8 кл. при температуре $t=-20^{\circ}\text{C}$

На Рис. 3 приведены результаты моделирования пуска двигателя с исходными данными по вышеприведенному примеру с использованием разработанного алгоритма поцилиндрового управления топливоподачей. При эксперименте задаваемый состав смеси в цилиндрах соответствовал достижению надежного воспламенения, определенного по результатам используемого для сравнения реального пуска $\lambda=0.75\div 0.82$. Расположение графиков на Рис. 3 соответствует Рис. 2. Как видно обеспечение единого состава смеси во всех цилиндрах двигателя в процессе пуска двигателя требует различных законов топливоподачи по цилиндрам с учетом предыстории и

текущего состояния по топливной пленке и параметрам двигателя – наполнению, частоте вращения, температуре.

Выводы

1. Представленная расчетно-экспериментальная модель подачи топлива показала свою работоспособность и эффективность как инструмент анализа и доводки алгоритмов при выполнении калибровочных работ по холодным пускам в текущих проектах и может быть рекомендована для дальнейшего использования в данном качестве.

2. Очевидно, что управление с индивидуальным поцилиндровым расчетом топливоподачи с учетом переменной массы топливной пленки в каждом из цилиндров позволяет существенно точнее отслеживать необходимый состав смеси внутри цилиндра с учетом быстроизменяющихся параметров работы двигателя при холодном пуске.

3. Точность работы представленного алгоритма управления топливоподачей по задаваемому составу смеси зависит от точности идентификации параметров модели и текущих измерений по наполнению цилиндров, что должно быть учтено при дальнейшем развитии данной работы.

Авторы выражают признательность и благодарят сотрудников НТЦ ОАО «АВТОВАЗ» В.А. Егорова, предоставившего экспериментальные данные для проведения расчетных исследований, а также

А.Е.Игнатенко и В.М.Тогиева, оказавших помощь при отладке компьютерной модели управления.

Список литературы:

1. Hires S.D. and Overington M.T. *Transient Mixture Strength Excursions - An Investigation of Their Causes and the Development of a Constant Mixture Strength Fueling Strategy*. SAE Pap. No 810495.
2. Shaylor P.J., Teo Y.C., Scarisbrick A. *Fuel Transport Characteristics of Spark Ignition Engines for Transient Fuel Compensation*. SAE Pap. No 950067.
3. Horie K., Takahashi H. and Akazaki S. *Emissions Reduction during Warm-Up Period by Incorporating a Wall-Wetting Fuel Model on the Fuel Injection Strategy during Engine Starting*. SAE Pap. No 952478.
4. Неяченко И.И., Ямоллов Ю.И., Егоров В.А. *Применение компьютерного моделирования в технологии калибровочных работ по холодному пуску двигателей ВАЗ // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал, -Харьков, 2' 2004, с. 16-21*.
5. Neyachenko I. *Method of A/F Control during SI Engine Cold Start*. SAE Pap. No 982521.
6. Неяченко И.И. *Метод оценки смесеобразования в бензиновых двигателях внутреннего сгорания//Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.– Харків: ХАІ, 2003.– Вип.41/6.– с.16-21*.
7. Burl J.F. *A State Model for the Air-Fuel Ratio*. Department of Electrical Engineering, Michigan Technological University, 1995.