

УДК 621.43.068.4

И.И. Неяченко, инж., В.А. Егоров, инж.

УПРАВЛЕНИЕ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА В БЕНЗИНОВОМ ДВС НА РЕЖИМЕ ПУСКА-ПРОГРЕВА

Введение

Данное исследование является продолжением цикла работ с известной феноменологической X-т моделью процесса транспортировки топлива во впускной системе бензинового двигателя. [1-4]. Основные проблемы управления при холодном пуске ДВС, как известно, вызываются образованием большого количества топливной пленки на стенках впускного тракта, что в свою очередь приводит к переменным задержкам подачи топлива в цилиндры. Разработанная модель смесеобразования и управления подачей топлива при холодном пуске двигателя на предыдущем этапе работ [4] позволила удовлетворительно описать переходные процессы при моделировании режима пуска двигателя. Использование модельного описания процесса смесеобразования позволило усовершенствовать технологию калибровочных работ и перенести часть работ по калибровке функции управления топливоподачей с натурального эксперимента на виртуальный. При этом подбор и уточнение значений калибровочных параметров алгоритма управления осуществляются при компьютерном моделировании смесеобразования с расчетом состава смеси в цилиндрах двигателя в режиме OFF-LINE, с использованием в качестве входных данных единичных измерений реального пуска. Таким образом, калибровка проводится с использованием сочетания реального и модельного экспериментов.

Однако при этом были выявлены некоторые особенности и возможности усовершенствования алгоритма.

1. Цели исследования

В данном исследовании решались задачи по уточнению модели индивидуального по цилиндрам управления подачей топлива при холодном **пуске-прогреве** бензинового двигателя с целью повышения адекватности и расширения диапазона применимости модели.

2. Формулирование проблемы

В данной работе оценка адекватности математической модели смесеобразования при холодном пуске проводилась путем сравнительного анализа экспериментальных данных анализатора состава смеси LA-4 ф. ETAS GmbH (90% сигнала за 2 мс) и модельных значений состава смеси. Калибруемые параметры модели подбирались в серии расчетных экспериментов до достижения удовлетворительного схождения прогнозируемого состава смеси в цилиндрах двигателя и измеренного состава анализатором LA-4 в процессе реального пуска.

Основные затруднения при оценке состава смеси, участвующей в сгорании при выполнении пуска двигателя, связаны с тем обстоятельством, что в первые 20-40 рабочих циклов показания анализатора LA-4 недостоверны. Кислородный датчик анализатора состава смеси располагается в выпускном коллекторе в зоне смешения отработавших газов из отдельных цилиндров и до полного вытеснения воздуха из объема коллектора отработавшими газами в процессе пуска датчик фиксирует избыточный кислород (см. рис. 1). Оценка адекватности модели в первые

рабочие циклы велась по косвенным показателям - ускорению коленчатого вала двигателя от рабочих циклов отдельных цилиндров. Таким образом, общая оценка модели считалась удовлетворительной при максимальном совпадении модельного и измеренного состава смеси в зоне достоверной работы анализатора LA-4 и при согласовании модельных значений состава смеси с поведением двигателя при разгоне в зоне недостоверной работы анализатора. Более подробно описание модели и расчетно-экспериментальных методов ее идентификации приведены в [2, 3].

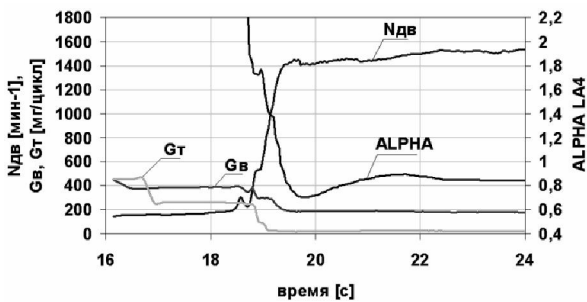


Рис. 1. Пуск двигателя $V_h = 1.6$ л, 8 кл при $t = -20$ °С

Однако разработанная модель смесеобразования в соответствии с [4] позволяла с удовлетворительной степенью соответствия воспроизводить переходные процессы по составу смеси при холодном пуске только на начальном отрезке времени 5-10 с. Попытки подобрать параметры модели для моделирования процесса пуска и последующего прогрева двигателя, повторного пуска приводили к неудовлетворительному результату. Таким образом, возникла необходимость усовершенствования модели.

3. Модернизация модели управления топливоподачей

Подробное описание моделей смесеобразования и управления подачей топлива приведены в [4].

Напомним, дискретная форма записи основных уравнений управления для отдельного цилиндра следующая:

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

$$m(k) - m(k-1) = \frac{X(k)}{1 - X(k)} M_{cyl}(k) - m(k-1) \frac{T(k)}{TAU(k)[1 - X(k)]} - M_{loss}(k) \quad (2)$$

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.

Значения параметров модели X и τ , а также параметров подмодели «потерь» топлива L и G_l [4] определяются экспериментально в процессе идентификации модели. Значения параметров модели зависят от испаряемости применяемого топлива. В данном исследовании применялся бензин АИ-95 с показателями испаряемости по нижней границе класса 4 в соответствии с ГОСТ Р 31105-97.

Основные усовершенствования модели управления (рис. 2) заключались в следующем:

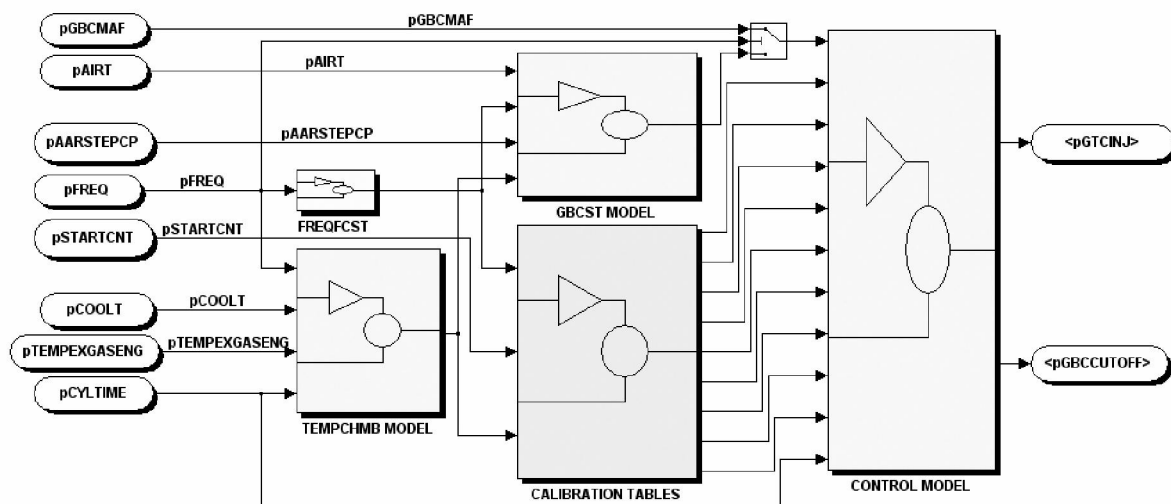


Рис. 2. Модель управления

3.1. «2-компонентная» модель топливной пленки

Представление топливной пленки в виде 2-х составляющих – «быстрой» и «медленной» со своими временными параметрами позволяет более точно описывать переходные процессы не только за счет соответствующего изменения временных параметров, но и за счет динамического перераспределения топлива между компонентами. При этом общее количество параметров модели возрастает с 4-х до 6-и:

X - доля топлива, оседающего на стенках в виде топливной пленки;

RXS - относительная доля «медленной» топливной пленки;

TAUF - постоянная времени «быстрой» топливной пленки;

TAUS - постоянная времени «медленной» топливной пленки;

L - безразмерный параметр модели потерь топлива;

G1 - параметр модели потерь топлива в размерности массового расхода.

Проведение калибровок на стационарных по частоте вращения коленчатого вала двигателя по

методу STEP-TEST [4] позволяет уйти от динамических ошибок измерения расхода воздуха. Однако увеличение числа параметров модели усложнило её идентификацию. Для облегчения процесса калибровки при проведении процедур STEP-TEST была разработана методика оптимизационного поиска в режиме OFF-LINE с использованием оптимизационных процедур и блоков Signal Constraint и DRMS из раздела Simulink Response Optimization.

3.2. Модель температуры «камеры сгорания»

Параметры модели смесеобразования в процессе пуска и прогрева двигателя изменяются в зависимости от скоростного и температурного режимов. Использование показаний штатного датчика температуры охлаждающей жидкости в головке блока цилиндров, ввиду его инерционности, не позволяет адекватно оценивать температурное состояние деталей, соприкасающихся с топливной пленкой. Для решения этого несоответствия была разработана модель температуры «камеры сгорания» - TEMPCHMB MODEL, выход которой использовался в качестве входного вектора в калибровочные таблицы пара-

метров модели смесеобразования. Модель предполагает наличие некоей обобщенной стенки камеры сгорания, не имеющей толщины, но имеющей теплоемкость. К стенке с одной стороны подводится теплота от отработавших газов, а с другой стороны отводится теплота в охлаждающую жидкость пропорционально соответствующему перепаду температур. Коэффициентами пропорциональности являются соответствующие коэффициенты теплообмена, задаваемые калибровочными таблицами в зависимости от частоты вращения и температуры охлаждающей жидкости. Калибровка модели температуры «камеры сгорания» проводилась по результатам опубликованных экспериментальных данных, полученных при пуске аналогичного двигателя [5].

3.3. Модель циклового наполнения цилиндров

Для реализации управления топливopодачей на режиме пуска по величине наполнения цилиндра воздухом (аналогично основным режимам работы ДВС) необходимо располагать оперативной информацией по текущему цикловому наполнению отдельного цилиндра. Как известно, во время резко нестационарных процессов и при низкой частоте вращения коленчатого вала, что характерно для начальных фаз холодного пуска, показания штатного расходомера анемометрического типа для прямой оценки цилиндрикового наполнения использовать нельзя. В связи с этим обстоятельством на начальных фазах пуска в зоне недостоверной работы расходомера для оценки циклового наполнения была разработана табличная модель циклового наполнения цилиндров - GBCST MODEL с входными переменными состояния двигателя - частота вращения, положение шагового регулятора воздуха на холостом

ходу (РХХ), температура воздуха и охлаждающей жидкости.

3.4. Программа «наблюдатель»

В процессе пуска двигателя при резком наборе оборотов топливная пленка (т.п.), накопленная во впускном тракте на стартерном режиме, начинает интенсивно расходоваться. В то же время для ограничения частоты вращения коленчатого вала при переходе к режиму прогрева РХХ закрывается, снижая цикловое наполнение, при этом состав смеси может резко переобогащаться. Таким образом, для поддержания заданного состава смеси в фазе разгона может возникать необходимость уменьшения топливopодачи вплоть до полного отключения. При отключении подачи топлива в режиме принудительного холостого хода поддержать заданный состав смеси можно, управляя цикловым наполнением.

Для решения перечисленных задач программа управления составом смеси при пуске - CONTROL MODEL была дополнена *программой-наблюдателем* – программа, которая ранее применялась как модель смесеобразования или модель прогноза состава смеси в цилиндрах двигателя. При входе в режим отключения подачи топлива *программа-наблюдатель* рассчитывает изменение текущей массы т.п. по цилиндрам и при возобновлении счета *программой-контроллером* передает обновленные значения массы т.п. в *программу-контроллер*. Применение в алгоритме управления *программы-наблюдатель* позволяет также рассчитать в режиме отключения подачи топлива форсунками цикловую массу топлива, попадающего в цилиндры из топливной пленки, и соответственно рассчитать необходимую подачу воздуха rGBCCUTOFF для поддержания заданного состава смеси. Далее, используя модель циклового наполнения GBCST, задается управление на регулятор холо-

стого хода (или на электропривод дроссельной заслонки).

Дополнительным преимуществом введения программы-наблюдатель является возможность использования результатов расчета прогноза состава смеси в цилиндрах двигателя для адаптивной настройки управления топливоподачей по качеству топлива и другим факторам, влияющим на образование топливной пленки.

4. Результаты экспериментальных исследований

В результате проведенных модернизаций алгоритма и серии калибровочных расчетных экспериментов удалось подобрать и откалибровать таблицы и добиться практически полного совпадения протекания измеренного и моделируемого состава смеси на выходе из цилиндров в процессе холодного пуска, последующего прогрева и повторного пуска-прогрева без ограничений по времени.

На Фиг. 3 представлены результаты компьютерного моделирования прогноза состава смеси при пуске двигателя. 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 **FILM** характеризует текущее состояние по накопленной топливной пленке.

Модельные и измеренные значения состава смеси совпадают, начиная с 20-30-го такта от включения стартера (рис. 3), очевидно, когда отработавшие газы полностью вытесняют воздух, находившийся в выпускном трубопроводе до пуска.

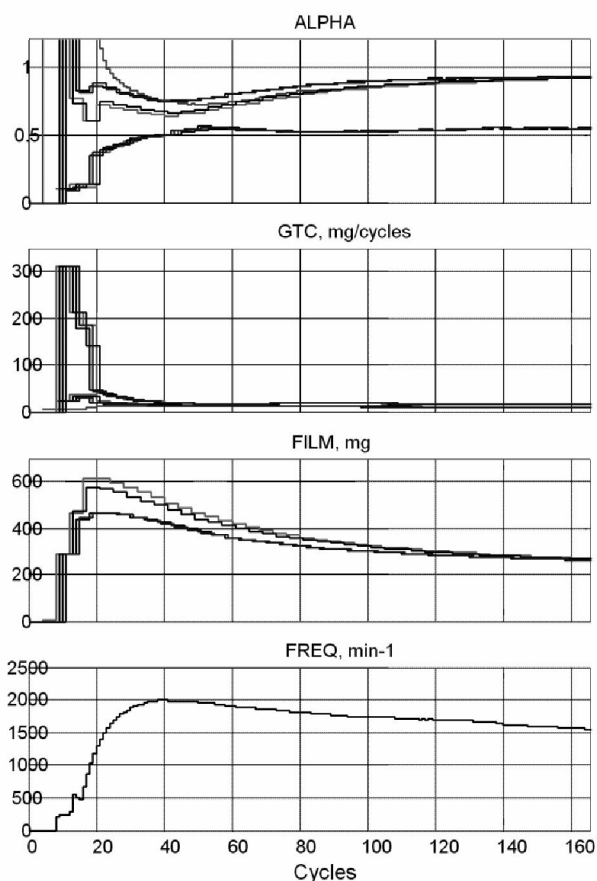


Рис. 3. Моделирование поцилиндрового прогноза состава смеси при пуске двигателя $V_h = 1.6$ л, 4 ц., 16 кл. при температуре $t = -7^\circ\text{C}$

Прогнозируемый состав смеси согласно модели в течение первых 20-ти тактов показывает, что проблемы с дозированием топлива при пуске заключаются в необходимости удержания состава смеси при разгоне в пределах воспламеняемости, что с действующим алгоритмом не всегда удается.

Моделирование управления при холодном пуске по предлагаемому алгоритму (рис. 4) показывает, что для удержания единого состава смеси по цилиндрам необходимо рассчитывать подачу топлива индивидуально для каждого цилиндра с учетом текущего состояния по топливной пленке для каждого цилиндра, сформированной в соответствии с изменяющимися режимными параметрами работы двигателя.

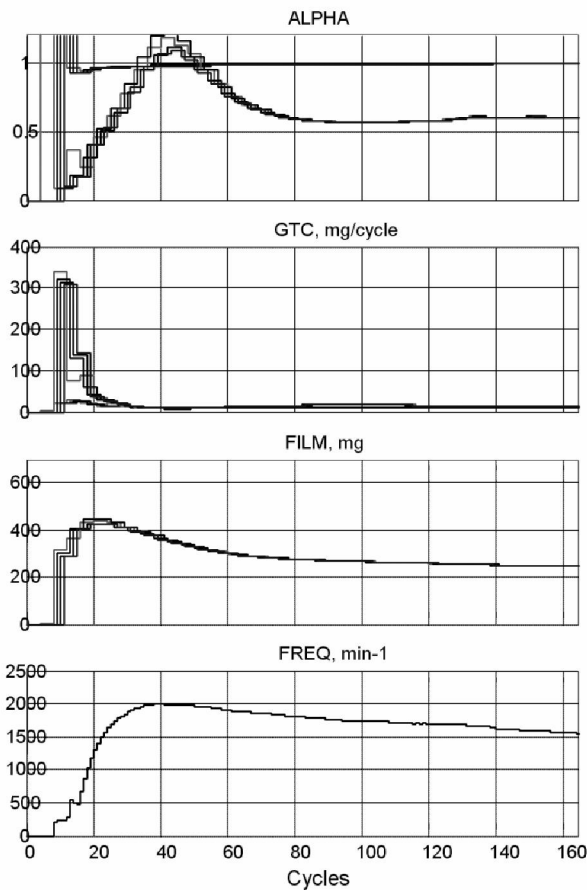


Рис. 4. Моделирование поцилиндрового управления топливоподачей при пуске двигателя $V_h=1.6$ л, 4 ц., 16 кл. при температуре $t=-7^{\circ}\text{C}$.

Заключение

1. Разработанный метод управления подачей топлива имеет следующие преимущества:

- более точное дозирование топлива с учетом индивидуальной динамики отдельных цилиндров
- управление составом смеси в режиме выключения подачи топлива

- автоматизация, сокращение объемов и сроков калибровочных работ
- возможность использования для анализа при калибровочных работах с любыми алгоритмами с целью их совершенствования

2. Развитие метода управления подачей топлива необходимо вести в направлении создания алгоритма адаптивной самонастройки в процессе эксплуатации

Список литературы:

1. Neyachenko I. Method of A/F Control during SI Engine Cold Start. SAE Pap. No 982521.
2. 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.
3. 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.
4. Неяченко И.И., Ямоллов Ю.И. Моделирование индивидуального по цилиндрам управления подачей топлива в бензиновом двигателе при холодном пуске. // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал, - Харьков, 1' 2006, с. 133-138.
5. Russ S., Stevens J., Aquino C., Curtis E. and Fry J. The Effects of Targeting and Fuel Volatility on Fuel Dynamics in a PFI Engine During Warm-Up: Part 1 – Experimental Results. SAE Pap. No 982518.