УДК 621.43.068.4

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

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ КАЛИБРОВОЧНЫХ РАБОТ ПО ХОЛОДНОМУ ПУСКУ ДВИГАТЕЛЕЙ ВАЗ

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. Однако прогресс во многом достигается за счет применения все более сложных алгоритмов управления, что в свою очередь значительно увеличивает трудоемкость и сроки калибровочных работ. Наибольшие затруднения вызывает оптимизация управления ДВС на неустановившихся режимах, в частности на режимах холодного пуска и прогрева. Ситуация при пуске дополнительно осложняется рядом обстоятельств:

- 1) в процессе пуска для компенсации плохой испаряемости бензина состав подаваемой смеси изменяется на порядок, что сопровождается обильным образованием топливной пленки во впускной системе и цилиндрах двигателя, которая в свою очередь приводит к переменным задержкам подачи топлива в цилиндры и как следствие к затруднениям анализа результатов эксперимента при калибровочных работах;
- 2) на начальных фазах пуска (работа стартера и разгон) датчики, характеризующие текущее состояние двигателя (расход воздуха, состав смеси) не обеспечивают получение достоверных данных и не

могут быть использованы ни для анализа эксперимента, ни тем более для оперативного управления;

- 3) ввиду наличия большого количества случайных внешних возмущений режим холодного пуска отличается невысокой воспроизводимостью результатов, что вынуждает проводить большое количество повторных экспериментов;
- 4) необходимость длительного кондиционирования объекта испытаний при заданной низкой температуре значительно увеличивает трудоемкость и стоимость калибровочных работ.

Облегчить решение вышеперечисленных проблем возможно за счет применения компьютерного моделирования процесса передачи топлива от форсунок в цилиндры двигателя – процесса, вносящего основные затруднения при калибровочных работах по холодному пуску двигателя.

Цель исследования

Целью данной работы являлось оценка возможности использования известной X-т модели процесса транспортировки топлива во впускной системе бензинового двигателя для прогнозирования поведения двигателя при холодном пуске на основе экспериментальных данных реального пуска, а также создания компьютерной модели в программной оболочке Matlab-Simulink для использования в качестве инструмента анализа экспериментальных данных при проведении калибровочных работ.

Формулирование проблемы

Традиционная технология калибровочных работ по холодному пуску ДВС предполагает выполнение серии испытаний при различных температурах с последовательным приближением к заданным критериям качества пуска. В настоящее время критери-

ем для двигателей ВАЗ является достижение надежного пуска двигателя за одну попытку продолжительностью не более 10 с при температурах пуска до -27°C. Более быстрый пуск оценивается при прочих равных показателях (частота вращения коленчатого вала после пуска, способность к принятию нагрузки, содержание токсических компонентов в отработавших газах) как более качественный. Одним из основных инструментов, по показаниям которого инженер-калибровщик проводит оценку оптимальности настроек топливоподачи, является быстродействующий анализатор состава смеси (λ-анализатор). В данной работе применялся анализатор LA-4 ф. ETAS GmbH (постоянная времени 2 мс). Такой анализатор имеет широкополосный кислородный датчик (λзонд), располагаемый в выпускной системе двигателя. На основании показаний λ-зонда после получения стабильного процесса сгорания в цилиндрах двигателя регистрируется текущий состав смеси. Ввиду отсутствия сгорания при первых поступлениях топлива в цилиндры, а также вследствие смешивания газов в выпускной системе в первые несколько циклов после получения сгорания, достоверные показания λ-анализатора появляются к моменту, когда пуск двигателя практически состоялся (см. рис. 1). В таких условиях инженер-калибровщик вынужден ориентироваться при подборе топливоподачи главным образом на скорость и ускорение коленчатого вала двигателя. Показания λ-анализатора принимаются с учетом упомянутых искажений и задержек. Таким образом, действия инженера-калибровщика в большой степени неопределенны и приводят к необходимости проведения большого количества повторных экспериментов.

Для облегчения калибровочных работ предлагается применение компьютерного моделирования процесса передачи топлива от форсунок в цилиндры двигателя.

Описание модели

В данной исследовании была применена из-

вестная феноменологическая X- τ модель процесса транспортировки топлива во впускной системе бензинового двигателя [1-4], 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.

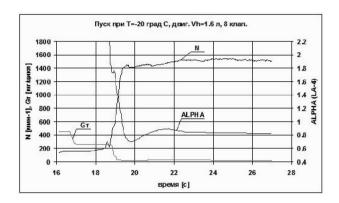


Рис. 1. Показания λ-анализатора

Основные уравнения следующие:

$$Gcyl = Gmet - dm / dt \tag{1}$$

$$dm / dt = X \times Gmet - m / \tau \tag{2}$$

где G_{cyl} – расход топлива, поступающего в цилиндры двигателя;

 G_{met} — расход топлива, подаваемого топливодозирующим устройством;

m — масса топливной пленки на стенках впускного тракта;

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

 τ – постоянная времени топливной пленки (параметр м.м.);

t – время.

Более подробно описание модели и расчетноэкспериментальных методов ее идентификации приведены в (5). На рис. 2, 3 приведены параметры модели X и τ , характерные для двигателей ВАЗ, оснащенных электронной системой впрыска топлива во впускной канал. Значения параметров были определены экспериментально и частично заимствованы из публикаций работ с аналогичными двигателями [2, 3].

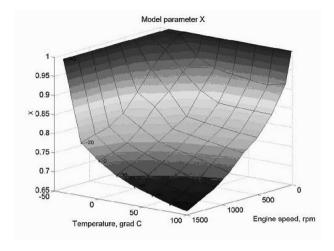


Рис. 2. Параметры модели Х

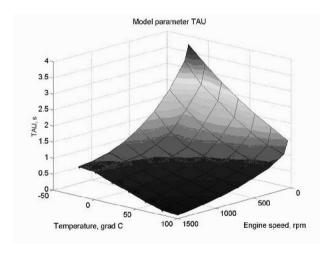


Рис. 3. Параметры модели т

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-P51105-97.

Компьютерная модель

Уравнения (1), (2) представляют форму записи математической модели, пригодной для компьютерного моделирования в непрерывных системах и предполагает рассмотрение двигателя как единого

инерционного звена первого порядка. Такая форма оказывается пригодной и полезной для анализа динамических процессов передачи топлива во впускной системе двигателя при наличии экспериментальных данных во временной шкале и 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 уравнений (1), (2) для отдельного цилиндра следующая:

$$Mcyl(k) = Minj(k) - [m(k) - m(k-1)]$$
(3)

$$m(k) - m(k-1) = X \times Minj(k) - m(k-1)\frac{T(k)}{\tau}$$
 (4)

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

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

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

T(k) — длительность k-го цикла.

Длительность цикла при индивидуальном поцилиндровом расчете принимается равной длительности 4-х тактов рабочего цикла (т.е. длительности 2-х оборотов коленчатого вала) для конкретного цилиндра.

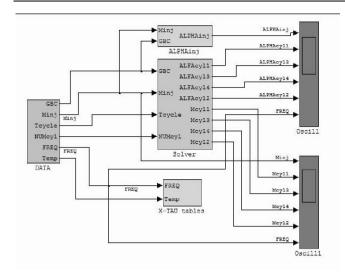


Рис.4. Модель поцилиндрового прогноза состава смеси

Такая дискретная модель поцилиндрового смесеобразования на основе уравнений (3), (4) была реализована в программной среде Matlab-Simulink. На Рис. 4 представлена структурная схема разработанной модели. При помощи блока "DATA" из рабочей области Matlab в качестве исходных данных для моделирования загружаются предварительно сохраненные экспериментальные данные реального пуска двигателя. Блок "Solver" обеспечивает разделение исходных данных по цилиндрам и решение разностных уравнений (3), (4) с определением массы топлива, поступающей в каждый из цилиндров, и расчетом состава смеси. Блок "X-TAU tables" обеспечивает введение в расчет переменных значений параметров модели Х и т, задаваемых калибровочными таблицами как показано на рис. 2, 3. Блок "ALPHAinj" рассчитывает состав смеси, подаваемой форсунками, и выводит данные на осциллоскоп для сравнительного анапиза

Результаты экспериментальных исследований

В процессе проведения экспериментальных исследований была определена новая технология ка-

либровочных работ по холодному пуску двигателей:

- 1) как уже упоминалось ранее, прежде всего, проводится серия экспериментов со ступенчатым изменением толивоподачи и регистрацией динамической реакции двигателя по λ-анализатору при постоянных частотах вращения коленчатого вала для определения параметров математической модели Х и т [5]. Такие эксперименты позволяют характеризовать динамические свойства по каналу топливоподачи целого семейства двигателей, имеющих одинаковые системы питания, например 8-и или 16-и клапанные головки блока цилиндров. Таким образом, набрав базу данных по параметрам математической модели для разных типов впускных систем, различных свойств применяемых бензинов и пусковых температур, в дальнейшем возможно использовать данную базу для аналогичных моделей двигателей априори;
- на реальных пусках двигателя в качестве первого приближения определяется начальная подача топлива, обеспечивающая получение вспышек в цилиндрах двигателя;
- 3) полученные экспериментальные ланные «прогоняются» через компьютерную модель с целью определения расчетного уровня по составу смеси в цилиндрах двигателя, соответствующего достижению первых вспышек в цилиндрах. Затем, в процессе компьютерного моделирования, изменяя в исходных данных подачу топлива, добиваются достижения за минимальное количество циклов определенного выше расчетного состава смеси в цилиндрах. Причем, первая подача топлива подбирается таким образом, чтобы расчетный состав смеси был близок к необходимому, но заведомо «беднее». Для предотвращения излишнего обогащения вторая и последующие подачи топлива меньше первой в несколько раз. После достижения расчетного состава смеси в цилиндрах, необходимого для получения первых вспышек, и возрастания оборотов двигателя подача топлива рез-

ко уменьшается для достижения по возможности состава смеси, соответствующего устойчивому горению, т.е. $\lambda=0.75\div0.85$, и последующему обеднению до $\lambda=0.85\div0.95$. Вследствие того обстоятельства, что не все топливо, попавшее в цилиндры двигателя, участвует в процессе горения, необходимый расчетный состав смеси должен быть несколько богаче указанных величин;

4) подобранные подачи при компьютерном моделировании реализуются при помощи имеющихся в распоряжении инженера управляющих алгоритмов и проверяются при реальных пусках двигателя. При необходимости проводится вторая серия расчетных экспериментов с уточненными экспериментальными данными.

Описанная технология была апробирована при калибровке 2-х проектов и показала свою эффективность — количество реальных пусков, необходимых для проведения цикла калибровочных работ, было сокращено в несколько раз.

На рис. 1 приведена запись пуска двигателя после цикла калибровочных работ по вышеприведенной технологии, результаты компьютерного моделирования которого приведены на рис. 5, 6. В данном случае подача топлива была оставлена несколько повышенной для компенсации возможных отклонений качества бензина в эксплуатации. Применявшийся в данных экспериментах алгоритм управления топливоподачей на пуске не обеспечивал индивидуального учета по цилиндрам двигателя накапливающейся топливной пленки и как следствие при разгоне двигателя после получения первых вспышек (18 -20 циклы) некоторые цилиндры были переобогащены, что привело к задержке набора оборотов.

Заключение

1. Представленная методика расчетноэкспериментального прогнозирования поступления топлива в цилиндры двигателя во время холодного пуска показала свою работоспособность и эффективность при выполнении калибровочных работ по текущим проектам и может быть рекомендована для дальнейшего использования.

2. Очевидно, что управление с индивидуальным поцилиндровым расчетом топливоподачи с учетом переменной массы топливной пленки в каждом из цилиндров позволит более точно отслеживать необходимый состав смеси внутри цилиндра, что и будет являться целью продолжения данной работы.

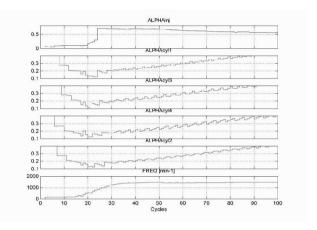


Рис. 5. Моделирование состава смеси в цилиндрах при пуске ($t = -20 \, \text{°C}$)

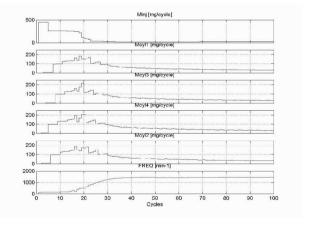


Рис. 6. Моделирование поступления топлива в цилиндры при пуске ($t = -20^{\circ}$)

Список литературы:

1. Hires S.D., 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. Horie K., Takahasi H., 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. 3. Shayler P.J., Teo Y.C., Scarisbrick A. Fuel Transport Characteristics of Spark Ignition Engines for Transient Fuel Compensa-

tion // SAE Pap. No 950067. 4. Neyachenko I. Method of A/F Control during SI Engine Cold Start // SAE Pap. No 982521. 5. Неяченко И.И. Метод оценки смесеобразования в бензиновых двигателях внутреннего сгорания // Авіаційно-космічна техніка і технологія: 36. наук. праць. — Харків: ХАІ, 2003. — Вип. 41/6. — С.16—21.

УДК 662.997

Н.А. Крестлинг, канд. техн. наук, В.В. Попов, инж.

ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ НА СУДАХ

Использование тепловых насосов на судах флота

Более эффективное и полное использование вторичных энергоресурсов (ВЭР) на судах морского флота возможно с помощью теплонасосных установок (ТНУ) повышающих потенциал теплоносителя. В данном случае повышение температуры теплоносителя происходит за счёт охлаждения низкотемпературных энергоносителей или источников теплоты. При этом происходит перенос теплоты от тела с более низкой температурой к телу с более высокой температурой в обратных круговых процессах.

В этом плане (ТНУ) аналогичны холодильным машинам, но отличаются от них целевым назначением, а циклы этих установок отличаются положением интервала температур. В частности, холодильные машины позволяют получить искусственное охлаждение, тепловые насосы - нагрев.

Принципиальная целесообразность применения ТНУ для теплоснабжения на судах наглядно видна при сравнительном рассмотрении на T- s диаграмме процессов теплоснабжения острым паром и при помощи ТНУ (рис. 1).

Рассматривая процесс передачи теплоты тепловоспринимающей среде (теплоприемника) как обратимый, количество теплоты, воспринятой им, изобразим площадью 4 - 5 - 5' - 3' - 4, равной по величине площади 1 - 4 - 3' - 1' - 1.

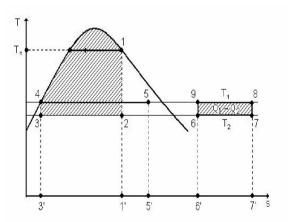


Рис. 1. Диаграмма процесса теплоснабжения острым паром при помощи THУ

Допустим, что при теплоснабжении ТНУ, использующим низкотемпературный источник теплоты с температурой T_2 , двигатель, использующий острый пар и приводящий в движение тепловой насос, работает по циклу, выраженному площадью 1-2-3-4-1. Работа идеального ТНУ выражается