

## ИСПЫТАНИЯ В ЧАСТИ ОТЛАДКИ РЕЖИМОВ ПУСКА ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ МОБИЛЬНОГО (БОРТОВОГО) ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

Папкин Б.А.<sup>1</sup>, Сонкин В.И.<sup>2</sup>, Назаров В.Е.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38), e-mail: borispapkin@yandex.ru.

<sup>2</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»), (125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2), e-mail: val.sonkin2010@yandex.ru.

<sup>3</sup> ЗАО «Межрегиональное производственное объединение технического комплектования «Технокомплект» (ЗАО «МПОТК «Технокомплект»), (141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Школьная д. 10А), e-mail: nazarov@techno-com.ru.

---

С ужесточением экологических стандартов все большая часть общих выбросов углеводородов (до 70-90%) по процедуре ездового цикла выбрасывается в течение холодного пуска и прогрева двигателя. Выбросы углеводородов (СН) из автомобиля в течение холодного пуска являются высокими, поскольку катализатор не достиг еще своей рабочей температуры (приблизительно 300 °С) для эффективного окисления СН. В статье приведен анализ режимов холодного пуска и прогрева бензинового двигателя мобильного зарядного устройства (МЗУ) и результаты экспериментальных работ по улучшению пусковых качеств модифицированного двигателя ВАЗ 21126, полномасштабного макета генераторной установки МЗУ. Выбранные калибровки позволили почти вдвое снизить выбросы СН на режиме холодного пуска, в том числе за счет быстрого прогрева и включения нейтрализатора в работу, снижения выбросов СН из двигателя.

Ключевые слова: мобильное зарядное устройство, бензиновый двигатель, холодный пуск, прогрев, каталитический нейтрализатор, вредные выбросы.

## TESTS REGARDING DEBUGGING START-UP MODES OF MOBILE (ONBOARD) CHARGER FOR ELECTRIC CITY TRANSPORT

Papkin B.A.<sup>1</sup>, Sonkin V.I.<sup>2</sup>, Nazarov V.E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow state university of mechanical engineering (MAMI)" (107023, Moscow, st. Bolshaya Semenovskaya, 38), e-mail: borispapkin@yandex.ru.

<sup>2</sup> Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile and Engine Institute» (FSUE NAMI) (125438, Moscow, Automotornaya street 2) e-mail: val.sonkin2010@yandex.ru.

<sup>3</sup> «TECHNOCOMPLEKT» Technical Supply Interregional Trade Association, (141980, Dubna, Moscow region, Shkolnaya st. 10A), e-mail: nazarov@techno-com.ru.

---

With the toughening of the emissions standard, a larger fraction of the total hydrocarbon emissions (up to 70-90%) from the driving cycle procedure is emitted during the cold start and warm up of the engine. Tailpipe hydrocarbon (HC) emissions during the cold start are high because the catalyst is not at its light-off temperature (about 300°C) to efficiently oxidize the HC. In this paper presented analysis cold-start and warm-up a spark ignition engine of range extender (MZU) and test results modified engine VAZ 21126 of MZU model with objective improvement startability. Selected calibration permit to half cold-start HC emissions due to rapid light-off exhaust catalyst and lower engine-out HC emissions.

Keywords: Range extender, gasoline engine, cold-start, warm-up, catalyst, emissions.

### Введение

Городской общественный транспорт с электрической энергоустановкой является реальной альтернативой обычному транспорту с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Он значительно уменьшает вредные выбросы, в том числе CO<sub>2</sub> и расхода топлива. Однако ограниченная емкость бортового накопителя энергии заметно снижает запас хода электромобиля. Перспективным решением этой проблемы является применение мобильного

зарядного устройства (МЗУ), которое представляет собой бортовой генератор, приводимый небольшим бензиновым ДВС, работающим периодически только тогда, когда уровень заряда накопителя снижается до заданного уровня. В этой связи особое внимание должно быть уделено пусковым качествам и прогреву холодного двигателя генераторной установки, от которых существенно зависят экологические характеристики бортовой генераторной установки и МЗУ в целом.

В статье рассмотрены особенности режимов пуска и прогрева бензинового ДВС, приведены методика и результаты испытаний полномасштабного макета генераторной установки (макета ГУ) МЗУ, созданного на базе модифицированного двигателя ВАЗ 21126 и электрогенератора с постоянными магнитами, по отладке этих режимов и проверке надежности пуска.

### **Особенности пуска и прогрева двигателя**

Поведение бензинового ДВС при пуске зависит от его теплового состояния после последней остановки и стратегии пуска, которые оказывают существенное влияние на вредные выбросы автомобиля. Важными факторами являются температура катализатора, влияющая на эффективность конверсии вредных веществ, и температура двигателя (охлаждающей жидкости), которая влияет на процесс испарения топлива [2]. На рисунке 1 показано изменение температуры катализатора и охлаждающей жидкости после остановки двигателя. В выключенном на короткий период времени двигателе (~30 минут) катализатор остается эффективным, а двигатель - достаточно горячим для быстрого без проблем повторного пуска и эффективной работы катализатора.

При более длительной остановке двигателя возникают экологические проблемы. От пуска и прогрева холодного двигателя и катализатора существенно зависят выбросы вредных веществ с отработавшими газами (ОГ), особенно СН. Доля СН на режимах пуска-прогрева составляет 70-90% всех выбросов углеводородов по ездовому циклу. Чем более жесткими являются экологические нормы, тем выше становится этот процент [4]. Это связано с тем, что при холодном пуске (при температуре 20-30 °С) катализатор остается не активным до тех пор, пока не прогреется до температуры порядка 300 °С, и поэтому почти все вредные выбросы двигателя попадают в выпускную трубу.

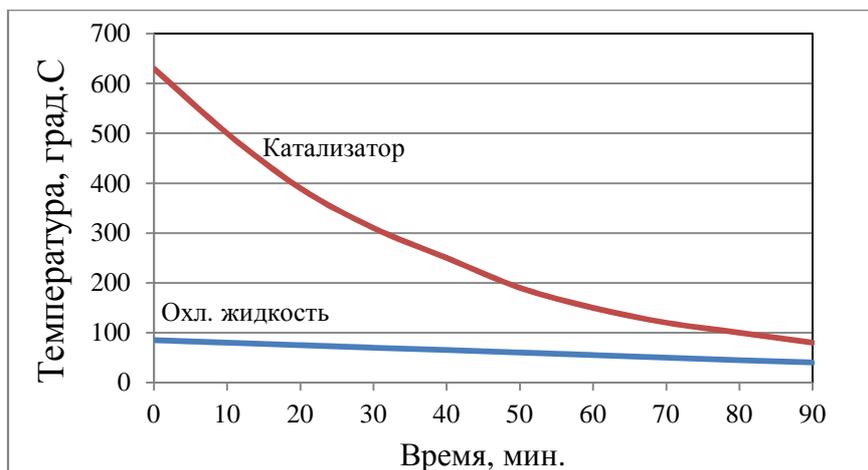


Рисунок 1 – Изменение температуры катализатора и охлаждающей жидкости после остановки бензинового двигателя: моторный стенд

Кроме того, чтобы обеспечить надежный, быстрый пуск обычного автомобильного ДВС, приходится в первом цикле впрыскивать большое количество топлива (почти в 5 раз превосходящее количество, требуемое для подготовки стехиометрической смеси). Это связано с неблагоприятными условиями для испарения - низкой температурой и атмосферным давлением во впускной системе.

При пуске затруднен точный контроль двигателя [1] из-за неопределенности его состояния (количества топлива, оставшегося в двигателе после предыдущей остановки, положения поршня, свойств бензина), что также влияет на уровень вредных выбросов с ОГ. К тому же низкая температура двигателя неблагоприятна для подготовки горючей смеси.

Современные технологии снижения вредных выбросов при холодном пуске включают разработку быстро включаемых и/или накапливающих СН катализаторов, стратегий работы двигателя, которые обеспечивают быстрое включение катализатора в работу, и средства, понижающие вредные выбросы из двигателя в процессе пуска [5]. Предлагавшиеся ранее сложные устройства прогрева катализатора, такие как электрически нагреваемые блоки, горелки в выпускной системе и др., не находят широкого применения из-за дополнительной цены и сложности этих систем. Исключение составляют системы подачи дополнительного воздуха на выпуск [6]. Более быстрое включение катализатора достигается размещением его по возможности ближе к двигателю для минимизации тепловых потерь ОГ и за счет оптимизации калибровок холодного пуска.

Исследования [7] показывают, что для снижения выбросов СН и СО до уровня современных норм прогрев катализатора до температуры включения его в работу необходимо завершить в течение первых 20-25 с после холодного пуска. Фактором, определяющим время включения катализатора, является поток тепла от ДВС к катализатору. Для быстрого прогрева катализатора сегодня применяют две основные стратегии. Первая –

бедный пуск. Она обычно требует небольшого обеднения смеси в сочетании со значительной задержкой зажигания. Вторая стратегия – богатый пуск. Быстрый прогрев достигается работой двигателя на экстремально богатой смеси с подачей воздуха в выпускные каналы воздушным насосом. В настоящей работе исследовалась первая стратегия.

### **Объект испытаний**

Объектом пусковых испытаний являлся полномасштабный макет генераторной установки МЗУ в составе: синхронного электрического генератора с постоянными магнитами и модифицированного бензинового двигателя ВАЗ-21126 рабочим объемом 1,6 л, отличавшегося от серийного двигателя в основном применением турбокомпрессора с регулируемым сопловым аппаратом, системы внешней рециркуляции ОГ (РОГ), конструкцией впускного и выпускного трубопроводов. В соответствии с концепцией МЗУ [3] турбокомпрессор и система РОГ используются для реализации высокоэкономичного процесса быстрого сгорания гомогенной разбавленной смеси с управляемым самовоспламенением. На режимах пуска и прогрева эти системы не работают. Фотография полномасштабного макета генераторной установки МЗУ показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Полномасштабный макет генераторной установки МЗУ

В двигателе МЗУ для быстрого прогрева холодного катализатора отработывалась стратегия бедного пуска с использованием: повышенной частоты вращения холостого хода ( $2000 \text{ мин}^{-1}$ ); обедненного состава смеси; и агрессивной задержки момента зажигания.

Увеличение частоты вращения холодного холостого хода позволяет увеличить как температуру ОГ, так и их расход, обеспечивая больший подвод тепла к катализатору и более быстрый его прогрев.

Небольшое обеднение состава смеси (до  $\alpha = 1,03-1,07$ ) обеспечивает избыток кислорода, необходимый для окисления СН и СО в ОГ. Это позволяет уменьшить их выбросы в течение части ездового цикла с пассивным (не включенным) катализатором. Кроме того, небольшое обеднение понижает на  $70-80 \text{ }^\circ\text{C}$  температуру, при которой

катализатор становится активным [8]. Это обусловлено избытком кислорода, а также увеличением доли реактивных низкомолекулярных олефинов в ОГ.

Задержка момента зажигания ведет к увеличению температуры ОГ, а также к увеличению массового расхода ОГ, обусловленному снижением термического КПД двигателя. Задержка зажигания резко увеличивает скорость прогрева катализатора, а также увеличивает окисление СН. При очень большой задержке сгорание может не завершиться к моменту открытия выпускного клапана. В этом случае реакции с выделением тепла продолжают в выпускной системе, увеличивая температуру ОГ. Следует отметить, что слишком большая задержка ведет к росту цикловых флуктуаций среднего индикаторного давления, вызывая нестабильную работу двигателя. Увеличение нестабильной работы двигателя является критическим фактором при определении задержки зажигания.

Эффективность указанной стратегии зависит от особенностей конструкции двигателя и требует для своей реализации выбора соответствующих калибровок по подаче топлива, воздуха и зажиганию. Для определения этих калибровок были проведены испытания макета ГУ МЗУ.

### **Программа и методика испытаний**

Программа пусковых испытаний макета ГУ МЗУ предусматривала два вида испытаний: 1) регулировочные испытания по выбору пусковых калибровок модифицированного двигателя ВАЗ 21126, обеспечивающих низкие выбросы СН и короткое время включения нейтрализатора в работу; 2) проверку пусковых качеств макета ГУ методами ГОСТ 26658 – 85, пункт 2.1.25 на режимах холодного и горячего пуска.

Пусковые испытания макета ГУ проведены на электрическом испытательном стенде с нагрузочным модулем НМ-50-К1 мощностью 50 кВт и номинальным напряжением 380/400 В, оборудованном приборами для измерения частоты вращения двигателя, температур охлаждающей жидкости и отработавших газов, коэффициента избытка воздуха, момента зажигания, концентрации углеводородов в ОГ и продолжительности нагрева ОГ в зоне установки трехкомпонентного каталитического нейтрализатора до заданной температуры.

Для обеспечения работы электрического генератора макета ГУ в стартерном режиме испытательный стенд был дополнительно оборудован комплектом аккумуляторных батарей, а также инвертором и контроллером для управления электрогенератором.

При испытаниях на режиме холодного пуска температура охлаждающей жидкости в двигателе и электрогенераторе поддерживалась на уровне  $25 \pm 5$  °С. При испытаниях на режиме горячего пуска температура охлаждающей жидкости двигателя составляла  $70 \pm 5$  °С, а охлаждающей жидкости генератора -  $55 \pm 5$  °С. Время прогрева холодного нейтрализатора оценивалось по продолжительности повышения температуры ОГ двигателя до 400 °С в зоне

установки нейтрализатора. Это время эквивалентно продолжительности включения нейтрализатора в работу с коэффициентом конверсии СН 50% [8].

Холодный и горячий пуск двигателя осуществлялся с помощью работающего в стартерном режиме электрического генератора установки. Для определения калибровок топливоподдачи и зажигания предусматривалась следующая процедура регулировочных испытаний.

1. Двигатель прокручивается до частоты вращения  $\sim 1700 \text{ мин}^{-1}$  с включенным электронным блоком управления, но без подачи топлива и зажигания, с частично открытым дросселем в течение 1-3 с. Это позволяет настроить блок управления на синхронизацию впрыска топлива с движением кулачка и поршня для последующего устранения избыточного обогащения, неэффективного одновременного впрыска топлива во все цилиндры и точного контроля сгорания за счет фазированного впрыска с первого рабочего цикла. Кроме того, прокручивание двигателя снижает расход топлива и выбросы СН на раскрутку двигателя до пусковых оборотов.

2. Включается подача топлива и зажигание с предварительно выбранными калибровками при фиксированной частоте вращения макета ГУ  $2000 \text{ мин}^{-1}$ . Сразу после запуска двигателя электрогенератор выключается.

3. На этом режиме выполняются замеры частоты вращения, момента зажигания, коэффициента избытка воздуха, концентрации СН в отработавших газах и времени прогрева отработавших газов в зоне предполагаемой установки нейтрализатора до температуры  $400 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Двигатель генераторной установки останавливается. Для сокращения продолжительности испытаний двигатель и нейтрализатор принудительно охлаждаются до температуры  $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , производится изменение калибровок подачи топлива и момента зажигания и проведение испытаний по п.п. 1-3. Процедура по п. 4. продолжается до тех пор, пока не будут определены оптимальные калибровки двигателя на режиме холодного пуска, обеспечивающие минимальные выбросы из двигателя СН и быстрое повышение температуры ОГ до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  в зоне установки нейтрализатора.

Определение калибровок горячего пуска двигателя генераторной установки осуществлялось по аналогичной процедуре за некоторым исключением. В отличие от испытаний по отладке режимов холодного пуска, двигатель предварительно прогревался, а время прогрева и температура отработавших газов в выпускной системе в зоне предполагаемой установки нейтрализатора не определялись.

Испытания методами ГОСТ 26658 – 85 (пункт 2.1.25) по проверке пусковых качеств холодного и горячего двигателя генераторной установки с выбранными пусковыми

калибровками по топливоподаче и зажиганию производятся путем включения пускового устройства генераторной установки МЗУ. Пуск считается осуществленным, если двигатель макета ГУ устойчиво работает не менее 2 минут.

### **Результаты испытаний**

Проведенные испытания позволили определить пусковые калибровки модифицированного двигателя ВАЗ 21126, входящего в состав макета ГУ МЗУ, отладить работу макета ГУ на режимах холодного и горячего пуска и подтвердили удовлетворительные пусковые качества макета ГУ при испытаниях методами ГОСТ 26658 – 85.

Надежный холодный пуск двигателя генераторной установки при окружающей температуре и температуре двигателя 20-25 °С обеспечивают: коэффициент избытка воздуха - 1,04; момент зажигания – 5 град. после ВМТ; частота вращения - 2000 мин<sup>-1</sup>. Кроме того, эти калибровки минимизируют выбросы СН с ОГ при холодном пуске и позволяют быстро прогреть (за 19 секунд) трехкомпонентный каталитический нейтрализатор

Надежный горячий пуск двигателя генераторной установки при окружающей температуре 20-25°С и температуре двигателя 70-75°С обеспечивают: коэффициент избытка воздуха - 1,00; момент зажигания – 29 град. до ВМТ; частота вращения - 2000 мин<sup>-1</sup>. Эти калибровки обеспечивают минимальные выбросы СН из двигателя и благоприятные условия для эффективной работы прогретого трехкомпонентного каталитического нейтрализатора.

Выбранные калибровки обеспечивают работу модифицированного двигателя ВАЗ 21126 макета ГУ МЗУ на режимах холодного пуска и прогрева с пониженными почти в два раза выбросами СН и обеспечивают условия для более быстрого прогрева нейтрализатора по сравнению с серийным двигателем ВАЗ 21126 экологического класса 3 на тех же режимах.

### **Заключение**

В результате экспериментальных работ и анализа особенностей режимов пуска и прогрева бензинового двигателя разработана методика отладки пусковых качеств генераторной установки мобильного зарядного устройства, определены пусковые калибровки модифицированного двигателя ВАЗ 21126, входящего в состав полномасштабного макета генераторной установки мобильного зарядного устройства. Выбранные калибровки позволяют почти вдвое снизить выбросы СН на режиме холодного пуска и обеспечивают благоприятные условия для быстрого прогрева и включения нейтрализатора в работу.

*Работа по созданию мобильного (бортового) ЗУ накопителей электрических силовых установок городского общественного транспорта проводится при финансовой поддержке Министерства*

### **Список литературы**

1. Петриченко Д.А. [и др.] Использование многопараметрической нейросетевой модели для управления энергоустановками на базе двигателя внутреннего сгорания // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2012. - Т. 1, № 1. – С. 78-84.
2. Химич В.Л. [и др.] Нейтрализация токсичных компонентов отработавших газов двигателей внутреннего сгорания до уровня перспективных экологических стандартов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2012. - № 1. – С. 161-168.
3. Хрипач Н.А. [и др.] Концепция мобильного (бортового) зарядного устройства накопителей электрических силовых установок городского общественного транспорта // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - № 6 (приложение «Технические науки»). - С. 46.
4. Eng J. A. The Effect of Spark Retard on Engine-out Hydrocarbon Emissions // 2005. SAE Paper, № 2005-01-3867. – P. 1-17.
5. Kidokoro T., Hoshi K., Hiraku K., Satoya K., Watanabe T., Fujiwara T., Suzuki H. Development of PZEV Exhaust Emission Control System // 2003. SAE Paper, № 2003-01-0817. – P. 1-13.
6. Kollmann K., Abthoff J., Zahn W., Bischof H., Göhre J. Secondary Air Injection with a New Developed Electrical Blower for Reduced Exhaust Emissions // 1994. SAE Paper, № 940472. – P. 1-11.
7. Samenfink W., Albrodt H., Frank M., Gesk M., Melsheimer A., Thurso J., Matt M. Strategies to Reduce HC-Emissions During the Cold Starting of a Port Fuel Injected Gasoline Engine // 2003. SAE Paper, № 2003-01-0627. – P. 1-11.
8. «Technologies for Near-Zero-Emission Gasoline-Powered Vehicle», Edited by Fuquan Zhao, SAE International, Warrendale, 2007. – P. 1-441.

#### **Рецензенты:**

Ерохов В.И., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва.

Фомин В.М., д.т.н., профессор, Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва.