

На правах рукописи

БАКАЙКИН Дмитрий Дмитриевич



**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ФОРСУНОК БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства
технического обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Эксплуатация автотранспорта и производственное обучение» ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Михайлов Юрий Егорович

Официальные оппоненты: **Плаксин Алексей Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Эксплуатация
машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВПО
«Челябинская государственная
агроинженерная академия»

Редреев Григорий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Инженерная графика
и механика» ФГБОУ ВПО «Омский
государственный аграрный университет
имени П. А. Столыпина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный
аграрный университет»

Защита состоится «26» апреля 2013 г., в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Автореферат разослан «25» марта 2013 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВПО ЧГАА <http://www.csaa.ru>.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Возмилов
Александр Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Автомобильный транспорт является важным звеном сельскохозяйственного производства. От эффективности его работы в значительной мере зависят снижение себестоимости продукции, своевременная уборка урожая, доставка его потребителям, заготовка кормов и другие производственные и хозяйственно-бытовые процессы. Фермерское хозяйство располагает различными моделями грузовых автомобилей общего и специального назначения, среди которых предпочтение отдается автомобилям малой и средней грузоподъемности.

В настоящее время наибольшее распространение на автомобилях малой грузоподъемности получили бензиновые двигатели с распределительным впрыском топлива. Данные топливные системы входят в число главных и сложных составляющих систем двигателя, от которых зависят такие показатели, как приёмистость, экономичность, мощность и легкость пуска двигателя. Но эти показатели реализуются только на двигателе с технически исправной системой топливоподачи. Недопустимые изменения технического состояния форсунок (пропускная способность изменяется более чем на 6%) происходят у 40% автомобилей при пробеге 15–30 тыс. км, что свидетельствует об их низкой эксплуатационной надежности. Так как явно отказ форсунок не проявляется, то говорить об обслуживании форсунок по потребности неправомерно. Разработка методов и средств диагностирования является важной задачей в системе технического обслуживания для предупреждения отказов СТ.

Работа выполнена в соответствии со Стратегией машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 г., разработанной в соответствии с Федеральным законом «О развитии сельского хозяйства» от 29.12.2006 г. № 264, Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2008–2012 годы.

Цель работы. Повышение эффективности эксплуатации бензиновых двигателей с электронной системой управления за счет диагностирования пропускной способности электромагнитных форсунок и их технического обслуживания по результатам диагноза.

Объект исследования. Процессы работы и диагностирования форсунок бензиновых двигателей с электронной системой управления.

Предмет исследования. Закономерности изменения пропускной способности форсунок в зависимости от технического состояния их элементов на различных режимах работы двигателя, а также взаимосвязь частоты вращения коленчатого вала двигателя с пропускной способностью бензиновой форсунки на тестовых режимах.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

1. Установлены закономерности изменения пропускной способности бензиновых электромагнитных форсунок во время эксплуатации и дано аналитическое описание процесса изменения пропускной способности форсунок в зависимости от технического состояния их элементов.

2. Раскрыта взаимосвязь частоты вращения коленчатого вала двигателя с пропускной способностью бензиновой электромагнитной форсунки на режимах минимальной и номинальной подачи топлива. Установлено, что частота вращения коленчатого вала двигателя является диагностическим параметром, отражающим техническое состояние элементов форсунок. Выявлены предельные значения диагностического параметра.

3. Разработаны методика и средства диагностирования бензиновой электромагнитной форсунки, позволяющие задавать тестовые режимы работы двигателя и фиксировать изменение пропускной способности форсунки с точностью 0,5...1,0%.

4. Получены экспериментальные данные изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя в зависимости от величины пропускной способности бензиновой электромагнитной форсунки на тестовых режимах диагностирования при работе двигателя на одном цилиндре.

Практическая ценность работы и реализация ее результатов:

1. Разработаны метод и технология диагностирования пропускной способности бензиновой форсунки, позволяющие в условиях сервисного предприятия своевременно устранять отказы и неисправности бензиновых форсунок (метод защищен патентом на изобретение РФ № 2418190).

2. Результаты исследований могут быть использованы научно-исследовательскими, ремонтными, автообслуживающими организациями при определении технического состояния форсунок бензиновых двигателей с электронной системой управления.

3. Способ диагностирования, технология и средство диагностирования используются при определении технического состояния ЭМФ техническим центром ООО «ЮРМА-сервис», СТО «Интервал», в учебном процессе Челябинской государственной агроинженерной академии.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО ЧГАА (г. Челябинск, 2006–2013 гг.), ГОСНИТИ (г. Москва, 2007 г.).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, в том числе три – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 132 страницах, включает в себя 24 таблицы, 31 рисунок. Работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, содержащего 105 наименований, и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, изложены научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава «Состояние вопроса и задачи исследования» посвящена анализу основных причин снижения эксплуатационной надежности СТ двигателей с электронной системой управления.

Отсутствие средств диагностирования, достоверно определяющих техническое состояние форсунок, приводит к большим затратам на устранение отказов форсунок (порядка 1 600...5 600 руб. на один автомобиль). Вопросами технического диагностирования системы топливоподачи двигателей с электронной системой управления занимались Ю. А. Васильев, С. С. Куков, Е. А. Киндеев, И. П. Залознов, Г. В. Овчинников, А. Ю. Верютин и др.

На основании проведенного анализа существующих методов оценки технического состояния элементов СТ можно сделать вывод, что такие элементы, как бензонасос, фильтр грубой и тонкой очистки, регулятор давления, оцениваются достаточно точно, но имеют высокую трудоемкость. Наиболее сложнодиагностируемым элементом системы топливоподачи является электромагнитная форсунка.

Перспективным методом оценки технического состояния форсунки, который способен удовлетворить всем требованиям, является метод диагностирования по изменению частоты вращения коленчатого вала. В основу разработки метода положено предположение о существовании чувствительной связи между качеством топливно-воздушной смеси и индикаторной мощностью двигателя. Это предположение подтверждается регулировкой холостого хода карбюраторных бензиновых двигателей: так, изменение положения винта качества системы холостого хода на пол-оборота может изменить частоту вращения коленчатого вала двигателя на $100 \dots 150 \text{ мин}^{-1}$. Изложенное позволило сформулировать следующую гипотезу: изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя на тестовых режимах его диагностирования при работе на одном цилиндре коррелирует с пропускной способностью форсунки.

Основой для разработки метода диагностирования форсунки послужил метод, защищенный авторским свидетельством № 1430789 (кл. G01 M15/00), разработанный Ю. А. Васильевым и С. С. Куковым (ЧГАА). Суть метода состоит в том, что за счет полного отключения части цилиндров двигателя или частично работающих цилиндров можно создать любой нагрузочный режим для работающих цилиндров. Двигатель при этом работает с постоянной частотой вращения коленчатого вала. Если индикаторная мощность работающих цилиндров равняется мощности механических потерь в двигателе, то любые причины, которые вызывают изменение индикаторной мощности (качество ТВС, угол опережения зажигания и др.), нарушают это равновесие и вызывают изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Этот метод позволяет фиксировать изменение индикаторной мощности в долях процента. Однако на изменение частоты вращения коленчатого вала двигателя на тестовых режимах могут оказывать влияние не только техническое состояние форсунки, но и износ цилиндропоршневой группы и газораспределительного механизма.

Следовательно, необходимо при проведении исследований учитывать влияние этих факторов на оценочный показатель технического состояния бензиновой электромагнитной форсунки. Остальные неисправности, которые влияют на качество топливно-воздушной смеси, диагностируемы и могут быть устранены в процессе технического обслуживания.

С учетом изложенного и в соответствии с поставленной целью были определены следующие **задачи исследования**.

1. Установить закономерности изменения пропускной способности бензиновых электромагнитных форсунок в зависимости от технического состояния их элементов при эксплуатации автомобилей.

2. Определить закономерности изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя в зависимости от пропускной способности форсунок, обосновать режим их диагностирования.

3. Разработать методику и средства диагностирования, проверить результаты теоретических исследований и провести оценку эффективности разработанных средств диагностирования.

Во **второй главе** «Обоснование тестовых режимов для диагностирования бензиновых электромагнитных форсунок» представлена математическая модель процесса топливоподачи на различных этапах процесса впрыска топлива, разработанная с целью выбора режимов диагностирования и диагностических параметров форсунок.

С целью выделения информации о влиянии технического состояния отдельных элементов форсунки на ее пропускную способность весь процесс топливоподачи был разбит на три временных интервала – три этапа процесса топливоподачи (рисунок 1).

Таким образом, на основе анализа рисунка 1 получаем суммарное время трех этапов изменения пропускной способности ЭМФ:

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3. \quad (1)$$

На первом этапе происходит подъем запорной иглы на максимальную величину, при этом пропускная способность ЭМФ увеличивается. Движение иглы вверх при открытии ЭМФ осуществляется под действием ряда сил: тяговой силы электромагнита $F_{т.э}$, силы предварительного сжатия пружины $F_{пр.с}$, силы давления топлива на иглу F_d и сил трения $F_{тр}$ (рисунок 2).

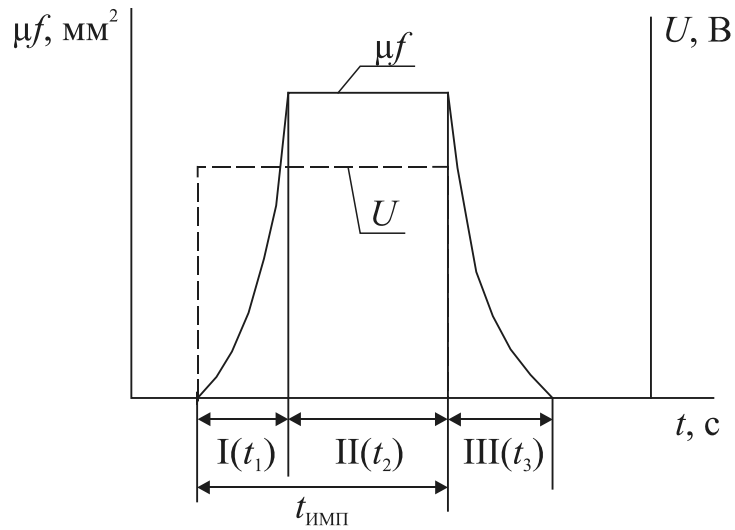


Рисунок 1 – Изменение пропускной способности ЭМФ μf , mm^2 , бензинового ДВС во времени t , с, под действием электромагнитного импульса U , В:
 t_1 – время открытия иглы ЭМФ, с; $t_{\text{имп}}$ – время действия электромагнитного импульса, с; t_2 – время полного открытия иглы ЭМФ, с; t_3 – время закрытия (опускания) иглы ЭМФ, с; $I(t_1)$ этап – увеличение пропускной способности ЭМФ; $II(t_2)$ этап – постоянство пропускной способности ЭМФ; $III(t_3)$ этап – уменьшение пропускной способности ЭМФ

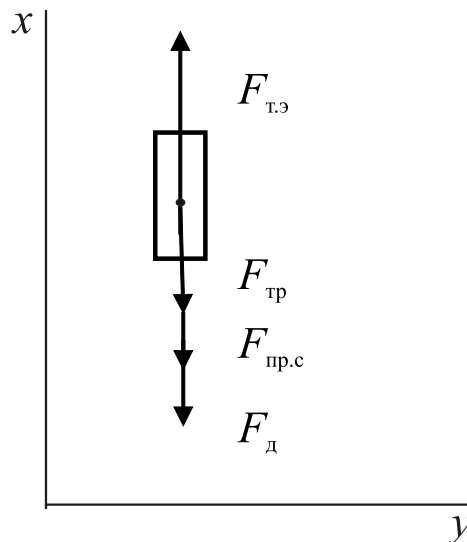


Рисунок 2 – Схема соотношения сил, действующих на иглу форсунки

Равнодействующая всех сил, действующих на иглу ЭМФ, описывается уравнением

$$F = F_{\text{т.э}} - (F_{\text{пр.с}} + kx) - SP - F_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{т.э}}$ – тяговая сила электромагнита, Н;

μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме;

B – магнитная индукция, Тл;

S – площадь поперечного сечения запорной иглы, м²;

$F_{\text{пр.с}}$ – сила предварительного сжатия пружины, Н;

k – коэффициент жесткости пружины, Н/м;

x – перемещение иглы ЭМФ, м;

P – давление топлива в рампе, Па;

$F_{\text{тр}}$ – силы трения, Н.

Перемещение запорной иглы X_1 на первом этапе открытия ЭМФ при условии, что тяговая сила электромагнита, создаваемая однородным магнитным потоком при малых перемещениях, принимается постоянной, описывается уравнением

$$X_1 = \frac{(F_{\text{т.э}} - F_{\text{пр.с}} - SP - F_{\text{тр}})t_1^2}{\left(1 + \frac{k}{m}\right)m}, \quad (3)$$

где m – масса запорной иглы, кг;

t_1 – время открытия ЭМФ, с;

P – давление топлива, Па.

При подаче электрического импульса на ЭМФ открытие запорной иглы происходит не мгновенно. Время открытия ЭМФ включает в себя время трогания иглы $t_{\text{т}}$, измеряемое от момента подачи напряжения на обмотку до момента начала движения иглы, и время движения иглы $t_{\text{д}}$. Следовательно, время открытия ЭМФ более полно описывается уравнением

$$t_1 = t_{\text{т}} + t_{\text{д}} = \frac{\omega BS}{IR} \ln \frac{1}{1 - I_{\text{т}}/I_y} + \sqrt{\frac{2x_1 m}{0,5/\mu \left(\mu \frac{I\omega}{2\pi r} \right) - (F_{\text{пр.с}} + kx) - SP - F_{\text{тр}}}}, \quad (4)$$

где ω – число витков;

I – сила тока в обмотке, А;

R – активное сопротивление обмотки электромагнита, Ом;

I_T – ток трогания подвижной системы, А;

I_y – установившееся значение тока в обмотке, А;

r – средний радиус катушки, м;

μ – магнитная проницаемость среды.

Анализ уравнений (3), (4) показывает, что на длительность первого этапа оказывают влияние тяговая сила электромагнита, сила предварительного сжатия пружины, сила давления топлива в рампе, силы трения в период ее открытия, т.е. структурные параметры технического состояния ЭМФ. Время открытия ЭМФ является выходным параметром процесса топливоподачи, комплексно отражающим все структурные параметры технического состояния ЭМФ.

Второй этап работы ЭМФ характеризуется неизменной пропускной способностью во времени, так как игла находится в неподвижном, максимально поднятом состоянии. Время полного открытия форсунки описывается уравнением

$$t_2 = t_{\text{имп}} - t_1. \quad (5)$$

Графическое изображение изменения пропускной способности ЭМФ за время действия электрического импульса представлено на рисунке 3.

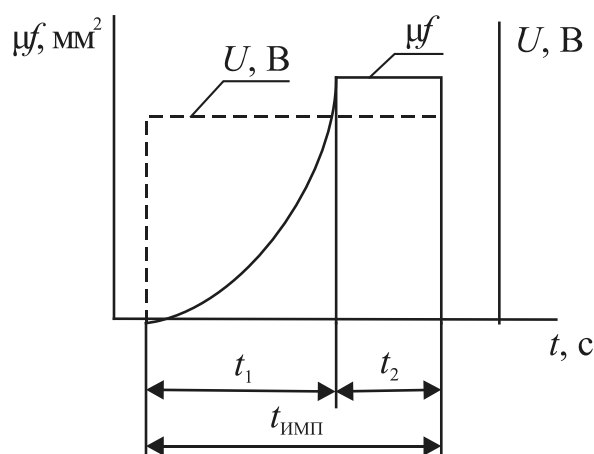


Рисунок 3 – Зависимость пропускной способности ЭМФ $\mu f, \text{мм}^2$, от времени действия электрического импульса $U, \text{В}$

Если время t_1 по причине изменения технического состояния увеличивается, то общая подача топлива ЭМФ на этапах I и II умень-

шается, и наоборот, уменьшение времени t_1 вызывает увеличение подачи топлива. Кроме этого, степень влияния первого этапа на второй зависит от времени импульса: чем больше время импульса, тем меньше степень влияния на общую пропускную способность ЭМФ, оказываемая первым этапом.

Третий этап характеризуется уменьшением пропускной способности ЭМФ; в ходе этапа выключается подача электрического сигнала и игла запирает проходной канал ЭМФ. При этом перемещение иглы запорного клапана происходит под действием силы сжатой пружины, давления топлива на иглу и силы трения между запорной иглой и корпусом ЭМФ. Перемещение иглы определяется по уравнению

$$X_3 = \frac{(F_{\text{пр.с}} + SP - F_{\text{тр}})t_3^2}{\left(1 + \frac{k}{m}\right)m}. \quad (6)$$

Время закрытия ЭМФ при отключении обмотки от источника питания складывается из времени спадания магнитного потока $t_{\text{сп}}$, отсчитываемого от момента разрыва цепи обмотки до момента трогания запорной иглы, и времени возвратного движения запорной иглы $t_{\text{вд}}$:

$$t_3 = t_{\text{сп}} + t_{\text{вд}} = \int_{\Psi_{\text{т}}}^{\Psi_{\text{у}}} \frac{d\Psi}{iR_{\text{дп}}} + \sqrt{\frac{2mx_3}{F_{\text{пр.с}} + kx + SP - F_{\text{мп}}}}, \quad (7)$$

где $\Psi_{\text{у}}$ – потокосцепление обмотки при установившемся токе;

$\Psi_{\text{т}}$ – потокосцепление, соответствующее току трогания при отпуске;

$R_{\text{дп}}$ – сопротивление короткозамкнутой обмотки.

Анализ уравнений (6), (7) показывает, что на длительность третьего этапа закрытия ЭМФ, следовательно, и на пропускную способность за этот период могут оказывать влияние сила предварительного сжатия пружины, сила давления топлива в рампе, сила трения.

Общий расход топлива за цикл работы ЭМФ на трех ее этапах:

$$Q_{\text{общ}} = \left[\mu_1 f_{\text{сп1}} t_1 + \mu_2 f_2 (t_{\text{ИМП}} - t_1) + \mu_3 f_{\text{сп3}} t_3 \right] \sqrt{2\Delta P / \rho}, \quad (8)$$

где μ_1, μ_2, μ_3 – коэффициенты расхода ЭМФ на трех этапах;

$f_{ср1}, f_2, f_{ср3}$ – средняя площадь сечения распылителя ЭМФ на трех этапах, мм^2 ;

ΔP – разность давлений топлива в рампе и впускном коллекторе, Н/м^2 ;

ρ – плотность топлива, кг/м^3 .

Если время импульса, подаваемого на ЭМФ, намного больше, чем время поднятия t_1 и время закрытия t_3 запорной иглы, то степень влияния первого и третьего этапов подачи топлива на работу ЭМФ минимальна (рисунок 4 а).

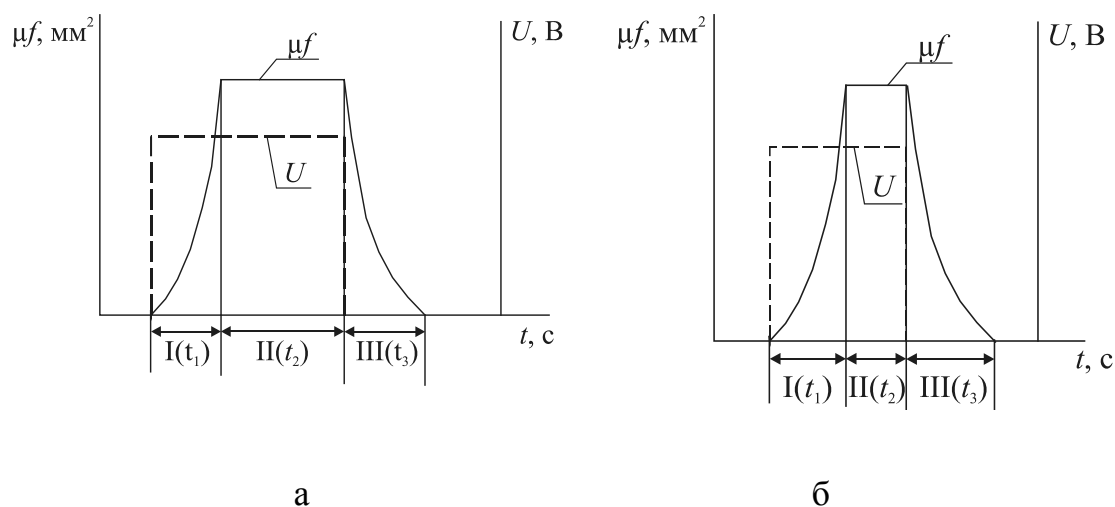


Рисунок 4 – Процесс работы ЭМФ: а – при импульсе U , В , значительно большем времени открытия ЭМФ t_1 , с ;

б – при импульсе U , В , соизмеримом с временем открытия ЭМФ t_1 , с

Если время импульса соизмеримо со временем открытия или закрытия ЭМФ, то цикловая подача топлива определяется продолжительностью времени открытия t_1 и закрытия t_3 запорной иглы. Влияние второго этапа работы ЭМФ при этом минимально (рисунок 4 б). Так как время импульса связано с режимом работы двигателя, можно сделать вывод, что средняя пропускная способность форсунки за время действия электрического импульса зависит не только от ее технического состояния, но и от режима работы двигателя. Следовательно, пропускную способность форсунки необходимо определять на двух режимах:

– на режиме малых подач топлива, где пропускная способность форсунки зависит от процесса открытия и закрытия форсунки;

– на режиме больших подач топлива, где влияние процесса открытия и закрытия форсунки на пропускную способность минимально.

С целью обоснования выбора диагностических параметров и режимов диагностирования проведен поисковый эксперимент. По результатам его получена математическая модель, отражающая влияние качества топливно-воздушной смеси на частоту вращения коленчатого вала двигателя при работе последнего на различных нагрузочных режимах. Данная модель представлена уравнением регрессии:

$$n = (45,984 \cdot z^2 - 4,817 \cdot 10^3 \cdot z + 8,096 \cdot 10^4) \cdot \alpha^2 + (-72,584 \cdot z^2 + 7,425 \cdot 10^3 \cdot z - 1,195 \cdot 10^5) \cdot \alpha + 27,754 \cdot z^2 - 2,748 \cdot 10^3 \cdot z + 4,383 \cdot 10^4, \quad (9)$$

где α – коэффициент избытка воздуха;

z – степень открытия дроссельной заслонки, %.

Анализ этой модели позволил установить, что максимальная чувствительность изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя при изменении качества смеси для режимов малых подач достигается при $\alpha = 1,17$, для режимов больших подач – при $\alpha = 0,95$ с работой двигателя на одном цилиндре.

Величина изменения диагностического параметра на режиме малых подач топлива такова: при увеличении номинальной пропускной способности форсунки на предельную величину +6% частота вращения коленчатого вала двигателя увеличивается на 250 мин⁻¹, при уменьшении на -6% – уменьшается на 470 мин⁻¹. На больших подачах топлива при увеличении номинальной пропускной способности форсунки на предельную величину частота вращения коленчатого вала двигателя увеличивается на 740 мин⁻¹, при уменьшении – уменьшается на 1 190 мин⁻¹.

Существующее диагностическое оборудование (мотор-тестеры и сканеры) позволяет измерять частоту вращения коленчатого вала двигателя с погрешностью 40 мин⁻¹. Этого достаточно для нахождения предельных изменений пропускной способности форсунки на выбранных режимах работы двигателя, то есть частота вращения коленчатого вала двигателя может служить диагностическим параметром для определения пропускной способности форсунки.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведено описание общей и частных методик экспериментальных исследований. Общая методика предусматривает решение поставленных задач путем проведения лабораторных исследований. Для проведения экспериментальных лабораторных исследований разработан исследовательский комплекс (рисунок 5), который включает в себя моторную установку на базе двигателя ЗМЗ-406.10.

Разработан прибор (рисунок 6), который позволяет изменять нагрузку на тестируемый цилиндр в широких пределах и длительность впрыска топлива от 0,1 до 50,0%.

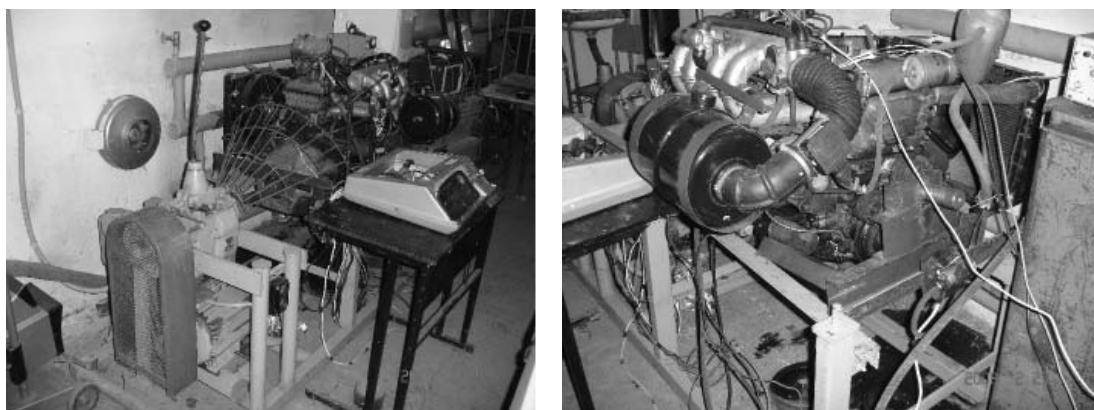


Рисунок 5 – Исследовательский стенд для испытаний двигателя ЗМЗ-406.10



Рисунок 6 – Отключатель электромагнитных форсунок

Так как в ходе теоретических исследований была установлена связь между качеством смеси и частотой вращения коленчатого вала двигателя, то мы предположили, что износ ЦПГ и ГРМ оказывает

влияние на частоту вращения коленчатого вала двигателя. Степень влияния износа ЦПГ и ГРМ на диагностический параметр планировалось оценить экспериментально.

Для оценки этих факторов разработан план трехфакторного эксперимента, в процессе которого определялась степень связи этих факторов с частотой вращения коленчатого вала двигателя.

Для исследования зависимости изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя от пропускной способности форсунки разработана методика однофакторного эксперимента, который позволил установить зависимость между степенью изменения пропускной способности форсунок в процентах от эталонной и частотой вращения коленчатого вала двигателя.

В четвертой главе представлены результаты многофакторного эксперимента, на основании которого сделан вывод, что значимым параметром, влияющим на диагностический параметр, является только пропускная способность форсунки.

Обработка результатов однофакторного эксперимента позволила установить связь между изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя от пропускной способности форсунок в процентах от эталонной форсунки для режимов малой и максимальной подачи топлива (рисунки 7, 8).

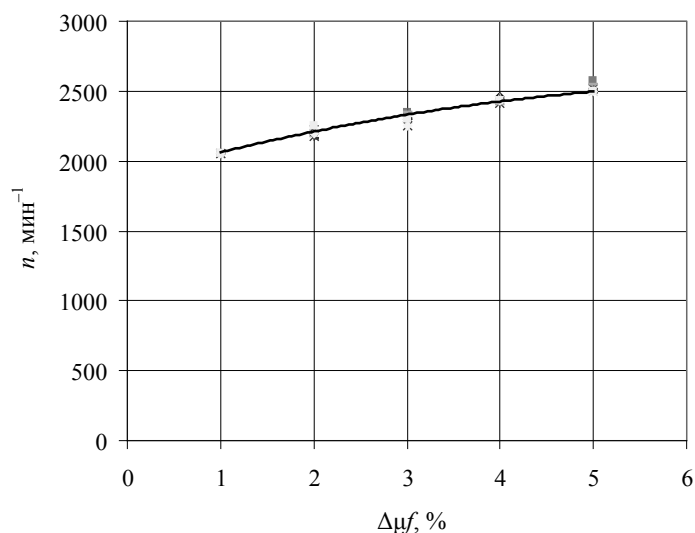


Рисунок 7 – Экспериментальная зависимость изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя от пропускной способности форсунок на режиме малой подачи топлива

Данная связь для режима малой подачи топлива аппроксимируется следующим уравнением:

$$n = -1,825 \cdot \mu f^2 + 38,333 \cdot \mu f + 2,343 \cdot 10^3. \quad (10)$$

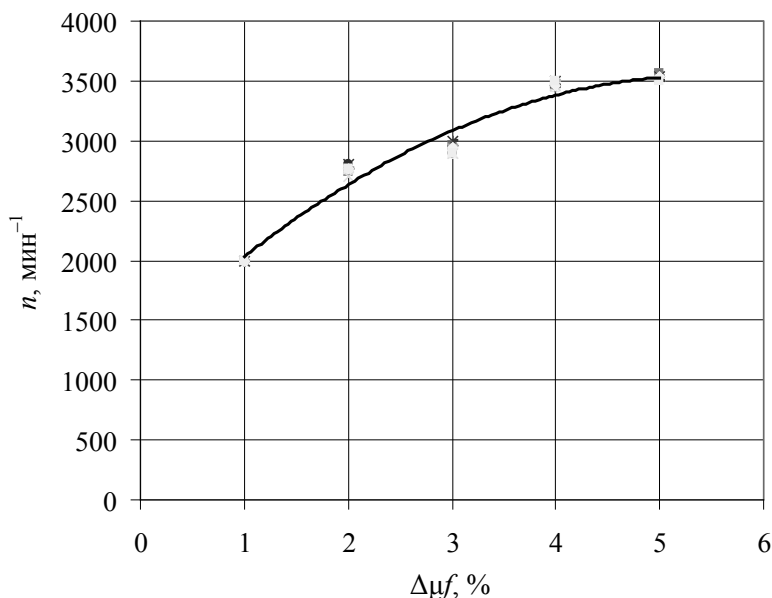


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя от пропускной способности форсунок на режиме номинальной подачи топлива

Данная связь для режима номинальной подачи топлива аппроксимируется уравнением

$$n = -8,841 \cdot \mu f^2 + 125,5 \cdot \mu f + 3,098 \cdot 10^3. \quad (11)$$

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных исследований от теоретических не превышает 40 мин^{-1} точности измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя мотор-тестером (40 мин^{-1}).

Получено, что чувствительность диагностического параметра на режиме малых подач топлива не менее $K = 35 \text{ мин}^{-1}/\%$, на режиме больших подач топлива – $K = 106 \text{ мин}^{-1}/\%$.

Среднеквадратическое отклонение диагностического параметра для пропускной способности технически исправной форсунки

$\sigma = 38,7 \text{ мин}^{-1}$; для предельно увеличенной пропускной способности форсунки $\sigma = 20 \text{ мин}^{-1}$; для предельно уменьшенной пропускной способности форсунки $\sigma = 25,2 \text{ мин}^{-1}$.

Таким образом, стабильность диагностического параметра не превышает значений дискретности измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Информативность диагностического параметра определяется по формуле

$$I = \frac{|P_1 - P_2|}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (12)$$

где P_1 – частота вращения коленчатого вала двигателя для исправной форсунки, мин^{-1} ;

P_2 – частота вращения коленчатого вала двигателя для форсунки с предельной пропускной способностью, мин^{-1} ;

σ_1 – среднеквадратическое отклонение технически исправной форсунки, мин^{-1} ;

σ_2 – среднеквадратическое отклонение форсунки с предельной пропускной способностью, мин^{-1} .

Минимальная информативность диагностического параметра для режима малых подач топлива $I = 3,4$; для режима больших подач $I = 9$.

В результате проведения эксплуатационных испытаний была разработана маршрутная технологическая карта процесса диагностирования пропускной способности форсунок. Хронометрирование операций процесса диагностирования показало, что общее время диагностирования пропускной способности форсунок безразборным методом для одного автомобиля ГАЗ составляет 23 чел.-мин. Время, затрачиваемое на определение технического состояния форсунок с использованием проливочного стенда, составляет 105 чел.-мин.

Таким образом, определение технического состояния форсунок разработанным способом осуществляется почти в пять раз быстрее. В связи с тем, что наработка на отказ электромагнитной форсунки бензинового двигателя составляет 40% при пробеге 15–30 тыс. км, необходимо проводить проверку ее технического состояния для предупреждения отказов во время ТО – 2 автомобиля.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Использование системы топливоподачи с распределенным впрыском топлива ведет к повышению тягово-экономических показателей автомобиля при эксплуатации, однако изменение пропускной способности бензиновой электромагнитной форсунки (БЭМФ) более чем на $\pm 6\%$ от номинала приводит к функциональному отказу системы топливоподачи, что наблюдается у 8...10% автомобилей в гарантийный период их эксплуатации. Поэтому обоснование параметров диагностирования пропускной способности форсунок и режима диагностирования позволит своевременно предупредить или устранять последствия их отказов.

2. Установлено, что пропускная способность форсунки является чувствительным выходным параметром технического состояния таких элементов форсунки, как пропускная способность фильтров форсунок, седла запорной иглы, усилия предварительного сжатия пружины, сопротивление обмотки катушки соленоида, герметичность седла форсунки.

3. Раскрыта взаимосвязь между пропускной способностью форсунок и частотой вращения коленчатого вала двигателя. В частности, на номинальном режиме работы двигателя изменение пропускной способности обусловлено техническим состоянием седла запорной иглы и пропускной способностью фильтров форсунок, а на режиме холостого хода изменение пропускной способности БЭМФ зависит от технического состояния усилия предварительного сжатия пружины, сопротивления обмотки катушки соленоида, герметичности седла форсунки.

4. Определено, что частота вращения коленчатого вала двигателя является чувствительным диагностическим параметром, комплексно отражающим техническое состояние электромагнитной форсунки. Режимы диагностирования является работа двигателя при малой подаче топлива с качеством смеси 1,17, при номинальной подаче топлива с качеством смеси 0,95.

5. Экспериментально подтверждена высокая чувствительность изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя от пропускной способности электромагнитной форсунки, которая описывается уравнениями регрессии: для режима на малой подаче топлива $n = -1,825 \cdot \mu f^2 + 38,333 \cdot \mu f + 2,343 \cdot 10^3$, для режима на номинальной

подаче топлива $n = -8,841 \cdot \mu f^2 + 125,5 \cdot \mu f + 3,098 \cdot 10^3$. Расхождение экспериментальных данных и теоретической зависимости изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя от пропускной способности форсунки не превышает 0,5...1,0%.

6. В результате реализации разработанного метода и средств диагностирования при лабораторных исследованиях и производственной проверке установлено, что чувствительность диагностического параметра изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя на режиме малой подачи топлива не менее $K = 35 \text{ мин}^{-1}/\%$, для номинальной подачи топлива $K = 106 \text{ мин}^{-1}/\%$, достоверность диагноза составляет 0,98.

7. Установлено, что разработанный безразборный метод диагностирования пропускной способности БЭМФ позволяет сократить трудоемкость оценки ее технического состояния на 1,25 чел.-ч на каждый автомобиль, т.е. на 70...75% меньше, по сравнению с существующим методом проливки форсунок на стендах. Для предупреждения отказов электромагнитных форсунок бензиновых двигателей целесообразно диагностировать их пропускную способность разработанным методом при ТО – 2 автомобиля.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Результаты экспериментальных исследований пропускной способности бензиновых форсунок // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 12. – С. 120–127.

2. Куков С. С., Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Теоретические исследования работы бензиновой форсунки и ее влияние на процесс топливоподачи // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2012. – № 3. – С. 40–42.

3. Куков С. С., Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Экспериментальные исследования пропускной способности электромагнитных форсунок бензиновых двигателей внутреннего сгорания // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2012. – № 5. – С. 40–42.

Публикации в других изданиях

4. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В., Куков С. С. Способ диагностирования системы топливоподачи двигателей внутреннего сгорания легковых автомобилей // Вестник ЧГАА. – 2011. – Т 59. – С. 30–32.

5. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В., Куков С. С. Способ диагностирования системы топливоподачи двигателя : информ. л. № 74-034-11 / Челябинский ЦНТИ. – 2011.

6. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В., Куков С. С. Техническое обслуживание элементов системы топливоподачи бензинового двигателя с электронной системой управления // Вестник ЧГАУ. – 2006. – Т 47. – С. 10–13.

7. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В., Куков С. С. Отключатель электромагнитных форсунок (догружатель двигателя) : информ. л. № 74-006-10 / Челябинский ЦНТИ. – 2010.

8. Бакайкин Д. Д., Куков С. С., Михайлов Ю. Е. Диагностирование пропускной способности бензиновых электромагнитных форсунок // Труды Всерос. науч.-исслед. технолог. института ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка ГОСНИТИ. – М., 2008. – Т. 101. – С. 89–91.

9. Бакайкин Д. Д., Огнев И. Г. Методика диагностирования инжекторного двигателя на тестовых статических режимах его работы // Известия Международной академии аграрного образования. – СПб., 2009. – Вып. № 8.

10. Пат. 2418190 RU F 02 М 65/00. Способ диагностирования системы топливоподачи двигателя / Д. Д. Бакайкин, А. В. Гриценко, С. С. Куков. – № 2009123798 ; заявл. 22.06.09 ; опубл. 10.05.11, Бюл. № 13.

Подписано в печать 13.03.2013 г. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 48

ФГБОУ ВПО ЧГАА
454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75