На правах рукописи

**АХМЕТЗЯНОВ Ильнур Ринатович**

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА БЕЗРАЗБОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ МТА НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ ЕГО СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА БАЙЕСА

Специальность 05.20.03 — Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2017

Работа выполнена на кафедре тракторы, автомобили и энергетические установки Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ)

Научный руководитель: **Халиуллин Фарит Ханафиевич,** кандидат технических наук, доцент кафедры тракторов, автомобилей и энергетических установок ФГБОУ ВО Казанский ГАУ

Официальные оппоненты: **Денисов Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства ФГБОУ ВО Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

**Костомахин Михаил Николаевич**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией разработки НТД, сертификации и надежности машин ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

Защита состоится «22» июня 2017 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДМ 220.003.04 при ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, ФГБОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина, ФГБОУ ВО Казанский ГАУ по адресу: г. Димитровград, ул.Куйбышева, 310, ауд. 210, Технологический институт филиал ФГБОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ и на сайте https://www.bsau.ru/

Автореферат разослан ____ _____2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Салават Гумерович
Мударисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы**. Двигатель МТА является одним из самых уязвимых агрегатов, на долю которого приходится около 50% отказов. В двигателе внутреннего сгорания наименьшую надежность имеют такие системы, как цилиндропоршневая группа – 20…25%, топливная аппаратура – 25…30%, газораспределительный механизм до 15%. Надежность ДВС и его систем зависит как от конструктивных особенностей, так и от качества проводимого технического обслуживания, организации своевременного и качественного диагностирования, выявления неисправностей и их устранения.

В связи с увеличением числа отказов, расширения номенклатуры технических операций, усложнения и разнообразия конструктивных элементов и различий в условиях эксплуатации тракторов, совершенствование методов технической диагностики ДВС является актуальной задачей. К тому же, классические алгоритмы диагностики ДВС не позволяют определять неисправности на ранней стадии их развития, поэтому важней задачей является совершенствование методов технической диагностики с применением универсальных алгоритмов обработки информации, с одновременным повышением достоверности результатов.

**Степень разработанности темы.** Свой вклад в решение проблем совершенствования методов и средств диагностирования автотракторных двигателей внесли В.И. Бельский, С.Н. Борычев, И.И. Габитов, А.В. Неговора, Ф.З. Габдрафиков, Л.В. Грехов, И.В. Добролюбов, Н.С. Ждановский, В.М. Михлин, И.Г. Галиев, Н.Р. Адигамов, А.П. Иншаков, В.И. Черноиванов, О.Ф. Савченко, Е.В.Николаев, А.Г. Кузнецов, А.В. Сафонов, А.С. Денисов, А.А. Молодан, С.В. Крашенинников, М.А. Кагарманов, С.Н. Ольшевский, В.Г. Баралевич, В.И. Сидоров, Б.И. Таранцев, М.Н. Костомахин, К.И. Лютин, А.С. Чурилин, А.А. Геленов и др. Однако, анализ характеристик работы двигателя имеет потенциал для дальнейшей разработки метода диагностирования, в связи с этим разработка метода диагностики по переходным функциям двигателя является востребованной задачей.

**Целью** работы является разработка метода безразборной диагностики двигателя как динамического объекта на основе переходных функций двигателя в целом и его составных частей.

**Задачи исследования:**

1. Разработать метод безразборной диагностики двигателя на основе переходных функций его систем;
2. Разработать стенд для безразборной диагностики двигателя внутреннего сгорания с возможностью имитации его реального технического состояния;
3. Разработать алгоритм и программное обеспечение для безразборной диагностики двигателя внутреннего сгорания на основе формулы Байеса;
4. Оценить экономическую эффективность применения предложенного метода по сравнению с существующими.

**Объект исследований**. Двигатель внутреннего сгорания Д-243 в составе МТА.

**Предмет исследования**. Закономерности влияния параметров технического состояния двигателя на форму переходных функций двигателя внутреннего сгорания.

**Методология и методы исследования.** В исследовании применяются основные положения теории тракторов и автомобилей, теории двигателей внутреннего сгорания, теории механизмов и машин, методы диагностики двигателя внутреннего сгорания, методы имитационного математического моделирования, методы моделирования динамических систем, методы теории планирования эксперимента, теории экспериментальных исследований и теории обработки сигналов, методы теории вероятности, методы статистического анализа.

**Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель оценки изменения параметров технического состояния двигателя внутреннего сгорания, где в качестве диагностических параметров выбраны переходные функции самого двигателя и его составляющих элементов, которая на основе алгоритма Байеса позволяет определить вероятности появления неисправностей.
2. Разработан алгоритм моделирования изменения параметров технического состояния двигателя в эксплуатационных условиях, отличающийся тем, что позволяет определить значения параметров технического состояния двигателя в зависимости от наработки.
3. Определены диапазоны изменения диагностических параметров двигателя внутреннего сгорания с использованием методики идентификации динамических систем для составления диагностической матрицы Байеса.

**Практическая значимость работы.** Разработанная методика диагностирования и программа могут использоваться для диагностики и технического обслуживания тракторов и автомобилей в транспортных предприятиях, также ремонтных мастерских. По результатам исследований получены патенты на полезную модель № 151482, №160474, свидетельство о регистрации программы для ПЭВМ №2016614082.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 3 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получены 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Апробация работы.** Положения диссертации докладывались на ежегодных научно-практических конференциях Казанского ГАУ в 2012-2016 гг., научно-практическом семинаре «Чтения академика ВАСХНИЛ В.Н. Болтинского» (Москва, 2014), международной научно-практической конференции «Новая наука: современное состояние и пути развития» (Оренбург, 2016), Международная научно-практическая конференция «Современная наука: теоретический и практический взгляд» (Тюмень, 2016), экспонировалась на 17-ой Международной специализированной выставке «Энергетика. Ресурсосбережение» (Казань, 2016).

**Реализация результатов работы.** Полученные результаты используются в ОАО «Агрофирма Джалиль», УСХиП Сармановского района Республики Татарстан, а также внедрены в учебный процесс Института механизации и технического сервиса Казанского ГАУ.

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием в качестве базиса исследования основных положений фундаментальных и технических наук, корректностью применяемого математического аппарата, проверкой теоретических положений

экспериментальными исследованиями с адекватным метрологическим обеспечением, публикацией результатов исследования в ведущих рецензируемых изданиях, обсуждением результатов исследования на конференциях и научных семинарах, практическим внедрением результатов.

**Вклад автора в проведенное исследование.** Автором лично получены все основные результаты: разработан стенд для динамического исследования двигателя, составлена методика диагностирования и программа экспериментальных исследований, проведены эксперименты и проанализированы их результаты, разработана программа для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, приложений, и содержит 148 страниц основного текста, включающего 59 иллюстрацию, 15 таблиц, список использованной литературы из 188 наименования.

**Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:**

- метод технического диагностирования ДВС, основанный на использовании метода определения переходных процессов двигателя и алгоритм Байеса для определения вероятности диагноза;
- математическая модель моделирования технического состояния систем двигателя;
- диапазоны изменения диагностических параметров, характеризующие техническое состояние двигателя МТА.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложены актуальность работы, цель, задачи, объект, предмет и методы исследований; научная новизна; теоретическая и практическая ценность; апробация работы; реализация и внедрение результатов диссертационных исследований; основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе «Анализ состояния вопроса»** проведен анализ возрастного, а также марочного состава машинно-тракторного парка РФ и РТ, согласно которому, трактора старше 10 лет составляют 73% парка, в возрасте от 3 до 10 лет - 19%, а до 3-х лет всего лишь 8%. Одним из самых распространенных тракторов является МТЗ-80/82, что составляет 39,3 % парка. Также проведен анализ количественного состава тракторов, который показывает, что с 2011 по 2015 год количество тракторов по РФ уменьшился на 21%.

Следующей проблемой выделено то, что ухудшилось состояние ремонтно-обслуживающей базы (РОБ) в сельском хозяйстве, которая не в состоянии произвести быстрые и качественные ремонтно-обслуживающие мероприятия. Так по данным Хафизова К.А. и Адигамова Н.Р. обеспеченность сельхозпредприятий РОБ уменьшилась по машинным дворам с 92 до 60%, по центральным мастерским – с 96 до 70%, по гаражам – с 96 до 55%, которые являются одним из основных элементов, поддерживающих стабильный темп развития производства сельскохозяйственной продукции в регионе.

Отмечается, что для улучшения положения необходимо усовершенствовать существующие методы диагностирования с учетом наиболее часто встречающихся неисправностей.

Связи с этим проведен анализ основных отказов двигателя внутреннего сгорания. Как показывает анализ, основные отказы приходятся на такие узлы, как цилиндропоршневая группа – 20…25%, топливная система – 25…30% и газораспределительный механизм – до 15%.

Также проведен анализ основных методов и средств, применяемых для диагностирования двигателей внутреннего сгорания. Основные методы диагностирования показаны на рисунке 1.

Рисунок 1 - Методы диагностирования двигателей внутреннего сгорания

Глава заканчивается постановкой цели и задач исследования.

**Во втором разделе «Теоретические предпосылки метода безразборной диагностики ДВС»** двигатель рассматривается как динамическая система и для идентификации выбран метод переходных функций. Для повышения достоверности результатов идентификации рассматриваются переходные функции как самого двигателя, так и его систем. В предлагаемом методе в качестве параметров идентификации выбраны переходные функции частоты вращения, цикловой подачи топлива и расхода воздуха при единичном изменении положения рычага управления топливом. Необходимость и достоверность выбора этих параметров обосновывается предложенными математическими формулами:

$$\Delta M_e = \Delta M_c + I\frac{d\omega}{dt} \tag{1}$$

Так, если примем $\Delta M_c = 0$, то изменение частоты вращения коленчатого вала в переходном процессе описывается уравнением:

$$\Delta\omega = \omega_0 + \frac{1}{I}\int_{t_1}^{t_2} \Delta M_e \cdot dt \tag{2}$$

Известно, что развиваемый двигателем крутящий момент $M_e$ зависит как от технического состояния двигателя, так и организации рабочего процесса в цилиндрах, а более точно от подачи топлива $g_ц$ и воздуха $G_в$. После ранжирования этих параметров принимаем допущение, что крутящий момент двигателя зависит от качества и подаваемого в цилиндры воздуха и топлива, а также компрессии $k$ в самом цилиндре. Подача воздуха в цилиндр двигателя определяется в первую очередь от состояния воздушного фильтра, который оценивается разряжением во впуском коллекторе $P_в$ и компрессии в цилиндре, а подача топлива в эксплуатационных условиях определяется регулировочными параметрами топливоподающей аппаратуры $P_ф$, а также зависит от наработки двигателя $l$.

Принятые допущения согласуются со статистическими данными ТО двигателей и выражаются зависимостями:

$$\begin{cases} M_e = f(G_в, g_ц, k); \\ G_в = f(k, P_в); \\ g_ц = f(P_ф, l). \end{cases} \quad (3)$$

где $P_в$ – разряжение во впускном коллекторе (степень загрязненности воздушного фильтра), кПа;

$l$ – наработка, мото-ч;

$k$ – компрессия в цилиндре, МПа.

Разложение выбранных зависимостей в ряд относительно равновесного состояния дают выражения:

$$\begin{cases} M_e = M_{e0} + \Delta M_e = M_{e0} + (\frac{\partial M_e}{\partial G_в})_0 \Delta G_в + (\frac{\partial M_e}{\partial g_ц})_0 \Delta g_ц + (\frac{\partial M_e}{\partial k})_0 \Delta k; \\ G_в = G_{в0} + \Delta G_в = G_{в0} + (\frac{\partial G_в}{\partial k})_0 \Delta k + G_{в0} + (\frac{\partial G_в}{\partial P_в})_0 \Delta P_в; \\ g_ц = g_{ц0} + \Delta g_ц = g_{ц0} + (\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф})_0 \Delta P_ф + (\frac{\partial g_ц}{\partial l})_0 \Delta l. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta M_e = (\frac{\partial M_e}{\partial G_в})_0 \Delta G_в + (\frac{\partial M_e}{\partial g_ц})_0 \Delta g_ц + (\frac{\partial M_e}{\partial k})_0 \Delta k; \\ \Delta G_в = (\frac{\partial G_в}{\partial k})_0 \Delta k + G_{в0} + (\frac{\partial G_в}{\partial P_в})_0 \Delta P_в; \\ \Delta g_ц = (\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф})_0 \Delta P_ф + (\frac{\partial g_ц}{\partial l})_0 \Delta l. \end{cases} \quad (5)$$

где периоды изменения исследуемых величин определяются выражениями:

- для $\Delta P_в$, $\Delta G_в$: $l \le l_{ТО\ возд.}$,
- для $\Delta P_ф$, $\Delta g_ц$: $l \le l_{ТО\ топл.}$,
- для $\Delta k$, $\Delta l$: $l \le l_{ресурс\ к.р.}$.

$l_{ТО\ возд.}$ – периодичность ТО системы воздухоподачи, мото-ч,

$l_{ТО\ топл.}$ – периодичность ТО системы топливоподачи, мото-ч,

$l_{ресурс\ к.р.}$ – ресурс до капитального ремонта.

После преобразований получаются уравнения (6) и (7), которые характеризуют переходную функцию всего двигателя в зависимости от его технического состояния и технического состояния его систем:

$$\Delta\omega = \frac{1}{I}\int_{t_1}^{t_2}\left[(\frac{\partial M_e}{\partial G_в})_0(\frac{\partial G_в}{\partial P_в})_0\Delta P_в + (\frac{\partial M_e}{\partial g_ц})_0(\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф})_0\Delta P_ф + (\frac{\partial M_e}{\partial g_ц})_0(\frac{\partial g_ц}{\partial l})_0\Delta l + \left[(\frac{\partial M_e}{\partial k})_0 + (\frac{\partial M_e}{\partial G_в})_0(\frac{\partial G_в}{\partial k})_0\right]\Delta k\right]dt. \quad (6)$$

$$\Delta M_e = (\frac{\partial M_e}{\partial G_в})_0 \cdot (\frac{\partial G_в}{\partial P_в})_0 \Delta P_в + (\frac{\partial M_e}{\partial g_ц})_0 \cdot (\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф})_0 \Delta P_ф + (\frac{\partial M_e}{\partial g_ц})_0 \cdot (\frac{\partial g_ц}{\partial l})_0 \Delta l + \left[(\frac{\partial M_e}{\partial k})_0 + (\frac{\partial M_e}{\partial G_в})_0 \cdot (\frac{\partial G_в}{\partial k})_0\right] \cdot \Delta k; \quad (7)$$

Коэффициенты $\frac{\partial M_e}{\partial G_в}$ и $\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}$ характеризуют влияние на изменение крутящего момента двигателя законов подачи воздуха и топлива. Коэффициенты $\frac{\partial G_в}{\partial P_в}$ и $\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф}$ показывают изменение показателей воздухо- и топливоподачи в процессе эксплуатации. Указанные выше коэффициенты имеют кусочно-экспоненциальную зависимость от периодичности ТО связанных с ними систем двигателя.

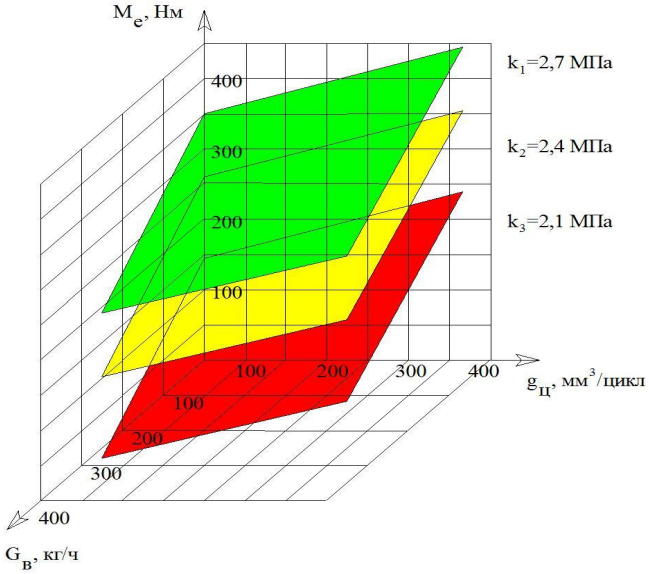



Рисунок 2 – Зависимость крутящего момента $M_e$ от подачи топлива $g_ц$ и воздуха $G_в$ при различных компрессиях

Коэффициенты $\frac{\partial G_в}{\partial k}$ и $\frac{\partial g_ц}{\partial l}$ характеризуют изменения в рабочих процессах двигателя и его систем в процессе эксплуатации и варьируются от номинального до предельного значения. Для получения адекватной картины технического состояния ДВС как динамического объекта, необходимо рассматривать переходные функции самого двигателя (по частоте вращения) и его систем воздухо- и топливоподачи. На рисунке 2 показана зависимость $M_e = f(g_ц, G_в)$ для различных значений компрессии, определяемый экспериментальным путем на стенде (патент на полезную модель № 151482), которая служила для идентификации предложенной математической модели.

Для более полного использования имеющейся статистической информации по технической эксплуатации двигателя и его систем был выбран алгоритм диагностики с использованием обобщенной формулы Байеса, который имеет вид:

$$P(D_i / k_j) = P(D_i)\frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)} \tag{8}$$

где $P(D_i)$ – априорная вероятность гипотезы $D_i$ (априорная вероятность – распределение вероятностей, которое выражает предположения до учёта экспериментальных данных);

$P(k_j/D_i)$ – вероятность гипотезы $k_j$ при наступлении события $D_i$ (апостериорная вероятность – вероятность случайного события при условии того, что известны апостериорные данные, т.е. полученные после опыта);

$P(k_j)$ – полная вероятность наступления события $k_j$;

$P(D_i/k_j)$ – вероятность наступления события $D_i$ при истинности гипотезы $k_j$;

$P(D_i)$ – вероятность диагноза $D_i$, определяемая по статистическим данным (априорная вероятность диагноза).

Обобщенная формула Байеса, применяемая для диагностики выражается следующей зависимостью (9):

$$P(D_i / K^*) = \frac{P(D_i)P(K^* / D_i)}{\sum_{s=1}^{n} P(D_s)P(K^* / D_s)} \quad (9)$$

Учитывая вероятностный характер изменения технического состояния двигателей для повышения достоверности результатов диагностики, необходимо использовать априорные данные результатов ТО и ремонта на практике. При этом надо отметить, что общий объем статистики имеющихся данных является недостаточным. Поэтому имеется необходимость получения недостающих данных путем проведения ситуационных экспериментов с имитацией реального технического состояния двигателя. Также возникает необходимость получения нормативных значений параметров идентификаций по результатам тестовых испытаний (рисунок 3).

Рисунок 3 - Структурная схема предложенного алгоритма двигателя как динамического объекта

В соответствии с разработанным алгоритмом были выбраны четыре основных состояний двигателя и три основных диагностических параметра (признака) проявления различных неисправностей:

– неисправности в системе подачи воздуха (СПВ) $D_1$;

– неисправности в системе подачи топлива (СПТ) $D_2$;

– неисправности цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) $D_3$;

– исправное состояние двигателя $D_4$.

В качестве диагностического признака выберем интенсивность изменения показателей двигателя при единичном изменении положения рычага настройки регулятора – переходные функции. Как известно, они отражают динамические характеристики системы и зависят от ее технического состояния. Каждый признак $k_j$ имеет три уровня состояния: хороший, удовлетворительный и неудовлетворительный, соответствующий неисправности системы:

– интенсивность изменения частоты вращения $T_n$ $(k_{1i})$;

– интенсивность изменения подачи топлива $T_{gц}$ $(k_{2i})$;

– интенсивность изменения расхода воздуха $T_{Gв}$ $(k_{3i})$.

Диапазон изменения показателей от хорошего до неудовлетворительного значения определяется соответствующими значениями этих показателей для двигателей с

нулевой и предельной наработкой. Эти данные необходимо получить в стендовых условиях, и они служат для определения граничных условий при диагностировании.

Определение вероятности диагнозов по методу Байеса подразумевает обязательное составление диагностической матрицы, которая формируется на основе предварительного статистического материала. Диагностическая матрица (таблица) содержит вероятности разрядов признаков для различных состояний двигателя (диагнозов). Размер исследуемых значений определяется количеством вероятных (возможных) проявлений признаков отказов и неисправных состояний

Пример составления диагностической матрицы по алгоритму Байеса для двигателя Д-243 представлен в таблица 1.

Таблица 1 – Диагностическая матрица Байеса

| Состояние двигателя $D_i$ | Признаки $k_j$ | | | | | | | | | $P(D_i)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | частота вращения | | | расход топлива $k_2$ | | | расход воздуха $k_3$ | | | |
| | $k_1$ | | | $k_2$ | | | $k_3$ | | | |
| | $k_{11}$ | $k_{12}$ | $k_{13}$ | $k_{21}$ | $k_{22}$ | $k_{23}$ | $k_{31}$ | $k_{32}$ | $k_{33}$ | |
| Неисправности СПВ $D_2$ | $P(k_{1i}/D_1)$ | | | $P(k_{2i}/D_1)$ | | | $P(k_{3i}/D_1)$ | | | $P(D_1)$ |
| Неисправности СПТ $D_2$ | $P(k_{1i}/D_2)$ | | | $P(k_{2i}/D_2)$ | | | $P(k_{3i}/D_2)$ | | | $P(D_2)$ |
| Неисправности ЦПГ $D_3$ | $P(k_{1i}/D_3)$ | | | $P(k_{2i}/D_3)$ | | | $P(k_{3i}/D_3)$ | | | $P(D_3)$ |
| Исправное состояние $D_4$ | $P(k_{1i}/D_4)$ | | | $P(k_{2i}/D_4)$ | | | $P(k_{3i}/D_4)$ | | | $P(D_4)$ |

Алгоритм определения переходных функций достаточно хорошо проработан. В общем случае, когда рассматриваемые элементы принимаются за апериодическое звено 1-го порядка, они могут быть занесены в виде:

$$\left\{ \frac{dn}{dt} = \frac{k}{T_n} e^{\frac{-t}{T_n}}; \frac{dg_ц}{dt} = \frac{k}{T_{g_ц}} e^{\frac{-t}{T_{g_ц}}}; \frac{dG_в}{dt} = \frac{k}{T_{G_в}} e^{\frac{-t}{T_{G_в}}} \right\} \quad (11)$$

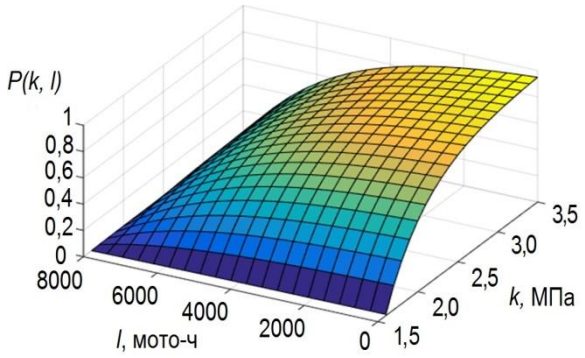



Рисунок 4 - Вероятность исправного состояния ЦПГ в зависимости от компрессии и наработки

Таким образом, постоянная времени определяется как момент времени, в который касательная к переходному процессу в начальной точке траектории пересекает установившееся значение выходной величины.

В то же время, по статистическим данным вероятность исправного состояния ЦПГ в зависимости от наработки и компрессии изменяется по экспоненциальному закону (рисунок 4).

Как видно из рисунка, максимум вероятности исправного состояния приходится на компрессию $k$ =3,5 МПа при нулевой наработке $l$=0 мото-ч. Минимальная вероятность достигается при значениях компрессии $k$ =1,5 МПа и наработке $l$=8000 мото-ч.

Используя предложенные зависимости и допущения можно спрогнозировать предельную наработку двигателя при заданной компрессии, которая выражается

зависимостью:

$$l_{ПР} = l_0 \cdot \ln\left(\frac{V_{al0}}{V_{al0} - V_{a0} + V_c \cdot k_0^{\frac{1}{n_1}}}\right) = l_0 \cdot \ln\left(\frac{V_{al0}}{V_{al0} - V_c \cdot (\varepsilon - k_{ПР}^{\frac{1}{n_1}})}\right) \quad (12)$$

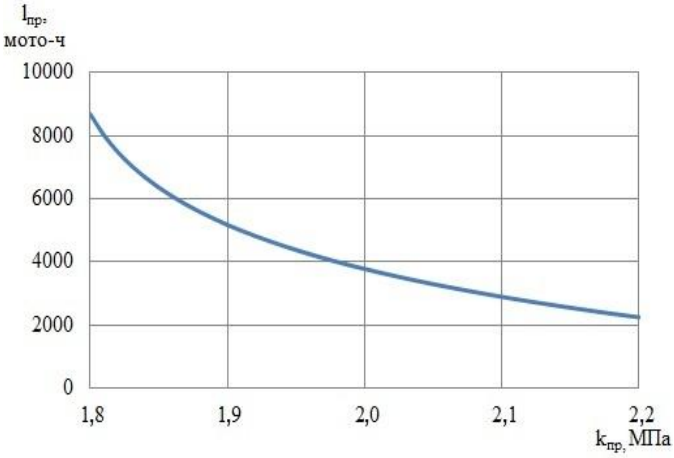


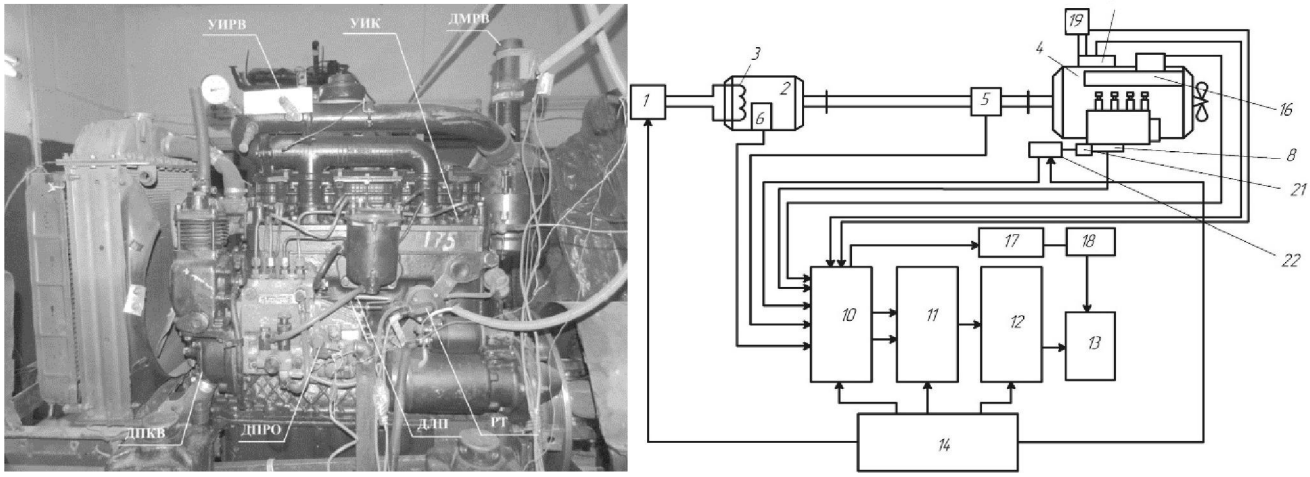

Рисунок 5 - Определение предельной наработки $l_{пр}$ в зависимости от заданной компрессии $k_{пр}$

Полученные результаты проведенного численного анализа по предложенной методики для двигателя Д-243 показаны на рисунке 5.

Предложенная методика моделирования вероятностей позволяет упростить процедуру применения алгоритма Байеса для безразборной диагностики двигателей внутреннего сгорания и может быть применена при практической реализации данного алгоритма.

**В третьем разделе «Программа, оборудование и методы экспериментальных исследований»** приведены результаты разработки программы экспериментального исследования, описание применявшихся методов и оборудования. Для проведения стендовых испытаний был выбран широко распространенный в сельскохозяйственном производстве тракторный двигатель Д-243.

Исследование работы дизельного двигателя в условиях, характерных для работы тракторов в сельском хозяйстве производились на разработанном стенде (Патент на полезную модель № 151482), рисунок 5.




а) б)

Рисунок 6 - Общий вид (а) и схема (б) экспериментального стенда

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов: 1) сбор экспериментальных данных; 2) обработка экспериментальных данных; 3) экспериментальное подтверждение эффективности выбранных диагностических параметров.

Разработанная программа экспериментальных исследований показана на

рисунке 7.

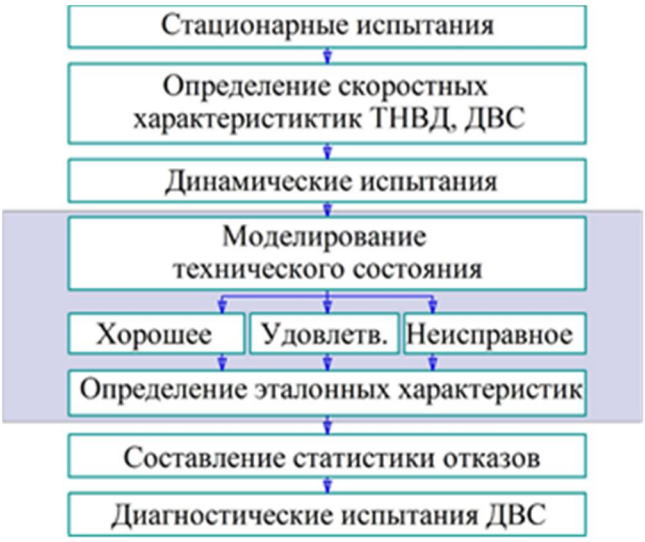



Рисунок 7 – Программа экспериментальных исследований энергетической установки МТА

Рисунок 8 – Устройство изменения компрессии в ЦПГ

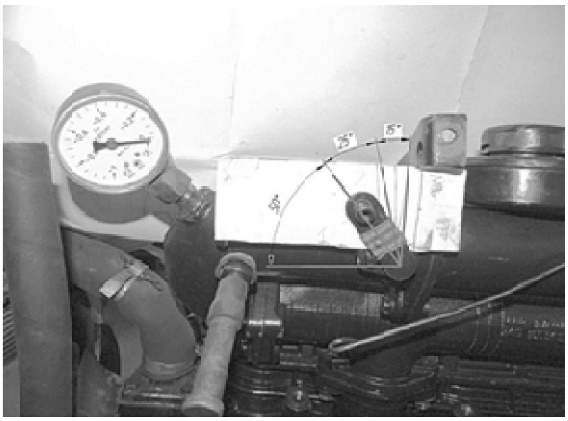


Рисунок 9 – Способ имитации засоренности воздушного фильтра

Для моделирования технического состояния применялась имитация основных неисправностей ДВС, таких как уменьшение компрессии в ЦПГ, неисправность в системе питания и засоренность воздушного фильтра.

Для имитации неисправностей в ЦПГ применялось устройство, устанавливаемое на головку блока цилиндров, которое дает возможность устанавливать необходимую компрессию каждого цилиндра отдельно, показана на рисунке 8.

При экспериментальных исследованиях были приняты значения компрессии 2,7, 2,4 и 2,1 МПа.

Имитация засорения воздушного фильтра производилось воздействием на заслонку на впускном коллекторе, в котором был установлен манометр для измерения разрежения во впускном тракте двигателя, которая показана на рисунке 9.

Для моделирования данной неисправности приняты значения разряжения во впускном коллекторе 2, 4, 7 кПа.

Для имитации неисправности в системе питания при проведении испытания двигателя внутреннего сгорания в форсунки были установлены новые распылители, распылители отработавшие 300 мото-ч. и 700 мото-ч., а также с установленными давлениями впрыска топлива 18,5, 16,5, 15,5 МПа.

Согласно разработанному алгоритму и методике диагностирования проведены диагностические испытания. Алгоритм диагностических испытаний показан на рисунке 10.

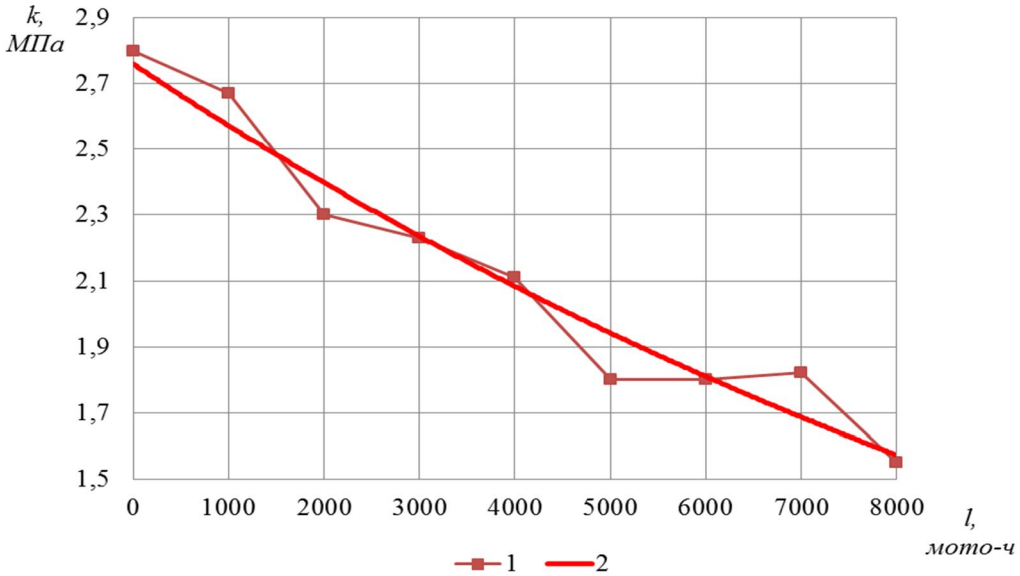
По предложенному алгоритму диагностирования разработано программное обеспечение для диагностирования неисправностей двигателя,

Рисунок 10 - Алгоритм диагностических исследований ДВС

основанное на определении вероятности диагноза состояния двигателя по алгоритму Байеса (свидетельство №2016614082).

**В четвертом разделе «Анализ результатов натурных исследований»** приведены результаты полученных экспериментальных данных. Отмечается, что в процессе эксплуатации нормативные параметры технической эксплуатации энергетических установок меняются под воздействием различных факторов.

Для составления алгоритма безразборной диагностики по методу Байеса необходимо было узнать закономерности изменения компрессии, цикловой подачи и расхода воздуха в зависимости от наработки трактора. Для этого была проведена оценка технического состояния выборки из 15 тракторов работающих в различных хозяйствах. Была определена зависимость компрессии в цилиндрах от наработки (рисунок 11).

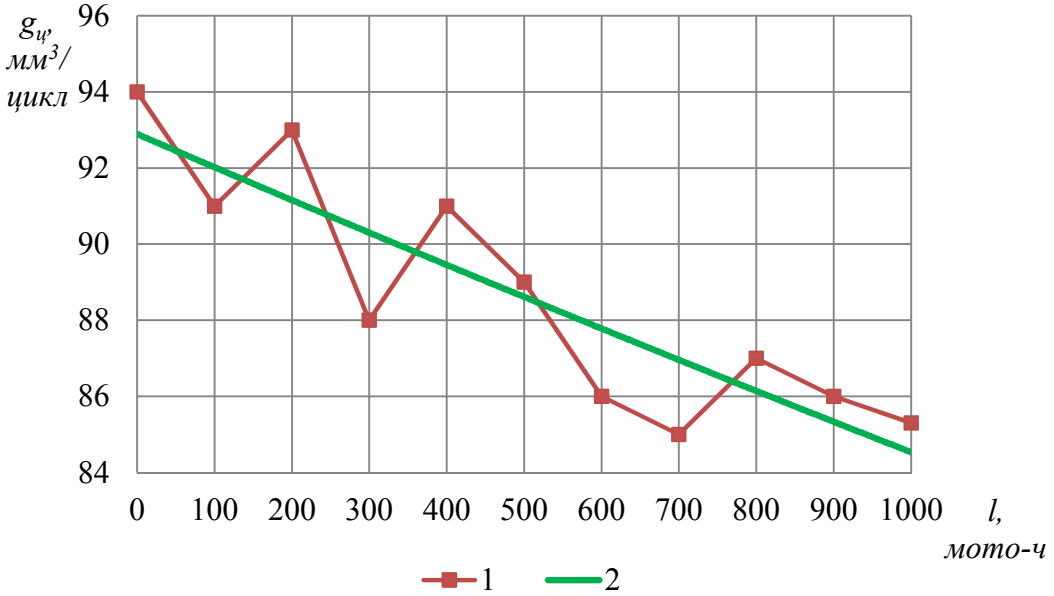



1 – экспериментальные данные, 2 – теоретические данные.

Рисунок 11 – Зависимость компрессии *k* от наработки *l* двигателя Д-243

Полученные данные показывают снижение компрессии k от 2,8 МПа до 1,6 МПа при изменении наработки l от 500 до 8000 мото-ч. Аппроксимация полученных данных теоретической зависимостью дает удовлетворительную сходимость в пределах 5,7-6,3%.

На рисунке 12 показана зависимость изменения цикловой подачи $g_ц$ мм$^3$/цикл при изменении наработки от 0 до 1000 мото-ч. При этом необходимо также отметить небольшие изменения давления впрыска и качества распыла.

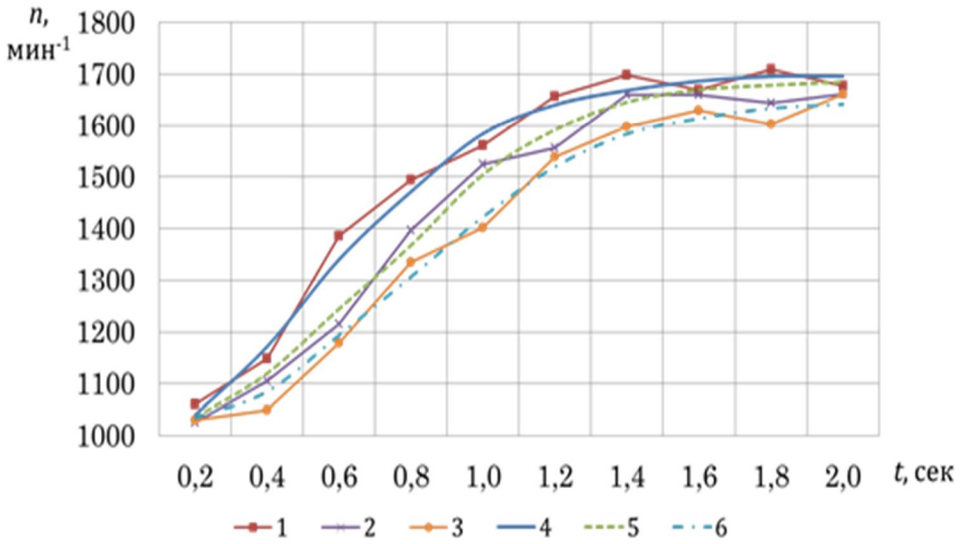



1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимированные данные

Рисунок 12 - Зависимость цикловой подачи топлива $g_ц$ от наработки $l$ двигателя Д-243

Для определения диагностических параметров были проведены ситуационные испытания. Определены переходные функции при единичном изменении положения рычага управления топливом для различных смоделированных состояний.

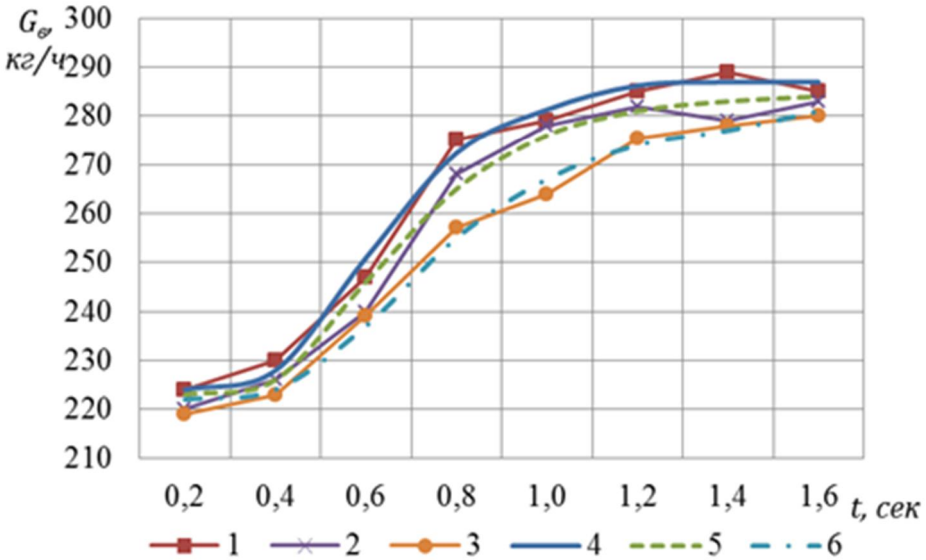
На рисунке 13 показаны экспериментальные и аппроксимированные значения изменения частоты вращения $n$ двигателя при различных значениях компрессии $k$.




Экспериментальные и аппроксимирующие данные: 1,4 - при компрессии 2,7 МПа, 2, 5 – при компрессии 2,4 МПа, 3, 6 –при компрессии 2,1 МПа

Рисунок 13 - Изменение частоты вращения $n$ в зависимости от компрессии $k$ двигателя Д-243

Также была определена переходная функция расхода воздуха$G_в$ при различных состояниях воздушного фильтра, который приведен на рисунке 14.



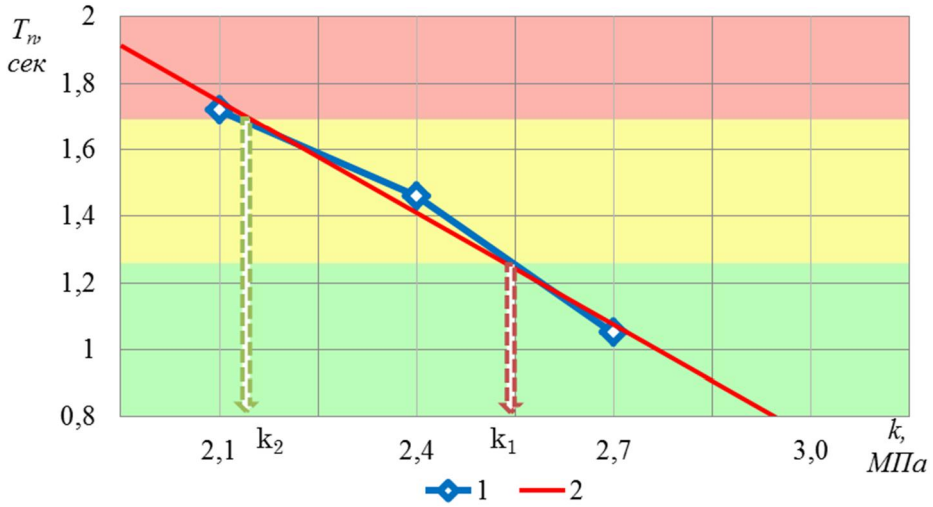

Экспериментальные и аппроксимирующие данные: 1,4 - при разряжении 2кПа, 2, 5 – при разряжении 4кПа, 3, 6 –при разряжении 7кПа

Рисунок 14 - Изменение расхода воздуха$G_в$ в зависимости от разряжения во впускном коллекторе $P_в$ двигателя Д-243

Согласно приведенному методу были определены переходные функции $n$, $G_в$, $g_ц$ для различных смоделированных состояний.

После проведения ситуационных испытаний были определены диапазоны диагностических параметров. На рисунке 14 показано изменение диагностического параметра $T_n$ в зависимости от компрессии в цилиндре. Так величина $T_n$ изменяется от 1,05 сек при k=2,7 МПа до 1,7 при k=2,1 МПа.

Также на графике указаны зоны состояний двигателя, которые соответствуют значения диагностического параметра.

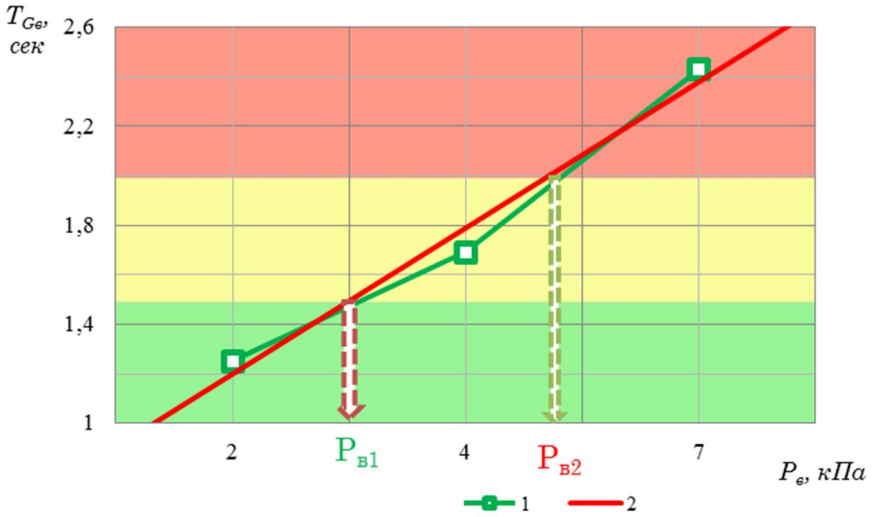



1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимированные данные

Рисунок 14 – Диапазон изменения диагностического параметра $T_n$ в зависимости от компрессии $k$

Влияние степени разреженности во впускном коллекторе (степени загрязненности воздушного фильтра) на диагностический параметр $T_{Gв}$ приведен на рисунке 15. При этом данный показатель меняется с $T_{Gв}$=1,2 сек до $T_{Gв}$=2,4 сек при изменении разряжения от $P_в$=2кПа (0%) до $P_в$=7кПа (100%). Полученная зависимость так

же имеет линейный характер $T_{Gв}=a \cdot P_в+b$ с коэффициентами $a$=0,649, $b$=0,259 при этом расхождение данных не более 5,4%.




1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимированные данные.

Рисунок 15 – Диапазон изменения диагностического параметра $T_n$ в зависимости от степени разреженности во впускном коллекторе $P_в$

Таким же образом были определены диагностические параметры $T_n$, $T_{gц}$ и $T_{Gв}$ для различных состояний двигателя.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют установить приемлемый диапазон изменения диагностических параметров, а также определить пределы для хорошего, удовлетворительного и плохого состояний, которые показаны в таблице 2.

Таблица 2 - Диапазон изменения диагностических параметров

| **$T_{gц}$**, сек (цикловая подача топлива) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| хорошая (Х) | | | | | | удовлетворительная (У) | | | | | | плохая (П) | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5-1 | | | | | | 1-1,5 | | | | | | >1,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| **$T_n$**, сек (частота вращения) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х | | | У | | | П | | | Х | | | У | | | П | | | Х | | | У | | | П | | |
| 0,8-1,3 | | | 1,3-1,7 | | | >1,7 | | | 0,8-1,3 | | | 1,3-1,7 | | | >1,7 | | | 1,3-1,7 | | | 1,7-2,2 | | | >2,2 | | |
| **$T_{Gв}$**, сек (расход воздуха) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П | Х | У | П |
| 1-1,5 | 1,5-2 | >2 | 1-1,5 | 1,5-2 | >2 | 1-1,5 | 1,5-2 | >2 | 1-1,5 | 1,5-2 | >2 | 1-1,5 | 1,5-2 | >2 | 1-1,5 | 1,5-2 | >2 | 1-2 | 2-2,5 | >2,5 | 1-2 | 2-2,5 | >2,5 | 1-2 | 2-2,5 | >2,5 |

Необходимо отметить, что диапазон изменения диагностических параметров является основой предлагаемой методики безразборной диагностики двигателя и служит базисом при составлении диагностической матрицы и устанавливает правила при применении решений.

Далее была проведена оценка полученных результатов по критерии Фишера для нелинейной и линейной регрессии.

Таблица 3 – Оценка адекватности полученных результатов

| пределяемый параметр | Уровень параметра | Уравнение регрессии | Коэфф. регрессии | | F | F-табл. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **a** | **b** | | |
| n от t при | $P_в$=2 кПа | $n = a\,e^{bPв}$ | 7,0776 | 0,2361 | 17,81 | 5,32 |
| | $P_в$=4 кПа | | 7,0231 | 0,2519 | 27,83 | 5,32 |
| | $P_в$=7 кПа | | 6,9599 | 0,2764 | 50,95 | 5,32 |
| n от t при | $P_ф$=18,5 МПа | $n = a\,e^{bPф}$ | 7,079 | 0,2346 | 16,14 | 5,32 |
| | $P_ф$=16,5 МПа | | 7,0132 | 0,2589 | 27,61 | 5,32 |
| | $P_ф$=15,5 МПа | | 6.962 | 0,273 | 47,9 | 5,32 |
| n от t при | k=2,7 МПа. | $n = a\,e^{bk}$ | 7,0273 | 0,2523 | 25,28 | 5,32 |
| | k=2,4 МПа. | | 6,9536 | 0,2798 | 37,2 | 5,32 |
| | k=2,1 МПа. | | 6,9129 | 0,2888 | 59,72 | 5,32 |
| $G_в$ от t при | $P_в$=2 кПа | $G_в = a\,e^{bPв}$ | 5,3753 | 0,1972 | 24,68 | 5,99 |
| | $P_в$=4 кПа | | 5,3753 | 0,1986 | 30,09 | 5,99 |
| | $P_в$=7 кПа | | 5,3593 | 0,1953 | 73,66 | 5,99 |
| $G_в$ от t при | k=2,7 МПа. | $G_в = a\,e^{bk}$ | 5,3901 | 0,2028 | 23,68 | 5,99 |
| | k=2,4 МПа. | | 5,3764 | 0,2005 | 30,62 | 5,99 |
| | k=2,1 МПа. | | 5,3431 | 0,2024 | 54,91 | 5,99 |
| $g_ц$ от t при | $P_ф$=18,5 МПа | $g_ц = a\,e^{bPф}$ | 4,109 | 1,1075 | 20,8 | 7,71 |
| | $P_ф$=16,5 МПа | | 4,0709 | 1,2523 | 48,68 | 7,71 |
| | $P_ф$=15,5 МПа | | 4,1216 | 1,3126 | 44,67 | 7,71 |
| k от L | | $k = a\,e^{bL}$ | 3,3092 | -6,9E-5 | 86,75 | 5,99 |
| $g_ц$ от L | | $g_ц = a\,e^{bL}$ | 4,5259 | -8,6E-5 | 18,81 | 5,32 |

Как видно из таблицы, вычисленные значения критерии Фишера выше табличных, что говорит об адекватности полученных результатов.

Практическое применение разработанного метода позволило снизить трудоемкость диагностирования одного двигателя до 1,036 чел-ч. за счет исключения наиболее трудоемких диагностических операций, связанных с разборкой двигателя, а также проведением и интерпретацией соответствующих измерений.

Применение метода диагностирования в УСХиП Сармановского района Республики Татарстан с учетом годовой программы загрузки предприятий позволило добиться до 40% экономии труда.

**В пятом разделе «Оценка экономической эффективности результатов исследования»** проведен расчет экономической эффективности применения усовершенствованного метода и программы по сравнению с базовыми методами диагностики. В качестве базовых вариантов диагностики ДВС были выбраны: метод №1, которая включает комплекс методов диагностирования систем ДВС (диагностика по прорыву картерных газов, диагностика системы питания по давление впрыска и расходу топлива, определение степени засоренности воздушного фильтра) и метод №2, реализующая динамический метод с помощью набора технических средств (ИМД-ЦП, ИПД-3, ЦИКЛ-2, АДТ-1, КИ-13924) с комплектом

первичных преобразователей.

Эффективность метода заключается в уменьшении трудоемкости до 40%, что влечет за собой снижение отчислений на заработную плату по сравнению с методом №1 на 27,58%, по сравнению с методом №2 на 42,53% и увеличение эксплуатационной производительности до 40%.

Годовой эффект по сравнению с методом №1 составляет 248,880 тыс.руб, по сравнению с методом №2 - 500,671 тыс.руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих методов технического диагностирования показывает, что идентификация двигателя внутреннего сгорания как динамического объекта позволяет применить переходные функции его систем в качестве диагностических параметров, что является перспективным и актуальным направлением развития технической диагностики двигателей МТА. На основании проведенного анализа разработан метод безразборной диагностики двигателя на основе переходных функций его систем. Обосновано применение в качестве диагностических параметров интенсивности изменения частоты вращения коленчатого вала, подачи топлива и расхода воздуха при скачкообразном изменении положения управляющего органа, которые выражаются кусочно-непрерывными функциями в зависимости от технического состояния двигателя. Исследования показали, что значение предлагаемых диагностических параметров в зависимости от состояния двигателя и характера неисправности находятся в диапазоне $T_n$=0,8-2,3 сек, $T_{Gв}$=1-2,5 сек, $T_{gц}$=0,5-1,5 сек.

2. Для проведения исследования рабочих процессов ДВС в динамических режимах разработан стенд, с автоматизированной системой сбора и обработки экспериментальных данных, который позволяет смоделировать основные неисправности двигателя. На разработанный стенд был получен патент на полезную модель № 151482 РФ, МПК G01M 15/05 от 10.04.2015. Применением разработанного стенда установлены выраженные в табличной форме зависимости взаимного влияния технического состояния систем ДВС на значения предлагаемых диагностических параметров.

3. Разработан алгоритм диагностирования технического состояния ЦПГ, системы питания и системы воздухоподачи по разработанному методу. Данный алгоритм был реализован в разработанном программном обеспечении для диагностики двигателя (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016614082 от 13.04.2016). Установлено, что применение разработанного программного обеспечения позволяет снизить трудоемкости диагностирования до 1,036 чел-ч.

4. Экономический эффект от внедрения разработанного метода диагностирования двигателя достигается за счет сокращения трудоемкости процесса. Предложенный метод повышает производительность по сравнению с существующими методами на 29,27% и 40,28%, а также снижается трудоемкость на 29,25% и 39,88%. Расчетный годовой экономический эффект по сравнению с методом №1 составляет 248,880 тыс.руб, по сравнению с методом №2 - 500,671 тыс.руб. (в ценах 2016г.).

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** На основании полученного метода и разработанного стенда предполагается продолжить исследования по определению и уточнению диагностических параметров для современных двигателей с различными видами неисправностей, а также расширить поле применения разработанного метода для оценки остаточного ресурса двигателей современных МТА.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В журналах, рекомендуемых ВАК:**

1. Халиуллин Ф.Х. Обоснование выбора диагностических параметров энергетических установок мобильных машин / Халиуллин Ф.Х., **Ахметзянов И.Р.** // Вестник Казанского ГАУ №2 (32) 2014. – С.72-74.

2. Халиуллин Ф.Х., Особенности составления диагностической матрицы Байеса при безразборной диагностики двигателей внутреннего сгорания / Халиуллин Ф.Х., **Ахметзянов И.Р.** // Международный научно-исследовательский журнал № 5 (47) Ч.3 –Екатеринбург, 2016. – С. 205-209.

3. Халиуллин Ф.Х. Оценка предельной наработки двигателя по величине компрессии в цилиндре / Халиуллин Ф.Х., **Ахметзянов И.Р.** // Вестник Казанского ГАУ №1 (39) 2016. – С.96-98.

**Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и патент:**

4. Халиуллин Ф.Х., **Ахметзянов И.Р.**, Шириязданов Р.Р., Халиуллин А.Ф. Патент на полезную модель. Стенд для исследования рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания в динамических режимах с возможностью имитации некоторых неисправностей двигателя // Патент № 151482 РФ, МПК G01M 15/05, заявл.30.05.2014, опубл. 10.04.2015, Бюл.№ 10.

5. Халиуллин Ф.Х., **Ахметзянов И.Р.**, Шириязданов Р.Р., Халиуллин А.Ф. Патент на полезную модель. Прибор для диагностики двигателя внутреннего сгорания по переходным характеристикам. // Пат. № 160474 Российская Федерация МПК RU G01M 15/05; заявитель и патентообладатель Казанский государственный аграрный университет №2015103562/06, заявл. 03.02.2015; опубл. 20.03.2016; Бюл. № 8.

6.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016614082 от 13.04.2016.

**В материалах конференций и других изданиях:**

7. **Ахметзянов И.Р.** Анализ существующих методов безразборной диагностики ДВС и пути их улучшения. // Актуальные проблемы истории и философии наук на современном этапе развития АПК, биотехнологий и техники, биоэкономики и права, экологии и лесного хозяйства, Казань, 2013. 40-44 стр.

8. **Ахметзянов И.Р.** Измерительная аппаратура для исследования двигателя внутреннего сгорания // Новая наука: современное состояние и пути развития / Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции. в 4 ч. Ч.3 - Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. – С. 4-8.

9. **Ахметзянов И.Р.** Методика экспериментальных исследований // Современная наука: теоретический и практический взгляд / Сборник статей международной научно-практической конференции. В 4 ч. Ч.3 – Тюмень: НИЦ АЭТЕРНА, 2016. – С. 9-13.

10. **Ахметзянов И.Р.**, Халиуллин Ф.Х. Имитация износа цилиндро-поршневой группы ДВС. // Научное сопровождение агропромышленного комплекса: теория,

практика, перспективы / Материалы международной научно-практической конференции посвященной 65-летию образования Института механизации и технического сервиса. -Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2015 –477с. С. 52-56.

11. **Ахметзянов И.Р.**, Халиуллин Ф.Х. Экспериментальная установка для диагностирования технического состояния ДВС с использованием переходных режимов их работы. // Инженерная наука – аграрному производству/Материалы международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса. – Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2014 – 10-12 стр.

12. **Ahmetzyanov, I.R.** Internal combustion engine faults imitation methods for developing a method of engine diagnostics / Ahmetzyanov I.R., Medvedev V.M., Khaliullin F.K., Shiriyazdanov R.R. / Science and Education, Germany, june 27-28, 2014.

13. Medvedev, V.M. Operating conditions of the D-240 Engine based dual fuel gas-diesel engine of the agricultural tractjr/ Medvedev V.M., **Ahmetzyanov I.R.**, Shiriyazdanov R.R., Khaliullin F.K / «European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences» Proceedings of the 2nd International scientific conference (May 12, 2014). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna.2014.

14. Khaliullin, F.K., Approaches for numerical simulation of mobile machines in actual operating conditions / Khaliullin F.K., Shiriyazdanov R.R., **Ahmetzyanov I.R.**, Medvedev V.M. / International Conference «Global Science and Innovation» / - USA. Chicago, may 21-22, 2014.

15. Shiriyazdanov, R.R. Some aspects of the practical application of agricultural mobile machinery`s powertrail transient operations research results / Shiriyazdanov R.R., Khaliullin F.K., Medvedev V.M., **Ahmetzyanov I.R.** / 10th International scientific conference «European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches», Stuttgart, Germany, 5th june 2014.

Подписано в печать 06.04.2017 г. Формат бумаги $60 \times 84\ \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,00
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать трафаретная. Заказ 310. Тираж 100 экз.
Типография ФГБОУ ВО Казанский ГАУ, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 65